

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ГОУ ВПО «СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»

ГЕО-СИБИРЬ-2006

Т. 4

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ, ТЕПЛОФИЗИКА, МИКРОТЕХНИКА

Сборник материалов
международного научного конгресса

Новосибирск
СГГА
2006

УДК 681.2:006:
С 26

Ответственные за выпуск:
координаторы направления
«Специализированное приборостроение, метрология,
теплофизика, микротехника»
Кандидат технических наук, профессор, директор ИОиОТ СГГА
О.К. Ушаков
Доктор технических наук, директор КТИ НП,
заслуженный деятель науки РФ
Ю.В. Чугуй

С 26 ГЕО-Сибирь-2006. Т. 4. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника : сб. материалов междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2006», 24 – 28 апреля 2006 г., Новосибирск. – Новосибирск : СГГА, 2006. – 330 с.

ISBN 5-87693-200-0

В сборнике опубликованы материалы международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2006» направления «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника».

Печатается по решению Редакционно-издательского совета СГГА

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 681.2:006:

ISBN 5-87693-200-0

© ГОУ ВПО «Сибирская государственная
геодезическая академия», 2006

NOVEL OPTICAL MEASURING SYSTEMS AND LASER TECHNOLOGIES FOR SCIENCE AND INDUSTRY

The novel results of the R & D activity of TDI SIE SB RAS in the field of the optical measuring technologies, as well as laser technologies for solving safety problems are presented. To measure the rocks stress and to prevent the mountain impact, as well as for basic investigations, a set of optical-electronic deformers and systems was developed and produced. For permanent noncontact bearing position inspection of oil-drilling platforms on Sakhalin coast (Russia) we have developed optical-electronic method and system SAKHALIN with cumulative traveled distance (3 km) measurement error less than 0.03 %. Multifunctional laser technological system LSP-2000 equipped by two Nd-YAG lasers was developed for cutting, welding and surface micro profiling with ablation process (working range of $3 \times 2 \times 0.6 \text{ m}^3$, positioning error less than 10 mkm). Safety of Russian nuclear reactors takes 100 % noncontact 3D dimensional inspection of all parts of fuel assemblies, including grid spacers. Results of development and testing the specialized high productive laser measuring machine, based on structured illumination, for 3D inspection of grid spacers with micron resolution are presented. Ensuring the safety of running trains is the actual task for railways. Using high-speed laser noncontact method on the base of triangulation position sensors, TDI SIE has developed and produced automatic laser diagnostic system COMPLEX for inspection of geometric parameters of wheel pairs (train speed up to 60 km/hr.), which are used successfully on Russian railroads. Experimental results on measuring and laser technological systems testing are presented.

Keywords: optical measuring technology, laser technology, safety, mining, oil and railway industries, nuclear reactor, grid spacer, structured illumination method, wheel pairs, triangulation method

1. INTRODUCTION

Modern industry and science take novel optical measuring systems and laser technologies for solving actual tasks, including safety problems for mining, oil, atomic and railroad industries [1-5]. The novel TDI SIE's results in these trends are presented.

Effective investigation of non-linear processes in block structures of geo medium requires comprehensive measurement of wave, deformation and power parameters using the multi-channel measuring systems [2]. These systems ensure the data collection and processing from sensors (accelerometers, dynamometers, resistive-strain sensors, and displacement sensors) in real time. The development of universal technical means (with enhanced metrological characteristics) for automatic measurement of these parameters in nature and laboratory conditions under the

physical experiments is very actual. For measurement the rocks stress and prevention the mountain impact we have developed a set of optical-electronic deformers and systems for modeling and investigation of nonlinear deformation wave processes.

Oil-drilling platforms on Sakhalin coast (Russia) have seismic protection systems using massive platform (28 000 tons) and the four friction pendulum bearings. They have limited cumulative traveled distance (about 3 km). As soon as this distance exceeds that value, the bearings should be replaced. We have developed optical-electronic system SAKHALIN for permanent non-contact bearing position inspection and traveled distance measurement (error no less than 0.03%) under operating extreme temperature range from -40°C up to $+40^{\circ}\text{C}$. Functional possibilities and experimental results for SAKHALIN are presented and discussed.

Laser material processing (cutting, welding) of 3D large-size objects and treatment (ablation) of their surfaces take multifunctional universal laser technological system. Such system (LSP-2000) was developed at TDI SIE. It has 5-coordinate (X-Y-Z- ϕ - θ) table with Computer Numerical Control system, table displacement range of $3 \times 2 \times 0,6\text{ m}^3$ (position error less than 10 mkm) and changeable Nd-YAG lasers for material processing and treatment. Below the LSP-2000 technical peculiarities and performances are given.

Safety of nuclear reactors VVER-1000 and VVER-440 [4] and ensuring their high exploitation reliability takes 100 % noncontact inspection of all parts of fuel assemblies, including grid spacers (more than 300 cells with diameter 9 mm and in height of 20 mm). We have developed and produced the specialized laser measuring machine, based on structured illumination, which enable 3D inspection of grid spacers with micron resolution and high productivity (some hundred times faster than CMM).

Ensuring the safety of running trains is the actual task of railways exploitation and transport of passengers and cargoes all over the world. We have developed high-speed laser noncontact method for geometrical parameters inspection of moving 3D objects on the base of triangulation position sensors using fast-response PSD linear arrays and produced automatic laser diagnostic system COMPLEX for noncontact inspection of geometric parameters of wheel pairs, including width and thickness of wheel rim; distance between inner sides of wheels; thickness of wheel flange; uniform rolling; wheel diameter; axle sliding-off [5]. Measurements are fulfilled at freight cars speed up to 60 km/hr (the range of working temperatures is from -50° up to $+50^{\circ}\text{C}$). Principle of self-scanning for running freight cars and testing results for system COMPLEX are given.

2. ROCKS NONLINEAR GEOMECHANICAL STUDY BY MEASURING TECHNIQUES

In order to reveal the mechanisms of rock bursts in mines, it is necessary to study mining-induced movements of structural inhomogeneities of rocks, rock stratum displacement, and deformations. It is required to measure displacements of geoblocks and strains at different points of a massif depending on location of these points relative to underground working contour in geomechanics with both natural and

induced jointing, and with allowance for structural features (disintegration zones, tectonic faults, pillars or filling masses failed by rock pressure or blasting, etc.). Institute of Mining and TDI SIE SB RAS have developed a prototype of a borehole multichannel optical-electronic longitudinal deformometer (from here on meter) [6].

The technical solution of measuring displacements of geoblocks in a rock mass is based on a “slide gauge idea”. The idea is realized using a measuring bar, which is fastened inside the massif in a borehole, and a position sensor with his sensing element attached to the rock and capable of moving freely along the bar. The bar consists of sections connected by pipe couplings. The sensor is set on a section of the bar. By doing so, we ensure the modular gathering of the instrument.

Measurements in rock masses are frequently conducted using horizontal boreholes drilled in mine working walls towards the section to be inspected. In this case, the borehole (Fig. 1) usually intersects rock blocks $C_1 \dots, C_i$ formed by disintegration zones [3] and gets deeper in an intact massif part C_n . Prior to installation, we need to choose a reference point O in C_n , check points in geoblocks $C_1, C_2, \dots, C_i$ between the zones of disintegration, and number of sensors.

The bar sections and sensors together is a pickup probe. Measuring bar 2 is fastened at the reference point O via support 1 (Fig. 1). According to the number of measured blocks, sensors 3 are installed on the bar with the sensing elements fastened to the rock at the points $C_1, C_2, \dots, C_n$. Having such arrangement, displacement of the i -th block under inspection will cause the same displacement of the sensing element of the corresponding sensor along the bar, which is recorded by an electron device.

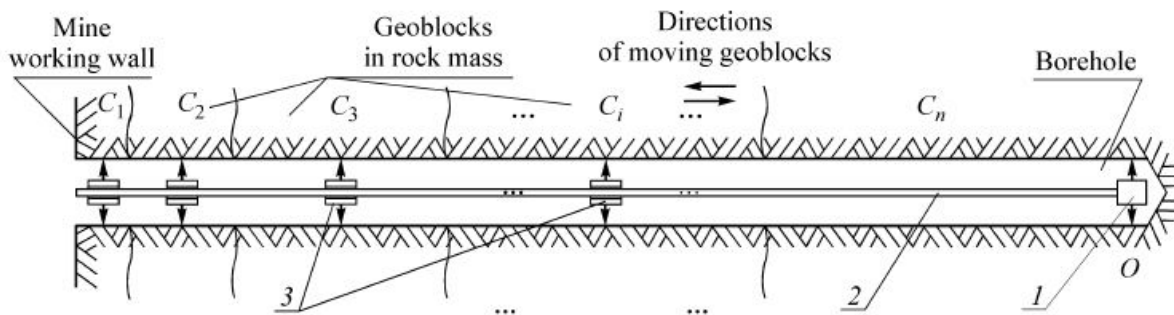


Fig. 1. Scheme of measuring bar and sensors in borehole.

The position sensor is based on an electron photosensitive recording device such as the position-sensing S3270-type photodetector PSD produced by Hamamatsu Co with a resistive layer and electrodes. The sensor equipped by LED has the following characteristics: the measurement range is ± 17.5 mm; the measurement error is ± 0.02 mm.

The sensor has the following design (Fig. 2): insertion 1 built-in into the bar section and movable bushing 2 mounted on the insertion so that to move longitudinally along the guide [6]. The current position of the bushing relative to the insertion is determined by the position of the spotlight on the photodetector. Such design allows minimization of the sensor size, simplifies fastening device, and decreases the mass and overall dimensions of the instrument. Using these sensors

(Fig. 3) we have developed the measuring system providing automatic measurements of longitude shifts and deformations in rocks (actual tests in mine working).

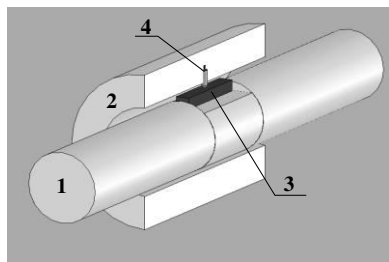


Fig. 2. Scheme of position sensor:
1 - insertion, 2 - movable bushing, 3 - photodetector, 4 - LED.



Fig. 3. Position sensor.

Modern phenomenological theory of pendulumtype waves, based on studies of geomechanical wave processes in structurally inhomogeneous rock masses, takes carrying out the detailed laboratory testing of models of block geomechanics under uniaxial and biaxial loading. In contrast to in situ experiments, stand trial conditions can be varied widely, and it is possible to analyze effects of stress state, strain rate as well as properties and behavior of rocks under complex loading modes. The obtained measurement data need being processed both in the course of experiment and after its completion. For these purposes we have developed a prototype of a micrometer position display sensor with a microprocessor data collection system.

When measuring equipment for the geomechanical stand, the main attention has been focused on an electronic micrometer display sensor and its design with the use of a photosensitive charge-coupled device (CCD) with a LED. As a recorder, we employed a commercial position photoreceiver ILX511 produced by SONY. The photoreceiver contains 2048 photosensitive elements spaced at $d = 14$ mkm and forming a bar of photoreceivers 28 mm long. A photosensitive element contains a photodiode, pre-gain circuit and plugboard chart, and is intended to convert optical radiation to an electric signal. The photoreceiver ILX511 differs from the analogous functional area facilities by low electrical noise and small-scattered photosensitivity of separate elements, which ensures high metrological characteristics of measuring equipment based on the device discussed.

The sensor consists of two parts (Fig. 4): a casing serving a basis guide and a mobile stem capable of displacing along the guide. The LED is installed on the stem, and the photoreceiver, i.e. CCD-bar is arranged inside the casing along the guide. When the stem displaces, its current position relative to the casing is determined by the coordinate of the LED-generated spotlight on the photoreceiver. The micrometer sensor has been tested to determine precision of its characteristics. It is shown that the error is no more than ± 3 mkm, and with due regard for the gauging characteristic based on the average curves of repeatability, the sensor error can be reduced to 1 mkm.

The information measuring system on the base of electronic micrometers as a laboratory equipment (providing the investigations on the processes models that take place on structured rocks) has been developed.

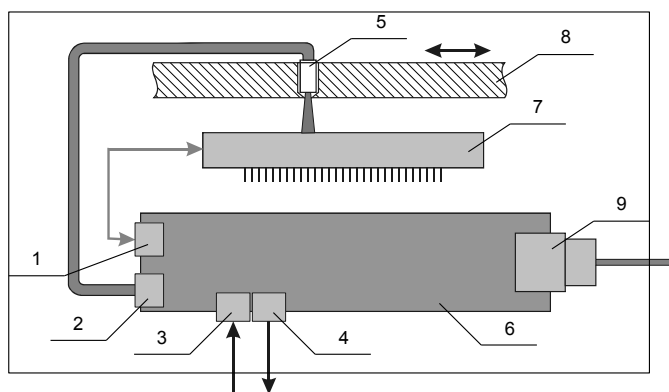


Fig. 4. Functional arrangement of sensor:

1 - mobile stem; 2 - light source; 3 - CCD-bar; 4 - CCD-bar control; light source control; 6 - synchronization input; 7 - synchronization output; 8 - KLM-1 microcontroller; 9 - USB output.

The system ensures the data collection within the process of model objects disintegration as well as their transmission on USB channels into personal computer. This system has 8 functionally finished position sensors, unified into the common system using the switchboard. The quantity of sensors can be increased when needed. It is provided by system architecture.

3. Friction pendulum bearing displacement measuring technology for oil platform

As it is known, the mining of oil and gas offshore is carried out using the drilling platforms, which are extremely massive and inert (Fig. 5). In order to avoid excessive stresses on platform it consists of few large parts (normally base and legs). Four friction pendulum bearings are used for mechanical link between the base and legs. The bearings functionality is to provide the protection of the platform from all possible mechanical loadings on the legs that might affect the base with the drill and other sensitive equipment (seismic movements, ice shifts, etc.).

Normally in the majority of regions around the world the bearings lifetime is at least 30 years of continuous use. The corresponding lifetime for the Sakhalin shelf, according to the estimations of scientists, can be from one to ten years, which is much shorter than the normal service life period of the drilling platform. The most important parameter, which allows estimation the bearing resource, is measuring the cumulative distance traveled by the bearing from the beginning of its service (no more than 3 km). As soon as cumulative travel exceeds that distance the bearings should be replaced.

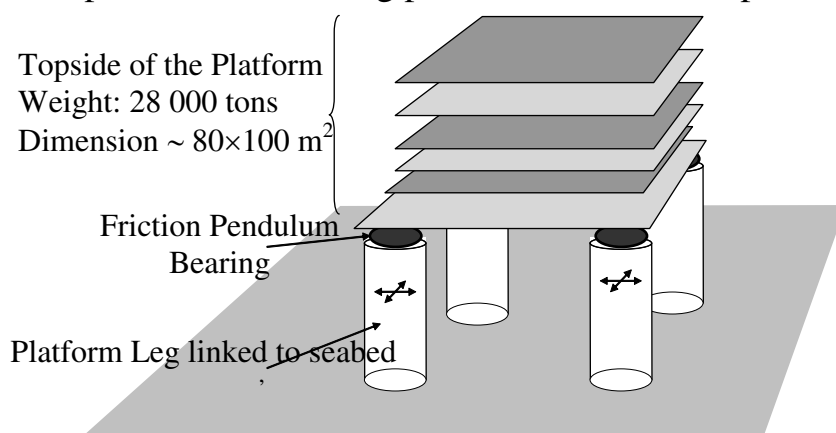


Fig. 5. An oil-drilling platform scheme.

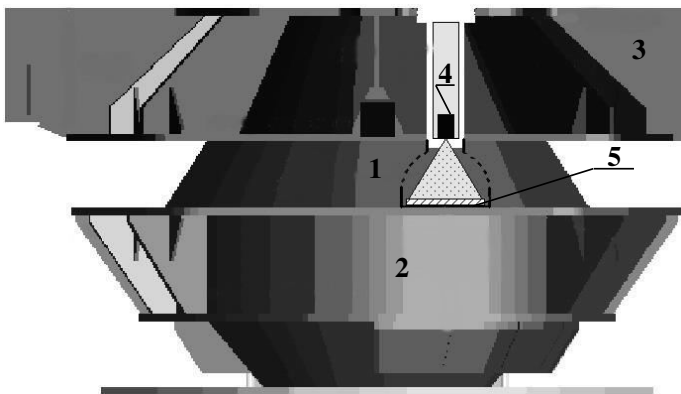


Fig. 6. Measurement system location:

1 - slider bearing, 2 - support, 3 - platform, 4 – image unit, 5 - target.

part – a field measurement sensor – is installed on another part of construction that moves relative to the first one. This sensor continuously captures and processes the image of optical target. On the output, after processing the relative displacement these two parts of construction is obtained with high degree of accuracy.

The system SAKHALIN (Fig. 7) is certified as a measuring tool as well as for the use in explosive environments (for gas and oil industry). It is designed for continuous 24-hour operation during 30 years. Its main technical characteristics are the following: measurement range on the X and Y axes is ± 350 mm; absolute error in the measurement range is ± 0.6 mm; measurement rate is 30 meas./s.; maximum movement speed of the objects under measurement without accuracy loss is from 0 up to 4 m/s.; working temperature for control panel is from 0 up to $+ 40^{\circ}\text{C}$. This system was put through tests accepted by customer.

This system SAKHALIN can also be used for the 24-hour monitoring of shifts and deformations of different parts of another mechanical and engineering constructions. It has capability to provide alerts in emergency cases, i.e. excessive construction strains, displacements, earthquake, tsunami events, etc.

For measurements of bearings movements the automatic optical-electronic system SAKHALIN was developed. Its main aim is continuous noncontact measurement of the bearing location and calculation of the total distance traveled by the bearing for any defined time period.

Measuring principle of the system (Fig. 6) is based on optical image processing. The passive part of the system (optical target) is fixed on one part of construction, while active



Fig. 7. System SAKHALIN: optical measuring and electronic units.

4. LASER TECHNOLOGICAL SYSTEM LSP-2000

We have developed the multifunctional laser technological system LSP-2000 for processing and treatment of 3D articles: cutting, welding and surface micro profiling with ablation process. The LSP-2000 system is equipped by two Nd-YAG lasers. The robotics for the laser head positioning and CNC control interface are provided for processing and treatment of parts with arbitrary topology. The system spatial working range is about $3 \times 3 \times 0.6 \text{ m}^3$. Inside this range all types of laser processing operations can be performed with contour displacement accuracy about $\pm 10 \text{ mkm}$ for any point of trajectory. The general view of the system is presented in the Fig. 8. The LSP-2000 was developed as the universal laser processing system with unique combination of the certain parameters / technical characteristics. These characteristics are listed below:

- *Multifunctionality.* It means the ability to perform a range of technological and processing operations.

Each operation using custom laser processing heads, requires custom positioning accuracy, different positioning speed and movement patterns depending on the operation. This requirement was fulfilled using two types of technological lasers. The first laser MLTI-500 for cutting and welding (produced by “Tulamashzavod”) has the following parameters: the pulses repetition frequency is 300 Hz, average power output is 500 Wt, laser wavelength is 1.064 mkm. Its purpose is laser cutting and laser welding

of any metals with thickness of less then 6 mm. The second laser for ablation of thin metal films on dielectric surfaces has pulses repetition frequency of 300 Hz, high pulses power ($> 10^7 \text{ Wt}$), laser wavelength is 0.532 mkm, and average power output is 10 Wt.

- *Large processing working field* ($3 \times 3 \times 0.6 \text{ m}^3$). The absolute positioning accuracy in the whole working field is better than 20 mkm. The special XYZ movement stage was developed in order to move the tool (laser processing heads, etc) to anywhere in the working field with required accuracy. The stages movements are controlled by the special CNC system. The positioning of each stage is feedback-controlled and based on the linear incremental optical sensors, which provide the required stage position information (position error 1 mkm).

- *The ability to process the articles with the arbitrary surface shapes.* For that purpose the processing head can make the movements with 5 degrees of freedom.

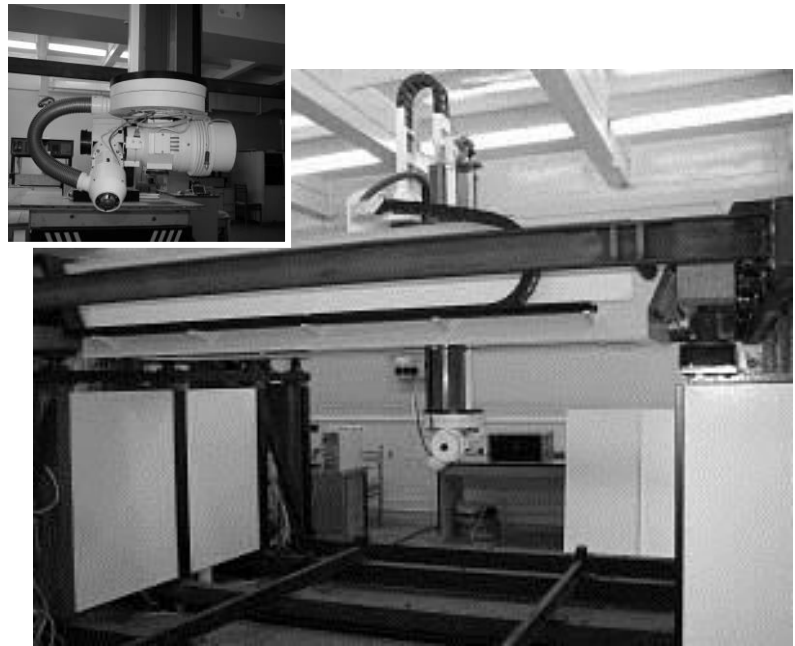


Fig. 8. Laser technological system LSP-2000 and enlarged fragment of its working processing head.

The processing head can be moved by XYZ carriage for bringing the head to the desired processing region. Also, two more possible movements are added in polar coordinates system. The head could rotate azimuthally and vertically (C and B coordinates) in the processing region thus it allows to orient the head perpendicularly to any of surface element of the arbitrary 3D object, which is under processing.

– *Long term parameters stability.* One of the main tasks of the current system is micro profiling of the large-size articles. The expected time for the single article processing is approximately 30 hours. The system is designed for continuous 24 hour work. At the same time it is required to keep high reproducibility and high processing accuracy for the all service life of the current system without any additional tuning. The long term stability of this device was provided using the linear motors and sliding parts having the air gap. The air gap in the moving parts makes the system mechanics frictionless and it is provided with the compressed air or pneumatic bearing principle.

The LSP-2000 system has the following technical performances:

Coordinate table travel range	$3 \times 3 \times 0.6 \text{ m}^3$
Maximum size of the processing parts	$3 \times 3 \times 0.6 \text{ m}^3$
Geometrical shapes of the processing parts	arbitrary
Uncertainty of system positioning in start-stop regime	$\leq 2 \text{ mkm}$
Uncertainty of system positioning along arbitrary movement loop	$\leq 10 \text{ mkm}$
Maximum head movement speed	10 m/min
The material for ablation	Al, NI-Cr alloy
Optical head weight	$\leq 6 \text{ kg}$
The material for laser cutting and welding	Ti, stainless steel
The maximum cutting thickness (for Ti)	6 mm

At the present time LSP-2000 is under industrial operation.

5. 3D grid spacers inspection technology

As known, a grid spacer for reactor VVER-1000 is multicell piece like honeycombed cellular structure (Fig. 9). Each cell of the grid spacer represents a hollow thin-walled integral prism, 20 mm in height, with three cylindrical protrusions in the direction of the cell center. The measuring technology must allow to inspect the following parameters of grid spacers (Fig. 10): diameters $D_c^{(n)}$ of the circumferences inscribed in the cells; diameters $D_{ch}^{(m)}$ of the circumferences inscribed in the guide channels; the distances between neighboring cells $L^{(k)}$ (center-to-center distances), i.e. distances between the centers of the inscribed circumferences in the cells; the centers shifts of the inscribed circumferences for cells relative to grid spacer design drawing $S^{(q)}$ (the position shifts); overall dimensions $B^{(p)}$ “for spanner”.

Since the use of existing universal contact coordinate measuring machines (CMM) for 3D measurements of grid spacer geometry is associated with high time expenditures (up to 4 hours), we have created the specialized noncontact high productive laser measuring machine (LMM) [4].

For solving this task we have developed the modified method, which is based on a multipoint structured illumination. It ensures fast, noncontact, automated 3D-measurements of many objects. The multipoint structured illumination is light

distribution as a 2D array matrix of laser beams (Fig. 11), which may be generated by kinoform elements such as, e.g., two crossed Dammann arrays. In order to overcome

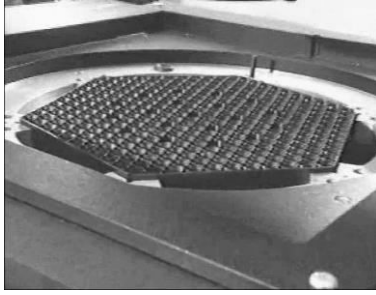


Fig. 9. A grid spacer for reactor VVER-1000.

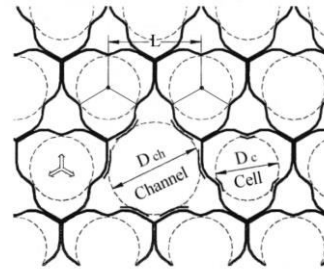


Fig. 10. Grid spacer geometric parameters under inspection.

uncertainty in determining the object position and shape, we have introduced singularity into the laser beam matrix structure as period malfunction.

In the case of 3D inspection of grid spacer cells, consisting of three protrusions, it takes three 2D laser beam matrixes (for simplicity only one light matrix is shown).

The laser measuring machine includes the three-channel laser-electronic measuring head for cell and channel holes perception, scanning X-Y table, electronics and software (Fig. 12). The scanning X-Y table with the working displacements $300 \times 300 \text{ mm}^2$ (OFL-2121 SM) ensures a controlled displacement of the grid spacer in the view of the photoreceiver unit in the direction of X and Y coordinates and a rotation of the grid spacer in the X-Y plane.

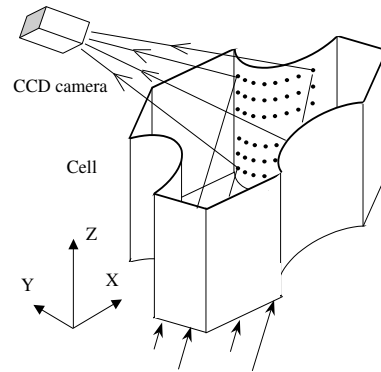


Fig. 11. The multipoint structured illumination 3D inspection method applied to a single segment of grid spacer cell.



Fig. 12. Laser measuring machine under operation.

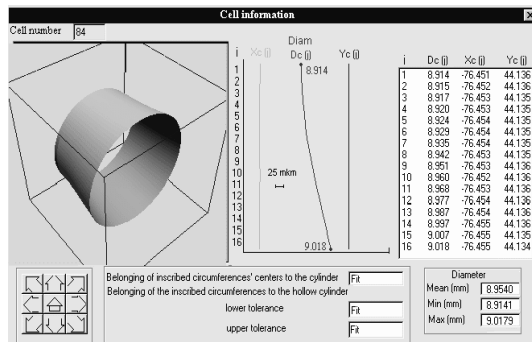


Fig. 13. Individual geometric information from LMM about every cell hole of the grid spacer: its 3D image, the diameters $D_c(j)$ and the centers coordinates $X_c(j)$, $Y_c(j)$.

Three methods of visualization and inspection of measurement results are envisaged. The first of them represents diameters in the form of a cartogram of the grid spacer with color distinction between cells and channel holes. According to the second visualization method, shifts of centers cell and channel holes ($S^{(q)}$) are represented as grid spacer cartograms with vectors going out of cell and channel centers. The module of vectors and their directions on appropriate scale illustrate the shifts, the color of vectors designate their belonging to the tolerance. And, finally, in the representation of the distances between neighboring cells (center-to-center distances) $L^{(k)}$, one can see on the screen the grid spacer “skeleton”: dashed lines connecting the drawn centers of cells and channel holes designate normal situations (within the tolerance), while solid lines designate distances between cells going beyond the tolerance gap.

In all the representation methods, one can inspect the individual sizes and a 3D configuration of any cell or channel hole. The result of the measurement of one cell is shown in Fig. 13. Here, diameters $D_c(j)$ and coordinates $X_c(j)$, $Y_c(j)$ of the inscribed circumferences centers in 16 cross-sections ($1 \leq j \leq 16$), as well as 2D graphs and 3D configuration of the cell hole are presented.

The laser measuring machine for 3D inspection of grid spacers has gone through a complete cycle of tests at the Novosibirsk plant JSC NCCP. The time of measurement of the indicated grid spacer parameters does not exceed 12 min, which is more than 300 times faster than existing universal contact coordinate measuring machines. At present LMM is under operation at the Novosibirsk plant JSC NCCP.

6. LASER WHEEL PAIRS DIAGNOSTIC INSPECTION FOR RUNNING TRAINS

For regular dimension inspection of wheels we have developed high-speed laser noncontact method and measuring technology for geometrical parameters inspection of moving 3D objects on the base of triangulation position sensors using fast-response position sensor detector PSD (50 000 meas/s) [5]. This method is based on the principle of wheel self-scanning

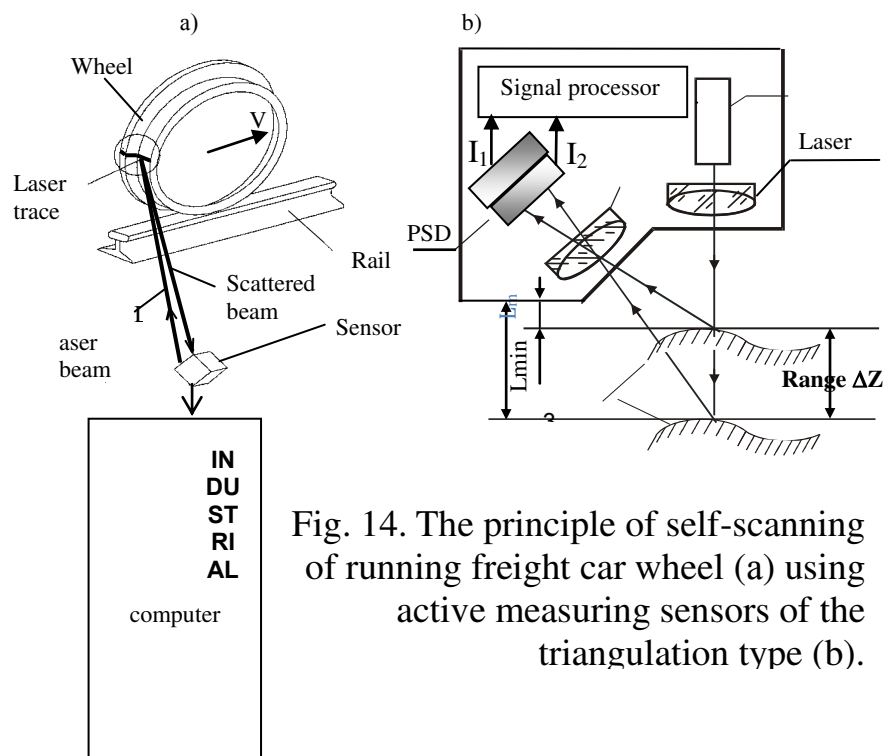


Fig. 14. The principle of self-scanning of running freight car wheel (a) using active measuring sensors of the triangulation type (b).

(Fig. 14a) by using active measuring sensors of the triangulation type. In this case, a beam produced by a laser diode is focused on the surface of the moving object under

inspection. The scattered beam is gathered by the aperture of a receiving objective. The objective forms an image of the illuminated surface zone in the PSD plane (Fig. 14b).

Using this method TDI SIE has produced automatic laser diagnostic system COMPLEX for noncontact inspection of geometric parameters of wheel pairs (Fig. 15), including: width (A) and thickness (B) of wheel rim; distance between inner sides of wheels (E); thickness of wheel flange (C); uniform rolling (F); wheel diameter (D); difference of diameters of wheels in a wheel pair $D=D_1-D_2$. Measuring error is about 0,5 mm. Measurements are fulfilled at freight cars speed up to 60 km/hr. The range of working temperatures is from -50° up to $+50^{\circ}$ C.

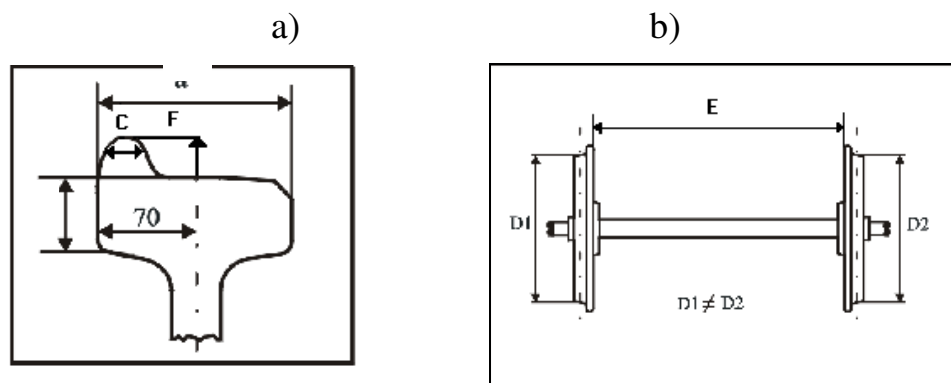


Fig. 15. Wheel parameters under inspection.

Figure 16 shows an example of the wheel reconstructed profile (cross-section). The required geometrical parameters are calculated from the reconstructed profile, in so doing, the algorithm of calculating the parameters follows the method of their measurement by means of a standard contact meter.

External view of this system COMPLEX is presented in Fig. 17. The developed diagnostic system COMPLEX corresponds to the best world prototypes. At the present time, COMPLEX more than two years is in operation at West-Siberian Railway. Today 20 systems COMPLEX are in operation on 6 Russian regional Railways (from Moscow to Far East). There were inspected more than 23 million wheel pairs for the period of system COMPLEX exploitation. 300000 alarming reports were received, more than 17000 carriages were rejected. The application of these systems allowed to improve the safety of railway industry in Russia.

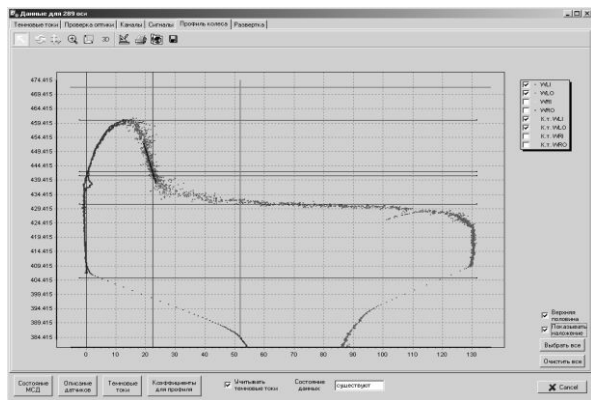


Fig. 16. A wheel reconstruction profile (cross-section).

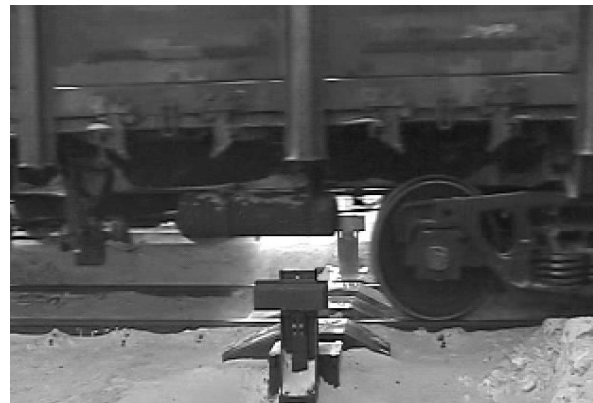


Fig. 17. System COMPLEX under operation in winter (West-Siberian railway).

CONCLUSION

Solving many actual safety problems in mining, oil, atomic and railway industry as well as in science takes noncontact optical measurement technologies with micron resolution and productivity from 500 to 10 000 meas/s. We have developed, implemented and tested some novel optical measuring systems and laser technologies. For mining industry applications there were developed and produced two types of sensors: one position sensor for displacement measurement of geoblocks using horizontal drilling boreholes and another precision sensor for laboratory testing of models of geo medium blocks under loading. For the first time the developed system SAKHALIN can also be used for the 24-hour monitoring of shifts and deformations of very huge mechanical and engineering constructions in emergency cases, i.e. excessive construction strains, displacements, earthquakes, tsunami events, etc. Multifunctional laser technological system LSP-2000 is effective equipment for material processing and 3D treatment. If one built-in additionally the measuring probes, LSP-2000 can be used as coordinate measuring machine with very large measuring volume. In atomic industry the developed and produced laser measuring machine has allowed to obtain objective information about the geometry of grid spacers which were subsequently used for further improvement of production of fuel assemblies for Russian nuclear reactors VVER-1000 and VVER-440. Application of automatic laser diagnostic system COMPLEX for noncontact wheel pairs dimensional inspection for running trains makes possible to increase the safety of Russian railways. The obtained results are applied to many industrial fields, including mechanical engineering, automobile industry, hydropower engineering and etc.

REFERENCES

1. Gordon M. Brown, Kevin G. Harding, H. Philip Stahl, Industrial Application of Optical Inspection, Metrology, and Sensing, *Proc. SPIE*, 1821 (1992).
2. From the first in the world AES to the atomic power of XXI century, *Proc. 10th Annual Conf. of Russian Nuclear Society*, Publishing house Rity "FEN" (1999) (in Russian).
3. M.V. Kurlenya, V.N. Oparin, and A.A. Eremenko, "Relation of linear block dimensions of rock to crack opening in the structural hierarchy of masses", *Fiz.-Tekh. Probl. Razrab. Polezn. Iskop.*, 3 (1993).

4. O.I. Bityutsky, I.G. Chapaev, Yu.V. Chugui et al, "Laser measuring machine for 3D noncontact inspection of geometrical parameters of grid spacers for nuclear reactors VVER-1000", *Proc. SPIE*, 4900, 202-212 (2002).

5. A.N. Baibakov, V.M. Gurenko, V.I. Paterikin, S.P. Yunoshev, S.V. Plotnikov, V.V. Sotnikov, and Yu.V. Chugui, "Automatic control of geometrical parameters of wheel pairs during train operation", *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 40 (5), 75-82 (2004).

6. V.N. Oparin, Yu.V. Chugui, V.M. Zhigalkin, V.F. Yushkin, A.K. Potashnikov, S.V. Plotnikov, K.I. Kuchinskii, V.S. Bazin, V.M. Gurenko, and V.S. Zinchenko, "Devices for continuous recording of the parameters of deformation - wave processes in rock mass. Part 1: Measurement of longitudinal movements of rocks in a borehole and design of the position sensor", *Journal of Mining Science*, 41(3), 282-290 (2005).

© Yu.V. Chugui, S.V. Plotnikov, A.K. Potashnikov, A.G. Verkhogliad, 2006

УДК 535.3 : 532.26

Ю.Н. Дубнищев, В.А. Арбузов, П.П. Белоусов, П.Я. Белоусов

ИТФ СО РАН, Новосибирск

ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР ДВИЖУЩИХСЯ СРЕД

Обсуждается диагностика динамических структур в задачах гидро-, газо- и геодинамики.

Методами оптической диагностики, основанной на лазерных доплеровских измерительных технологиях и лазерной визуализации динамических полей плотности [1], исследованы кинематические и структурные параметры ударных волн и возмущений воздушной среды, индуцированных ударными волнами. В эксперименте использовалась портативная ударная труба, выполненная на базе пневматического ружья ИЖ–53. Калибр ствола $\varnothing 4,5$ мм, длина – 200 мм. Ударная волна формируется при разрыве диафрагмы из алюминиевой фольги, толщиной 0,05 мм, в один или два слоя.

На рис. 1 показаны теневые фотографии (а) – ударной волны на выходе ствола пневморужья, работающего в режиме ударной трубы, и сдвиговые интерферограммы (б и с), полученные на модифицированном теневом приборе ИАБ–463 с фильтрацией Фуко–Гильберта. На фотографии 1,д показано распределение оптической фазовой плотности в ударной волне, полученное на системе ИАБ–463 с применением гильберт–фильтрации оптического сигнала. Рис. 1,а соответствует ориентации оси пневморужья под углом 30° к оси. На рис. 1,б, с, д ось пневморужья направлена ортогонально к оптической оси.

Эксперименты выполнялись с применением модифицированного лазерного анемометра «Пульсар–3М», предназначенного для измерения 2D скоростей потоков газовых и конденсированных сред в динамическом диапазоне до 103 м/с. Прибор состоит из оптико–механического блока и компьютеризированной системы обработки, содержащей высокоскоростную плату сбора данных. Расширение функциональных возможностей лазерных доплеровских измерительных технологий на исследование нестационарных быстропротекающих газодинамических процессов потребовало новых

технических решений, относящихся к способам формирования зондирующего поля, оптической фильтрации рассеянного излучения, его фотоэлектрического преобразования и компьютерной обработки сигнала.

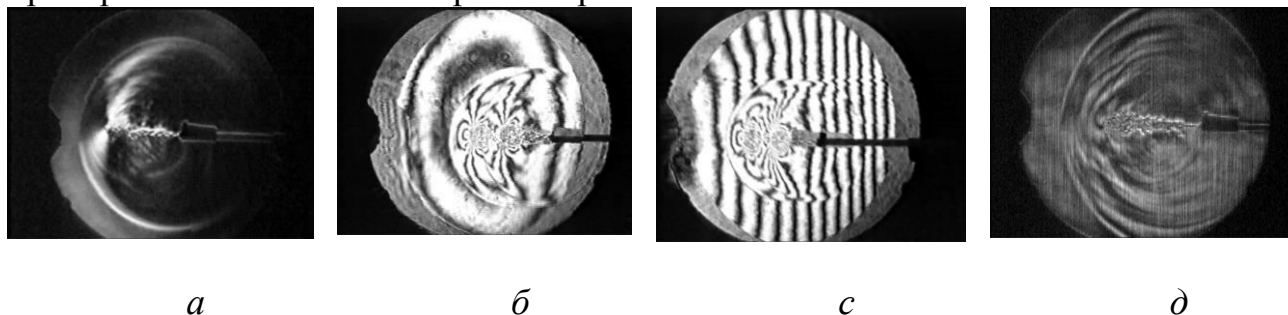


Рис. 1

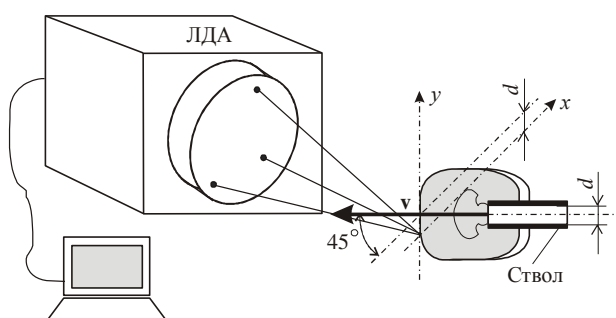


Рис. 2

На рис. 2 показана упрощенная схема эксперимента, в котором ось ствола пневморужья направлена под углом 45° к плоскости xu 2D координатно-измерительного базиса, задаваемого в системе отсчета, связанной с лазерным анемометром.

В каждой реализации исследуемого процесса измерялась одна из двух ортогональных компонент вектора скорости. Коммутация оптических каналов, формирующих 2D координатно-измерительный базис, осуществляется акустооптическими элементами по заданной программе или от внешнего управляющего сигнала. Зондирующее поле локализовано в объеме, ограниченном эллипсоидом, малая полуось которого равна 25 мкм, большая – 0,35 мм.

Доплеровский сигнал формируется при прохождении фронта ударной волны через зондирующее поле. Сигнал представляет собой короткий видеоимпульс, огибающая которого модулирована частотой, определяемой периодической структурой зондирующего поля и соответствующей компонентой скорости движения фронта ударной волны.

Кинематические возмущения в структуре ударной волны должны проявляться через динамическую скорость. С целью измерения этой скорости координатно-измерительный базис, задаваемый зондирующим лазерным полем, ориентировался так, чтобы ось y была параллельной плоскости волнового фронта. На рис. 3 в качестве примера показан один из фрагментов реализации доплеровского сигнала, полученные при измерении y -компоненты вектора

скорости в плоскости волнового фронта ударной волны, когда зондирующее поле позиционировано на расстоянии 10 калибров от среза ствола. Существование y -компонент скорости в конфигурации, показанной на рис. 2, говорит о том, что зондирующее поле рассеивается оптическими неоднородностями, движущимися в плоскости волнового фронта. Такие рассеивающие структуры могут возникать из гидродинамических неустойчивостей.

Вид доплеровских сигналов, соответствующих y -компоненте скорости, указывает на упорядоченность структуры динамических возмущений фронта ударной волны. На рис. 3 над сигналом приведен график, где точками показана зависимость от времени локальной скорости движения динамической рассеивающей структуры на фронте ударной волны. Временные интервалы, соответствующие сигналу и измеренной динамической скорости, согласованы. Измерена скорость на временном интервале 80 нс.

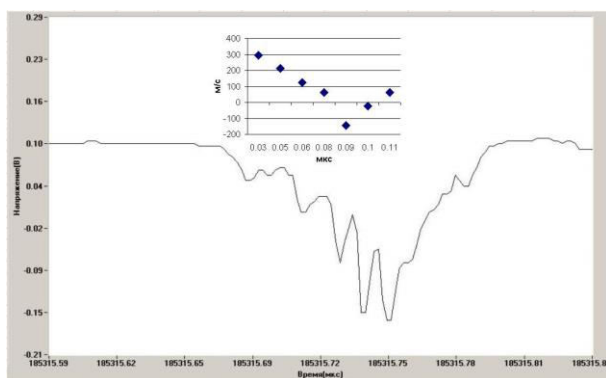


Рис. 3

Для выявления структуры фронта ударной волны были выполнены эксперименты по визуализации динамического поля плотности на расстоянии 20 калибров от среза ствола. На рис. 4, *a–c* показаны примеры визуализированных фронтов ударных волн при пересечении лазерной плоскости.

Явственно просматриваются радиально–тангенциальные структуры оптической плотности, вид которых характерен для колебательных мод.

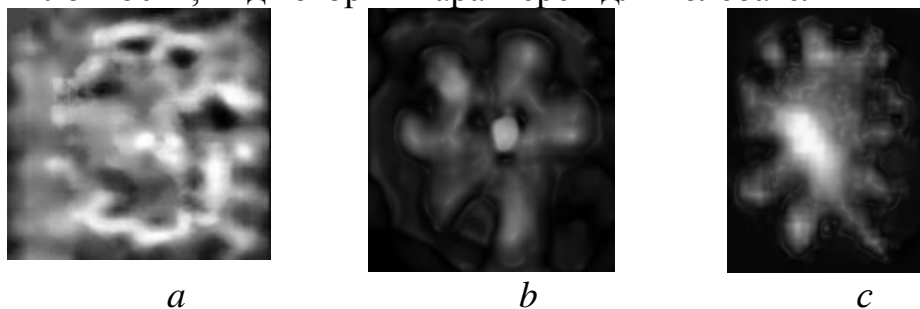
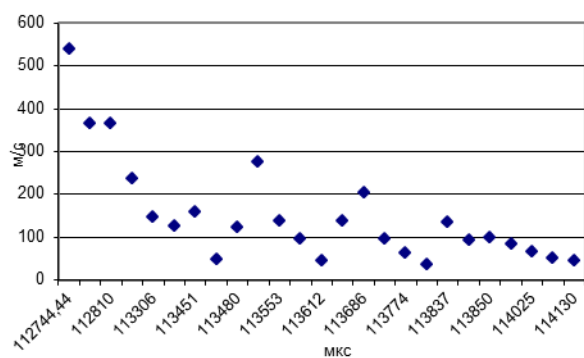
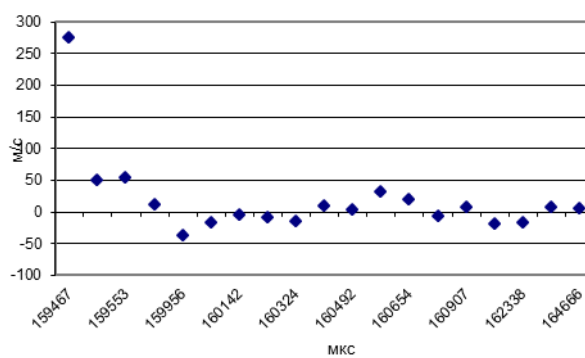


Рис. 4

Радиально–тангенциальная структура оптической фазовой плотности в ударной волне угадывается и на тенеграмме (рис. 1, *a*), полученной с использованием фильтрации Фуко–Гильберта при ориентации оси пневморужья под углом 30° к оптической оси.



a



б

Рис. 5

На рис. 5,*a* и 5,*б* приведены примеры зависимости от времени локальной скорости воздушной среды, возмущенной ударной волной. Измерения выполнялись в геометрии, показанной на рис. 2. Зондирующее поле позиционировалось на расстоянии 10 калибров от среза ствола.

Измерялась скорость по оси x в направлении распространения ударной волны (рис. 5,*a*) и скорость по оси y , параллельной плоскости волнового фронта (рис. 5,*б*). Эти измерения дают представление об эволюции ортогональных компонент локальной скорости в воздушной среде при распространении ударных волн.

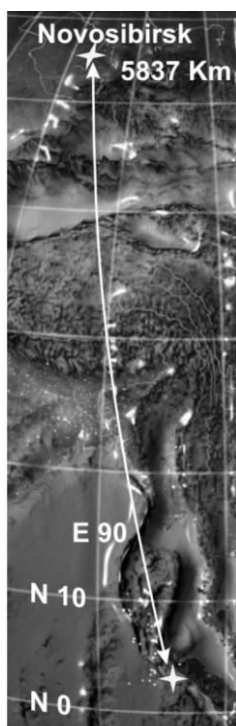


Рис. 6

В качестве примера приложений диагностических методов в газодинамике приведем некоторые результаты мониторинга геодинимических возмущений от землетрясения 26.12.04 в Индийском океане, вызвавшего катастрофическое цунами на побережье. Расположение станции наблюдения в Новосибирске относительно района землетрясения представлено на географической карте (рис.6). Координаты станции $54^{\circ}51,2' \text{ N}$, $083^{\circ}06,5' \text{ E}$, el 136 м (N – северная

широта, Е – восточная долгота, еl – возвышение над уровнем моря); расстояние от эпицентра 5837 км. Регистрировалась радиальная компонента колебаний земной поверхности.

Рис. 7 представляет фрагмент записи динамики радиальной компоненты колебаний земной поверхности во временном интервале с 15.12.04 по 25.01.05. По оси ординат отложена амплитуда колебаний в условных единицах, по оси абсцисс – местное новосибирское время (первые две цифры – год, вторые две цифры – месяц, следующие пары цифр соответственно дни, часы, минуты и секунды, последние три цифры за точкой – десятые, сотые и тысячные доли секунды). Стрелкой отмечено возмущение от землетрясения 26.12.04.

На рис. 8 показано это динамическое возмущение в увеличенном масштабе. Зарегистрированное возмущение представляет собой волновой цуг длительностью около 20 мин и периодом, изменяющимся от ≈ 40 с. в начале цуга до ≈ 20 с. в конце. Сигнал от землетрясения зафиксирован в Новосибирске в 7 час. 28 мин. по гринвичскому времени. Расстояние 5837 км от эпицентра геодинамическое возмущение преодолело за 29,53 мин. Форма волнового цуга и его частотная структура определяются, по-видимому, дисперсионными свойствами среды, в которой распространяется сигнал. Как следует из рис. 7, сигналу от землетрясения предшествовали интенсивные радиальные смещения земной поверхности в виде периодической импульсной последовательности. Период этой последовательности равен земным суткам, а средняя длительность импульсных возмущений составляла приблизительно четверть суток. Природа таких периодических импульсных возмущений определяется суточным лунно–солнечным воздействием. Землетрясение произошло в полнолуние. Из рис. 7 также видно, что после землетрясения на приливные деформации земной поверхности наложился низкочастотные аperiodические возмущения, на фоне которых приливная динамика стала менее выраженной.

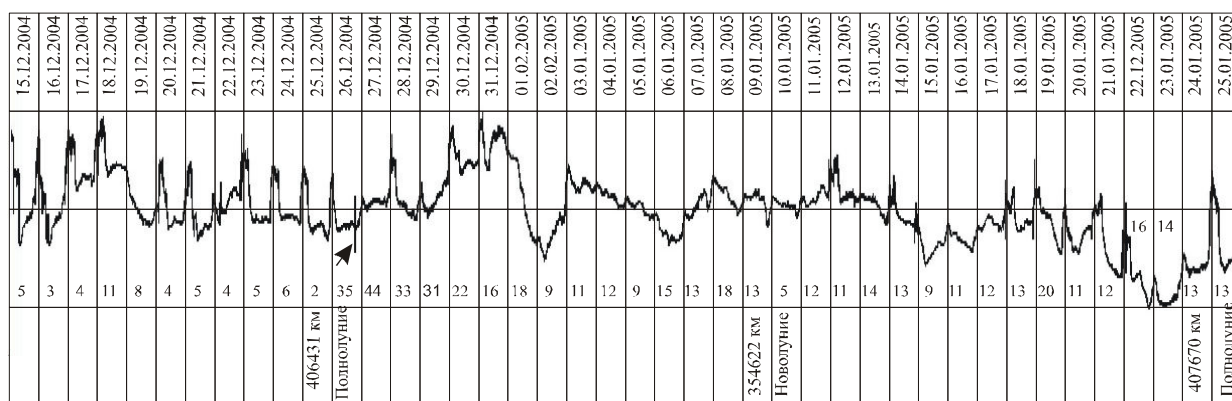


Рис.7. Мониторинг радиальной компоненты смещения земной поверхности на станции наблюдения в Новосибирске. Верхняя шкала указывает время в масштабе 1 сутки на клетку; цифры непосредственно под кривой указывают число землетрясений (≥ 4 балла), происшедших за сутки; на нижней шкале приведены фазы Луны и соответствующее расстояние между Луной и Землей

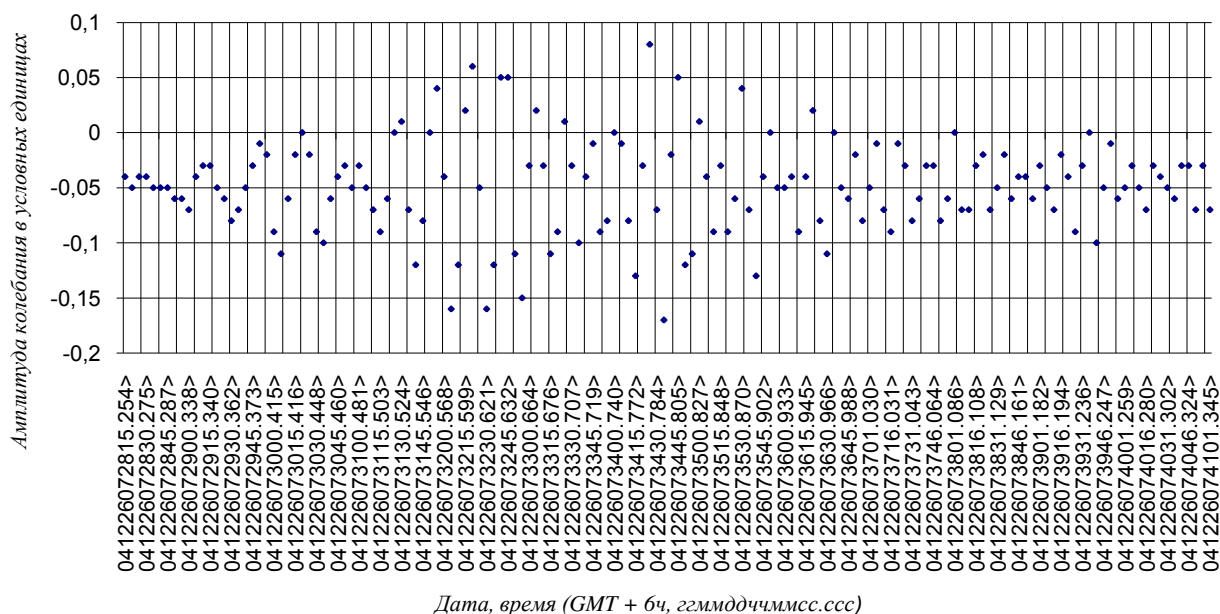


Рис. 8. Радиальные колебания земной поверхности в Новосибирске, вызванные геодинамическим возмущением от землетрясения в Индийском океане 26.12.04

Как отмечалось в средствах массовой информации, перед землетрясением сейсмическая активность в этом районе Индийского океана в течение длительного времени не наблюдалась. Видно, что радиальные смещения поверхности с суточным периодом на временном интервале, предшествующем возмущению от землетрясения, оказались много больше смещений с периодом в половину суток. Из записей радиальных колебаний земной поверхности следует, что геодинамическая активность в виде землетрясений коррелирует с лунным циклом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоусов П.П., Белоусов П.Я., Дубнищев Ю.Н. Оптические методы исследования потоков. Новосибирск: Сибирское университетское издательство. 2003, 415 с.

© Ю.Н. Дубнищев, В.А. Арбузов, П.П. Белоусов, П.Я. Белоусов, 2006

УДК 620.93:661.961

В.В. Кузнецов, О.В. Витовский

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

МИКРО И НАНОТЕХНОЛОГИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВОДОРОДА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

ВВЕДЕНИЕ

Анализ тенденций развития современной энергетики показывает, что водород в будущем займет важное место в мировом энергетическом балансе. Это связано с тем, что водород является эффективным энергоносителем.

Наиболее важное применение водорода в энергетике заключается в его использовании в электрохимических генераторах - топливных элементах для прямого преобразования химической энергии водорода в электрическую энергию с высоким коэффициентом преобразования и отсутствием вредных выбросов в окружающую среду. В свободном состоянии водород крайне редко встречается в земных условиях, но он широко распространен в виде природных соединений, и может быть получен из них различными методами. Например, водород может быть получен электролизом с помощью ветро-, гидро-солнечной и атомной энергии. Он может быть получен из традиционных источников (нефть, уголь, природный газ) с использованием различных каталитических и других технологий. После этого водород может транспортироваться к месту потребления, или получен непосредственно там, и служить основой работы электрохимических электрогенераторов на транспорте (электромобилях) или в автономных источниках электроэнергии на основе топливных элементов. Автомобиль на топливных элементах может использоваться как средство передвижения в дневное время, и как источник электроэнергии в ночное время.

1. ПРИМЕНЕНИЕ ВОДОРОДА В ЭНЕРГЕТИКЕ И ТРАНСПОРТЕ

Достоинством водорода является практически полное отсутствие выбросов в атмосферу. Это связано с тем, что в результате электрохимической реакции производится вода, которая может быть использована в цикле топливного элемента. Эффективность преобразования энергии топлива при использовании топливных элементов (установленная мощность больше 100 мВт) достигает 60%, при использовании дизельного электрогенератора 40%, паровой и газовой турбины 45%. Высокая эффективность при использовании топливных элементов обусловлена отсутствием многоступенчатости в процессе преобразования. Происходит прямое преобразование химической энергии топлива и окислителя в электрическую энергию, и оно происходит при температурах, которые могут составлять порядка 80-90 градусов, что характеризуется высоким КПД электрохимического преобразования.

Такие высокие эффективности преобразования достигаются в случае использования чистого водорода. В случае же при использовании, например, природного газа вначале необходимо затратить энергию на его преобразование в водород. Здесь важна эффективность собственно преобразователей-конверторов, поскольку от неё в значительной степени зависит конечный КПД устройства, который с учетом тепловой энергии может достигать 70% и более. Принципиальная схема электростанции на топливном элементе включает в себя топливный элемент, состоящий из анода, катода, и мембраны, которая проводит ионы кислорода или протоны, в зависимости от типа топливного элемента. Топливный элемент может использовать, как топливо, окись углерода или водород и в результате реакции получается вода или двуокись углерода, электрическая и тепловая энергия. Исходное сырье предварительно

конвертируется в синтез газ и водород с использованием топливных процессоров и устройств доочистки водорода. Окись углерода является ядом для катализатора полимерного топливного элемента и приходится применять сложные многоступенчатые системы очистки водорода для того, чтобы сохранить эффективность топливного элемента в течение длительного времени.

Примером действующей автономной электростанции на топливных элементах является установка, выпущенная компанией Bollard Power, она генерирует 250 киловатт тепла и электроэнергии, что достаточно для снабжения промышленного предприятия, школы или жилого квартала из 50 домов. В России также есть примеры создания таких установок. Это топливные элементы, установленные в «Буране». Есть опыт установки топливных элементов «Бурана» на автомобиль «Лада», который показал их жизнеспособность. Сейчас развивается программа компании «Норильский никель», направленная на развитие водородных технологий в масштабах России, организована компания «Новые энергетические технологии».

Второе важное применение топливных элементов - это электромобили. В электромобиле отсутствует двигатель внутреннего сгорания, здесь используется электромотор, топливная ячейка и источник водорода. Эффективность таких электромобилей составляет до 50% вместо существующих сейчас 20-30%. Важным результатом является также значительное снижение CO_2 на километр пути.

Для питания автономных электрогенераторов водородом развиваются три направления. Это использование газообразного водорода в баллонах с давлением до 1000 атмосфер. Второе направление - это использование металлгидридных накопителей водорода. Наиболее целесообразным для мобильных и автономных энергетических устройств является, по-видимому, применение топливных процессоров, преобразующих обычное сырье, например природный газ, дизель или бензин, в водород.

2. ТОПЛИВНЫЕ ПРОЦЕССОРЫ АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ МИКРОРЕАКТОРОВ

Конверсия водородсодержащего сырья в чистый водород в топливном процессоре является сложным многостадийным процессом, и традиционные химические реакторы не могут быть использованы из-за их размера и сложности в управлении. Принципиальным решением проблемы локальных источников водорода является применение топливных процессоров, основанных на использовании микроканальной технологии. Такие генераторы водорода имеются в мире сейчас только в виде отдельных демонстрационных образцов, и разработка их энергоэффективных конструкций представляет значительный коммерческий интерес. Микрореакторы, это компактные химические реакторы с каналами субмиллиметрового размера. Размер каналов изменяется от нескольких десятков до 500 микрон и более. Благодаря этому реализуются экстремально высокие соотношения «поверхность – объем» для таких реакторов – от 10000 до 50000 $\text{м}^2/\text{м}^3$ и коэффициенты теплопереноса от 20000 до 25000 $\text{Вт}/\text{м}^2$, что определяет уникальные свойства таких

микрореакторов. Модуль микрореактора включает все необходимые устройства для регулировки потоков агентов, контроля параметров потоков, устройства перекачки реагентов, устройства смешения и микроканальный реактор.

Преимуществом микрореакторов является их малый размер, уменьшенный по отношению к традиционным реакторам на несколько порядков. Высокая производительность микроканального реактора достигается за счет интенсификации тепло- и массопереноса в каналах малого размера при параллельной реакции в большом числе каналов. Микрореакторы имеют модульную конструкцию и возможность наращивания числа моделей для увеличения производительности. Другим преимуществом микрореакторов является большая степень загрузки катализатора и его высокая эффективность из-за малой толщины каталитического покрытия. Форма каналов может изготавливаться специальным образом для интенсификации процессов тепло- и массообмена в таких устройствах.

Схема топливного процессора паровой конверсии жидкого топлива в водород включает блок испарителя топлива и воды, реактор предварительной конверсии, реактор доочистки от окиси углерода и реактор окончательной очистки водорода. Тепло к испарителю подается за счет реакции сгорания части топлива. Далее газообразное топливо, после смешения в парами воды, поступает в реактор начальной конверсии метана и на выходе мы получаем синтез-газ, который содержит до 60% водорода, окись углерода, CO_2 и воду. Далее этот газ может непосредственно поступать в высокотемпературный топливный элемент, для которого окись углерода является топливом. В случае использования наиболее эффективных низкотемпературных топливных элементов необходимо очистить продукты конверсии от окиси углерода. Это достигается в реакторе сдвига, где содержание окиси углерода уменьшается от 20% до 1-2%. Далее используется еще один реактор доочистки от окиси углерода. После него чистый водород с воздухом поступает в топливный элемент. В результате реакции на выходе из топливного элемента получаем катодные газы, которые содержат пары воды, и анодные газы, которые содержат частично водород. Для повышения энергетической эффективности топливный процессор объединяется с топливным элементом. Продукты анодной реакции с остатком водорода дожигаются в испарителе для получения тепла, необходимого для испарения топлива и воды, а продукты катодной реакции, подаются в конденсатор для отделения паров воды и её использования в цикле топливного процессора.

Более простую схему имеет топливный процессор на основе неполного окисления водородсодержащего сырья. В таком топливном процессоре вместо воды в качестве реагента используется кислород, содержащийся в воздухе. Кроме того, реакция неполного окисления является экзотермической, то есть происходит с выделением тепла, и нет необходимости сжигать часть исходного сырья для получения тепла, необходимого, например, для реакции паровой конверсии. Недостатком такой схемы топливного процессора является большое содержание азота в продуктах реакции и дополнительные затраты на его удаление при получении сверхчистого водорода. Существуют также топливные

процессоры на основе автотермической конверсии водородсодержащего сырья. В таких процессорах в качестве реагента используется как кислород, содержащийся в воздухе, так и пары воды. Тепловой эффект реакции близок к нулю и нет необходимости в организации тепловых потоков в зоне реакции.

Критерий энергетической эффективности топливных процессоров является определяющим, и с этим связаны основные трудности при разработке таких устройств. Здесь необходимым является использование методов математического моделирования физико-химических процессов в отдельных элементах топливного процессора и всего процессора в целом. Математическое моделирование тепло- и массопереноса при химических превращениях в микроканалах проводится на основе решения уравнений гидродинамики совместно с уравнением конвективного теплообмена для реагирующей смеси газов и уравнения теплопроводности для стенок реактора, что позволяет определить режимы перераспределения тепловых потоков в микрореакторе, исключая образование горячих областей на стенках и деградирование катализатора. Микроканальные реакторы имеют уникальные свойства благодаря тому, что в области ламинарного течения коэффициенты тепло- и массопереноса обратно пропорционально зависят от поперечного размера канала. Чем меньше размер канала, тем выше коэффициенты тепло- и массопереноса. Но оптимальная конструкция определяется уже не только в сфере математического моделирования, но и конструктивного оформления реактора.

3. МИКРО И НАНОТЕХНОЛОГИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МИКРОРЕАКТОРОВ

Важной проблемой, которую необходимо решить при создании микрореактора является выбор метода формирования микроканальной структуры. Для микрореактора из кремния применяются традиционные методы, используемые в микроэлектронике, при использовании металлов применяются механические методы обработки, химическая и электрохимическая обработка, химическое травление, литография, лазерная, плазменная обработка. Все эти методы имеют свои диапазоны применимости. Для микрореакторов из металла эффективными являются механические методы обработки, поскольку они позволяют получить каналы строго определенной формы и удобные для нанесения катализаторов. С помощью высокоскоростного резания можно получить систему микроканалов с поперечным размером больше 200 микрон. Микроканальный реактор, выполненный с помощью литья керамики, позволяет работать при высоких температурах. Используя ионное травление кремния, можно получить каналы уникальной формы, но такая технология достаточно дорогая и позволяет получать каналы от 10 микрон и меньше.

Для соединения микроканальных пластин используются методы диффузионной сварки. Набор микроканальных пластин, сжатых под высоким давлением, помещается в высокотемпературную печь со строго заданным полем температуры, и после спекания получается пористое тело с упорядоченной структурой.

Для нанесения каталитического покрытия на стенки микрореактора используются как традиционные методы (осаждение, соосаждение, пропитка, ионный обмен, электрохимическое осаждение), так и современные нанотехнологии, например, создание решетки платиновых наночастиц с помощью электронно-пучковой литографии. На обработанную поверхность микроканалов вначале наносится наноструктурный слой оксида алюминия. Структура этого слоя существенно зависит от режима нанесения и это, в конечной степени, определяет степень развитости поверхности и эффективность катализатора. Транспорт исходных продуктов и отвод продуктов реакции происходит через нанопоры носителя катализатора. Наночастицы катализатора, имплантированные в оксид алюминия, защищены от перегрева и доступны для реагирующих компонент.

Оптимизация метода нанесения покрытия оксида алюминия, и внедрения в него наночастиц металлов платиновой группы позволила разработать катализатор для паровой конверсии метана, позволяющий получать при температуре в реакторе выше 800°C до 2.6 моля водорода на один исходный моль метана с высокой степенью химического превращения метана и селективностью продуктов реакции. При горении метана в среде воздуха в качестве катализатора используются наночастицы палладия. Тепло, выделяемое при горении метана, подводится к реактору паровой конверсии. Структура катализаторов и использование канальной архитектуры микрореакторов позволяет согласовать экзотермическую и эндотермическую реакции и повысить энергетическую эффективность элемента топливного процессора. В рассмотренных примерах время пребывания смеси газов в реакторе составляет меньше десяти микросекунд, это позволяет получать значительные мольные потоки компонент при длине микрореактора несколько сантиметров.

В данной работе мы попытались лишь очертить круг проблем, связанных с применением водорода в энергетике и транспорте, развитием микро и нанотехнологий для топливных процессоров, а также показать, что эти проблемы могут иметь приемлемые технические решения при производстве водорода для перспективных энергетических устройств. Использование микроканальных технологий не ограничивается только решением проблемы получения водорода. Микроканальные реакторы являются новым, быстро развивающимся полем высоких технологии. Существует широкий спектр технологий в энергетике, химической технологии, фармацевтике, пищевой промышленности, где важны микроканальные технологии, и они позволяют получать продукты с новым качеством.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-08-65526).

© В.В. Кузнецов, О.В. Витовский, 2006

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ПАССИВНОЙ ДВУХСПЕКТРАЛЬНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ

Современные боевые действия в локальных конфликтах с применением партизанской тактики иногда образно называют борьбой снайперов. Поэтому весьма актуальной является задача обнаружения местоположения снайперов противодействующей стороны. Однако создание таких средств осложняется тем, что установление координат вспышек стрелкового оружия является более трудным по сравнению с аналогичной задачей для других видов вооружения. Причины – относительно низкая сила излучения при выстреле, применение специальных устройств для бесшумно-беспламенной стрельбы, тщательная маскировка и высокая мобильность снайпера. Кроме того, не следует забывать, что аппаратура военного назначения должна работать в условиях плохой погоды, ограниченной видимости, в специфических условиях поля боя и, по возможности, скрытно. Указанные обстоятельства обуславливают повышенные требования по точности и быстродействию системы определения координат целей, обнаруживающих себя блеском выстрелов.

В течение 2002 - 2005 гг. Сибирской государственной геодезической академией при участии Конструкторско-технологического института прикладной микроэлектроники СО РАН по заданию Секции прикладных проблем при Президиуме РАН проводились поисковые теоретические и экспериментальные исследования путей создания компактной пассивной оптико-электронной системы автоматического определения координат огневых целей, обнаруживающих себя вспышкой выстрела. Полученные основные результаты можно кратко сформулировать следующим образом:

- Предложена общая концепция оперативного автоматического определения полярных координат огневых целей, основанная на идее двухканальной регистрации световой вспышки с помощью многоэлементных фотоприемных устройств (ФПУ), последующем анализе и преобразовании электронных сигналов по специальной методике и выдачи полярных координат цели в цифровой форме [1, 2];

- Проанализированы отечественные и зарубежные матричные и линейчатые ФПУ в части спектральной чувствительности, пространственного разрешения и пригодности использования в полевых условиях;

- Проведен анализ и расчет теоретических и инструментальных погрешностей, выработаны рекомендации по выбору основных схемотобразующих параметров системы [3];

– Выполнены энергетические расчеты системы в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра, сформулированы требования к параметрам оптико-электронного тракта;

– Исследована возможность повышения точности определения координат целей с использованием принципов комплексного совмещения каналов и двухспектрального анализа изображений, подтверждена целесообразность при технической реализации разрабатываемой концепции осуществлять интегрированную систему, в которой различные каналы объединены на основе общей оптической системы, а также единой системы обработки и представления информации на общем индикаторе [4];

– Проведены лабораторные и полевые исследования принципа измерения полярных координат световых вспышек; успешная верификация принятой концепции построения разрабатываемой системы показала, что при технической реализации возможно обеспечить определение полярных координат целей с погрешностями, величины которых не превышают расчетных значений [5, 6];

– Проанализированы варианты построения оптических схем, выбраны, обоснованы и рассчитаны оптимальные схемные решения [6, 7]; каждая из схем предполагает разнообразные варианты исполнения: объективы каналов могут быть как полностью раздельными, так и содержать общие элементы, могут быть как линзовыми, так и зеркально-линзовыми; физическое деление излучения на спектральные диапазоны может происходить как на входном зрачке, так и внутри системы, с использованием как зеркальных, так и дихроичных покрытий; в качестве многоэлементных приемников излучения могут использоваться как матричные, так и линейчатые многоэлементные ФПУ;

– Разработана и смонтирована электронная схема анализа и преобразования сигналов ФПУ с автоматической выдачей полярных координат целей в цифровой форме; структурно схема состоит из блока преобразователей, блока первичной обработки информации и специализированного вычислительного устройства; блок входных преобразователей содержит два информационных канала на различные спектральные диапазоны; блок первичной обработки информации обеспечивает аналого-цифровое преобразование, временную разностную обработку сигналов изображения и ввод данных в вычислительное устройство, которое производит логическую обработку сигналов, поступающих со всех информационных датчиков, сопоставляет характеристики излучения каждого элемента с эталоном, выбирает элемент, наиболее близкий к эталону, и формирует результаты (целеуказание) для средств огневого поражения;

– Разработаны методики юстировки, выверки и проверки основных параметров системы;

– Изготовлены и экспериментально (в том числе, в натурных условиях) исследованы действующие макеты системы автоматического определения координат целей с линейчатыми и матричными ФПУ, включающие в себя модули входных светосильных объективов, системы базирования оптических

каналов, модули многоэлементных ФПУ, системы согласования ФПУ, модули электронной и математической обработки сигналов, модули электропитания; проведенные лабораторные и полевые испытания макетов продемонстрировали на практике правильность выбранной концепции построения и убедительно подтвердили возможность создания автоматической системы определения полярных координат огневых целей с точностными характеристиками, соответствующими теоретической модели.

Результаты могут быть использованы при дальнейшей постановке прикладной НИОКР по созданию оптико-электронной системы, обеспечивающей оперативное автоматическое определение полярных координат огневых средств противника, обнаруживающих себя блеском пламени выстрела.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоконев В.М., Итигин А.М.–Ш., Прудников Н.В., Шлишевский В.Б. Концепция построения оптико-электронной системы автоматического определения координат цели по световой вспышке // Изв. вузов. Приборостроение. – 2003. – № 3. – С. 64 – 66.
2. Белоконев В.М., Итигин А.М.–Ш., Хацевич Т.Н., Шлишевский В.Б. Определитель полярных координат огневых средств, обнаруживающих себя блеском выстрела // Патент РФ № 2 252 442. – Бюл. изобр. – 2005. – № 14.
3. Белоконев В.М., Итигин А.М.–Ш., Шлишевский В.Б. Теоретические ошибки определения полярных координат светящихся объектов с помощью двухканальной оптико-электронной системы с матричными фотоприемниками // Опт. журн. – 2003. – № 7. – С. 91 – 92.
4. Белоконев В.М., Журавлев П.В., Шлишевский В.Б. Рациональные пути комплексирования тепловизионных и низкоуровневых телевизионных модулей для построения систем автоматического определения координат световых вспышек // Тез. докл. XIII Междунар. научно-техн. конф. «Лазеры в науке, технике и медицине» («Лазеры–2002»). – Сочи, 2002. – С. 138.
5. Белоконев В.М., Итигин А.М.–Ш., Хацевич Т.Н., Шлишевский В.Б. Проблемы технической реализации оптико-электронной системы автоматического определения координат цели по световой вспышке // Тез. докл. Совещ. «Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники» («Фотоника–2003»). – Новосибирск: ИФП СО РАН, 2003. – С. 92.
6. Белоконев В.М., Итигин А.М.–Ш., Михайлов И.О., Хацевич Т.Н., Шлишевский В.Б. Некоторые особенности технической реализации оптико-электронной системы автоматического определения координат цели по световой вспышке // Изв. вузов. Приборостроение. – 2004. – Т. 47, № 9. – С. 73 – 78.
7. Белоконев В.М., Ефремов В.С., Шлишевский В.Б. Некоторые оптические устройства оптико-электронных координаторов // Материалы LIII Междунар. конф. «Современные проблемы геодезии и оптики». Ч. III – Новосибирск: СГГА, 2003. – С. 45 – 47.

© Н.В. Прудников, А.М.–Ш. Итигин, Т.Н. Хацевич, В.Б. Шлишевский, 2006

УДК 623.4.023.472

И.О. Михайлов, С.В. Олейник, Г.А. Уставич, Т.Н. Хацевич, В.Б. Шлишевский

СГГА, Новосибирск

А.В. Гусаченко, Ю.Л. Кравченко, Б.Н. Новгородов

КТИ ПМ СО РАН, Новосибирск

В.А. Арутюнов, Н.Г. Богатыренко, А.М. Кучеров, Е.А. Платонова,

А.Е. Прокофьев, А.Ю. Рахметулов

ФГУП «НПО «Электрон»», Санкт–Петербург

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МАКЕТА ПАССИВНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ КРАТКОВРЕМЕННЫХ СВЕТОВЫХ ВСПЫШЕК

В работах [1 – 3] рассмотрены принципиальные предпосылки и характерные проблемы технической реализации пассивной двухканальной оптико-электронной системы автоматического определения полярных координат огневых целей по их световым вспышкам, обсуждены различные схемные варианты, приведены данные полевых исследований, подтверждающие возможность достижения точностных характеристик, соответствующих теоретической модели. Настоящее сообщение касается некоторых предварительных результатов экспериментальных испытаний макета подобной системы с матричными фотоприемными устройствами (ФПУ) инфракрасного (ИК) диапазона.

Эксперимент выполнялся с целью:

- Подтверждения собственно возможности регистрации огневых вспышек от различных типов стрелкового оружия в ИК диапазоне спектра на дальностях до 1 000 м в дневных и ночных условиях, в том числе, при наличии высоко- и низкоэнергетических помех;
- Практического опробования электронной схемы анализа и преобразования сигналов с многоэлементных ФПУ, а также алгоритмов распознавания и вычисления полярных координат огневых позиций по кратковременным вспышкам выстрелов стрелкового оружия;
- Реальной оценки погрешности определения координат и обоснования возможности обеспечения их значений в заданных пределах.

Место проведения испытаний – тир полигонного участка СФ ГУ НПО «СТиС» МВД РФ на территории учебного центра НВИ ВВ МВД РФ (г. Искитим Новосибирской обл.). Испытания проводились в дневное и в ночное время 30 – 31 августа 2005 г. Условия проведения испытаний: температура 18 – 20° С днем и 10 – 15° С ночью, переменная облачность, кратковременные слабые осадки в виде дождя (вечером и ночью), влажность до 100%.

В макете использовались матрицы – ФППЗ БШ-22М в корпусе криостата, формат матриц 256×256, размер пикселей 0,04 мм, температурная чувствительность 70 мК, кратность пересветки 1 000, инерционность 10^{-9} с. Для охлаждения применялись микрокриогенные системы с циклом Стирлинга типа МСМГ-5А-1,3/80. Частота кадровой развертки 25 кадр/с, тип развертки – чересстрочная.

ИК объективы имели фокусное расстояние 100 мм, относительное отверстие 1 : 1,8, рабочий спектральный диапазон 3,0 – 5,5 мкм.

Обработка видеосигнала – 12-разрядное аналого-цифровое преобразование, коррекция неоднородности чувствительности, коррекция дефектных элементов, формирование фонового кадра и его вычитание из текущего кадра, цифровое смещение и усиление видеосигнала. Выходной видеосигнал может быть представлен либо в виде параллельного цифрового 12-

разрядного кода в сопровождении служебных импульсов, либо в аналоговой форме для работы со стандартным видеоконтрольным устройством.

Для контроля точности измерения координат огневых точек с учетом рельефа местности была разработана схема метрологического полигона (рис.), представляющая совокупность геодезических меток на местности, координаты которых измерены электронным тахеометром TCR 307 Leica с погрешностью не более ± 30 мм. Выстрелы производились из АК-74, СВД и ВСК с трехкратным дублированием. Координаты, полученные с помощью разработанного макета, после математической обработки сравнивались с координатами, определенными геодезическим методом.

В полном объеме экспериментальные результаты еще находятся в стадии уточнения и осмысления, однако предварительно можно сделать следующие основные выводы:

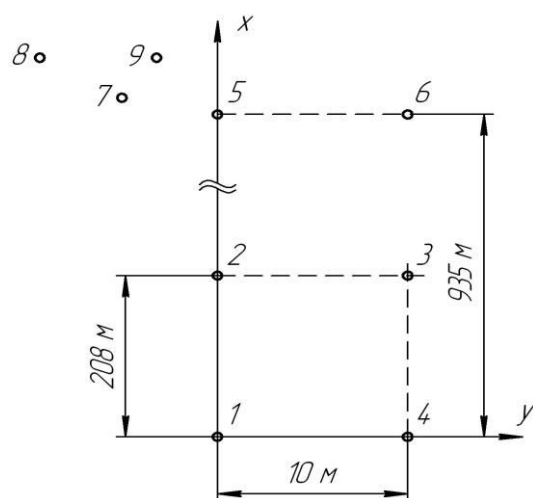


Схема метрологического полигона:

1, 4 – приемные оптико-электронные модули макета; 2, 3 – юстировочные реперные ИК источники излучения; 5 – 9 – позиции стрелков

1. Разработанный макет обеспечил уверенную регистрацию выстрелов из АК-74 и СВД на всех дальностях в соответствии со схемой испытаний; из ВСК зафиксирован только один выстрел из 12.

2. Средние погрешности измерения дальности составили 0,16 – 0,65%, средние погрешности измерения азимута – не более 0,2 угл. мин, средние погрешности угла места цели – не более 0,4 угл. мин.

4. Полученные значения погрешностей измерений в полной мере удовлетворяют изначально поставленным требованиям.

3. Наличие высокоэнергетической помехи в виде сигнальной ракеты не

влияло на возможность и точность обнаружения огневых вспышек при условии их пространственного разделения (т.е. если огонь ракеты не перекрывал пламя выстрела).

4. Макет системы позволяет по принципу селекции по времени обнаружить постоянные низкоэнергетические источники излучения (огонь сигареты наблюдался в 300 последовательных кадрах, а выстрел – в среднем в одном или двух последовательных кадрах).

5. Макет системы позволил уверенно выделить и идентифицировать два одновременных выстрела, сделанных на расстоянии около 20 м.

6. Метод измерения координат в плоскости МФПУ с учетом «энергетического центра» изображения позволил существенно уменьшить погрешность определения дальности до вспышки выстрела по сравнению с измерением координат по целому количеству пикселей. Особенно сильно этот

эффект проявился в полевых испытаниях для выстрелов из АК-74, где погрешность измерения дальности уменьшилась в 3,5 – 6 раз.

В целом, полевые испытания макета в полной мере продемонстрировали на практике правильность выбранной концепции его построения и подтвердили возможность создания автоматической системы оперативного определения полярных координат огневых целей с необходимыми тактико-техническими характеристиками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоконев В.М., Итигин А.М.–Ш., Прудников Н.В., Шлишевский В.Б. Концепция построения оптико-электронной системы автоматического определения координат цели по световой вспышке // Изв. вузов. Приборостроение. – 2003. – № 3. – С. 64 – 66.
2. Белоконев В.М., Итигин А.М.–Ш., Хацевич Т.Н., Шлишевский В.Б. Определитель полярных координат огневых средств, обнаруживающих себя блеском выстрела // Патент РФ № 2 252 442. – Бюл. изобр. – 2005. – № 14.
3. Белоконев В.М., Итигин А.М.–Ш., Михайлов И.О., Хацевич Т.Н., Шлишевский В.Б. Некоторые особенности технической реализации оптико-электронной системы автоматического определения координат цели по световой вспышке // Изв. вузов. Приборостроение. – 2004. – Т. 47, № 9. – С. 73 – 78.

© И.О. Михайлов, С.В. Олейник, Г.А. Уставич, Т.Н. Хацевич, В.Б. Шлишевский,
А.В. Гусаченко, Ю.Л. Кравченко, Б.Н. Новгородов, В.А. Арутюнов,
Н.Г. Богатыренко, А.М. Кучеров, Е.А. Платонова, А.Е. Прокофьев,
А.Ю. Рахметулов, 2006

УДК 681.785

А.С. Рафаилович, В.Б. Шлишевский
КТИ ПМ СО РАН, Новосибирск

КРАТКИЕ ИТОГИ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

В соответствии с соображениями и задачами, изложенными в [1], Конструкторско-технологическим институтом прикладной микроэлектроники СО РАН совместно с Институтом физики полупроводников СО РАН, Сибирской государственной геодезической академией, Санкт–Петербургским государственным университетом информационных технологий, механики и оптики, Государственным оптическим институтом им. С.И. Вавилова, Институтом оптики атмосферы СО РАН, 2 ЦНИИ МО РФ, 3 ЦНИИ МО РФ, 22 ЦНИИ МО РФ, 30 ЦНИИ МО РФ и НИЦ-2 4 ЦНИИ МО РФ в течение 2002 – 2005 гг. была проведена работа, направленная на исследование физико-технологических основ создания отдельных типов элементной базы и оптико-электронных модулей в обеспечение повышения помехозащищенности и

обнаружительной способности обзорно-прицельных и навигационных систем вооружений и военной техники (ВВТ) за счет введения в их состав ультрафиолетовых (УФ) каналов.

Полученные основные результаты можно кратко сформулировать следующим образом:

- Проанализированы, обобщены и систематизированы результаты натурных измерений излучательных и отражательных характеристик целей, фонов и прозрачности атмосферы в УФ области спектра;

- Дан анализ современных тенденций развития и определены технические требования к элементной базе и оптико-электронным модулям для УФ области спектра применительно к системам ВВТ;

- Исследованы технологические возможности и пути создания современных фотокатодных узлов InGaN/AlGaN и вакуумно-полупроводниковых фотодиодов на их основе для УФ области спектра; разработаны требования и рекомендации по использованию вакуумно-полупроводниковых фотодиодов для исследований характеристик целей и фонов в УФ диапазоне и применения в перспективных оптико-электронных системах (ОЭС) ВВТ; оптимизирована конструкция узлов вакуумно-полупроводниковых фотодиодов, обеспечивающая при этом их унификацию с узлами электронно-оптических преобразователей 3-го поколения; разработана необходимая документация и изготовлены экспериментальные образцы вакуумно-полупроводниковых фотодиодов с фотокатодами на основе GaAs/AlGaAs и InGaN/AlGaN; проведены исследования характеристик экспериментальных образцов фотодиодов и оценена возможность их применения в составе аппаратуры для анализа спектральных характеристик целей и фонов в УФ диапазоне и ОЭС ВВТ;

- Определены пути практической реализации высокосветосильного спектрального модуля, сохраняющего заданное спектральное разрешение без сопутствующей фоновой засветки приемника излучения; сделан анализ схем построения, выбор и расчет оптической системы модуля; разработана методика настройки модуля; разработано аппаратное и программное обеспечение управления работой модуля и обработки сигнала; разработана документация и изготовлен экспериментальный образец модуля; проведены его экспериментальные исследования;

- Определены пути практической реализации телевизионного УФ модуля; сделан анализ схем построения, выбор и расчет схемно-конструктивных решений; изготовлен экспериментальный образец УФ объектива; исследована стабильность оптических характеристик УФ фильтров под влиянием внешних воздействующих факторов; разработана документация и изготовлен экспериментальный образец модуля; проведены экспериментальные исследования модуля, определена область применения его в системах ВВТ;

- Разработаны и апробированы методики проверки параметров разрабатываемых элементной базы и оптико-электронных модулей;

- Определены пути практической реализации бортового видеоспектрального модуля УФ диапазона; сделан анализ схем построения, произведены выбор и расчет оптической системы модуля; разработана методика настройки модуля; разработаны аппаратное и программное обеспечение управления работой модуля и обработки сигнала; разработана эскизная конструкторская документация и изготовлен макетный образец модуля; проведены экспериментальные исследования модуля;
- Разработана база исходных данных спектральных и высотных оптических характеристик подстилающей поверхности и атмосферы, необходимая для проведения численного моделирования спектроэнергетических характеристик (СЭХ) излучения фоновых объектов земли и атмосферы для различных условий освещения и наблюдения с учетом широтно-сезонных вариаций в УФ области спектра;
- Разработана база исходных данных, необходимая для дополнения и уточнения моделей излучения объектов и проведения численного моделирования характеристик излучения широкой номенклатуры целей в УФ области спектра;
- Разработаны алгоритмы и программы расчета прозрачности в УФ области спектра для различных условий наблюдения и освещения с учетом широтно-сезонных вариаций;
- Разработаны алгоритмы и программы расчета СЭХ излучения фоновых объектов Земли, тропосферных облаков и атмосферы для различных условий освещения и наблюдения с учетом широтно-сезонных вариаций в УФ области спектра;
- Разработаны алгоритмы и программы расчета СЭХ излучения широкой номенклатуры целей в УФ области спектра;
- Проведено численное моделирование СЭХ излучения целей на естественном фоне;
- Исследованы технологические возможности и определены пути создания высококонтрастных корректирующих полосовых и отрезающих интерференционных фильтров для УФ области спектра с эффективным подавлением остаточного фона в диапазоне 400 – 900 нм;
- Разработаны калибровочные источники монохроматического и широкодиапазонного УФ излучения;
- Определены пути практической реализации малогабаритного бортового спектрального модуля на основе вогнутых дифракционных решеток; сделан анализ схем построения, произведен выбор и расчет оптической системы модуля; разработаны методики настройки модуля; разработано аппаратное и программное обеспечение управления работой модуля и обработки сигнала; разработана эскизная конструкторская документация и изготовлен макетный образец модуля; проведены экспериментальные исследования модуля;
- Определен состав и параметры оборудования светотехнического стенда для проведения предполетных калибровок и градуировок экспериментальной аппаратуры УФ диапазона;

– Разработаны программы и методики натурных испытаний оптико-электронных модулей:

– Подготовлены и проведены натурные испытания разработанных оптико-электронных модулей; состав исследовавшихся объектов фоноцелевой обстановки (ФЦО);

– Разработаны предложения и рекомендации по использованию элементной базы и модулей в измерительных системах и комплексах различного базирования для исследования характеристик ФЦО.

Далее планируется провести измерения на полигонах соответствующих видов войск и планомерные исследования в разные сезоны фонового излучения, прозрачности атмосферы, отражательных характеристик подстилающих поверхностей и искусственных сооружений на оптических трассах различной протяженности с целью сбора и систематизации экспериментальных данных по излучению факелов целей, вспышек выстрелов из артиллерийских орудий и гранатометов, других источников излучения, отражательных характеристик естественных и искусственных объектов, пропускания атмосферы, необходимых для моделирования и анализа ФЦО в УФ диапазоне спектра в интересах МО РФ и других государственных заказчиков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоконев В.М., Крайлюк А.Д., Журавлев П.В., Рафаилович А.С., Шлишевский В.Б. Задачи и перспективы создания современной элементной базы для аппаратуры ультрафиолетового диапазона спектра // Материалы LIII Междунар. научно-техн. конф. «Современные проблемы геодезии и оптики». Ч. III. – Новосибирск: СГГА, 2003. – С. 40 – 42.

© А.С. Рафаилович, В.Б. Шлишевский, 2006

УДК 681.785

А.В. Марков

НИЦ-2 4 ЦНИИ МО РФ, Санкт-Петербург

А.С. Рафаилович, В.Б. Шлишевский

КТИ ПМ СО РАН, Новосибирск

К.Н. Чиков

СПбГУИТМО, Санкт-Петербург

С.С. Гулидов

ФГУП «ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»», Санкт-Петербург

НЕКОТОРЫЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

Основной целью выполненного в августе 2005 г. цикла натурных испытаний являлась экспериментальная оценка возможностей применения ряда

специально разработанных разнотипных оптико-электронных модулей (ОЭМ) для исследования пространственных и спектрально-энергетических характеристик элементов фоноцелевой обстановки (ФЦО) в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне спектра. В соответствии с этим задачами испытаний ставилось:

– Проведение аэросъемки тестовой мишенной обстановки и необходимых синхронных наземных измерений в интересах определения технических характеристик ОЭМ в авиационном варианте эксплуатации и оценки соответствия тактико-технических характеристик ОЭМ поставленным требованиям;

– Проведение аэросъемки и наземных измерений типовых наземных и морских военных объектов в интересах получения разносектральной информации, необходимой для оценки возможностей применения ОЭМ в задачах исследования характеристик ФЦО в УФ диапазоне спектра.

Для решения поставленных задач использовалась бортовая и наземная аппаратура в следующем составе:

1. Авианоситель – комплексная самолетная лаборатория (КСЛ) «Фотон» (самолет Ан-30) НИЦ-2 4 ЦНИИ МО РФ.

2. Испытуемые оптико-электронные модули УФ диапазона – спектральный модуль (СМ) разработки Конструкторско-технологического института прикладной микроэлектроники (КТИ ПМ) СО РАН; телевизионный модуль (ТВМ) разработки КТИ ПМ СО РАН; видеосектральный модуль (ВСМ) разработки Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, состоящий из телевизионного (ТВБ) и видеосектрального (ВСБ) блоков; малогабаритный бортовой спектральный модуль (МБСМ) разработки ФГУП «ВНЦ «Государственный оптический институт им. С.И.Вавилова»».

3. Вспомогательная бортовая аппаратура – цифровая цветная фотокамера CANON EOS 1D Mark II; оптико-электронный сканер «Везувий-ЭК» видимого и инфракрасного диапазонов спектра; видеосектrometer «Фрегат» видимого диапазона спектра; комплекс навигационных спутниковых приемников; комплекс контроля ориентации самолета в пространстве на базе гироскопической ЦГВ-5, радиовысотомера и доплеровского измерителя скорости и угла сноса.

4. Наземные средства измерений и калибровки – объекты мишенного комплекса (специально созданные калибровочные радиальные миры; элементы подстилающей поверхности с известными геометрическими и/или спектроэнергетическими характеристиками); полевой многоканальный фотометр ПМКФ со спектральным каналом, работающим в диапазоне 290 – 380 нм; стандартная метеорологическая и актинометрическая аппаратура (аспирационный психрометр, анемометр, люксметр, актинометр, пиранометр и др.).

В процессе испытаний исследовались следующие объекты ФЦО:

1. Авиационная техника, автомобили аэродромного обслуживания и типовые элементы инфраструктуры аэродрома – фронтальной бомбардировщик Су-24, в различных режимах функционирования: «холодный» на стоянке и с запущенными двигателями; военно-транспортный самолет Ан-30; многоцелевой вертолет Ми-8; аэродромный передвижной агрегат АПА-80; защищенные железобетонные капониры; аэродромные покрытия: взлетно-посадочная полоса, рулежные дорожки, стоянки; характерные фоны в районе аэродрома (поле, лес).

2. Военно-морская техника и элементы инфраструктуры военно-морской базы – дизельная подводная лодка; большие учебные корабли; сторожевые корабли; транспортные и вспомогательные суда; гидротехнические сооружения: молы, причалы, доки; морская поверхность.

3. Бронетанковая техника – танки Т-80 в различных режимах функционирования (стоянка, пробег, прогрев); многоцелевые тягачи МТ-ЛБВ в различных режимах функционирования, в том числе, укрытые маскировочными сетями.

Анализ результатов, полученных в ходе летных и наземных испытаний ОЭМ, позволяет сделать следующие предварительные выводы (окончательное заключение будет сформулировано после полной обработки экспериментальных материалов и дополнительного тестирования аппаратуры в лабораторных условиях):

1. Установлена работоспособность всех испытывавшихся ОЭМ в наземных условиях эксплуатации.

2. В условиях полета:

- Модули СМ и ТВМ функционировали без замечаний;
- Блок ТВБ формировал малоконтрастные зашумленные изображения с рядом темных пятен по полю, природа возникновения которых связана, по предварительным оценкам, с осыпанием фотокатода приемника излучения;

- Блок ВСБ не обеспечил регистрации полезных сигналов (превышающих шумы) либо по причине низкой чувствительности приемника излучения, либо из-за возможных технических неисправностей (периодически проявлявшихся сбоев синхронизации, нарушений контактов в электронной части прибора);

- Модуль МБСМ функционировал с многочисленными отказами, связанными с недоработанностью системы регистрации и программного обеспечения.

3. В целом, практически подтверждена возможность использования испытывавшихся экспериментальных образцов ОЭМ в задачах исследования пространственных и спектрально-энергетических характеристик элементов ФЦО в УФ диапазоне спектра. При этом ТВМ уже в реализованном варианте обеспечивает на высотах до 1 500 м получение изображений с качеством, достаточным для их распознавания до типа объектов военной техники, в том числе, малоразмерных и малоконтрастных.

4. Результаты обработки экспериментальных материалов

свидетельствуют, что такие технические характеристики ОЭМ, как пространственное разрешение, поле зрения, время записи спектра, соответствуют поставленным требованиям. В то же время, анализ чувствительности приборов показывает ее недостаточный уровень для ТВБ и ВСБ, использующих приемник УПЗС-023 разработки ЦНИИ «Электрон».

5. Получен уникальный набор экспериментальных изображений и спектральных характеристик объектов военной техники в УФ диапазоне спектра, которые были занесены в базы данных по характеристикам ФЦО, разрабатываемые в НИЦ-2 4 ЦНИИ МО РФ в интересах информационного обеспечения перспективных систем наблюдения и наведения.

6. В качестве рекомендаций по направлениям дальнейшего развития оптико-электронной аппаратуры УФ диапазона спектра и применения ее для исследования характеристик ФЦО предлагается:

- Продолжить работы по получению новых экспериментальных данных с целью выявления направлений оптимизации параметров перспективных УФ систем и определения фоноцелевых сцен и условий наблюдения, для которых они являются более эффективными по сравнению со средствами наблюдения, работающими в других спектральных диапазонах;

- Предусмотреть проведение цикла экспериментальных работ по исследованию характеристик ФЦО с задействованием ОЭМ, подтвердивших свои высокие информационные возможности в ходе испытаний, а именно – модуля ТВМ в авиационном варианте применения (например, в составе специального оборудования КСЛ «Фотон», регулярно привлекаемой к работам по исследованию характеристик ФЦО в интересах Минобороны РФ), предусмотрев увеличение поля обзора (как минимум, до 30°), а также калибровку регистрируемых изображений по встроенному эталону, и модуля СМ в наземном варианте применения или в варианте установки на низкоскоростной авианоситель (вертолет), предусмотрев конструктивные решения, облегчающие наведение (прицеливание) прибора на исследуемый объект;

- Исходя из потенциально наибольшей информативности гиперспектральной видовой информации выполнить доработку модуля ВСМ за счет установки в нем приемника излучения нового поколения (например, разработки КТИ ПМ СО РАН, аналогичного использовавшемуся в модуле ТВМ).

© А.В. Марков, А.С. Рафаилович, В.Б. Шлишевский, К.Н. Чиков, С.С. Гулидов, 2006

УДК 535.411

В.Г. Максимов, Г.В. Симонова, В.А. Тартаковский

ИМКЭС (Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН), Томск

ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

В оптическом производстве немаловажное место занимает процесс контроля качества изготовления формы оптических деталей, поскольку дефекты оптики непосредственно связаны с качеством изображения. Интерферометрия способна обеспечить требуемый практикой высокоточный контроль. В любом интерферометре результат сложения опорного и объектного волновых полей проектируется на плоскость регистрации в виде интерферограммы, которая представляет собой изменяющееся в пространстве и во времени распределение интенсивности интерференционного поля. При равных амплитудах опорного и объектного полей интерферограмма в момент регистрации может быть представлена в виде:

$$I(x, y) = [1 + \cos(\Phi(x, y) + \theta x)]\mu(x, y) + \nu(x, y),$$

где $\Phi(x, y)$ - разность фаз интерферирующих полей, θ - несущая пространственная частота интерферограммы, определяемая углом наклона между интерферирующими полями, $\mu(x, y)$ и $\nu(x, y)$ - мультипликативная и аддитивная компоненты шума. Проблема восстановления фазы из интерферограммы заключается в определении неизвестной функции $\Phi(x, y)$ по зарегистрированной $I(x, y)$ и последующем выделении из $\Phi(x, y)$ фазы объектного поля. Специфика реальных интерферограмм требует от методов восстановления фазы наличие особых качеств. Их можно охарактеризовать как независимость от вида интерференционной картины и формы обрабатываемой детали, а так же нечувствительность к нелинейным искажениям интерферограммы, неравномерности фона освещения $\mu(x, y)$, и компонентам аддитивного шума $\nu(x, y)$ особенно с частотами, перекрывающими область полезного сигнала.

Обзор и классификация методов восстановления фазы интерферограммы приведены во многих публикациях по интерферометрии [1-8]. Развитие современных методов анализа интерферограмм происходит в двух направлениях: 1) анализ отдельной интерферограммы – статическая интерферометрия; 2) анализ нескольких интерферограмм – динамическая интерферометрия.

Подходы статической интерферометрии можно разделить на несколько групп:

1. Методы построения экстремальных линий интерферограммы основаны на интерполяции фазы между найденными опорными точками экстремумов интерференционных полос. Для подавления аддитивного шума эти методы требуют предварительной линейной фильтрации. Для методов данной группы характерно присутствие искажений в краевой зоне апертуры. По способу реализации они делятся на сканирующий [9] и адаптивный [10] классы. Для первого класса требуется наличие процедур сортировки и упорядочивания найденных опорных точек. Второй класс ограничен в области применения по виду интерференционной картины и форме обрабатываемой области.

2. Методы, основанные на представлении интерферограммы в виде аналитического сигнала [1], базируются на известных свойствах

преобразования Гильберта. Требуют соответствия интерферограммы аналитическому сигналу. Требуют наличие априорной информации о спектре полезного сигнала при оптимизации частотных фильтров. С использованием одномерной обработки, при форме апертуры отличной от прямоугольной, эти методы требуют процедуры увязки отдельных сечений фазы. Распространение теории аналитического сигнала на двумерный случай [11] находится в стадии разработки и не находит широкого применения.

3. Методы симуляции пространственного сдвига [12] основаны на создании выборки образцов интерферограммы путем сдвига области считывания в направлениях не параллельных направлению интерференционных полос. Восстановление фазы происходит методами фазового сдвига динамической интерферометрии. Применение пространственного сдвига предполагает, что изменение фазы вдоль интерференционной полосы пренебрежимо мало. Поэтому для реализации данного метода интерферограмма должна состоять из достаточно большого количества прямых полос. Методы пространственного сдвига независимы от формы обрабатываемой области, но область перекрытия всей выборки всегда меньше апертуры исходной интерферограммы. Данные методы чувствительны к шумам и требуют достаточно высокого качества интерферограмм.

4. Оптимизационные подходы [13, 14, 15]. Методы данной группы основаны на поиске коэффициентов разложения функции $\Phi(x, y)$ и сравнении построенной по ним идеальной интерферограммы с исходной реальной интерферограммой. Коэффициенты разложения определяются из условия максимального соответствия модели интерферограммы данным интерференционных измерений. Используются итерационные методы. Сходимость и существование единственного решения возможны только в случае, когда итерируемый оператор является оператором сжатия. В общем случае сжатие реализуется в некоторой области, причем начальное приближение должно в ней находиться. Выполняются или нет эти условия для модели интерферограммы и конкретных экспериментальных данных, установить довольно трудно.

Подходы динамической интерферометрии [5-8] разделяются на методы, использующие временную модуляцию и методы пространственного фазового сдвига. Для этих подходов характерно введение временной зависимости в интерферограмму через фазовый сдвиг $\varphi_0(t)$. В первом случае происходит непрерывный анализ точек плоскости регистрации (x, y) во временной области, во втором случае происходит совместный анализ интерферограмм, полученных для заданных значений $\varphi_0(t_i)$. Методы временной модуляции требуют наличие прецизионных модуляторов и многоканальных детекторов. Методы пространственного сдвига предполагают точный контроль фазовых сдвигов $\varphi_0(t_i)$ по всей плоскости регистрации.

Каждый из перечисленных методов анализа интерферограмм имеет ряд преимуществ и недостатков, но взятый в отдельности не решает всех проблем интерферометрии. Чисто алгоритмические подходы, без целенаправленного

формирования интерферограмм, не способны решить задачи технологического контроля формы поверхности. Необходимо разработать стратегию контрольно-измерительного эксперимента.

Применение средств электронной регистрации интерференционной картины, цифровой вычислительной техники с большим объемом памяти для хранения изображения позволяет осуществить измерительный эксперимент, формирующий выборку интерферограмм с различным числом интерференционных полос. Восстановленные из интерферограмм фазы усредняются, и по среднему значению фазы судят о качестве контролируемой поверхности. Выборка интерферограмм имеет статистически независимые искажения в силу некоррелируемости шума на различных пространственных частотах. Усреднение нескольких интерферограмм позволяет понизить дисперсию восстановления, вызванную случайными ошибками, и, кроме того, уменьшить влияние нестабильности внешних условий.

Для осуществления предлагаемой стратегии проведения контрольно-измерительного эксперимента необходимо иметь автоматизированную систему компьютерной обработки интерферограмм непосредственно оцифровывающую сигнал с видеокамеры и активный интерферометр, позволяющий формировать выборку интерферограмм, изменяя угол α между оптическими осями опорного и объектного пучков в интерферометре (рис. 1). Осуществить это можно при наклоне эталонной или контролируемой поверхностей посредством пьезокерамического привода. Наклон поверхности приводит к дополнительным абберрационным искажениям, что нежелательно при высокоточном контроле. Искажения волнового фронта, вызванные наклоном поверхности проанализированы в работе [16], где в численном эксперименте оценено искажение формируемого волнового фронта при перестройке интерферометра на разное число интерференционных полос, и определено максимально возможное число интерференционных полос 25, позволяющее проводить высокоточный контроль с погрешностью, не превышающей величины $\lambda/150$ (где λ – длина волны источника излучения).

Для реализации статистической процедуры необходимо определить обрабатываемую область проекции интерферограммы на ПЗС матрице, затем выбрать направление и ширину прямоугольной области сканирования и провести сканирование, поворачивая эту область с определенным шагом, перекрывая между собой соседние области сканирования. Увязка всех областей сканирования в одну поверхность может быть осуществлена применением метода наименьших квадратов в зоне их пересечения.

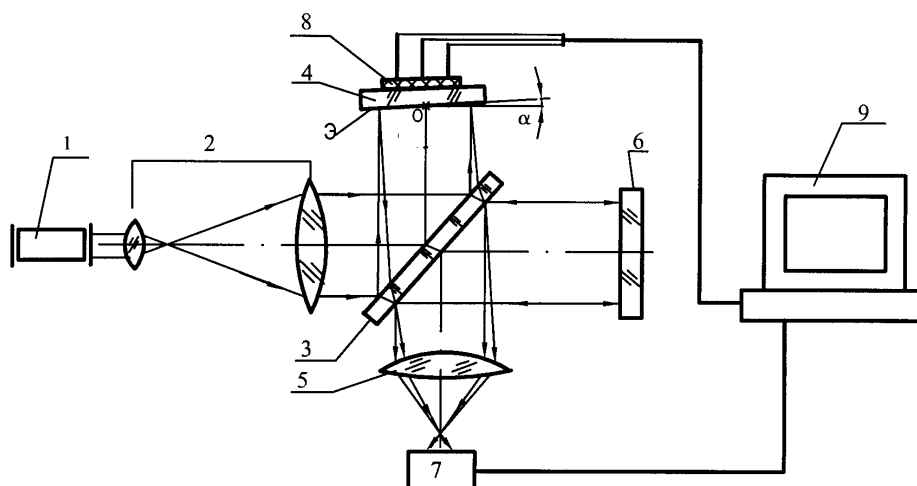


Рис. 1. Интерферометр: 1 – источник излучения (лазер); 2 – коллиматор, 3 – светоделитель, 4 – эталонная поверхность; 5 – объектив; 6 – контролируемая поверхность; 7 – TV-камера; 8 – пьезокерамический привод; 9 – компьютер с автоматизированной системой обработки интерферограмм

Использование прямоугольной области сканирования позволяет повысить эффективность подавления шумов. Поворот и смещение областей сканирования обеспечивает возможность обработки апертуры отличной от прямоугольной.

Таким образом, для дальнейшего развития интерференционного высокоточного контроля формы поверхности необходимо обратить внимания на разработку активных интерферометров, обеспечивающих возможность реализации статистических процедур на выборке интерферограмм с различным числом и ориентацией интерференционных полос.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Витриченко Э.А., Лукин В.П., Пушной Л.А., Тартаковский В.А, Проблемы оптического контроля, Новосибирск: Наука, 1990, 351 с.
2. D. Malacara and S. L. Devore, Optical Shop Testing, 2nd ed., D.Malacara, Ed., John Willey and Sons, New York, 1992, p. 455.
3. Бoryньяк Л. А., Логинов А. В., Меднис П. М., Сарнадский В. Н. Физические принципы практической интерферометрии, Автометрия, № 4, 1993, С.59.
4. V. I. Vlad and D. Malacara “Direct spatial reconstruction of optical phase from phase-modulated images”, Chap 4 in E. Wolf, Progress in Optics XXXIII, Elsevier Science B.V. 1994, pp 261-317.
5. K. A. Goldberg, “Interferogram analysis”, Chap 4 in Extreme Ultraviolet Interferometry, University of California, Berkley, 1997, pp. 177-247.
6. D. Malacara, M. Servin, Z. Malacara, Interferogram Analysis for Optical Testing, 1st ed., Marcel Dekker, New York, 1998, p. 101.
7. Y. Surrel, Fringe analysis, National Institute of Metrology, Paris, 1998, p. 56.
8. M. Servin and M. Kujawinska, “Modern fringe pattern analysis in interferometry”, Chap. 12 in Handbook of Optical Engineering, D. Malacara and J. Thompson, Eds., Marcel Dekker Inc, New York, 2001, pp 373-426.
9. A. Anand, Tracing of interference fringes using average gray value and simultaneous row and column scan. Optics & Laser Technology № 35, 2003, pp.73-79.
10. V. Maximov, V. Tartakovsky, S. Chudinov, Adaptive algorithm for interference fringe tracing. Proc. SPIE, V. 5743, 2004, pp. 271-281.

11. T. Bullock, G. Sommer, "A novel approach to the 2-D analytic signal" in CAIP'99, F.Solina and A. Leonardis (Eds.), Springer 1999, pp. 25-32.
12. J. C. Wyant, Vibration Intensive Interferometric Optical Testing, OSA Optical Fabrication and Testing, Rochester, New York, October 2004, pp.11-13.
13. S. Vasquez-Montiel, J. J. Sanchez-Escobar, O. Fuetes, Obtaining the phase of an interferogram by use of an evolution strategy: Part 1, Appl. Opt. V. 41, № 17 2002, pp. 3448-3452.
14. O. Fuetes, T. Solorio, Interferogram analysis using active instance-based learning, From Proceeding (403) Artificial Intelligence and Applications, ACTA Press 2003.
15. J. J. Sanchez-Escobar, S. Vasquez-Montiel, Experimental interferogram analysis using an automatic polynomial fitting method based on evolutionary computation, Opt. Eng. V. 44, № 4, 2005.
16. Симонова Г.В. "Методы уменьшения инструментальных погрешностей интерферометров с совмещенными ветвями". Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Томск, 2005, 130 с.

© В.Г. Максимов, Г.В. Симонова, В.А. Тартаковский, 2006

УДК 620.179.15

Ю.В. Обидин, К.В. Петухов, А.К. Потапников, В.Ю. Сартаков
КТИ НП СО РАН, Новосибирск

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ТОМОГРАФ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТВЭЛ

В атомной промышленности поставлена задача увеличения срока службы тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) с целью более рационального использования ядерного топлива и снижения затрат на производство электроэнергии. Решение этой задачи невозможно без повышения надежности и всестороннего контроля изделий при их производстве. В КТИ НП СО РАН разработан и сертифицирован высокопроизводительный рентгеновский компьютерный томограф для контроля сварных швов тепловыделяющих элементов ядерных энергетических реакторов ВВЭР-1000 [1]. Внешний вид томографа представлен на



рис. 1.

Рис. 1. Внешний вид Томографа

Особенность томографа состоит в том, что для обеспечения необходимого сочетания чувствительности и производительности, максимум времени, отведенного на контроль, используется для получения проекций, а все вычисления выполняются за время загрузки изделия (1 - 2 секунды).

Томограф содержит источник рентгеновского излучения, сканирующее устройство, рентгеновский детектор и персональный компьютер с программными средствами для управления узлами томографа, сбора проекционных данных, реконструкции цилиндрических слоев, обнаружения и измерения дефектов.

В качестве источника излучения в томографе используется двухфокусная трубка Comet, подключенная к рентгеновскому аппарату YXLON-226. Рабочее напряжение 180-200 кВ. Прецизионное сканирующее устройство с микропроцессорным управлением обеспечивает подачу изделий в зону контроля, их фиксацию с помощью цангового пневмозажима и вращение вокруг продольной оси. Сканирующее устройство имеет малые габариты, автономное питание и управляется от ЭВМ через последовательный интерфейс RS-232 или шину USB.

С целью получения максимальной экспозиционной дозы в пределах времени, отведенного на контроль, в томографе применен многоэлементный детектор, позволяющий при любых ракурсах наблюдать зону контроля целиком и регистрировать двумерные проекции.

Оптическая схема детектора приведена на рис.2. Для преобразования рентгеновского излучения, прошедшего через объект контроля, в видимый свет используется монокристаллический сцинтиллятор CsJ(Tl). Полученное на сцинтилляторе видимое изображение переносится на фотокатод усилителя яркости объективом «Вега-20». В качестве усилителя используется микроканальный ЭОП типа ЭПМ-44Г с диаметром фотокатода 18 мм. Изображение проекции с экрана ЭОП регистрируется цифровой видеокамерой VSCTT-249 фирмы «Видеоскан». В камере применен объектив A13444 с фокусом 8 мм фирмы WPI. Камера подключена к видеоадаптеру VS2001, установленному в PCI слот компьютера.

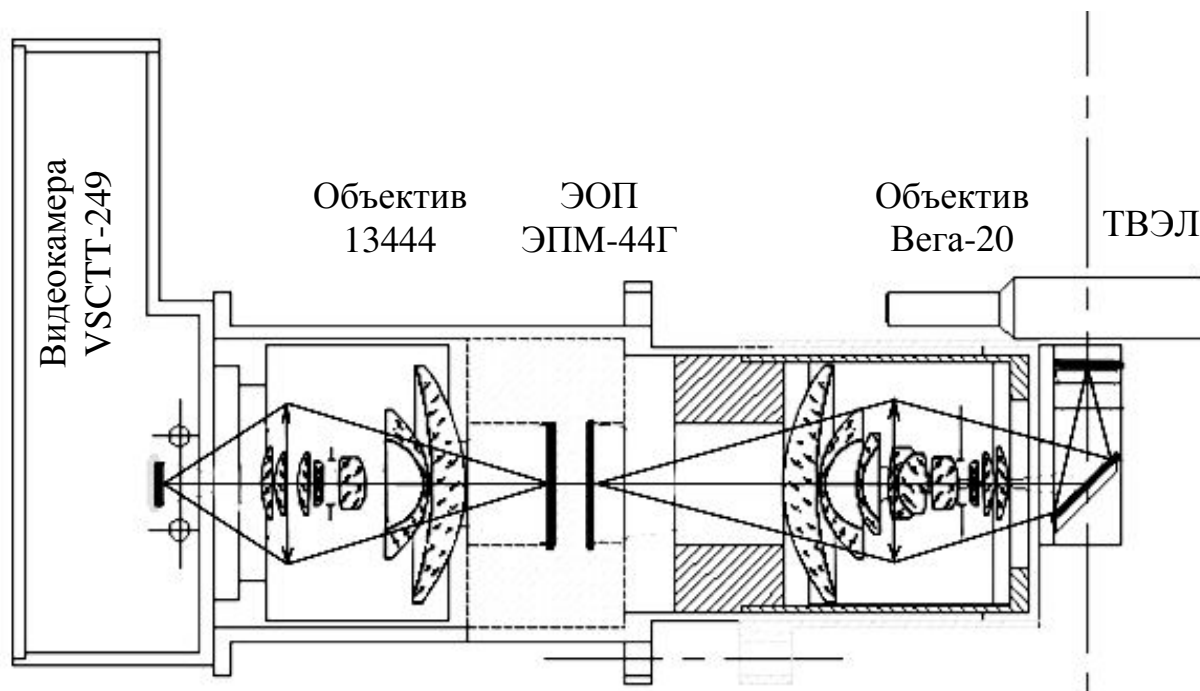


Рис.2. Оптическая схема детектора

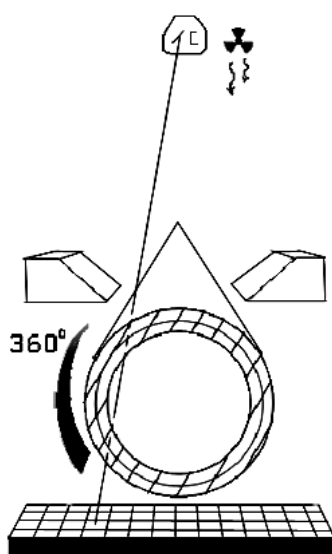


Рис. 3. Схема получения проекций

Защита ЭОП и видеокамеры от рентгеновского излучения обеспечена конструкцией детектора, так как эти элементы выведены из-под прямого рентгеновского излучения и, кроме того, они закрыты сверху свинцовыми экранами. В томографе предусмотрена возможность юстировки детектора непосредственно под рентгеновским излучением с помощью специального тест объекта, устанавливаемого в сканирующую систему вместо тепловыделяющего элемента.

В процессе контроля ТВЭЛ делает полный оборот за 1 минуту, а детектор регистрирует при этом 400 проекций размером 200×50 пикселей.

На рис. 3 показана схема получения теневых проекций, где схематически изображены медные компенсаторы, установленные в блоке коллиматоров.

Компенсаторы служат для ограничения динамического диапазона сигнала. Их положение регулируется с помощью микроподвижек так, чтобы избежать пересвечивания ЭОП. В схеме получения проекций расстояние от трубки до ТВЭЛа составляет 200 мм, диаметр ТВЭЛа – 9,1 мм. Зона контроля имеет следующие размеры: диаметр цилиндра - 8,8 мм, высота - 3,5 мм, толщина стенок - 0,7 мм.

Все элементы канала регистрации проекций установлены внутри защитной камеры, обеспечивающей защиту персонала от излучения, что позволяет применять томограф вне специальных помещений.

Программное обеспечение (ПО) работает под управлением операционной системы Windows 2000 и состоит из двух программ: исследовательской и рабочей. Исследовательская программа создана на этапе разработки томографа специально для моделирования и проверки технических решений. Она позволила оценить влияние параметров регистрации на качество проекций, исследовать на моделях объект контроля и канал регистрации томографа, выбрать оптимальные параметры детектора и режим регистрации. Моделирование выполнялось с помощью специальной библиотеки, подключаемой к программе вместо библиотеки обслуживания детектора. В существующих библиотеках, предназначенных для построения 3D моделей (например, DirectX и OpenGL), трехмерные поверхности представляются треугольниками, при этом имеются средства, позволяющие рассчитывать отраженный и рассеянный свет при визуализации объектов. В созданной библиотеке кроме треугольников в набор базовых элементов введены простейшие 3х-мерные фигуры - цилиндр и сфера, имеется возможность расширения этого списка. Такое представление выгодно отличается от триангулярного меньшим количеством хранимых и обрабатываемых данных и приводит к снижению погрешности моделирования. Кроме того, для каждой поверхности задается коэффициент поглощения и направление (по какую сторону от поверхности находится поглощающая среда).

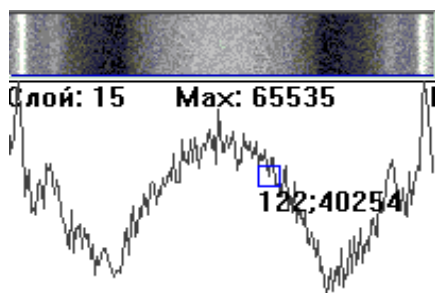


Рис. 4. Модельная проекция с профилем сигнала

В соответствии с заказанной сценой регистрации (рис. 3) программа проводит луч, соединяющий источник излучения с детектором и определяет координаты точек пересечения луча с объектами сцены. Таким образом, луч разбивается на отрезки, на каждом из которых задан коэффициент поглощения. Программа производит необходимые вычисления, в результате которых получается 2-х мерная проекция, вид которой приведен на рис. 4.

Библиотека моделирования позволяет вводить шумы в процесс регистрации и учитывать не моноэнергетический характер излучения, получаемого с рентгеновской трубки. С помощью исследовательской программы выбран оптимальный для сварного шва ТВЭЛ алгоритм реконструкции – получение многослойного панорамного изображения методом фильтрации и обратного проецирования. Оптимальное количество одновременно реконструируемых слоев равно пяти. При фильтрации используется фильтр вида $\sin(x)/x$. Граничная частота (размер фильтра) оптимизированы с целью получения минимальной погрешности при измерении пор размером 200 мкм. Результаты реконструкции представляются в 3D-графике (рис. 5) или в виде развернутой двумерной панорамы (рис. 6).

Рабочая программа содержит минимальный набор алгоритмов, необходимых для функционирования аппаратных средств томографа. Кроме этого в нее встроены функции, реализующие алгоритм реконструкции многослойных панорамных изображений и алгоритм обнаружения и измерения дефектов типа пор в двумерном панорамном изображении сварного шва.

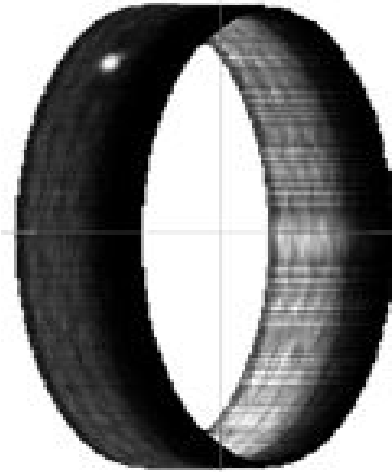


Рис. 5. Цилиндрический

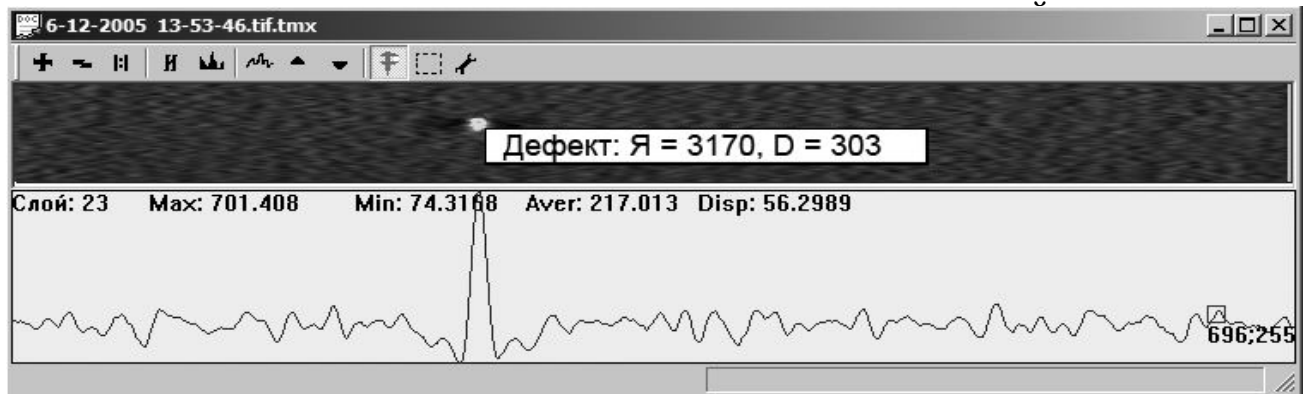
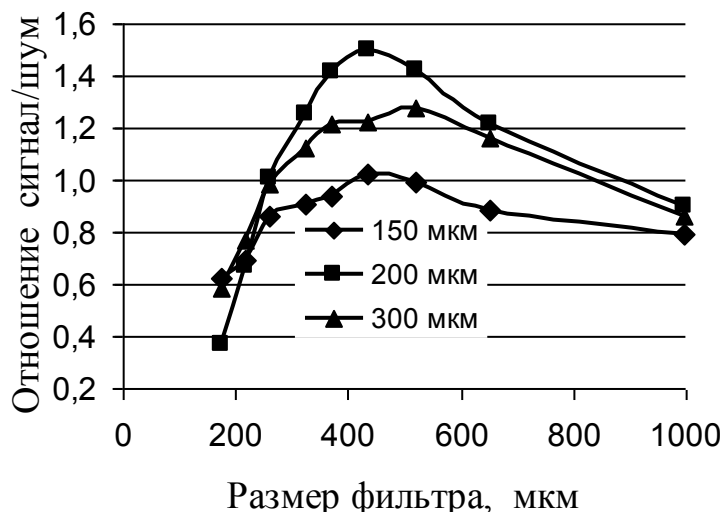


Рис. 6. Панорамное изображение шва с профилем сигнала

Вкратце существо задачи измерения дефектов по их панорамным изображениям заключается в получении такой оценки реконструированного изображения дефекта, которая бы удовлетворяла требованиям точности и однозначности при преобразовании в размер дефекта. Исследовалось несколько алгоритмов измерения пор. Лучшие результаты достигнуты при использовании алгоритма, описанного в [2]. Суть его приведена ниже.

Находится точка изображения, яркость которой превышает заданный порог P . Вычисляется центр массы изображения в окрестности найденной точки. В центр массы помещается центр окружности, радиус R которой выбирается равным размеру фильтра. Граничная частота фильтра (и радиус R) подбирались экспериментально. Далее определяется суммарная яркость всех точек, которые располагаются внутри окружности и считаются принадлежащими дефекту.



Преобразование яркости в размер дефекта производится по калибровочной кривой.

Для производителя тепловыделяющих элементов очень важно точное измерение пор, имеющих размер, близкий к границе, разделяющей годные изделия и брак (200 мкм). В ходе экспериментов выбраны такие параметры

Рис. 7. Сигнал/шум от размеров фильтра

обработки изображений, при которых ошибка измерения дефектов минимальна. На рис. 7 представлены зависимости отношения сигнал/шум от диаметра круга, по которому считается суммарная яркость. Как видно из рисунка наилучшее отношение сигнал/шум достигается при размере фильтра равном 400 мкм. Этот размер соответствует размеру передаточной функции томографа.

При подготовке томографа к сертификации как средства измерений был разработан комплект метрологических средств и документов. Калибровка томографа и проверка его метрологических характеристик осуществлялись с использованием стандартных образцов (СО), которые созданы при участии лаборатории СОП ОАО «НЗХК». СО представляет собой обрезок оболочки ТВЭЛ с заглушкой, приваренной на установке электронно-лучевой сварки в соответствии с техпроцессом. На наружной поверхности СО высверлено глухое цилиндрическое отверстие, имитирующее пору. Было изготовлено и сертифицировано два комплекта стандартных образцов: один – рабочий и один – контрольный, всего 14 штук. В силу того, что нанесенные на СО дефекты имеют форму, отличную от шара, был аттестован такой параметр как «эффективный диаметр», т.е. диаметр шаровой поры, объем которой эквивалентен объему эталонного отверстия. Размеры отверстий в микронах (диаметр/глубина) для контрольных СО приведены в табл. 1.

Таблица 1

Размер мкм	К-Т797	К-Т798	К-Т799	К-Т800	К-Т801	К-Т802	К-Т803
По чертежу	100/100	120/120	150/150	200/200	250/250	300/300	350/350
По паспорту	113/112	124/122	145/163	202/195	262/257	301/306	352/351
Эффективный	109	120	150	193	252	296	342

Из табл. 1 видно, что в изготовленных СО отклонения линейных размеров отверстий от заданных не превышает 13% (в случае минимального дефекта) и 3% - для разбраковочного размера (200 мкм).

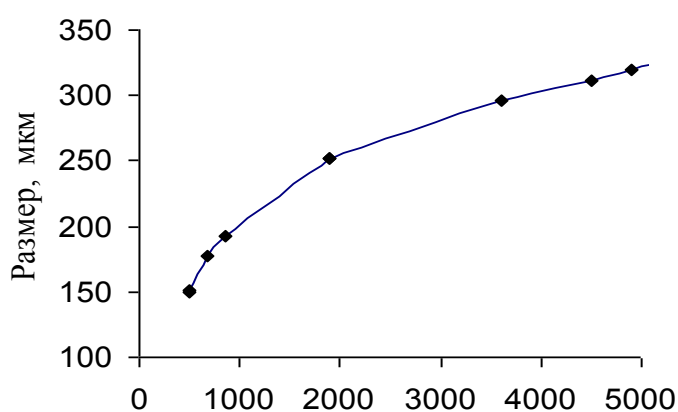


Рис. 8. Калибровочная кривая

В ходе подготовки томографа к испытаниям каждый из 14 стандартных образцов был измерен по 25 раз. Зафиксировано среднее значение суммарной яркости и ее среднеквадратическое отклонение от среднего значения. Полученные данные использованы для построения калибровочной кривой (рис. 8), в соответствии с которой

осуществляется преобразование суммарной яркости в размер дефекта.

С целью сертификации томографа как средства измерений были проведены испытания в соответствии с программой, согласованной с ОАО «НЗХК» и ФГУП СНИИМ. В процессе испытаний томографа максимальная погрешность измерений по всем образцам составила не более 27 мкм, подтверждена

возможность обнаружения пор диаметром 120 мкм. Среднеквадратическое отклонение измеренных значений получено равным 11 мкм. Комиссия признала результаты испытаний положительными.

Заключение

Создан высокопроизводительный томограф для измерения дефектов сварного шва ТВЭЛ в темпе 1 изделие в минуту. Основные характеристики томографа:

Чувствительность к порам	100 мкм
Диапазон измерений	от 150 до 350 мкм
Погрешность измерений	50 мкм
Время контроля	1 минута

Оптимизированы алгоритм быстрой реконструкции зоны сварного шва ТВЭЛ. Разработана методика и программное обеспечение автоматического обнаружения и измерения дефектов типа пор по панорамным изображениям, полученным методом реконструктивной томографии.

Томограф сертифицирован ВНИИМС как средство измерений, используемое при контроле внутренних пор сварных швов ТВЭЛ. Получен сертификат RU.E.27.007.A № 21866.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рентгеновская томографическая станция контроля сварных соединений ТВЭЛов. Воробьев В.В., Карлов Ю.К., Обидин Ю.В. и др. Датчики и системы. - 1999. - № 2. - С. 6-9.
2. Определение размеров дефектов сварного шва по томограммам. Обидин Ю.В., Поташников А.К., Тяжев И.В. Автометрия. - 2001. - № 5. - С. 37-43.

© Ю.В. Обидин, К.В. Петухов, А.К. Поташников, В.Ю. Сартаков, 2006

ПРИМЕНЕНИЕ Nd:YAG/I₂ – ЛАЗЕРА В КАЧЕСТВЕ ОПТИЧЕСКОГО СТАНДАРТА ДЛИНЫ В БАЛЛИСТИЧЕСКОМ ГРАВИМЕТРЕ

Введение. С появлением высокостабильных источников когерентного излучения (лазеров) баллистический метод измерения абсолютного значения ускорения силы тяжести g стал наиболее точным и перспективным для дальнейшего развития. Абсолютное значение g определяют этим методом по результатам измерения пути и времени свободного падения пробной массы в вакуумированной камере. В схеме этих измерений используется лазерный интерферометр, т.е. мерой пути служит длина волны лазера, стабилизированного по атомному реперу в спектре его излучения. Мерой интервалов времени являются сигналы прецизионного (например, рубидиевого) стандарта частоты.

Принцип действия баллистического гравиметра основан на измерении интервалов времени T_i , за которые свободно падающее тело проходит заданные интервалы пути S_i при ($i = 1, \dots, N$). Вычисляемое по результатам измерений интервалов S_i и T_i значение g определяет величину ускорения силы тяжести в точке, находящейся внутри интервала измерений.

Непосредственное освещение интерферометра стабилизированным лазером с йодной ячейкой поглощения вносит в результат измерений дополнительную погрешность, определяемую шириной спектра излучения, воспроизводимостью и долговременной стабильностью частоты оптического стандарта. Еще один фактор – ограниченные поперечные размеры пучка лазерного излучения – также может быть источником ошибок определения g . Распространение такого пучка сопровождается дополнительными (по сравнению с интерференцией плоских волн) дифракционными фазовыми сдвигами.

Nd:YAG лазер с внутрирезонаторным удвоением частоты, стабилизированный по резонансам насыщенного поглощения в I_2 . Исходя из требования получения минимальных значений ошибок, обусловленных параметрами используемого излучения при измерении ускорения силы тяжести g , Институтом лазерной физики СО РАН был спроектирован и изготовлен оптический стандарт частоты ILP I₂/532-1. Стандарт состоит из Nd:YAG лазера бегущей волны с внутрирезонаторным удвоением частоты и системы стабилизации частоты лазера по резонансам насыщенного поглощения в молекулярном йоде [1].

Таблица 1

Основные параметры стандарт частоты ILP I ₂ /532-1:	
Выходная мощность во внешнюю оптическую схему	$\geq 5\text{ мВт}$
Относительная стабильность частоты не хуже	10-10
Относительная воспроизводимость частоты не хуже	2×10^{-10}
Частота лазера при стабилизации по резонансу $\alpha 1 R(56), 32-0$	563259651950 ± 50 кГц
Модовый состав	TEM _{00q}
Поляризация	Линейная

Nd:YAG лазер бегущей волны представляет собой двухзеркальный резонатор с непланарной геометрией. Оптический диод базируется на эффекте Фарадея (поворот поляризации) в кристалле YAG при приложении к нему магнитного поля в направлении, параллельном направлению распространения луча в резонаторе (рис.1).

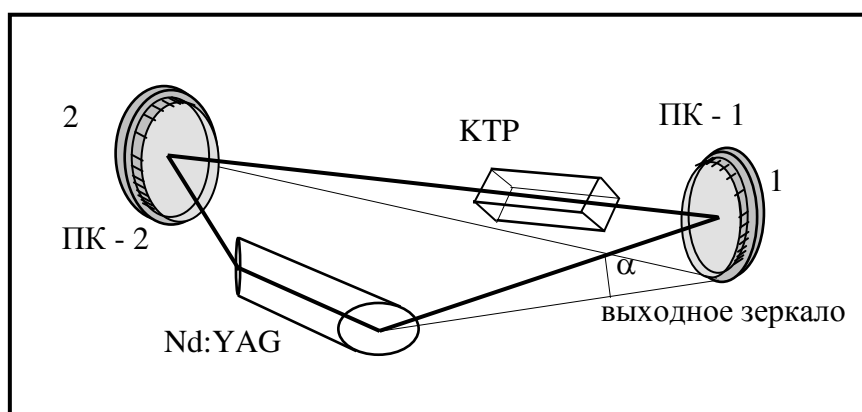


Рис. 1. Оптическая схема Nd:YAG лазера

Накачка лазера производится с помощью лазерного диода на длине волны 808 нм с выходной мощностью порядка 1.7 Вт. Ввод излучения накачки производится через зеркало 2 резонатора. Зеркало 1 служит для вывода излучения на длине волны 1064 нм и второй гармоники частоты излучения на длине волны 532 нм (в системах, предназначенных для измерения гравитационного поля, основное излучение на длине волны 1064 нм блокируется на выходе лазера и не используется в схеме стабилизации частоты). Для удвоения частоты излучения лазера используется внутрирезонаторный кристалл КТР.

Одновременно с функцией внутрирезонаторного удвоения частоты кристалл КТР используется для перестройки частоты излучения лазера в больших пределах, что дает возможность стабилизировать частоту излучения лазера по ряду линий поглощения молекулярного йода в пределах диапазона

перестройки ~ 700 ГГц. Для стабилизации частоты лазера часть излучения на длине волны 532 нм направляется в поглощающую ячейку с парами молекулярного йода. Оптическая схема стабилизации частоты представлена на рис. 2. Система стабилизируется по нулю сигнала первой гармоники резонанса насыщенного поглощения (для гравиметров на переходе a_1 сверхтонкой структуры линии R56,32-0, соответствующему центру диапазона перестройки лазера) в I_2 . Электрооптический модулятор (ЭОМ) служит для фазовой модуляции насыщающей волны (используется для формирования сигнала ошибки в системе стабилизации частоты). Пробная волна после прохождения через поглощающую ячейку поступает на фотоприемник. Сигнал ошибки детектируется с помощью синхронного детектора и система АПЧ, управляя пьезоэлементами (ПК-1 и ПК-2), стабилизирует частоту излучения лазера.

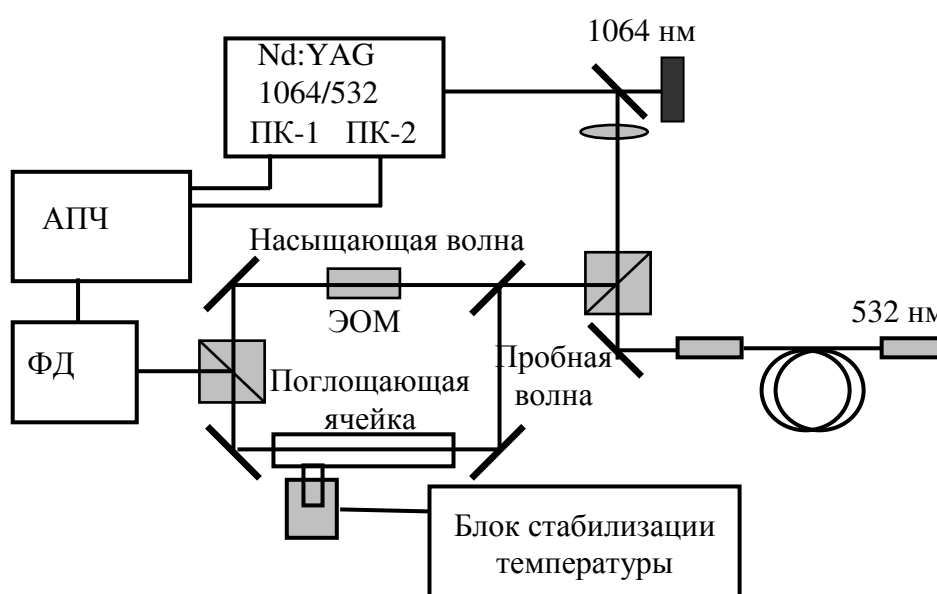


Рис. 2. Оптическая схема стабилизации частоты

Часть излучения, не используемая для стабилизации частоты, выводится из корпуса через одномодовое оптоволокну с сохранением поляризации. Данное излучение (мощность ~ 5 мВт) используется во внешней оптической схеме. Стабилизация частоты может производиться как в ручном, так и в автоматическом режимах.

Адаптация стандарта частоты для работы в баллистическом гравиметре и предварительные исследования параметров лазерного луча в интерферометре баллистического гравиметра. Испытания оптического стандарта Nd:YAG/I2 производилось на базе баллистического гравиметра ГАБЛ [2,3]. В адаптированном варианте оптической системы гравиметра вместо He-Ne рабочего и контрольного лазеров использовался Nd:YAG/I2 оптический стандарт частоты. Излучение стандарта вводилось в оптическую систему гравиметра с помощью одномодового оптического волоконного кабеля P1-630A-FC-2 с сохранением поляризации. Вместо штатного коллиматора в оптической системе гравиметра был установлен асферический коллиматор

F220FC-A. Кроме того, в системе были заменены светоделитель и поворотные зеркала, рассчитанные под новую длину волны – 532 нм. Фотоприемник выходного сигнала интерферометра (лавинный фотодиод) в адаптированном варианте системы был вынесен из интерферометра и конструктивно располагался в блоке контроллера гравиметра. Выходной сигнал интерферометра подавался на фотоприемник с помощью оптоволоконного кабеля M29L02 – SMA. Волоконные кабели снабжены оптическими разъемами, что обеспечивает удобство при транспортировке и способствует минимизации времени запуска всей системы на новом месте.

Баллистический гравиметр ГАБЛ с встроенным Nd:YAG/I₂ оптическим стандартом частоты в сентябре 2005 г. был доставлен в Международное бюро весов и мер (BIPM, Севр, Франция) для участия в Седьмой Международной сверке абсолютных гравиметров ICAG-05. Перед началом гравиметрических измерений было произведено сличение используемого нами оптического стандарта Nd:YAG/I₂ с оптическим стандартом Международного бюро весов и мер. В результате сличений установлено, что частота излучения оптического стандарта ILP I₂/532-1 составляет 563 259 652 143(20) kHz, (что соответствует длине волны 532.24557601(2) нм) и отличается от частоты, приведенной в техническом паспорте ILP I₂/532-1 (табл. 1) на 193 kHz. И хотя при этом ошибка определения g не превышает 5×10^{-10} м/с², в дальнейших расчетах использовалось значение частоты, определенное в результате сличения с оптическим стандартом Международного бюро весов и мер.

Седьмая Международная Сверка Абсолютных Гравиметров ICAG-2005. Для установления единства международных абсолютных гравиметрических измерений раз в четыре года в Международном бюро весов и мер (BIPM, Севр, Франция) проводится Международная сверка абсолютных гравиметров.

28 апреля 2005 на объединенном совещании BIPM, CCM WGG (Working Group on Gravimetry of Consultative Committee on Mass) и SG CAG (Study Group 2.1.1 on Comparison of Absolute Gravimeters of Sub-Commission 2.1 of International Association of Geodesy) было принято решение об организации и проведении 7-ой Международной сверки абсолютных гравиметров ICAG-2005. Сверке был присвоен статус ориентировочных исследований (pilot study) согласно правилам для основных сравнений (key comparison) [3]. К сверке были допущены девятнадцать исследовательских групп из шестнадцати стран, представляющих семь типов абсолютных гравиметров. Гравиметры типов: JILA, FG5, A10 и GABL – основаны на принципе свободного падения пробного тела, а в гравиметрах IMGC и TBG – использован принцип подбрасывания пробного тела вверх. Срок проведения абсолютных измерений ускорения силы тяжести g был установлен с 5 по 19 сентября 2005 г.

В течение сверки гравиметром ГАБЛ было выполнено три серии измерений: 22.09.05 на пункте А, 23.09.05 на пункте В и 24.09.05 повторные измерения на пункте А. По предварительным оценкам, базирующимся на материалах предыдущих сверок, результаты измерений весьма близки к приписываемым значениям для данных пунктов (окончательные результаты будут получены после обработки материалов всех участников сверки ICAG-

2005). Отметим, что повторные измерения гравиметром ГАБЛ на пункте А отличаются всего лишь на 3,6 микрогала ($3,6 \times 10^{-8}$ м/с²). Расширенная инструментальная неопределенность гравиметра ГАБЛ определена как $1,1 \times 10^{-7}$ м/с². Результаты исследования показали, что разработанный Институтом лазерной физики СО РАН Nd:YAG/I2 оптический стандарт с успехом может быть использован в качестве стандарта длины для баллистического гравиметра, а разработанная в Институте автоматики и электрометрии СО РАН базовая конструкция абсолютного лазерного баллистического гравиметра со встроенным Nd:YAG/I2 стандартом частоты является прототипом гравиметра нового поколения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 04-22-08062 офи_а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. M.V.Okhapkin, M.N.Skvortsov, A.M.Belkin, N.L.Kvashnin and S.N.Bagayev. Tunable single-frequency diode-pumped Nd:YAG ring laser at 1064/532 nm for applications of optical frequency standard // Opt. Commun. 203 (2002) 359-362.1.
2. Арнаутов Г.П., Калиш Е.Н., Смирнов М.Г., Стусь Ю.Ф., Тарасюк В.Г. Лазерный баллистический гравиметр ГАБЛ-М и результаты наблюдений силы тяжести //Автометрия. 1994. № 3.
3. Арнаутов Г.П., Калиш Е.Н., Стусь Ю.Ф., Смирнов М.Г. Высокопрецизионное измерение ускорения силы тяжести лазерным интерферометрическим способом // Приборы, 2003, № 6 (36), С. 57-62.
4. T.J. Quinn, Guidelines for CIPM key comparisons carried out by Consultative Committees, BIPM, Paris, 1 March 1999 with modifications by the CIPM, in October 2003 <http://www.bipm.org/utis/en/pdf/guidelines.pdf>

© Ю.Ф. Стусь, Е.Н. Калиш, М.В. Охапкин, М.Н. Скворцов, 2006

УДК 681.783
С.А. Шойдин
СГГА, Новосибирск

ИНФОРМАЦИОННАЯ ЕМКОСТЬ ГОЛОГРАММ В ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЯХ

How do you get people to notice something, they have seen a million times? – известный рекламный слоган голографической продукции фирмы Du Pont [1]. Ответ на этот вопрос менеджеры Du Pont находят в применении вместо полиграфических рекламных картинок – голографических. Действительно, колоссальная информационная избыточность голограмм позволяет произвести на потенциального потребителя значительно большее впечатление, чем обычное фото, даже очень высокого качества. Например, вращая перед собой голограмму, можно видеть один и тот же объект с разных ракурсов, с одной стороны заглядывать в те части изображения, которые закрыты самим объектом

при его рассматривании с другого ракурса. Это создает иллюзию присутствия реального объекта и привлекает внимание. Количественно информационная емкость голограмм рассчитывалась в работах, посвященных голографическим запоминающим устройствам [2], и на много порядков превосходит информационную емкость лучших дисплеев и фотографий. Однако, исследуя этот вопрос, можно обнаружить, что количество информации, необходимое для понимания необычности увиденного, не так уж и велико. Так, висящее перед голограммой изображение, производящее на человека сильнейшее впечатление своей необычностью [3], может быть простым плоским предметом, кодирование которого проще, чем обыкновенное фото. Такой висящий в воздухе предмет может быть даже не изображением реального объекта, а более простой, абстрактной фигурой, даже просто точкой, на кодирование положения в пространстве которой достаточно нескольких бит. Это аналогично задаче распознавания цели, когда её изображение содержит много информации, а вывод свой - чужой содержит всего 1 бит. Из сказанного выше напрашивается вывод о необходимости более детального информационного анализа структуры изображений при создании голографических устройств рекламы. Аналогично, правильная постановка задачи создания виртуального дизайна направляет нас на разработку абстрактных изображений, несущих в себе специальные психологические эффекты [4]. В заключение следует сказать, что вопрос создания голографического кинематографа [5] также упирается сегодня в ограниченную пропускную способность информационных каналов. В табл. 1 видны количественные оценки информационной емкости стационарного сигнала, проходящего от предмета до наблюдателя по различным каналам. Видно, что выводы, к которым приходит наблюдатель, видя эти изображения, заключаются в крайне малом объеме информации, не сравнимом с реальной информационной емкостью сигнала. Можно с очевидностью предположить, что один из ближайших путей создания голографического кинематографа тесно связан с переосмыслением информационной избыточности динамического трехмерного изображения с целью определения, какую его часть и как следует фиксировать на голограммах.

Таблица 1

Носитель	Количество информации на поле А4 (200*300) мм ²
Фото	$5 \cdot 10^6$ бит
Стере фото	10^7 бит
Панорамное фото	$5 \cdot 10^6$ бит * $K \approx 10^8$ бит
Голограмма	$S/(\lambda/\omega)^2 = 10^7$ бит/мм ² * 10^5 мм ² = 10^{12} бит
Световая волна, рассеянная объектом	?
Образ на сетчатке глаза.	$7 \cdot 10^6$ бит (цвет) $7 \cdot 10^7$ (ч/б)
Промежуточный образ	?
Обработанное мозгом изображение	<i>Миша, ты? (16 бит.)</i> <i>Привет Василий! (22 бит.)</i>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Du Pont Magazine, Wilmington, № 3, 1997, p. 6-9.
2. Соскин С. И., Шойдин С. А. Расчет оптической схемы голографического запоминающего устройства. *Опт. и спектр.* – 1978. - Т. 44. - № 3, с. 566-573.
3. Шойдин С. А., Кондаков В. Ю. Устройство для демонстрации декоративных голограмм. Свидетельство на полезную модель № 21460. - 2002.
4. Дж. Гиббсон. Когнитивная психология. - М.: Наука, 1977. -С. 325.
5. Комар В. Г., Серов О. Б. Изобразительная голография и голографический кинематограф. – М.: Искусство, 1987.

© С.А. Шойдин, 2006

УДК 681.7.067.2

С.В. Олейник, Т.Н. Хацевич

СГГА, Новосибирск

ОБЪЕКТИВЫ СО СМЕНОЙ ПОЛЯ ЗРЕНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ РАБОТЫ С МАТРИЧНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ В ДИАПАЗОНЕ 8 – 12 МКМ

Для совершенствования моделей тепловизоров «смотрящего» типа нами был разработан ряд объективов с дискретной сменой поля зрения, предназначенных для работы с матричными фотоприемниками в спектральном интервале 8 – 12 мкм.

Анализ существующих оптических систем с дискретной сменой поля зрения (фокусного расстояния) позволил сформулировать основные направления разработки: в частности, было решено разрабатывать линзовую систему как наименее чувствительную к механическим и температурным воздействиям по сравнению с зеркальной и зеркально-линзовой; исходя из габаритных требований, было решено использовать только продольные перемещения компонентов; отказ от применения любых несферических поверхностей был вызван существующей технологией производства; для повышения светосилы системы поставлено требование постоянства величины относительного отверстия при смене поля.

Было разработано несколько вариантов оптических систем с различными техническими характеристиками (табл.1).

Таблица 1. Характеристики объективов

№ схемы	узкое/широкое поле, 2 ω , град.	фокусное расстояние, мм	относительное отверстие	длина системы, мм
1	5 / 15	180 / 60	1,5	361
2	5 / 15	180 / 60	1,5	230
3	15 / 45	60 / 20	1,0	180

4	10 / 30	90 / 30	1,0	175
5	7 / 21	120 / 40	1,2	216
6	11 / 22	40 / 20	1,2	115
7*	5,5 / 11,0	40 / 20	1,0	82,0

В качестве базовой была принята пятикомпонентная схема (рис.1) с постоянным расстоянием между первой поверхностью фронтальной линзы и плоскостью изображения. Все варианты оптических систем рассчитаны для матричного фотоприемника с линейными размерами 13,44 x 10,08 мм.

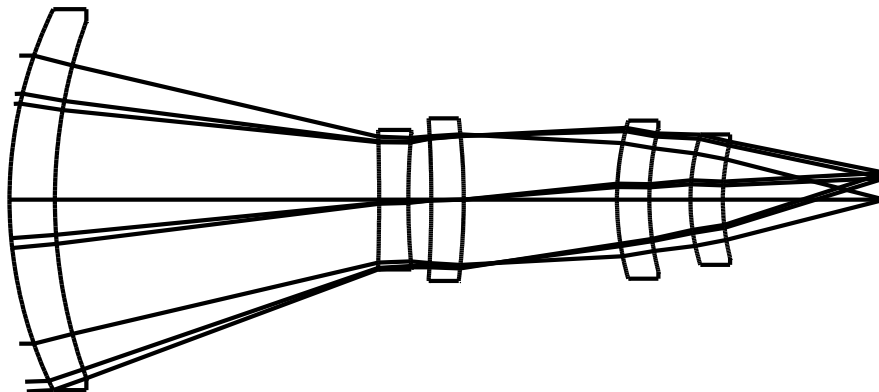


Рис.1. Базовая схема семейства объективов с дискретной сменой увеличения

При смене поля зрения происходит изменение значения относительного отверстия системы. Следовательно, что бы величина относительного отверстия оставалась постоянной необходимо так выбрать оптические силы подвижных компонентов, чтобы при смене поля зрения угол падения главного луча на апертурную диафрагму оставался неизменным.

На рис.2 представлена система с апертурной диафрагмой, расположенной на неподвижной линзе 4 и перемещающимися вдоль оптической оси компонентами 2 и 3. Все компоненты рассматриваемой системы выполнены из германия.

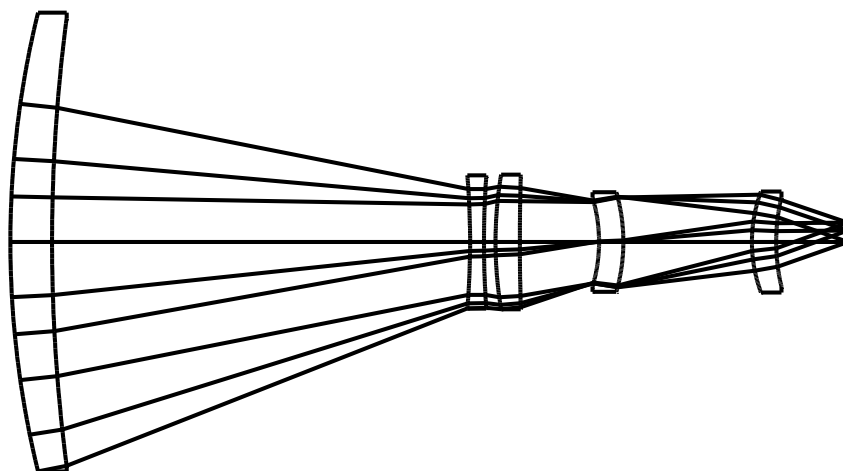


Рис.2. Объектив с дискретной сменой поля зрения и неподвижной апертурной диафрагмой

Сокращение длины системы 2 (табл.1) потребовало увеличения числа подвижных компонентов до трех (линзы 2 - 4), применения в качестве материала отдельных линз арсенида галлия GaAs и совмещения апертурной диафрагмы с подвижной второй линзой (рис. 3). Использование двух указанных материалов позволило получить объектив – ахромат.

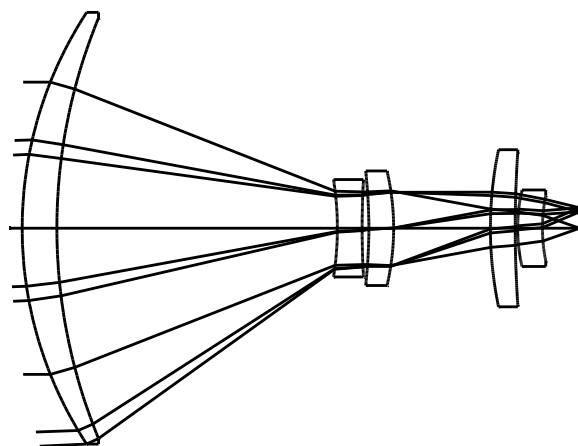


Рис.3. Объектив с дискретной сменой поля зрения и подвижной апертурной диафрагмой

Для всех выше описанных объективов в табл. 2 приведены результаты расчета значений функции концентрации энергии в круге рассеяния диаметром 40 мкм для различных точек в плоскости изображений (y' - координата этих точек), свидетельствующие о согласованности качества изображения разработанных объективов с параметрами современных матричных фотоприемных устройств.

Таблица 2. Концентрация энергии в пятне диаметром 0,04 мм

№ схемы	Концентрация энергии, отн. ед.					
	широкое поле			узкое поле		
	$y_1' = 0$ мм	$y_2' = 5$ мм	$y_3' = 8$ мм	$y_1' = 0$ мм	$y_2' = 5$ мм	$y_3' = 8$ мм
1	0,85	0,85	0,85	0,87	0,81	0,72
2	0,90	0,83	0,72	0,90	0,87	0,85
3	0,76	0,70	0,70	0,80	0,66	0,73
4	0,75	0,70	0,65	0,75	0,65	0,73
5	0,80	0,80	0,73	0,80	0,80	0,80
6	0,90	0,90	0,90	0,90	0,83	0,80
7*	0,88	0,88	0,86	0,9	0,88	0,85
* - высота изображения $y_1' = 0$ мм, $y_2' = 2$ мм, $y_3' = 4$ мм						

Дальнейшее исследование полученных систем показало, что замена сферической формы одной из преломляющих поверхностей на асферическую второго порядка позволяет сократить число линз до четырех с сохранением высокого качества изображения при величине относительного отверстия $D : f' = 1 : 1$ (схема №7* в таблицах).

Величина хроматизма положения в узком поле составляет 0,02 мм, в широком – 0,025 мм. Продольная сферическая aberrация не превышает 0,05 мм как в узком, так и в широком полях зрения. Объектив имеет отрицательную дисторсию, величина которой составляет 5% в узком и 1% в широком поле. Данный объектив может применяться, например, с матричным фотоприемником 160 x 120 элементов, размер элемента которого равен 0,035 мм.

В заключение отметим, что диаметр апертурной диафрагмы во всех разработанных объективах при смене углового поля остается неизменным.

© С.В. Олейник, Т.Н. Хацевич, 2006

УДК 681.7.067.2
С.В. Олейник
СГГА, Новосибирск

ВЫСОКОСВЕТОСИЛЬНЫЙ ОБЪЕКТИВ ДЛЯ ПНВ

Объектив, представленный в настоящей статье предназначен для работы в приборах ночного видения, выпускаемых ОАО «Катод». Основным требованием было повышение контрастности в изображении фоно-целевой обстановки при сохранение существующих массогабаритных характеристик объектива. Серийный прототип изображен на рис. 1.

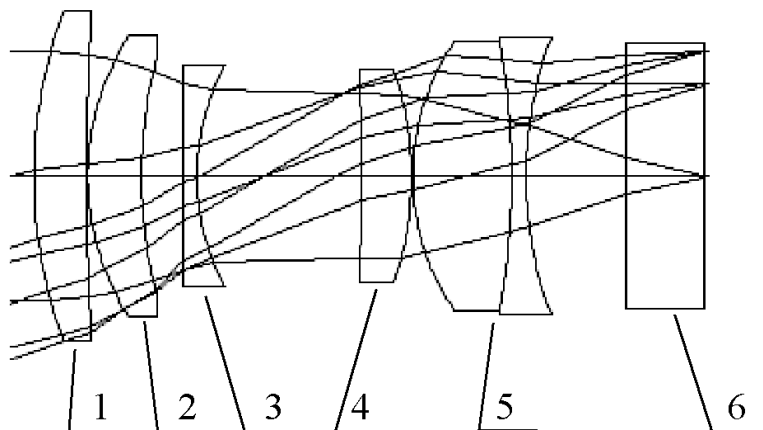


Рис.1 – Объектив-прототип

Численные значения величины ЧКХ для разных точек поля зрения при различном разрешении приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики объектива-прототипа

Разрешение штр./мм	Контрастность, отн.ед.			
	$\omega' = 0^\circ$	$\omega' = 7^\circ$	$\omega' = 13^\circ$	$\omega' = 20^\circ$
10	0.96	0.73	0.41	0.73
20	0.91	0.49	0.14	0.33
30	0.82	0.29	0.16	0.23
40	0.74	0.21	0.11	0.15

Из таблицы видно, что качество изображения внеосевых точек хуже, чем точки на оси. Анализ прототипа показал, что причинами, снижающими качество изображения, являются, в основном, астигматизм и кривизна поля (рис. 2).

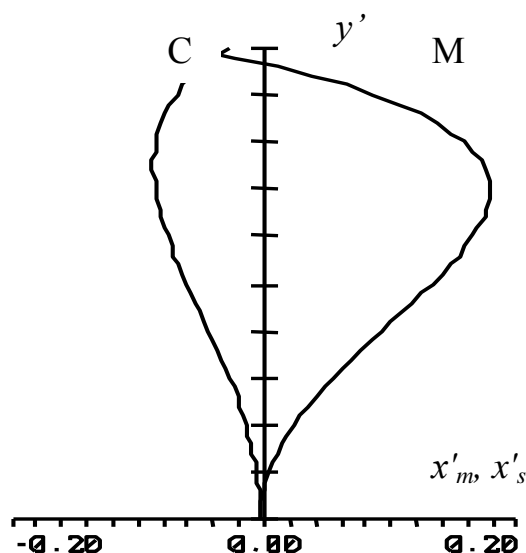


Рис. 2. Астигматизм и кривизна поля прототипа

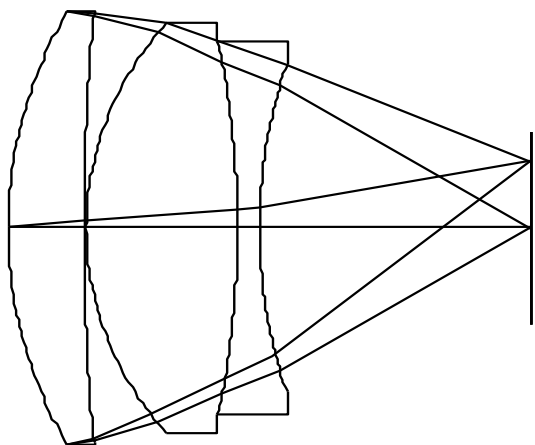


Рис. 3. Силовые элементы объектива-прототипа

Проанализируем схему объектива. Компоненты 1 – 3 уменьшают диаметр световых пучков относительно главного луча, т.е. сжимают их не изменяя сходямость. Основную силовую функцию выполняет блок, состоящий из положительного мениска 4 и склеенного элемента 5, установленного перед защитным стеклом 6. Получаем схему "одионочная линза + склейка" (рис. 3). Оптичсская сила поровну распределена между компонентами позволяя избежать малых радиусов. Реверсия положительного мениска 4, осуществленная в серийном объективе, уменьшает кривизну изображения. Однако данная схема не позволяет добиться высокого качества изображения, при величине

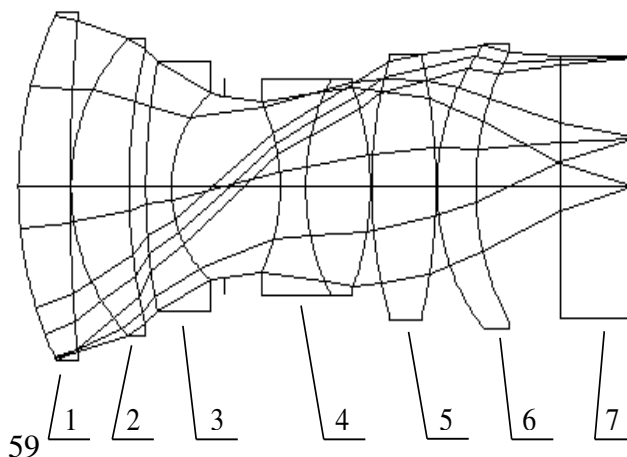


Рис.4. Разработанный объектив

относительного отверстия $D/f' > 1:2$.

В разработанном объективе (рис. 4) произведена реверсия компонентов 4 и 5 и введен дополнительный коррекционный мениск 6. Компоненты 1 – 3 обеспечивают сходимость лучей и поэтому их суммарная оптическая сила отлична от нуля. Склейка 4, расположенная непосредственно за апертурной диафрагмой обладает отрицательной силой и служит, в основном, для коррекционных целей. Основным силовым компонентом является положительная двояковыпуклая линза 5. Таким образом, получившаяся система имеет следующее расположение элементов: силовой компонент – коррекционный компонент – силовой – коррекционный.

Такое построение, в отличие от прототипа, имеющего схему коррекционный – силовой – силовой, обладает несколькими преимуществами.

Во-первых, симметричное расположение силовых и коррекционных компонентов позволило более благоприятно распределить углы падения световых лучей на преломляющие поверхности.

Во-вторых, увеличение высоты падения главных лучей на преломляющую поверхность силового компонента 5 с последующим полным разделением осевого и крайнего пучков на коррекционном мениске 6, на котором они не имеют общих точек, способствовало коррекции аберраций наклонного пучка.

В-третьих, изменение углов падения лучей на преломляющие поверхности позволило повысить размер относительного отверстия системы с $D/f' = 1:1,24$ до $D/f' = 1:1,17$. Изменение сортов стекол в склеенном компоненте 4 и силовой линзе 5 позволило уменьшить хроматизм положения в 1,7 раза. Величина астигматизма разработанного объектива составляет 0,045 мм тогда как в прототипе она равна 0,25 мм. Кривизна изображения уменьшена в 2 раза. Вместе с тем, несколько увеличилась величина сферической аберрации, что снижает значение ЧКХ осевого пучка. В табл. 2 представлены числовые данные, а на рис. 5 приведен график ЧКХ разработанного объектива.

Таблица 2. Характеристики разработанного объектива

Разрешение штр./мм	Контрастность, отн.ед.			
	$\omega' = 0^\circ$	$\omega' = 7^\circ$	$\omega' = 13^\circ$	$\omega' = 20^\circ$
10	0.95	0.90	0.90	0.90
20	0.87	0.75	0.73	0.77
30	0.77	0.57	0.52	0.63
40	0.63	0.42	0.35	0.52

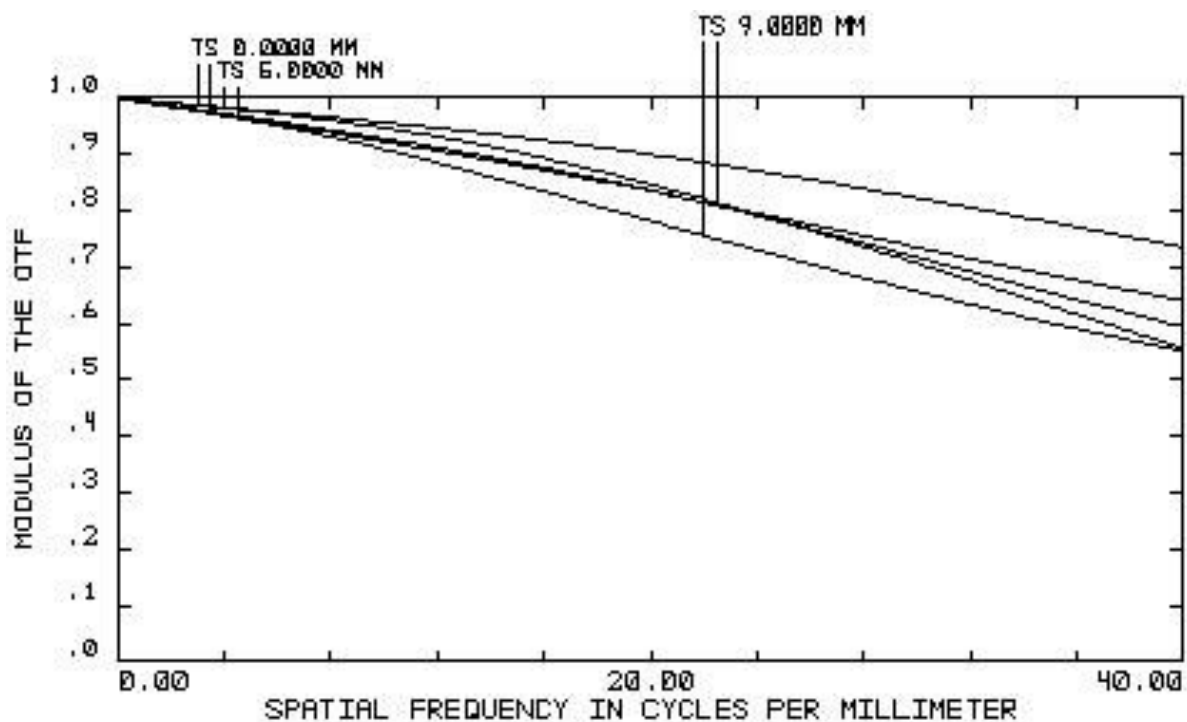


Рис.5 – График ЧКХ разработанного объектива

© С.В. Олейник, 2006

УДК: 681.782.44
 А.А. Котельников
 СГГА, Новосибирск

РАЗРАБОТКА ОПТИКО-ВОЛОКОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Цель работы заключалась в разработке и изготовлении оптико-волоконного интерферометра, который в дальнейшем будет использоваться для проведения исследовательских работ по определению физических параметров микромеханического волновода.

Вследствие стремительного развития науки и техники быстро возрастает роль точных измерений, многие из которых осуществляются интерференционными методами. В последнее время все шире применяются оптические методы измерения упругих волн. Это связано с тем, что оптические методы свободны от всех недостатков, присущих другим методам: они практически безинерционны; не требуют непосредственного контакта с исследуемым объектом; позволяют измерять колебания очень малых (доли микрон) поверхностей; обладают высокой чувствительностью; являются абсолютными методами измерений; обеспечивают высокую точность и воспроизводимость результатов измерений.

Использование оптических волокон позволяет сделать такие устройства чрезвычайно компактными и экономичными, значительно уменьшить вес и

энергопотребление устройства, что весьма актуально поскольку современные требования снижения размеров и веса устройств, расширение их динамического диапазона, уменьшение потребляемой мощности и стоимости подталкивают разработчиков к созданию новых компонентов и поиску их оптимальных архитектур.

Одной из решаемых проблем при создании измерительного интерферометра было создание минимального регулируемого зазора между торцом оптического волокна и микромеханическим волноводом.

Эта проблема решена путем создания рычажно-винтовой конструкции, обеспечивающий зазор в 1 мкм. Принципиальная схема интерферометра приведена на рис. 1.

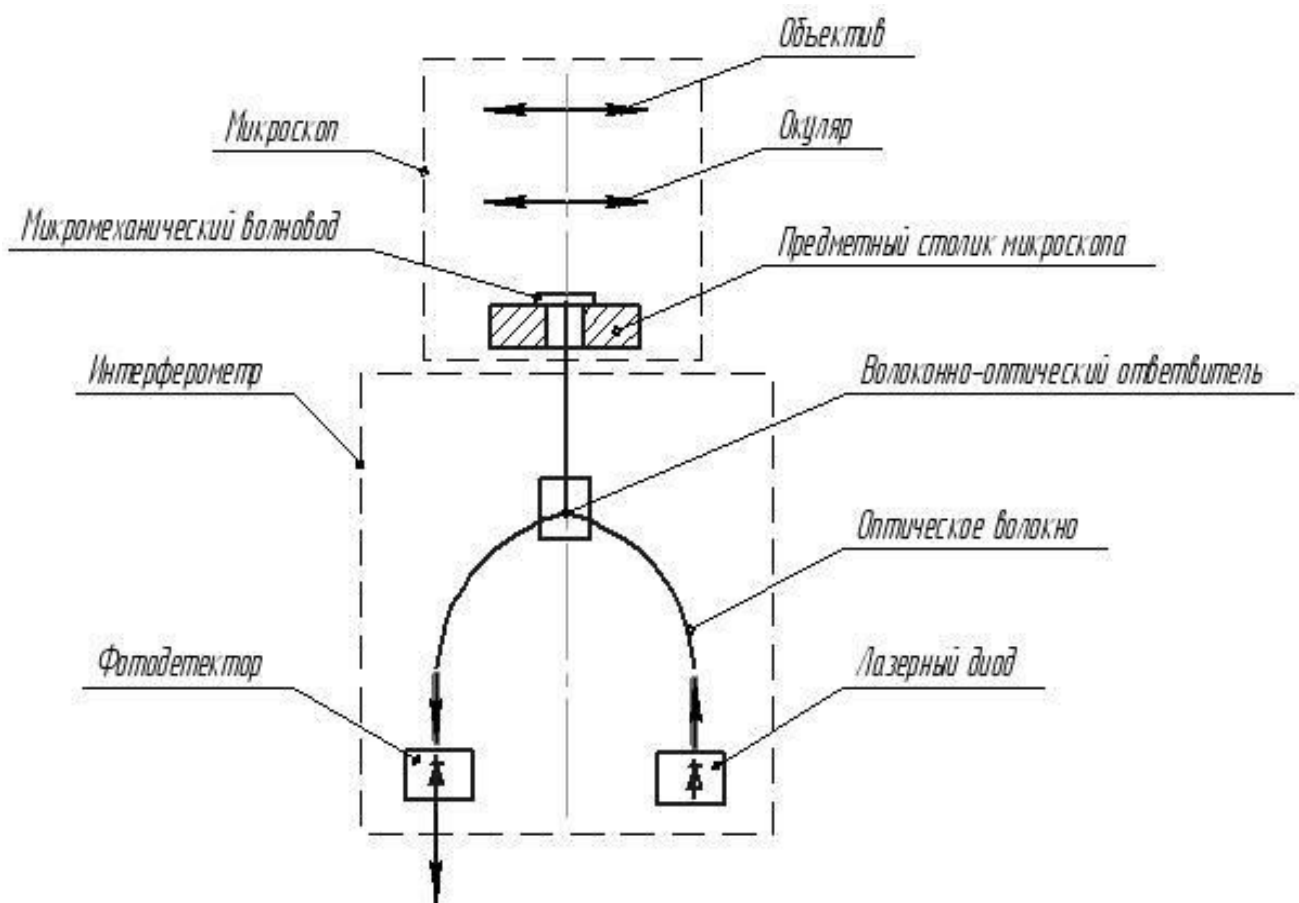


Рис. 1. Схема торцевого оптико-волоконного интерферометра с микроскопом

© А.А. Котельников, 2006

ОСОБЕННОСТИ ЭОП ДЛЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

В последние годы растет интерес приборостроителей к созданию оптико-электронных систем (ОЭС), работающих в ультрафиолетовой (УФ) области спектра. Это обусловлено широким использованием данных приборов в различных областях науки и техники, например, в экологическом мониторинге Земли для дистанционной индикации разливов нефтепродуктов на воде и суше. Кроме того, применение ОЭС, например телевизионных камер, работающих в УФ области спектра, в качестве дополнительного информационного канала в составе многоспектральных ОЭС может значительно повысить их информативность [1].

В настоящее время в России и за рубежом быстрыми темпами развивается элементная база для создания данных ОЭС – фотодиоды, фотоэлектронные умножители, ПЗС и др. Одним из приемников УФ излучения являются и электронно-оптические преобразователи (ЭОП). Трудностью создания ЭОП для УФ области спектра, в отличие от ЭОП для видимого диапазона, является небольшой выбор материалов для изготовления фотокатодов, а также прозрачных материалов для входных окон.

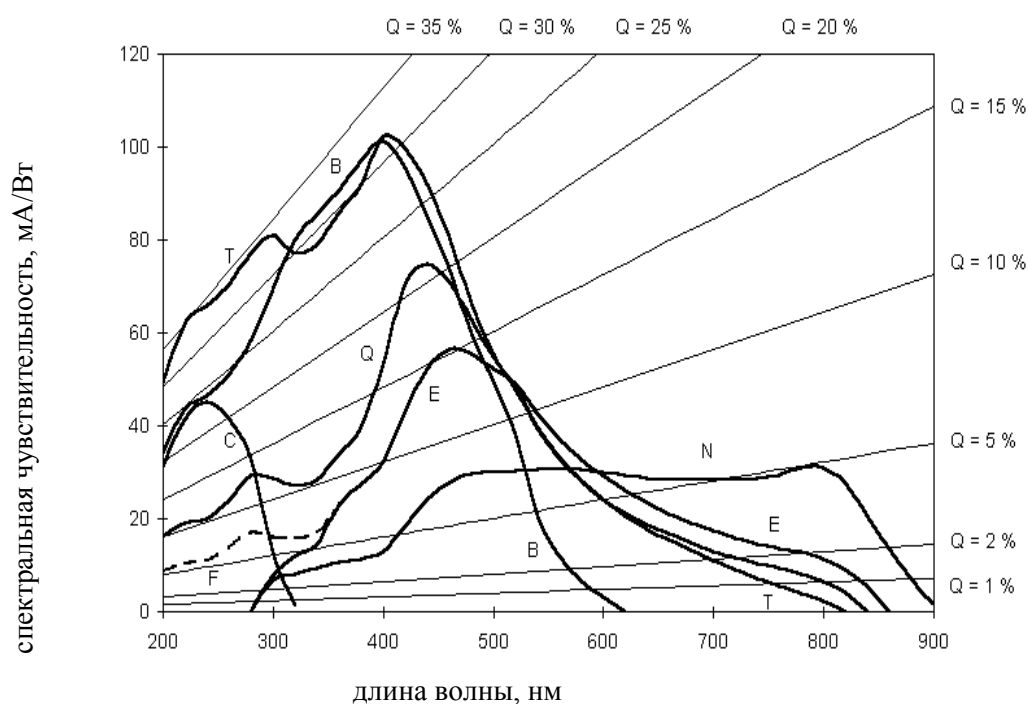


Рис. 1

На рис. 1 показаны спектральные характеристики наиболее распространенных фотокатодов, нанесенных на различные входные окна: С – фотокатод CsTe на кварцевом стекле; В – бищелочной фотокатод K_2SbCs на кварцевом стекле; Т – фотокатод UV Wide-Band (NaKSb)Cs на кварцевом стекле; Q – фотокатод S20 (NaKSb)Cs на кварцевом стекле; F – фотокатод S25 (NaKSb)Cs на кварцевом стекле; Е – фотокатод S25 (NaKSb)Cs на боросиликатном стекле; N – фотокатод S25RE (NaKSb)Cs на боросиликатном стекле.

Известно, что большинство фотокатодов, чувствительных в видимой области спектра, чувствительны и к УФ излучению. Однако, применение в УФ ЭОП фотокатодов, чувствительных в широкой области спектра, имеет существенный недостаток, связанный с необходимостью защищать его (фильтровать) от засветки видимым светом. Поэтому целесообразно применять так называемые солнечнослепые фотокатоды, не чувствительные в видимой области спектра.

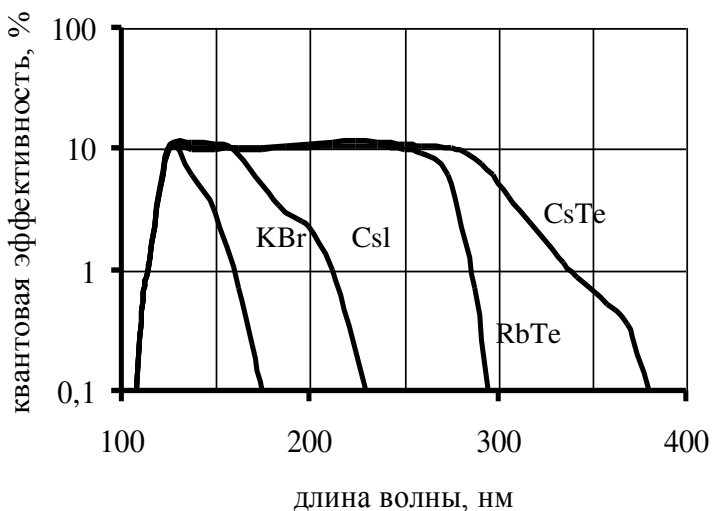


Рис. 2

Как известно [4], только небольшая доля рассеянного излучения короче 290 нм может присутствовать в верхних слоях атмосферы, однако около поверхности Земли УФ излучение менее 290 нм практически отсутствует. Поэтому УФ ЭОП с солнечно-слепыми фотокатодами могут работать без защиты от естественного солнечного излучения. Обычно коэффициент «слепоты» таких катодов, т. е. отношение чувствительности фотокатода на длине волны 250 нм к чувствительности на длине волны 300 нм, должен составлять не менее 100 [2].

Наибольшее распространение получили фотокатоды на основе телурида цезия и рубидия (CsTe и RbTe), чувствительные в области среднего УФ излучения. Спектральные характеристики, этих фотокатодов показаны на рис. 2.

На рис. 3 приведены кривые пропускания некоторых материалов в УФ области спектра: 1) MgF_2 –

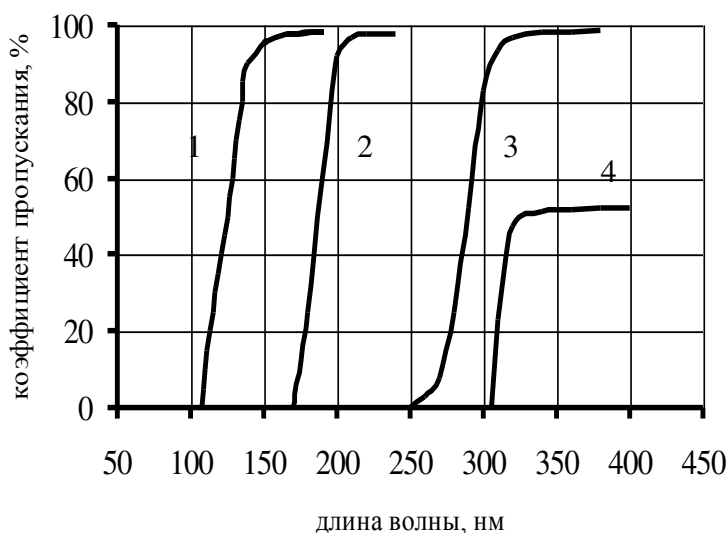


Рис. 3

фтористый магний, 2) Fused Silica –кварцевое стекло, 3) Glass – боросиликатное стекло, 4) UV Fider Optic – УФ волоконно-оптическая пластина.

Как видно, лучшим материалом является фтористый магний, поскольку это единственный материал, у которого коротковолновая граница пропускания составляет 120 нм.

Сдерживающим фактором в применении материалов в качестве входных окон, является их совместимость с технологией изготовления ЭОП и согласованность по температурному коэффициенту линейного расширения (ТКЛР) с конструкционными материалами корпуса ЭОП (металлами и стеклом) [2], поскольку в состав технологического процесса подготовки входных окон ЭОП входит мойка в различных растворителях, многократный прогрев в вакууме и на воздухе при температуре до 450° С, обработка поверхности в парах щелочных металлов при изготовлении фотокатода и т.д.

Фтористый магний не полностью согласован с металлами и сплавами по ТКЛР, гигроскопичен и взаимодействует со щелочными металлами при изготовлении фотокатода, поэтому в итоге его чувствительность получается хуже, чем чувствительность фотокатода, изготовленного, например, на увиолевом стекле УС-88.

Фториды других металлов – бария и кальция также прозрачны в УФ области спектра, но их применение для входных окон невозможно по перечисленным выше соображениям [2].

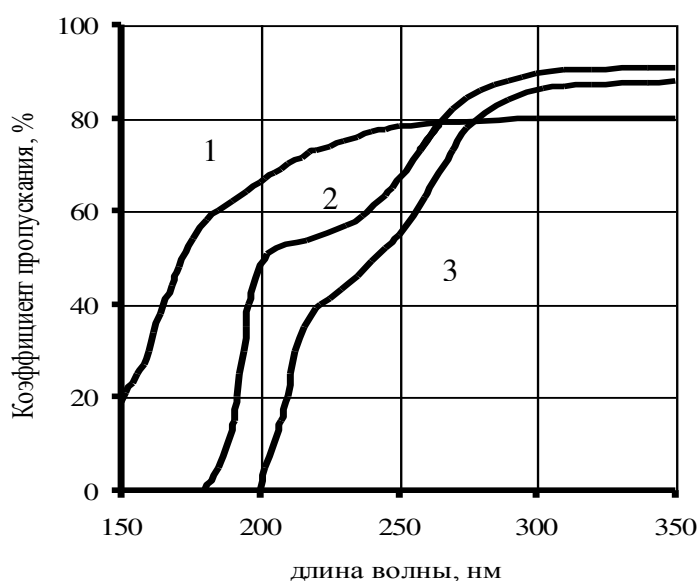


Рис. 4

На рис. 4 показаны кривые пропускания материалов, прозрачных в УФ области спектра и применяемых для входных окон ЭОП, которые производятся в России. Основными из них также являются фтористый магний, плавленый кварц (показаны на рис. 3), лейкосапфир (1), увиолевые стекла УТ-49 (2) и УТ-88 (3).

С началом выпуска ЭОП с микроканальным усилением, сборка которых производится способом холодной герметизации, условие согласование материала входного окна с материалом

корпуса ЭОП перестало быть сдерживающим фактором в применении фтористого магния и кварца в конструкции ЭОП для УФ области спектра [2, 3].

Одним из примеров зарубежных УФ ЭОП являются приборы, выпускаемые фирмой HAMAMATSU, основные параметры которых приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1

Размер фотокатода	Спектральный диапазон	Основная длина волны	Материал входного окна	Фотокатод	Катодо люминесцентный экран
18 мм	160-320 нм	230 нм	MgF ₂	CsTe	P43
25 мм					
18 мм	160-320 нм	230 нм	Синтетический кремний	CsTe	P43
25 мм					

Характеристики отечественного УФ ЭОП «Кварц» второго поколения приведены в табл. 2 [6].

Таблица 2

Размер фотокатода	Спектральный диапазон	Чувствительность фотокатода	Материал входного окна	Фотокатод	Разрешение	Катодо люминесцентный экран
14 мм	150-350 нм	На λ 250 нм > 20 мА/Вт	MgF ₂	CsTe	В центре 40 штр/мм На диаметре 10 мм 30 штр/мм	P43

По заказу КТИ ПМ СО РАН был разработан макет УФ ЭОП с параллельным переносом изображения. Данный ЭОП имеет фотокатод на основе соединения Cs₂Te, нанесенного на входное окно из MgF₂ и чувствительного в спектральном диапазоне 200 – 320 нм; его основные характеристики представлены в табл. 3.

Таблица 3

Размер фотокатода	Спектральный диапазон	Пороговая облученность в плоскости фотокатода	Материал входного окна	Фотокатод	Разрешение при оптимальной облученности
18 мм	200-320 нм	10 ⁻⁷ Вт/м ²	MgF ₂	CsTe	39 штр/мм

График квантового выхода фотокатода ЭОП показан на рис. 5.

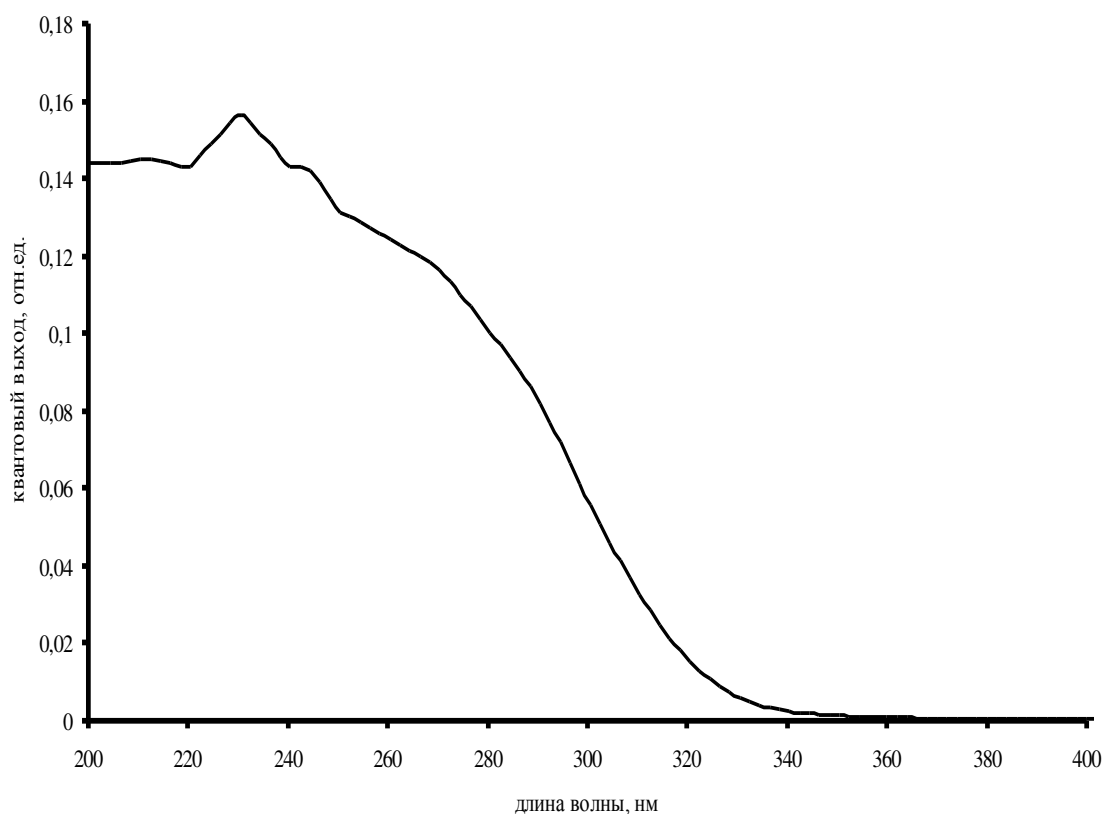


Рис. 5

Можно надеяться, что дальнейшее повышение основных характеристик УФ ЭОП таких как: спектральной чувствительности, пространственного разрешения, увеличение отношения сигнал/шум позволит использовать данные приборы при создании перспективных многоканальных ОЭС различного назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алдохин П.А., Рафаилович А.С. Телевизионные системы для УФ области спектра // Сб. материалов научного конгресса «ГЕО - СИБИРЬ – 2005» – Т. 6. – Новосибирск: СГГА, 2005. – С. 42 – 47.
2. Отчет «Анализ состояния метрологической базы за рубежом и в России необходимой для измерения параметров электронно-оптических преобразователей и оптико-электронных модулей, работающих в УФ-области спектра, разработка предложений по ее созданию и составу». – М.: «ДОМ ОПТИКИ» ВНЦ «ГОИ им. С. И. ВАВИЛОВА», 2004.
3. Бутслов М. М., Степанов Б. М., Фанченко С. А. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. – М.: «Наука». – 1978.
4. Рафаилович А.С. Объекты исследования и параметры исследовательской аппаратуры для ультрафиолетовой области спектра // Сб. материалов научного конгресса «ГЕО - СИБИРЬ – 2005» – Т. 6. – Новосибирск: СГГА, 2005. – С. 52 – 56.
5. Internet: <http://www.hamamatsu.com>.
6. Internet: <http://rusnv.ru>.

© П.А. Алдохин, 2006

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

Цель работы заключается в разработке технологии получения микромеханических волноводов, а так же разработке и конструировании экспериментального стенда, с помощью которого будет проведена исследовательская работа.

MEMS-технология (MicroElectroMechanical Systems) в настоящее время является самой передовой и перспективной технологией производства. Современные требования снижения размеров и веса устройств, расширение их динамического диапазона, уменьшение потребляемой мощности и стоимости, наращивание их интеграции и функциональных возможностей при росте рабочих частот подталкивают разработчиков к созданию новых компонентов и поиску их оптимальных архитектур.

Технологические процессы создания MEMS строятся на многократных циклах осаждения материала, переноса изображений и удаление материала.

Интеграция микромеханической и микроэлектронной технологий открывает возможности создания нового класса контрольно-диагностической аппаратуры, удовлетворяющей специальным требованиям и условиям ее применения. Пользователь аппаратуры заинтересован в ее эффективном и недорогом использовании при решении специальных задач. В эту сферу включается, в частности, проблема создания систем навигации и управления на основе интерферометрических интегральных акселерометров в миниатюрном исполнении.

В последние годы особую актуальность приобрели разработки в области создания микроэлектронных мультисенсорных устройств различного назначения. В основу этого направления положены принципы построения преобразователей различных физических величин в электрические сигналы, а также новые принципы извлечения полезной информации из этих сигналов, базирующиеся на совместной интеллектуальной обработке всей совокупности сигналов, поступающих от мультисенсорной системы.

Потребность в таких устройствах стремительно растет в связи с быстрым развитием автоматизированных систем контроля и управления, внедрением новых технологических процессов, переходом к гибким автоматизированным производствам. При разработке микроэлектронных сенсорных систем, как правило, на передний план выдвигаются новые технологии и варианты конструктивных решений.

Наиболее бурно развивающимся в последние годы направлением построения датчиковой аппаратуры является микромеханика. Возможность группового производства с применением процессов фотолитографии и прецизионного травления, разработки и создания элементов с наперед заданными электромеханическими параметрами (омическим сопротивлением,

чувствительностью, вибропрочностью, ударостойкостью и собственной резонансной частотой) создает реальные предпосылки для построения контрольно-измерительной техники практически для любого диапазона измеряемых величин с требуемыми и воспроизводимыми параметрами.

Научной новизной является получение в результате исследования принципиально нового конструктивного элемента оптических приборов который способен в себе сосчитать несколько функциональных назначений.

© П.Г. Морозов, 2006

УДК 528.514/.517

Е.А. Бабенко

СГГА, Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ФАЗОВОГО БЕЗОТРАЖАТЕЛЬНОГО ДАЛЬНОМЕРА

Цель работы заключалась в исследовании и расчете основных характеристик разрабатываемого оптико-электронного фазового безотражательного дальномера, проверки характеристик с помощью экспериментальной установки. Дальномер работает по гетеродинной схеме. Проводилось измерение предельной обнаружительной способности фотоприёмного устройства, контроль длины волны модуляции, расчет предельной дальности и точности измерений.

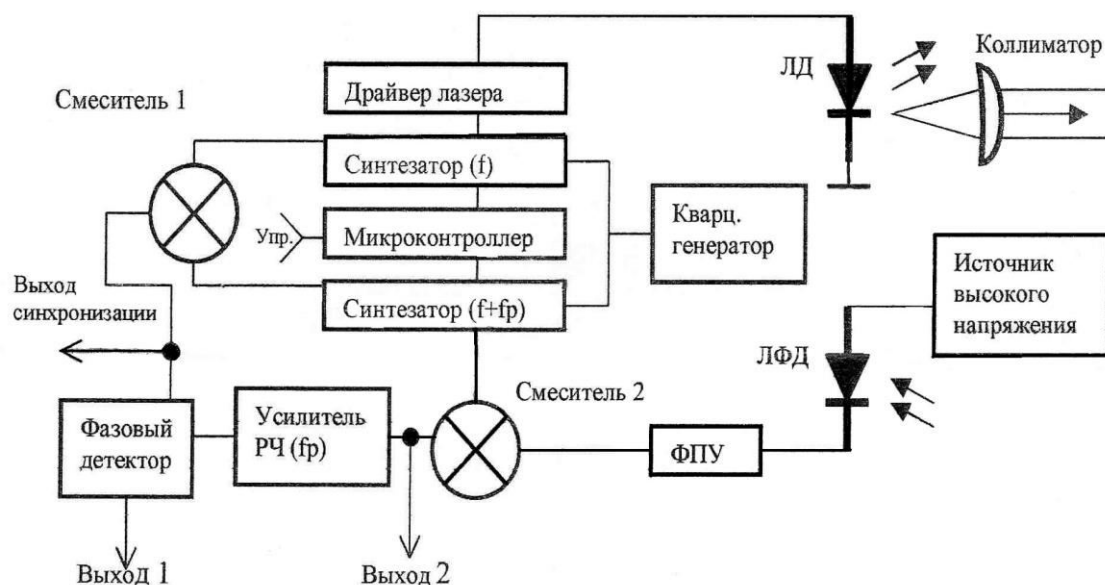


Рис. 1. Блок-схема Аналогового блока лазерного дальномера

Актуальность данного разрабатываемого дальномера заключается в возрастающей потребности в приборах данного класса, отличающихся высокой скоростью и удобством проведения измерений. Кроме традиционных линейных измерений, выполняемых при геодезических построениях, топографических съемочных работах, они применяются при лазерном сканировании местности, строительных работах. Измерение расстояний с помощью безотражательного дальномера производится с меньшими затратами и гораздо быстрее, чем при использовании дальномеров с отражателями.

Одной из решаемых проблем было увеличение максимальной измеряемой дальности. Эта проблема решена путем применения диафрагмы и интерференционного фильтра.

© Е.А. Бабенко, 2006

УДК 681.7.067.2:520.2.066/.067

А.С. Агеев, И.В. Парко

СГГА, Новосибирск

ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫЙ ОБЪЕКТИВ АСТРОНОМИЧЕСКОГО ПРИБОРА

Предлагаемый зеркально-линзовый объектив может быть использован в астрономических телескопах для визуального наблюдения и фотографирования небесных объектов в условиях пониженной освещенности и в ночное время. Его прототипом является медианальная система Шупманна [1], состоящая из трех компонентов, первый из которых – выпукло-плоская линза, второй – прямоугольная призма, расположенная диагональной гранью под углом к оптической оси, а третий – коррекционный, состоящий из двух линз с воздушным промежутком между ними, причем задняя поверхность второй линзы имеет зеркальное покрытие. Основными недостатками подобной системы являются большие диаметры линз, требующие высокой неоднородности стекла, малый коэффициент отражения зеркал и наличие центрального виньетирования. В результате, насколько нам известно, после Шупманна не было сделано ни одной попытки вернуться к медианальным системам.

Предлагаемый объектив обладает повышенной разрешающей способностью и улучшенным качеством изображения. Достигается это за счет того, что он состоит только из двух компонентов (рис. 1) – двояковыпуклой линзы и компенсатора аберраций из отрицательной линзы с зеркальной поверхностью и выпукло-плоской линзы малого диаметра; при этом в систему введено плоское диагональное зеркало, вторая линза компенсатора расположена вблизи фокальной плоскости объектива, а все линзы выполнены из одной марки стекла.

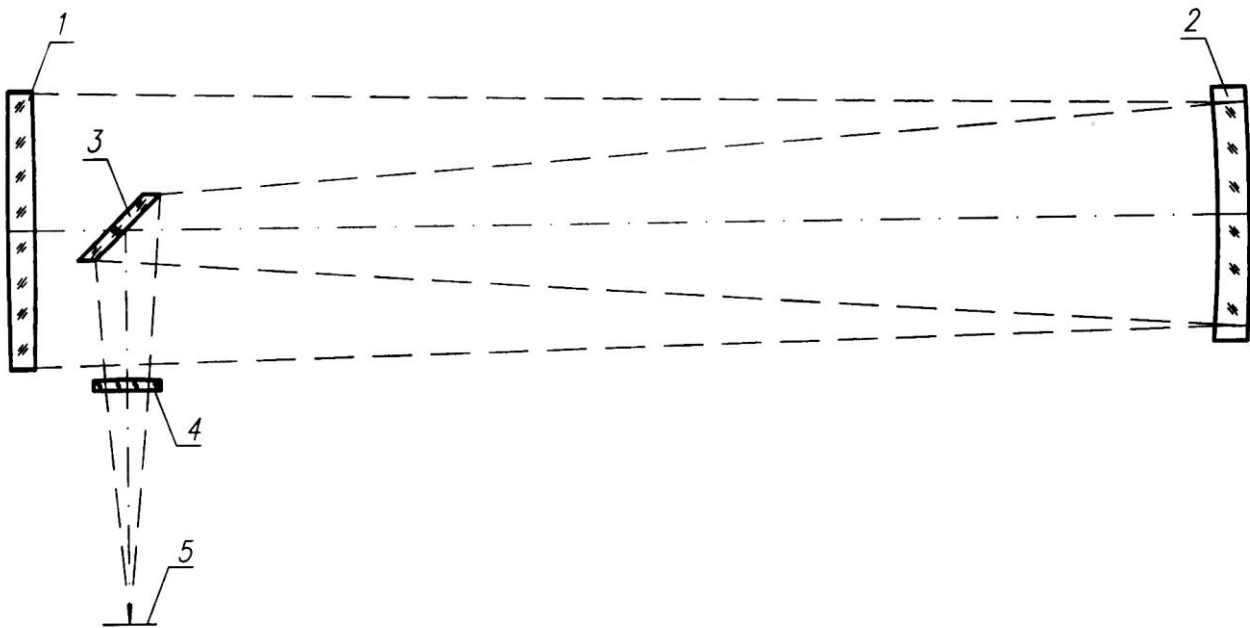


Рис. 1. Схема зеркально-линзового объектива: 1 – первый компонент, 2, 4 – второй компонент, 3 – диагональное зеркало, 5 – плоскость изображения

Выполнение первого компонента системы в виде двояковыпуклой линзы позволяет использовать его в виде силового элемента.

Выполнение второго компонента системы в виде отрицательной выпукло-вогнутой линзы с отражающей поверхностью позволяет добиться исправления сферической и продольной хроматической aberrаций первого компонента на оси системы.

Выпукло-плоская линза, расположенная вблизи фокальной плоскости объектива, позволяет добиться исправления полевых aberrаций системы.

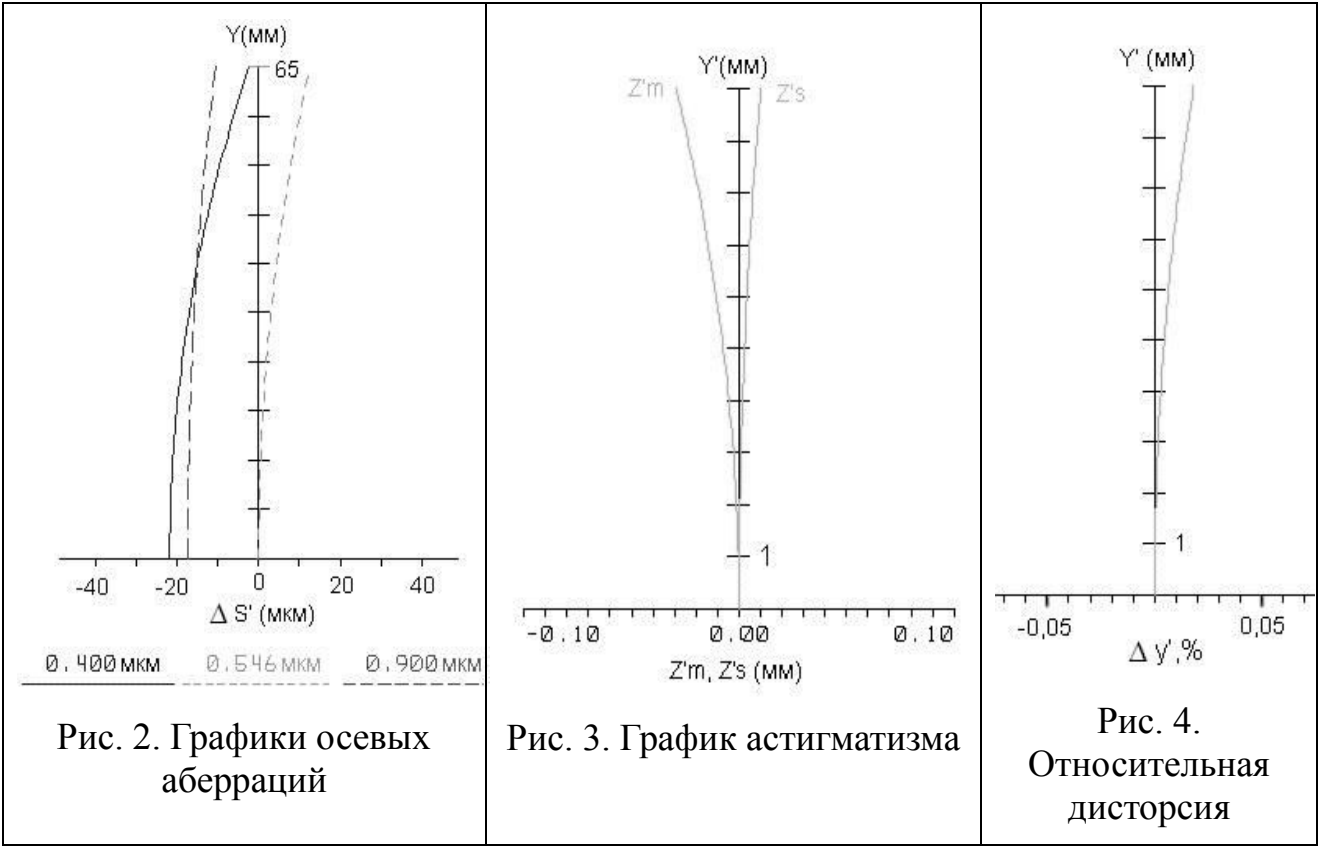
Один из рассчитанных вариантов объектива имеет следующие технические характеристики:

Фокусное расстояние	719 мм;
Относительное отверстие	1 : 5,5;
Рабочий спектральный диапазон	400 – 900 нм;
Основная длина волны	546 нм;
Угловое поле зрения в пространстве предметов	1,6о;
Линейное поле в пространстве изображения	20 мм.

На рис. 2 показаны графики его осевых aberrаций; по оси абсцисс отложены значения продольных aberrаций $\Delta S'$ (мкм), по оси ординат – координата Y (мм) в плоскости входного зрачка.

На рис. 3 изображен график астигматизма, а на рис. 4 – график дисторсии; по осям ординат на обоих графиках отложен размер изображения Y' (мм), на

рис. 3 по оси абсцисс – астигматические отрезки Z'_s , Z'_m (мм), на рис. 4 – относительная дисторсия $\Delta y'$ в %.



На рис. 5 показаны графики частотно-контрастной характеристики; по оси абсцисс отложена пространственная частота N мм⁻¹, отнесенная к плоскости изображения объектива, а по оси ординат – коэффициент передачи контраста в относительных единицах.

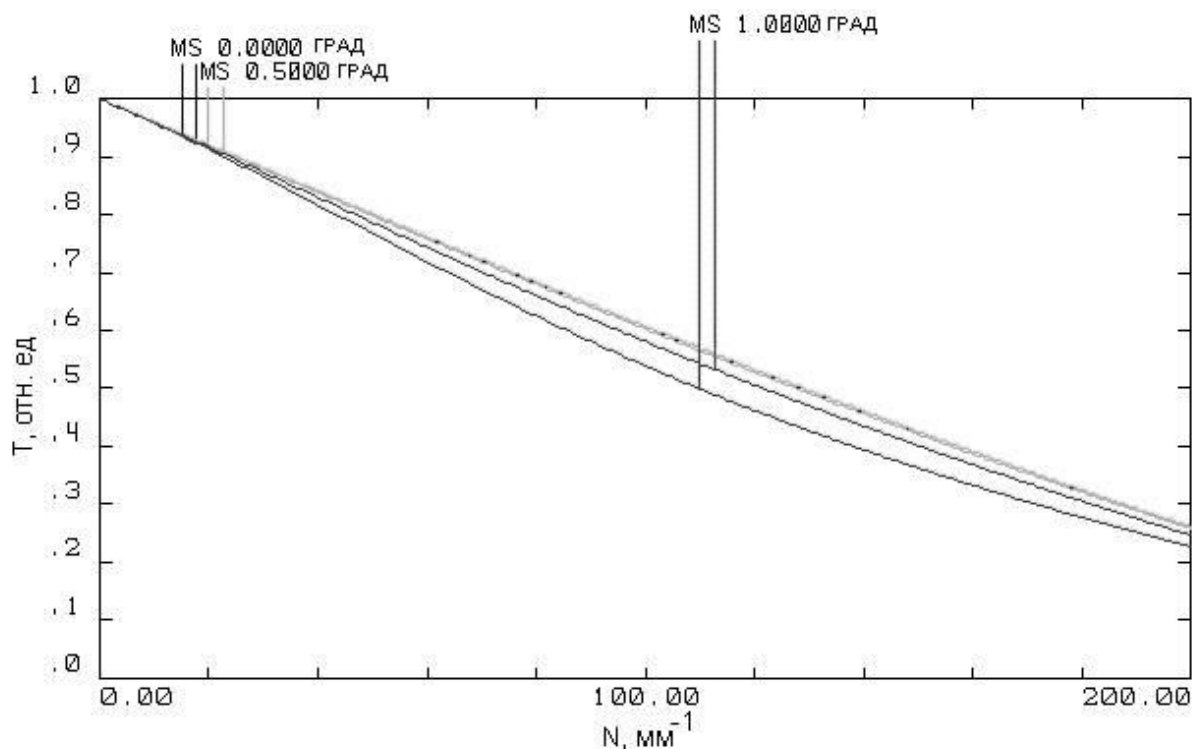


Рис. 5. Графики частотно-контрастной характеристики

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение (Ленинградское отделение), 1975. – 640 с.

© А.С. Агеев, И.В. Парко, 2006

УДК 528.526.6:681.7

А.В. Новиков

СГГА, Новосибирск

ПРИНЦИП РАБОТЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Волоконный оптический гироскоп (ВОГ) - оптико-электронный прибор, создание которого стало возможным лишь с развитием и совершенствованием элементной базы квантовой электроники. Прибор измеряет угловую скорость и углы поворота объекта, на котором он установлен. Принцип действия ВОГ основан на вихревом (вращательном) эффекте Саньяка.

Интерес зарубежных и отечественных фирм к оптическому гироскопу базируется на его потенциальных возможностях применения в качестве чувствительного элемента вращения в инерциальных системах навигации, управления и стабилизации. Этот прибор в ряде случаев может полностью заменить сложные и дорогостоящие электромеханические (роторные) гироскопы и трехосные гиросtabilизированные платформы. По данным

зарубежной печати в будущем в США около 50% всех гироскопов, используемых в системах навигации, управления и стабилизации объектов различного назначения, предполагается заменить волоконными оптическими гироскопами.

Возможность создания реального высокочувствительного ВОГ появилась лишь с промышленной разработкой одномодового диэлектрического световода с малым затуханием. Именно конструирование ВОГ на таких световодах определяет уникальные свойства прибора. К этим свойствам относят:

- Потенциально высокую чувствительность (точность) прибора, которая уже сейчас на экспериментальных макетах 0,1 град/ч и менее;
- Малые габариты и массу конструкции, благодаря возможности создания ВОГ полностью на интегральных оптических схемах;
- Невысокую стоимость производства и конструирования при массовом изготовлении и относительную простоту технологии;
- Ничтожное потребление энергии, что имеет немаловажное значение при использовании ВОГ на борту;
- Большой динамический диапазон измеряемых угловых скоростей (в частности, одним прибором можно измерять скорость поворота от 1 град/ч до 300 град/с);
- Отсутствие вращающихся механических элементов (роторов) и подшипников, что повышает надежность и удешевляет их производство;
- Практически мгновенную готовность к работе, поскольку не затрачивается время на раскрутку ротора;
- Нечувствительность к большим линейным ускорениям и следовательно, работоспособность в условиях высоких механических перегрузок;
- Высокую помехоустойчивость, низкую чувствительность к мощным внешним электромагнитным воздействиям благодаря диэлектрической природе волокна;
- Слабую подверженность проникающей гамма-нейтронной радиации, особенно в диапазоне 1,3 мкм.

Волоконный оптический гироскоп может быть применен в качестве жестко закрепленного на корпусе носителя чувствительного элемента (датчика) вращения в инерциальных системах управления и стабилизации. Механические гироскопы имеют так называемые гиromеханические ошибки, которые особенно сильно проявляются при маневрировании носителя (самолета, ракеты, космического аппарата). Эти ошибки еще более значительны если инерциальная система управления конструируется с жестко закрепленными или «подвешенными» датчиками непосредственно к телу носителя. Перспектива использования дешевого оптического датчика вращения, который способен работать без гиromеханических ошибок в инерциальной системе управления, есть еще одна причина особого интереса к оптическому гироскопу.

Появление идеи и первых конструкций волоконного оптического гироскопа тесно связан с разработкой кольцевого лазерного гироскопа (КЛГ). В КЛГ чувствительным контуром является кольцевой самовозбуждающийся резонатор с активной газовой средой и отражающими зеркалами, в то время как в ВОГ пассивный многовитковый диэлектрический световодный контур возбуждается «внешним» источником светового излучения. Эти особенности определяют по крайней мере пять преимуществ ВОГ по сравнению с КЛГ:

1. В ВОГ отсутствует синхронизация противоположно бегущих типов колебаний вблизи нулевого значения угловой скорости вращения, что позволяет измерять очень малые угловые скорости, без необходимости конструировать сложные в настройке устройства смещения нулевой точки;

2. Эффект Саньяка, на котором основан принцип работы прибора, проявляется на несколько порядков сильнее из-за малых потерь в оптическом волокне и большой длины волокна.

3. Конструкция ВОГ целиком выполняется в виде твердого тела (в перспективе полностью на интегральных оптических схемах), что облегчает эксплуатацию и повышает надежность по сравнению с КЛГ.

4. ВОГ измеряет скорость вращения, в то время как КЛГ фиксирует приращение скорости.

5. Конфигурация ВОГ позволяет «чувствовать» реверс направления вращения.

Эти свойства ВОГ, позволяющие создать простые высокоточные конструкции полностью на дешевых твердых интегральных оптических схемах при массовом производстве привлекают пристальное внимание разработчиков систем управления. По мнению ряда зарубежных фирм, благодаря уникальным техническим возможностям ВОГ будут интенсивно развиваться.

Зарубежные авторы констатируют, что разработка конструкции ВОГ и доведение его до серийных образцов не простая задача. При разработке ВОГ ученые и инженеры сталкиваются с рядом трудностей. Первая связана с технологией производства элементов ВОГ. В настоящее время еще мало хорошего одномодового волокна, сохраняющего направление поляризации; производство светоделителей, поляризаторов, фазовых и частотных модуляторов, пространственных фильтров, интегральных оптических схем находится на начальной стадии развития. Число разработанных специально для ВОГ излучателей и фотодетекторов ограничено.

Вторую трудность связывают с тем, что при кажущейся простоте прибора и высокой чувствительности его к угловой скорости вращения он в то же время чрезвычайно чувствителен к очень малым внешним и внутренним возмущениям и нестабильностям, что приводит к паразитным дрейфам, т. е. к ухудшению точности прибора. К упомянутым возмущениям относятся температурные градиенты, акустические шумы и вибрации, флуктуации электрических и магнитных полей, оптические нелинейные эффекты флуктуации интенсивности и поляризации излучения, дробовые шумы в фотодетекторе, тепловые шумы в электронных цепях и др.

Фирмами и разработчиками ВОГ обе эти задачи решаются. Совершенствуется технология производства элементов в ВОГ, теоретически и экспериментально исследуются физическая природа возмущений и нестабильностей, создаются и испытываются различные схемные варианты ВОГ с компенсацией этих возмущений, разрабатываются фундаментальные вопросы использования интегральной оптики. Точность ВОГ уже сейчас близка к требуемой в инерциальных системах управления.

В специальной научной и периодической литературе проблеме ВОГ уже опубликовано множество научных статей. Анализ этих статей свидетельствует о необходимости дальнейшего изучения этой проблемы и разработки новых способов улучшения качественных характеристик ВОГ.

Систематизация и обобщение узловых вопросов теории и практики создания ВОГ также является важным этапом.

Задачей работы является анализ работы ВОГ, обобщенной модели шумов и нестабильностей и оценка предельной (потенциальной) чувствительности прибора. На основе свойства взаимности необходимо рассмотреть минимальную конфигурацию ВОГ. Затем оценить современное состояние элементной базы. При этом значительное внимание уделить свойствам волоконных световодов и провести анализ возможных неоднородностей и потерь для различных типов волокон. Рассмотреть основные элементы ВОГ: волоконный контур, излучатели и фотодетекторы, а также предложить способы компенсации шумов и нестабильностей ВОГ (таких, как обратное рэлеевское рассеяние, оптический нелинейный эффект, температурные градиенты, магнитное поле и др.).

© А.В. Новиков, 2006

РАСЧЕТ СХЕМЫ ЗАПИСИ ПЛАНАРНОГО ОБЪЕМНОГО ГОЛОГРАММНОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Известна неоптимальность использования в оптических системах традиционных линз, призм, зеркал, так как они существенно превосходят по массе и габаритам такие источники и приемники излучения как полупроводниковые лазеры и фотоприемники. Именно оптические элементы в настоящее время задают массо-габаритные характеристики оптических приборов когерентного излучения. Одним из известных путей создания компактных оптических элементов для когерентной оптики являются планарные голограммные оптические элементы (ГОЭ) [1, 2]. Но в этих и других работах планарные фокусирующие ГОЭ имеют малые размеры и формируются методами фото и электронной литографии. Планарные ГОЭ значительно больших размеров могут быть изготовлены традиционными методами объемной и псевдоглубокой голографии [3].

В настоящей работе приведены результаты расчета схемы записи двумя волнами планарного фокусирующего объемного ГОЭ, который имеет следующие характеристики:

- Расстояние d_c от центра ГОЭ до источника восстанавливающей волны (или до предметной плоскости) 20 ± 1 мм,
- Расстояние d_i от центра ГОЭ до источника восстановленной волны (или до плоскости изображения) бесконечность,
- Угловая координата Θ_c источника восстанавливающей волны в сагиттальной плоскости в среде $0^\circ \pm 0^\circ,3$,
- Угловая координата Θ_i источника восстановленной волны в сагиттальной плоскости в среде $90^\circ \pm 1^\circ$,
- Длина волны восстановления λ_c 655 нм,
- Длина волны λ_o записи 632,8 нм,
- Толщина среды ГОЭ не более 0,1 мм,
- Средний показатель преломления среды при восстановлении и записи n_o 1,5.

Для расчета угловых Θ_r , Θ_o и радиальных d_r , d_o координат источников волн схемы записи этого планарного ГОЭ воспользуемся формулами, приведенными в работах [4, 5]. При выполнении расчетов предполагается, что ГОЭ находится в диэлектрической среде со средним показателем преломления n_o . В такой среде расстояние от центра ГОЭ до источника восстанавливающей волны равно $d_c =$

(30,0 ± 1,5) мм. В дальнейшем, все угловые Θ_r , Θ_o , Θ_c , Θ_i и радиальные координаты d_r , d_o , d_c рассматриваются в среде.

Определим угловые координаты записывающих волн Θ_r , Θ_o через известные углы на стадии восстановления Θ_c , Θ_i , отношение длин волн записи и восстановления μ по формулам

$$\begin{aligned}\Theta_r &= \Theta_c/2 + \Theta_i/2 + \arcsin[\sin(\Theta_c/2 - \Theta_i/2)/\mu]; \\ \Theta_o &= \Theta_c/2 + \Theta_i/2 - \arcsin[\sin(\Theta_c/2 - \Theta_i/2)/\mu],\end{aligned}\quad (1)$$

получаем значения угловых координат Θ_r , Θ_o источников записывающих волн: $\Theta_r = 1^\circ 55'$, $\Theta_o = 88^\circ 05'$. Допуски на рассчитанные углы определяются из дифференциалов выражений (1) и равны: $\Delta\Theta_r = \pm 0^\circ 15'$, $\Delta\Theta_o = \pm 0^\circ 57'$.

Из выражений [6]

$$\begin{aligned}1/d_o &= (1 - P_c)/\mu F_1(\cos\Theta_o/\cos\Theta_r - 1); \\ 1/d_r &= (\cos\Theta_o/\cos\Theta_r - P_c)/\mu F_1(\cos\Theta_o/\cos\Theta_r - 1),\end{aligned}\quad (2)$$

(где параметр $P_c = \pm[1 + (\cos\Theta_o/\cos\Theta_r - 1)(1 - \mu F_1^2 \cos\Theta_o/d_c^2)]^{1/2}$, F_1 – фокусное расстояние), получаем в меридиональной плоскости значения радиальных координат d_r , d_o источников записывающих волн: $d_r = 28,6$ мм, $d_o = 362$ мм.

Продольные допуски на рассчитанные расстояния в меридиональной плоскости определяются из дифференциалов выражений (2) и равны: $\Delta d_r = \pm 1,3$ мм, $\Delta d_o = \pm 10$ мм. Поперечные допуски на рассчитанные расстояния в меридиональной плоскости определяются по формулам $d_r\Delta\Theta_r$, $d_o\Delta\Theta_o$ и равны соответственно: $\pm 0,1$ мм, ± 6 мм.

Из выражений [6]

$$\begin{aligned}d_r &= \mu d_c \cos\Theta_r \sin(\Theta_o - \Theta_r)/(\sin\Theta_o \cos^2\Theta_c - \cos\Theta_o \sin 2\Theta_c/2); \\ d_o &= \mu d_c \cos\Theta_o \sin(\Theta_o - \Theta_r)/(\sin\Theta_r \cos^2\Theta_c - \cos\Theta_r \sin 2\Theta_c/2),\end{aligned}\quad (3)$$

получаем в сагиттальной плоскости значения радиальных координат d_r , d_o источников записывающих волн: $d_r = 31,0$ мм, $d_o = 31,0$ мм.

Продольные допуски на рассчитанные расстояния в сагиттальной плоскости определяются из дифференциалов выражений (3): $\Delta d_r = \pm 1,5$ мм, $\Delta d_o = \pm 1,5$ мм. Поперечные допуски на рассчитанные расстояния в сагиттальной плоскости определяются по формулам $d_r\Delta\Theta_r$, $d_o\Delta\Theta_o$ и равны соответственно: $\pm 0,1$ мм и $\pm 0,5$ мм.

Расчетные значения продольных допусков близки к продольным допускам на координаты волн при восстановлении, что говорит о достаточной устойчивости полученных значений координат записывающих волн. Величины углов в вакууме (воздухе), соответствующие рассчитанным углам в среде получаются из закона преломления, а расстояния в вакууме (воздухе) получаются делением расстояний в среде на показатель преломления n_o . Таким образом, запись планарного ГОЭ может быть выполнена двумя волнами с астигматическими aberrациями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Suhara T., Ura S., Nishihara H., Koyama J. // Proc. Intern. Conf. On Integrated Optics and Fiber Communication. Venezia. Italy, 1985. P. 117 – 120.

2. Петров, Д.В. Проблемы создания интегрально оптической системы для записи голографической информации [Текст] / Петров Д. В. // Голографические оптические элементы и системы. – СПб: Наука. 1994. – С. 27 – 36.
3. Denisyuk Y.N. 3-Dimensional and pseudodeep holograms // JOSA. – 1992.V. 9. – № 7. – P. 1141 – 1147.
4. Ган, М.А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов [Текст] / М.А. Ган. Л.: ГОИ, 1984. – 140 с.
5. Батомункуев, Ю.Ц. Расчет схемы записи цилиндрическими волнами объемного внеосевого голографического оптического элемента [Текст] / Батомункуев Ю.Ц., Мещеряков Н.А. // Автометрия. – 1999. – № 4. – С. 33 – 38.
6. Батомункуев, Ю.Ц. Разработка и расчет объемных голографических оптических элементов [Текст] : Дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / Ю.Ц. Батомункуев. – Новосибирск, 2003. – 184 с.

© Ю. Ц. Батомункуев, 2006

УДК 681.325.5;6 21

09.06.529

Б.Э. Шлишевский, А.Н. Соснов

СГГА, Новосибирск

ГИБКАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ. ЦЕЛИ И МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ. ТЕРМИНОЛОГИЯ

Комплексная автоматизация производства это основное направление технического прогресса в промышленности [1].

Основной целью автоматизации при обработке конструкционных материалов в оптическом приборостроении в условиях серийного производства является мобильность и экономически рентабельная адаптация к рыночному спросу, т. е. к изменению номенклатуры и величины партии обрабатываемых деталей.

Немаловажным является социальный аспект проблемы: облегчение условий труда, его облагораживание и интеллектуализация, а так же повышение и стабилизация качества изделия, т. е. управление качеством продукции в процессе обработки.

Эти компоненты при автоматизации достигаются надежнее и эффективнее, чем при использовании универсальных станков с ручным управлением.

Выпускающиеся, до последнего времени технологические машины – станки и станочные системы для серийного производства располагают практически неограниченной гибкостью, так как представляют собой в большинстве случаев универсальное оборудование ограниченной функциональности – токарные, фрезерные и другие станки с ручным управлением. В этих станках и системах основной является проблема автоматизации всех функций, при сохранении существующей гибкости. Автоматические станки существуют уже давно. Их создают для выпуска деталей без участия человека. Управление отдельными механизмами станка

осуществлялось, в основном, с помощью жестких программносителей – комплектов специальной оснастки: эксцентриков – кулачков, копиров, упоров, путевой электроавтоматики. Оснастка изготавливалась для каждой конкретной детали отдельно. Перенастройка автоматов вызывала значительные затраты средств и времени. К такому оборудованию относятся широко используемые в промышленности автоматы: токарные, токарно-револьверные, продольно-фасонного точения, холодно-высадочные и многие другие типы оборудования.

В условиях массового производства на протяжении многих десятилетий наиболее эффективными технологическими системами являются специализированные станки – автоматы и автоматические линии с «жесткими» системами управления, построенные по агрегатному принципу из унифицированных узлов и предназначенные для обработки определённых деталей. Целесообразность «жесткой» автоматизации для стабильного производства больших партий деталей в обозримом будущем для многих производств не вызывает сомнений, однако их адаптация даже к незначительным изменениям конструкции изделий является чрезвычайно трудным (и практически невозможным) делом.

Во многих случаях промышленность всё больше нуждается в новых системах автоматизации, в которых во внимание принимались бы как выше указанные обстоятельства, так и следующие факторы:

В связи с тем, что 75 – 80% всей продукции машиностроения выпускается малыми и средними сериями, автоматизация такого производства связана с большими затруднениями. В то же время с каждым годом сроки коммерческой эксплуатации любого вида продукции сокращается, номенклатура растёт, а изделия систематически подвергаются конструктивному совершенствованию и модернизации. Значительная часть специальных средств производства, площадей и сложной технологической оснастки используется не полностью.

Высокая стоимость кредитов и незавершённого производства исключает хранение избыточных запасов заготовок и готовых деталей.

Следовательно, создание гибких технологий и автоматического оборудования для серийного изготовления продукции с эффективностью и преимуществами близкой к массовому производству является весьма актуальной и важной задачей. Путь к ее решению занял почти сорок лет и был многотрудным. Исследования в достижении поставленной цели были постоянно и неразрывно связаны с важнейшими достижениями научно-технической революции XX века. Ими занимались специалисты всех развитых стран. Требовались новые подходы и решения. И они были найдены на стыке механики, электроники, электротехники, гидравлики, вычислительной техники, технологии машиностроения, автоматики, автоматизации и других наук. За указанный период было создано, апробировано и освоено производством несколько поколений и разновидностей принципиально новых систем автоматического управления на основе цифровой техники (без жестких программносителей), которые отличались элементной базой, функциональностью, способами программирования, программносителями и

имели узко специализированную аппаратную структуру для управления технологическими функциями конкретных типов или моделей металлообрабатывающих станков. Эти системы управления получили обобщенное наименование «Устройство числового программного управления» (УЧПУ). Сочетание системы станок – УЧПУ, обусловило необходимость в разработке многих сотен и тысяч оригинальных, ранее не известных, технических решений по коренной реконструкции и усовершенствованию всех типов технологического оборудования и аппаратуры для его состыковки с УЧПУ, по проектированию прогрессивных технологий, включая работу по созданию и внедрению принципиально новых, на порядок более производительных, режущих инструментов и другого технологического оснащения (например, приборов для предварительной настройки инструментов вне станка). Разработаны принципиально новые типы станков – автоматов и полуавтоматов – многоцелевые станки сверлильно – фрезерно – расточной группы и на два десятилетия позже – токарной группы для обработки деталей из стали, чугуна, цветных металлов и их сплавов, пластмасс, металлов армированных стекловолокном и иных конструкционных материалов. В международной практике их именуют соответственно обрабатывающий центр (ОЦ) и токарный обрабатывающий центр (ТОЦ).

Наиболее широкое применение на практике получили станки, оснащенные УЧПУ типа NC (Numerical Control), которые в результате их эволюционного развития позволили достичь сравнительно широких технологических возможностей: линейной (в трех осях) и линейно-круговой интерполяции, коррекции положения инструментов, выдача на станок большого числа необходимых команд и ряд других. Станки с NC УЧПУ имели большую мощность, жесткость и число оборотов шпинделя, чем универсальное оборудование с ручным управлением; работали в полуавтоматическом или автоматическом (при наличии соответствующих загрузочных устройств) цикле, что позволяло обеспечить многостаночное обслуживание, стабильно повторяемую точность обработки, повышение производительности и комфортности труда оператора.

Первые поколения упомянутого оборудования сыграли положительную роль в прогрессе механической обработки и в обеспечении, но в ограниченных пределах, гибкости производства. Однако NC УЧПУ и станки на их основе имели существенные недостатки: не позволяли непосредственно на рабочем месте у станка редактировать и совершенствовать управляющие программы (УП), адаптироваться к изменениям условий производства; отсутствовали оперативно-запоминающие устройства (ОЗУ) для хранения УП, а так же дисплей или развитый пульт управления с элементами цветовой индикации и другие средства визуализации. Проектирование УП, ее кодирование и отладка были сложным, трудоемким и, в то же время, рутинным процессом; недостаточно надежно функционировала релейная автоматика связи УЧПУ – приводы станка. УЧПУ и релейная автоматика выполнялись в виде отдельно стоящего шкафа, что создавало неудобство в эксплуатации, увеличивалась

занимаемая производственная площадь. Цена станков резко возросла, что не всегда обеспечивало нормативный срок их окупаемости.

Но главным недостатком системы NC была невозможность изменить и расширить первоначально заложенные в них функциональные возможности, так как это требовало изменения электрической схемы самого устройства. Этим обуславливалась ограниченная мобильность и гибкость первых поколений УЧПУ. В то же время, можно отметить, что в станки с NC УЧПУ на многих предприятиях эксплуатируются до настоящего времени, по-видимому, в связи с отсутствием финансовых средств для их замены.

Предпосылки оптимального решения проблем гибкой автоматизации технологического оборудования появились в середине 80-х годов прошлого столетия в результате создания микро и мульти микропроцессорных УЧПУ, построенных по структуре универсальных мини ЭВМ, но во много раз меньшие по габаритам и по стоимости, обладавшие на порядок, и более, мощными вычислительными возможностями. Их именуют CNC (Computer Numerical Control). Наиболее важной отличительной особенностью систем ЧПУ с микропроцессорным управлением является многообразие задач, которые они способны решать. Рабочие функции в CNC УЧПУ выполняются не аппаратно, а так называемым «математическим обеспечением», т. е. программой хранящейся в памяти микропроцессора. Эта программа в определенных пределах может меняться и адаптироваться без физического изменения конструкции схемы.

Таким образом, появление микропроцессоров, как оригинального перепрограммируемого элемента памяти, открыло новую эпоху в методах управления технологическим оборудованием, а микроЭВМ на их основе, стали важнейшим элементом современных электронных управляющих устройств станками, машинами и системами машин. CNC УЧПУ за счет мощного программно-математического обеспечения радикально повысили гибкость, функциональность и, что особенно важно, надежность эксплуатации станков типа ОЦ и ТОЦ.

CNC УЧПУ обеспечивают линейную, круговую, цилиндрическую, спиральную, параболическую интерполяцию; оснащены цветным дисплеем размером до 18 дюймов для визуализации процесса обработки или другой «защитой» в УЧПУ информации; развитым пультом управления с квазисенсорными виртуальными клавишами; обладают постоянной и оперативной памятью до 20 Мбайт и выше (по желанию заказчика). Обеспечивают: работу УП без ее прогона на станке с имитацией процесса обработки на экране дисплея (без реальной заготовки и инструмента) с контролем геометрических размеров, при необходимости, электронной лупой до 1000 крат; максимальную мобильность, гибкость. Позволяют в автоматическом режиме реализовать практически все функции технологического процесса: управление по 2 – 27 осям, в том числе интерполяцию одновременно по 2 – 6 осям, дискретность ввода – вывода информации до 0,1 – 0,05 мкм; высокие и высочайшие значения холостых и рабочих ходов, соответственно до 60 – 80 м/мин (холостые ходы органов подачи инструмента до врезания в заготовку) и до 60000 мин⁻¹ (вращение шпинделя станка), большой диапазон их регулирования; могут

хранить в оперативной памяти большое количество – до 999 управляющих программ и до 999 подпрограмм; работать без перфоленты или другого внешнего программносителя от ОЗУ; имеют входы- выходы подключения к ЭВМ более высокого уровня для трансляции, хранения и ретрансляции УП.

Наличие большой постоянной памяти в УЧПУ и широкого спектра вспомогательных функций G (от 40 до 200); техники «меню», автоматических циклов обработки (продольный и торцовый съем припуска при работе резцами или фрезами, нарезание резьбы до M64, глубокое прерывистое сверление, прорезка канавок различной конфигурации); циклов чистовой обработки, многократного повторения контура, разгона и торможения (до 10 м/с^2), циклы «привязки» инструментальных узлов станка к нулевым точкам; циклы врезания в заготовку и другие; параметрические подпрограммы обработки – до 99; большое количество макрокоманд; возможность ввода информации в УЧПУ на символьном языке; многоцветного дисплея и других средства визуализации с выводом на экран необходимых справочных цифровых, графических, текстовых, схемных, расчетно-аналитических и иных информационных материалов, что позволяет многократно упростить и ускорить процесс разработки, отладки УП, ее совершенствование и адаптацию к изменяющимся условиям производства. [2]

Много осевая объемная интерполяция обеспечивает обработку на ОЦ и ТОЦ практически всей номенклатуры многомерных базовых, точных деталей сложно-контурной формы используемых в машино-приборостроении.

Появилась возможность оснащать ОЦ и ТОЦ богатым набором периферийных устройств: для автоматического накопления заготовок и подачи их в рабочую зону; для контроля инструмента, изделия, состояния процесса обработки; для диагностики, мониторинга и визуализации процесса обработки; для диалоговой разработки и ручного ввода непосредственно на рабочем месте управляющих программ; для коррекции и совершенствования УП; для управления роботами, транспортно-накопительными системами заготовок и инструмента; для опознавания кода деталей считывающим устройством; для автоматической коррекции износа режущих кромок инструмента и выполнения функций адаптивного управления; для решения широкого круга расчетно-аналитических задач.

К настоящему времени создано и эксплуатируются пять базовых поколений (и множество их разновидностей) многофункциональных CNC УЧПУ, для управления металлообрабатывающим оборудованием, которые сверх надежно обеспечивают решение практически всего спектра задач по резкому повышению производительности обработки и гибкости производства не только при условиях средне и крупно серийного производства, но и при обработке единичных изделий или заготовок мелкими сериями [3].

Современные УЧПУ оснащены системами автоматического проектирования технологического процесса, а так же возможностью разработки УП на новую деталь без остановки процесса механической обработки заготовки выполняемой на станке. Ряд зарубежных фирм освоили выпуск, так называемых, «интуитивных» УЧПУ (пятого поколения). Они предназначены

для автоматического проектирования УП и управления станками типа ОЦ при обработке заготовок средних и крупных размеров с иррегулярной поверхностью из литья в землю и кузнечных поковок, со значительными величинами разброса размеров припусков. Выше упомянутые УЧПУ, перед обработкой, предварительно контролируют размеры обрабатываемых поверхностей каждой отдельной заготовки и в автоматическом режиме оптимизируют параметры обработки (глубину, подачу и скорость резания). В оптическом приборостроении подобные заготовки – редкость и составляют не более 0,005 % от всей номенклатуры деталей. Более детальное исследование развития конструктивных и функциональных возможностей современных УЧПУ, включая и «интуитивные», – предмет отдельного рассмотрения.

Следует отметить, что расширение функциональности и технологических возможностей оборудования и систем ЧПУ является одним из концептуальных положений Гибкой автоматизации. Эта концепция способствовала тому, что за сравнительно короткий срок (12 – 15 лет) на основе блочно – модульного принципа создана гамма станков – автоматов с ЧПУ по всем типам металлорежущих станков. Эти станки в условиях серийного производства могут обеспечивать реализацию прогрессивных схем обработки деталей, перечисленных ранее и свойственных, как правило, массовому производству.

Таким образом, сложилась ситуация, при которой обработку корпусных и других сложных, многомерных деталей в условиях массового и, в ряде случаев, крупносерийного производства экономически выгодно выполнять на традиционном оборудовании с жёсткими системами управления. Это оборудование постоянно совершенствуется и развивается. При этом оно часто интегрирует в себе отдельные элементы, заимствованные из техники ЧПУ, что повышает его гибкость и технологические возможности. Но в объёме выпуска автоматических станков доля жёстко программируемого специального и автоматического оборудования увеличивается незначительно.

В то же время работы по внедрению в производство гибкой автоматизации за рубежом во всех типах производства, но особенно в серийном (мелко-, средне-, - крупном), получают приоритетное развитие; существенно возросла надёжность и производительность станков с УЧПУ и сервисных устройств к ним (роботов, манипуляторов, автоматического транспорта и других). Рассмотрим некоторые обобщённые технологические возможности многоцелевых станков [4].

Современные ОЦ и ТОЦ это системы механотроники самого высокого уровня. Они компактны, эргономично оформлены, имеют мощные высокодинамичные приводы; жёсткую конструкцию станины и всех узлов, термосимметричные направляющие и шпиндельный узел; снабжены большим количеством разнотипных инструментов и автооператорами для их последовательной замены по УП.

Многоцелевые станки воплощают идею концентрации и комбинации операций, широко функциональны и универсальны. ТОЦ и ОЦ обеспечивают одноточечное расположение оборудования в пространстве, 3-х – 6-ти стороннюю обработку, позволяют интегрировать и выполнять все или большее

число разнородных технологических операций, например: получистовое и чистовое точение и растачивание, фрезерование всеми типами фрез, сверление, рассверливание, зенкерование, развёртывание, резбонарезание метчиками и фрезами, и др. непрерывно, за один установ заготовки, без её перемещения по цеху, что во много раз позволяет сократить длительность цикла производства и стабилизирует точность обработки.

Изготовление объёмно-сложных по форме, многомерных корпусных деталей и не центровых тел вращения может быть осуществлено полностью за один установ на одном станке или в гибкой технологической ячейке из двух станков последовательно или последовательно параллельно в автоматическом цикле. Существенно уменьшается потребность в квалифицированной рабочей силе. Практически полностью исключается ручной труд на вспомогательных и машинных переходах обработки, ликвидируются (или сводятся до минимума) межоперационные транспортные, контрольные, установочные и разметочные операции, складирование и пролёживание заготовок. Отпадает необходимость в многочисленных перемещениях заготовок по цеху и в большой номенклатуре дорогой специальной оснастки; обеспечивается возможность многостаночного обслуживания. В результате достигаются преимущества, свойственные поточному крупносерийному производству.

Для повышения законченности цикла обработки и повышения уровня автоматизации и функциональности многоцелевые станки типа ОЦ оснащают одно и двух - поворотными столами, различными поворотными головками, в том числе многошпиндельными, для углового сверления и фрезерования; устройствами для автоматической замены спутников с заготовками и обработанными деталями. Станки типа ТОЦ комплектуют двумя и, реже, тремя револьверными головками, в том числе, с приводными инструментами и механизмом кругового позиционирования шпинделя – осью С в дискретном режиме 0 – 360 градусов.

Оба типа многоцелевых станков комплектуют различными системами активного автоматического контроля: деталей, инструментов, процесса обработки, самодиагностики УЧПУ и станка.

Перечисленные компоненты выдвигают ОЦ и ТОЦ на передний план в технологии гибкой автоматизированной обработки деталей объёмно-сложной формы.

Многоцелевые станки и, во многих случаях, одноцелевые станки с CNC – ЧПУ являются первым уровнем гибкой автоматизированной обработки. Максимальное освоение их экономического потенциала по времени работы и техническим возможностям потребителями создаёт предпосылки для интенсивной разработки гибких технологий более высокого уровня: робототехнических комплексов (РТК), гибких производственных модулей (ГПМ), гибких производственных систем (ГПС).

Многоцелевые станки, в ряде случаев, целесообразно комплектовать промышленными роботами, автоматическими манипуляторами или системой спутников с установленными на них заготовками вне рабочей зоны станка. Универсальные станки, управляемые от УЧПУ, ОЦ и ТОЦ за рубежом (по их

значимости в машино- и приборостроении) сравнивают с созданием паровой машины, автомобиля, самолёта, а гибкое автоматизированное производство (ГАП) – с достижениями космической техники.

Эти достижения позволили перейти к качественно более прогрессивному этапу технологии и организации производства, который в литературе всё чаще определяется термином «Гибкая автоматизация». Ниже приводится их терминология (таблица №1).

Таблица 1. Терминология

Обозначение		Определение
Русское	Международное	
Гибкие производственные системы (ГПС)		
ГПС	FMS	Гибкая производственная система (это обобщающий термин для всех уровней гибкой автоматизации) – совокупность оборудования с УЧПУ (ГПМ, станки, транспорт и т.д.) с управлением от ЭВМ, обладающая свойством автоматизированной переналадки при производстве изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик.
ГПМ	FMM	Гибкий производственный модуль – обрабатывающий центр с накопителем заготовок, магазином инструмента и автоматическим осуществлением всех функций. Понятие ГПМ относится и к робототехническому комплексу, если предусмотрена возможность встраивать его в ГПС более высокого уровня.
ГАЛ		Гибкая автоматическая линия – ГПС, в которой оборудование расположено в заданной последовательности технологических операций
ГАУ		Гибкий автоматизированный участок – ГПС, в которой предусмотрено изменение последовательности использования технологического оборудования.
ГАЦ	FMF	Гибкий автоматизированный цех – ГПС для изготовления изделий (узлов) заданной номенклатуры, включающая в себя несколько ГАУ или ГАЛ с общей транспортной и складской системой.

В дореформенные годы в нашей стране проводились серьёзные теоретические и прикладные исследования, включая опытно – конструкторские работы по внедрению гибкой автоматизации в машино- приборостроении. При рыночных преобразованиях результаты этих работ существенно замедлились или совсем приостановились. Многие достижения и накопленный опыт

утрачены или не востребованы. Однако гибкая автоматизация в технологии металлообработки – необратимая ценность. Это определяет насущную необходимость ее более интенсивного и широкого промышленного использования. Здесь, по-видимому, целесообразно использовать стимулирующие и координирующие воздействия государственных институтов, как это принято во всех промышленно развитых странах. Одними из необходимых мер, в этом плане, являются: многократное усиление государственной поддержки инновационной активности машино-приборостроения; стимулирования научно-технического прогресса за счет увеличения бюджетных ассигнований и жесткий контроль их целевого использования; освобождение от налогов расходов из прибыли предприятий на внедрение новой техники, включая финансирование мероприятий по внедрению гибкой автоматизации механического производства по всем его технологическим переделам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Штаймхимер Р. «Концепция технологии 90-х годов. Автоматика и робототехника». Издательство: Модерн Индустрии (Германия) и Ост Контакт (Швейцария) № 2 1990 г. С. 12 –18.
2. Шлишевский Б.Э., Соснов А.Н., Трифонов Е.Е. «Микропроцессорные устройства ЧПУ и Гибкая автоматизация оборудования в оптическом приборостроении». Новосибирск, НИГАиК, 1989 год, 143 с.
3. Каталоги и проспекты, материалы симпозиума фирм производителей УЧПУ за 2002 – 2004 год: Hajdenchajn, Siemens, Boch, Traub, Gildemejster (ФРГ); Fanuc, Jmazaki, Okuma (Япония); Fagor (Испания) Num (Франция).
4. Каталоги, проспекты и материалы симпозиумов (по ОЦ и ТОЦ) станкостроительных фирм: ОАО «СТЕРЛИТОМАК - М. Т. Е.», ОАО «ИЗТС», ОАО «Красный пролетарий», ОАО «РСЗ» (Россия); Heckler – Koch, Hüller – Hille, Burkhardt und Weber, Maho, F. Werner, Ex – Cell – O, Mauser, Traub, Gildemeister (ФРГ); Cincinnati Milackron, Kearney + Trecker, HAAS AUTOMATION (США); Oerlikon, Wyssbrod, Wahli (Швейцария); Olivetti, Mandelli (Италия); Mitsui Seiki, Roki – Rorki, Makino, Tayoda, OKUMA (Япония); Bridgenort (Англия). 2000 – 2004 г.

© Б.Э. Шлишевский, А.Н. Соснов, 2006

УДК 621906. 01156

Б.Э. Шлишевский, Н.К. Соснова

СГГА, Новосибирск

ЭКСТЕНСИВНЫЕ РЕСУРСЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКОВ С ЧПУ

Многоцелевые станки (станочные системы) с микропроцессорными устройствами числового программного управления (УЧПУ) являются уникальным автоматическим оборудованием. В международной литературе их именуют термином «Обрабатывающий центр» (ОЦ) и «Токарный

обрабатывающий центр» (ТОЦ). Они обладают широчайшим спектром технологических возможностей и производительностью [1]. В то же время имеют очень высокую стоимость до 5 – 10 миллионов рублей или выше (для обработки крупногабаритных деталей). Поэтому вопросы экономичности обработки деталей на их основе требуют особого внимания и изучения. Первым необходимым условием их рационального использования является обработка особо сложных, точных, многомерных деталей, как в оптическом производстве так и в других отраслях машино - приборостроения, в условиях мелко и средне-серийного производства.

Эффективность автоматизации на основе ОЦ и ТОЦ оценивается по интегральным показателям: экономическому эффекту за год (Эфг) в рублях, сроку окупаемости капитальных затрат (Ток), в годах, с учётом следующих, изложенных ниже, дополнительных источников экономии, которые отсутствуют при использовании станков с ручным управлением и не всегда выступают в явном виде:

1. Повышение производительности труда оператора за счёт: концентрации разнородных операций обработки за один установ на ОЦ и ТОЦ; возрастание непрерывности процесса обработки, отсутствие коммуникационных потерь; возможность применения многостаночного обслуживания (двух-четырёх станков); интенсификации режимов резанья на 150 – 400%; облегчения условий труда, снижение утомляемости операторов и обеспечение технике безопасности; многократное (на порядок и более) сокращение длительности цикла обработки и объёмов незавершённого производства, сложной технологической оснастки и других оборотных фондов; повышение и стабилизация качества - повторяемой точности обработки до такого уровня, который при традиционных методах обработки был практически не достижим.

Станки ОЦ и ТОЦ выполняются по повышенному, высокому и особо высокому классам точности, что исключает ошибки и разброс размеров в деталях; обеспечивает сокращение трудоёмкости доделочных и пригоночных работ на сборке (кратно числу операций на эти виды работ для сопрягаемых деталей); исключаются неточности многочисленных приспособлений используемых на станках с ручным управлением (РУ), многократных установок, базирования, закрепления заготовок, постоянные и случайные погрешности станков с РУ.

На станках с ЧПУ, ОЦ и ТОЦ, по требованию заказчика, обеспечивается активный контроль обрабатываемых деталей, коррекция размеров координат положения режущих кромок инструмента и других функций технологического процесса, включая самодиагностику устройства ЧПУ и контроль работы станка; ликвидируются операции разметки в механическом производстве; экономятся затраты и многократно сокращается потери времени на межоперационное пролёживание заготовок, их учёт и складывание; достигается экономия на межоперационном транспорте и в площадях складских помещений.

2. Повышение гибкости производства, за счет быстрой переналадки оборудования на изготовление новых деталей.

3. Сокращение цикла подготовки производства новых деталей и, следовательно, изделий.

4. Достижение большого организационного эффекта: упрощение планирования, диспетчирования, учёта, надёжного обеспечения производства сложными базовыми деталями:

- Сокращение времени между принятием заказа на обработку и выдачей готовых деталей, облегчение контроля сроков прохождения заказов;

- Упрощение синхронизации времени обработки различных деталей, быстрое согласование программы загрузки станков в зависимости от конкретных условий.

5. Для планово-производственных служб – упрощение увязки вопросов, связанных с организацией работ по обеспечению ритмичности и ликвидации «узких мест» в связи с радикальным снижением брака из-за утомляемости рабочих – станочников сравнительно с обработкой на станках с РУ.

6. Сокращение потребности в квалифицированных рабочих-операторах, контролерах, основных и вспомогательных рабочих, в технических специалистах – программистах, в управленческом персонале, что уменьшает прямые затраты по заработной плате, косвенные затраты на подоходный налог, отчисления в социальную сферу и, в конечном счете, обеспечивает снижение себестоимости продукции.

7. Существенная экономия: основных и вспомогательных производственных помещений (зданий, сооружений) и другого имущества (технологического, подъемно-транспортного, энергетического и иных видов оборудования); площадей земельного участка, включая, все коммуникации, что так же обеспечивает весомое уменьшение налоговой нагрузки; сокращение других, менее значительных прямых и косвенных налогов на единицу продукции. Повышение $\cos \varphi$ и уменьшение платы за электроэнергию, а так же сокращение затрат и экономия всех других видов энергоносителей.

8. Одним из важнейших достижений использования современных станков с ЧПУ следует считать: повышение интеллектуальности производственной среды и квалификации персонала; улучшение структуры материальных и информационных потоков; сокращение коммуникационных потерь; возможность ускоренной переналадки к изменению рыночного спроса.

9. Для многих предприятий важным является фактор – повышение и стабилизация качества, – что гарантирует высокий уровень технологической однородности продукции, её взаимозаменяемость, снижение затрат на пригоночные и притирочные работы на сборке, и в конечном счёте – повышение конкурентоспособности выпускаемой продукции.

Годовая экономия Γ_3 в рублях оценивается разностью годовых приведённых затрат на изготовление одинакового объёма продукции в течении года

$$\Gamma_3 = \Pi_1 - \Pi_2 = (C_1 + E_n K_1) \beta - (C_2 - E_n K_2). \quad (1)$$

Где, Π_1 и Π_2 – приведенные затраты за год работы соответственно по базовому и новому вариантам; C_1 и C_2 – себестоимость обработки, производимой в течении года продукции, соответственно на базовом (универсальном) станке и на станках с ЧПУ, ОЦ и ТОЦ; K_1 и K_2 – величина капитальных вложений в основные фонды (на оборудования и здания) и в оборотные средства (оснастку, незавершённое производство, управляющие программы), соответственно по базовому и новому вариантам; E_n рекомендуемый коэффициент эффективности капитальных вложений.

Срок окупаемости капитальных вложений τ для государственных предприятий машиностроения

$$\tau = \frac{K_1 - K_2}{C_1 - C_2} \leq 8,3 \text{ года.} \quad (2)$$

Для предприятий других форм собственности τ определяется сроком погашения кредита, взятого на приобретение оборудования.

Коэффициент приведения затрат базисного варианта к годовому объёму производства на станке типа ОЦ и ТОЦ β равен

$$\beta = \frac{T_{шт.к1} F_{эф2}}{T_{шт.к2} F_{эф1}}, \quad (3)$$

где $T_{шт.к1}$, $T_{шт.к2}$, $F_{эф.1}$, $F_{эф.2}$ соответственно штучно-калькуляционное время и годовые фонды эффективного времени работы базового и нового станка.

Себестоимость обработки единицы продукции с целью анализа влияния показателей, характеризующих уровень организации использования ОЦ, можно представить выражением:

$$C = \frac{C_3}{K_m} \mu + \frac{C_f}{Q F_{эф} K_{см} K_z (1 - K_n) t}, \quad (4)$$

где C_3 – расходы по заработной плате на единицу продукции при обслуживании одним рабочим одного станка; K_m – коэффициент многостаночности; μ – коэффициент, характеризующий отношение материальных затрат к расходом заработной платы в составе условно-переменных расходов при обработки конкретной группы деталей; C_f – условно-постоянные расходы на годовой выпуск продукции; Q – число станков на участке; $F_{эф}$ – эффективный фонд времени при односменном режиме работы оборудования в плановом (отчётном) периоде; $K_{см}$ – коэффициент сменности оборудования; K_z – коэффициент загрузки оборудования; K_n – коэффициент, учитывающий затраты времени, в течение которого на ОЦ контролируют и отлаживают внедряемые новые управляющие программы (при выполнении этих

работ вне оборудования или вне рабочей смены $K_n = 0$); t – станкоёмкость изготовления деталей;

Из формул 1, 2, 3, следует что увеличение годовой экономии Γ_9 и сокращение срока окупаемости затрат τ в решающей степени обеспечивается сокращением затрат по заработной плате на единицу продукции C_3 , снижением $t_{шт.к2}$, повышением $F_{эф2}$, уменьшением стоимости капитальных вложений и оборотных средств K_2 .

Из (4) следует, что увеличение коэффициентов сменности и загрузки станков $K_{см}$, K_3 обеспечивает рост выпуска продукции и снижение условно-постоянных расходов на единицу продукции так же за счёт наиболее полного использования эффективного времени $F_{эф}$ работы оборудования. Расширение зоны обслуживания (то есть увеличение коэффициента многостаночности K_m) позволяет снизить условно-переменные расходы, за счёт уменьшения издержек на заработную плату на единицу продукции.

Из формулы (4) следует так же, что снижение себестоимости C (в общем случае) в значительной степени зависит от уменьшения станкоёмкости t и увеличения количества станков на участке Q .

Таким образом, повышение уровня организации и использования ОЦ и ТОЦ по времени обеспечивает снижение себестоимости обработки деталей без привлечения дополнительных капитальных вложений.

Следовательно, в организационном плане основные идеи в стратегии использования станков с ЧПУ типа ОЦ можно сформулировать так:

- Всемерное увеличение эффективного времени работы оборудования $F_{эф2}$ путём организации трёхсменной работы;
- Сокращение всех видов внутрисменных простоев по техническим и организационным причинам;
- Выпуск большего объёма дополнительной продукции (3) за счёт максимально увеличенной загрузки станков;
- Массированное внедрение станков с ЧПУ и ОС в объёме $\geq 10 - 15\%$ от общего количества станочного оборудования, что снижает удельные издержки эксплуатации;
- Организация многостаночного обслуживания.

Эти компоненты являются экстенсивными ресурсами повышения эффективности станков с ЧПУ.

Экстенсивное использование ОЦ можно характеризовать коэффициентом, который показывает время работы станка и время его простоев.

$$K_9 = \frac{F_{эф2}}{F_k}, \quad (5)$$

где F_k – календарный фонд времени.

Экстенсивные ресурсы предельно максимизируются при условии

$$F_{эф2} \rightarrow F_k \text{ и } K_{эф} \rightarrow 1.$$

ОЦ по технологическим возможностям и по стоимости – уникальные станки. Такое оборудование по зарубежным источникам при годовом календарном фонде времени 8400 часов необходимо эксплуатировать в 3 смены и, во многих случаях, с непрерывной рабочей неделей. Эффективный фонд рабочего времени станка $F_{эф2}$ следует довести до 4500 – 6000 часов по штучно-калькуляционному времени (на универсальных станках с ручным управлением и станках с ЧПУ при двухсменной работе этот показатель составляет не более 1400 – 1800 часов).

Трехсменная загрузка ОЦ и ТОЦ – *радикальный путь* и первое необходимое условие многостороннего повышения эффективности и организованного уровня производства, позволяющий увеличить на 800 – 850% объем выпуска сложных корпусных и других базовых деталей произвольной формы на одном станке типа ОЦ и ТОЦ; обеспечивается реальное (в 30 – 40 раз) сокращение количества используемого универсального оборудования; освобождаются большие производственные площади; пропорционально росту $F_{эф2}$ повышается фондоотдача и снижается удельная доля амортизационных отчислений в себестоимости на единицу продукции.

Многостаночное обслуживание. В ОЦ и ТОЦ примерно 9/10 времени работы станка проходит без непосредственного участия оператора, его функция – наблюдение, периодический контроль, извлечение готовых деталей и замена заготовок. Машинное и машинно-вспомогательное время (станкоемкость) обработки заготовки обычно превышают 0,25 – 0,35 часа, что создаёт объективные предпосылки вариантного, многостаночного обслуживания 2– 4 станков ОЦ и ТОЦ. Оборудование расставляется группами, в соответствии с требованиями научной организацией труда (НОТ), с минимизацией пути перемещения оператора. Влияние на возможность многостаночного обслуживания оказывает надёжная работа станка, системы ЧПУ, высококачественный, инструмент, автоматическое дробление и удаление металлической стружки из рабочей зоны, механизированное обеспечение заготовками и эвакуация обработанных деталей, надлежащее сервисное обслуживание рабочих мест.

Здесь, на всех стадиях производства, необходимы и оправданы различные активно-стимулирующие формы оплаты труда: за технологическое, производственное и проектное экономическое освоение станков, за рационализацию и совершенствование управляющих программ, за освоение обработки новых деталей, за перевыполнение расчетных норм выработки, за бездефектный выпуск продукции, за максимально-высокий коэффициент загрузки оборудования.

Необходимо создание привилегий персоналу вечерней и ночной смены. Целесообразна организация бригадного подряда с непрерывной многосменной работой.

Необходимо исключить практику ограничения оплаты труда рабочих – операторов определенным, предельным уровнем, в независимости от количества и качества изготовленной продукции.

В исследованиях выполненных за рубежом отмечается, что двухсменная работа повышает прибыль от внедрения станков с ЧПУ и ОЦ, ТОЦ на 25 – 38%, а трёхсменная – ещё на 18 – 27% (большие значения при меньшем числе переналадок) сравнительно с двухсменной.

Срок окупаемости ОЦ и ТОЦ по данным некоторых фирм ФРГ при числе смен 1; 2; 3 и годовом эффективном фонде времени равны соответственно 1700; 3200; 4500 часов составляет соответственно 10; 7 и 5 лет. Эти показатели коррелируют с нашими расчётами.

Подтверждением эффективности использования ОЦ в ночные смены можно считать и то, что на международной выставке в г. Москве «Металл – обработка 2004 г.» более 95% демонстрировавшихся ОЦ оснащаются устройствами для работы по принципу «безлюдной» технологии или для работы в ночные смены с ограниченным персоналом. Эти ОЦ, именуемые «станочными модулями» или гибкими производственными модулями (ГПМ); оснащены накопителями приспособлений – спутников, с установленными на них заготовками, что позволяет осуществить автоматическую подачу и закрепление заготовок в рабочую зону станка для их обработки. Число приспособлений спутников колеблется от 4 до 12 единиц.

Внедрение «безлюдной» технологии (или работы с ограниченным персоналом) требует высокой надёжности оборудования, постоянного автоматического контроля состояния процессов обработки и саморегулирования (адаптации) в соответствии с изменяющимися условиями работы. Такие условия современными высококачественными электронными и механическими элементами автоматики и системы ЧПУ на микропроцессорах обеспечиваются достаточно надёжно [2]. Таким образом, обуславливается целесообразность и перспективность широкой апробации метода «безлюдной» технологии при работе во вторую и, особенно, в третью смены в ближайшие годы, по мере накопления опыта, обеспечения заказами и полной загрузки оборудования.

Несмотря на очевидную выгоду трёхсменной эксплуатации ОЦ организация этой работы, как показал экспресс анализ, по ряду ведущих предприятий Новосибирска, нельзя признать удовлетворительной. Станки работают в одну смену, у ОЦ большие простои; многие станки законсервированы, что ведёт не к снижению, а резкому возрастанию стоимости выпускаемой продукции в сопоставимых ценах к 1990 году [3]. Излишнее оборудование следует реализовать или обеспечить его полную загрузку.

Совокупное воздействие изложенных выше экстенсивных составляющих (особенно, максимизация использования оборудования по времени, многостаночное обслуживание, плюс дополнительные компоненты рационализации производства) обеспечивают до 2/3 всей экономической эффективности автоматической обработки на основе ОЦ. Это требует особого внимания со стороны менеджеров – пользователей.

Методологически, для достижения перечисленных позитивных результатов, целесообразно использовать системно – целевой подход. На его основе подготовить и реализовать план эксплуатационной подготовки производства станков типа ОЦ и внедрения новых технологий, как это принято выполнять при освоении новых изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шлишевский Б.Э. «Многоцелевые станки с ЧПУ для обработки корпусных деталей и пути повышения их эффективности». М.: ВНИИТЭМР. 1985 год, с. – 64.
2. Каталоги, проспекты и материалы симпозиумов по ОЦ станкостроительных фирм: ОАО «СТЕРЛИТОМАК - М. Т. Е.», ОАО «ИЗТС», ОАО «Красный пролетарий», ОАО «РСЗ» (Россия); Heckler – Koch, Hüller – Hille, Burkhardt und Weher, Maho, F. Werner, Ex – Cell – O. Mauser (ФРГ); Cincinnati Milackron, Kearney + Trecker, HAAS AUTOMATION (США); Oerlikon, Wyssbrod, Wahlen (Швейцария); Olivetti, Mandelli (Италия); Mitsui Seiki, Roki – Rorki, Makino, Tayoda, Okuma (Япония); Bridgenort, HURON (Англия). 2002 – 2005 г.
3. Шлишевский Б. Э., Поветкин И.О. «Компоненты повышения эффективности станков с ЧПУ при обработке деталей типа тела вращения». Сборник материалов конференции «Современные проблемы Геодезии и Оптики», Новосибирск, 2003 год, с.- 199, часть 2.

© Б.Э. Шлишевский, Н.К. Соснова, 2006

КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА НА БАЗЕ МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКОВ С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД

Современная наука всё более последовательно осуществляет системный подход к таким явлениям и процессам, которые прежде рассматривались как механические или аморфные совокупности. Накопленный за рубежом и в нашей стране опыт подтверждает, что системный подход позволяет в более полной мере выявить и оптимизировать многофакторные преимущества и параметры эффективности многоцелевых станков.

Одной из причин длительного освоения в эксплуатации многоцелевых станков с УЧПУ называемых за рубежом «Обрабатывающий центр» (ОЦ) и их недостаточной эффективности является то, что подготовительные работы должным образом не систематизируются и не выделяются в самостоятельный комплекс. В результате многие из них выполняются недостаточно организованно и не своевременно, а некоторые упускаются вообще. Системный подход это во многом исключает. Комплексную автоматизацию и механизацию серийного производства (КМ и АСП) на основе станков с УЧПУ и ОЦ можно рассмотреть, как организационно – техническую систему с множеством объектов различной природы с известными и упорядоченными связями. Эти объекты в определённых границах функционируют как целостная пространственно – временная система для достижения заданной конечной цели (обеспечение программы производства, снижение себестоимости и стабилизация качества продукции, облегчения условий и повышения привлекательности труда).

Для нормального функционирования организационно – технологических систем важными факторами являются: правильное задание (определение) цели, выбор правильных пороговых критериев эффективности, разработка оптимальной пространственной структуры и её элементов, выбор и способ реализации рациональных связей и условий эксплуатации системы. Систему КМ и АСП можно расчленить на подсистемы, пока не получим элементы системы (за элементы применяются объекты, которые в условиях данной задачи не подлежат расчленению на части). Свойства систем определяются не только свойствами отдельных элементов, но и характером взаимодействия между ними. Независимо от масштаба и сложности каждой отдельной системы КМ и АСП, её структуру (при использовании ОЦ) можно представить в обобщённом виде построенной из типовых подсистем, показанных в таблице 1.

Подсистема $У_{\text{тска}}$ (табл. 2) – универсальные и унифицированные (агрегатно модульный принцип) технические средства комплексной автоматизации: многоцелевые станки – автоматы, станки с ЧПУ, промышленные манипуляторы, средства транспорта и механизации вспомогательных процессов.

Подсистема $P_{т и м.}$ – прогрессивные технологии и методы обработки, внедрение прогрессивных инструментов, позволяющих решать новый круг технологических задач: концентрацию операций, оптимизацию и форсирование режимов резания, автоматизацию контроля деталей и инструментов, повышение качества обработки.

Подсистема T_y – технологическая унификация и преемственность путём подбора и перевода обработки на ОЦ номенклатуры трудоёмких, сложных, точных, многомерных деталей с коэффициентом концентрации операции

$K_{к.о.} \geq 8 - 12$ и более, с внедрением типовых переходов, операций и технологических процессов, групповых методов обработки, обратимой технологической оснастки; технологическое освоение станков.

Подсистема O_c – оптимальная специализация по цели производства, формирование на этой базе предметно – замкнутых, преимущественно, поточных подразделений группового производства или технологических ячеек (с количеством оборудования с ЧПУ и $\geq 10 - 15$ единиц); освоение производственной мощности оборудования.

Подсистема T_k – технологичность конструкции заготовок и деталей с целью максимального использования функциональных преимуществ и особенностей многоцелевых станков типа ОЦ и др. и других, оснащенных УЧПУ.

$\mathcal{E}_{оц.мах}$ – максимальная экономическая эффективность автоматизации на основе ОЦ, что предполагает достижение проектной эффективности оборудования в процессе эксплуатации.

Заметим, что количество подсистем и их элементов в конкретных условиях может быть расширено, например, можно ввести подсистему обеспечения инструментом и оснасткой.

Системный подход основан на исследовании, изыскании и построении рациональных структур подсистем различных уровней и их элементов (это базис) и призван обеспечить стабильное функционирование системы КМ и АСП по времени и в пространстве, для обеспечения заданных экономических и производственных показателей.

Ранжирование подсистем I уровня, содержание их элементов, связей и значимость уточняются к конкретным условиям. $\mathcal{E}_{оц.мах}$ можно достигнуть, как показывает опыт предприятий Западной Сибири, путём совокупного использования, интенсивных и экстенсивных ресурсов технологического и организационного характера, присущих станкам с УЧПУ и ОЦ, которые можно выразить функциональной зависимостью (1). Рассмотрим, для примера подсистему $Y_{тска}$, основные элементы которой приведены в таблице 2.

Таблица 1

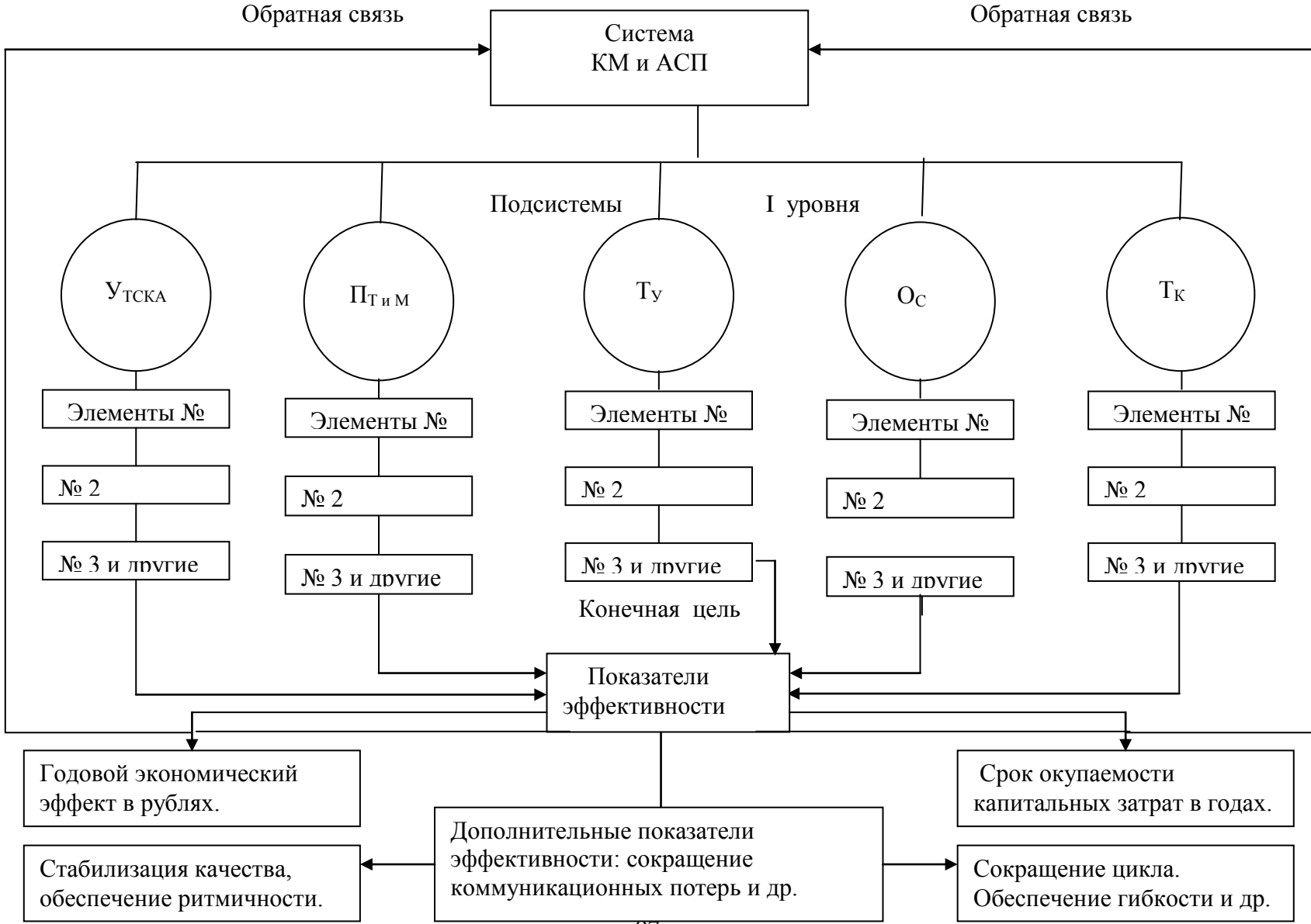
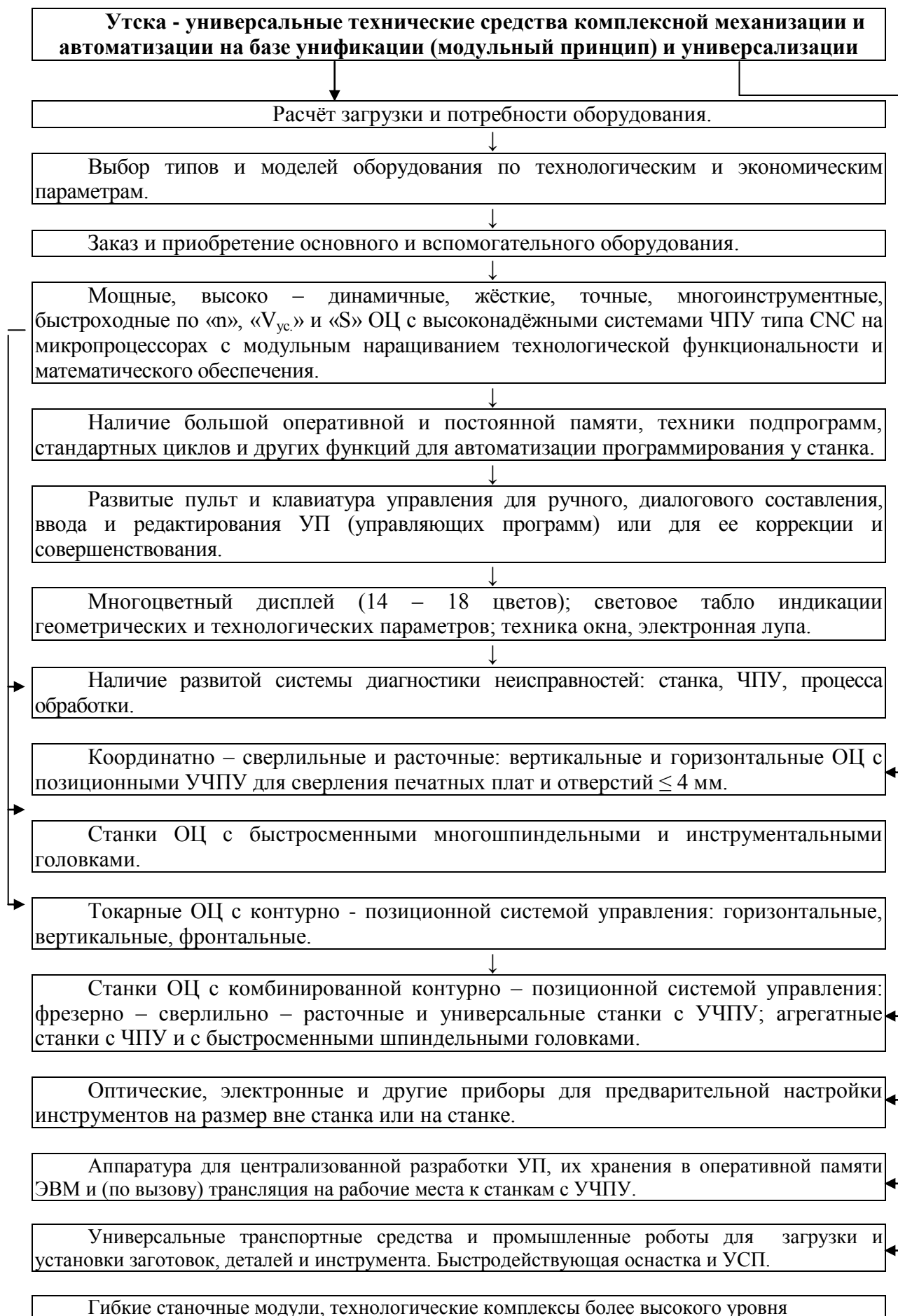


Таблица 2



$$\text{KM и АСП} = (f) \begin{bmatrix} (Y_{ТСКА}) \\ (П_{ТМ}) \\ (T_y) \\ (O_c) \\ (T_K) \end{bmatrix} \rightarrow \mathcal{E}_{\text{оц. max.}}$$

Ответственнейшим моментом успешного применения ОЦ с ЧПУ является выбор и комплектование оборудованием. Необходимо приобретать надёжные, производительные, проверенные технологичные в эксплуатации скоростные, мобильные станки с высокими техническими характеристиками, показанные в работах [1, 2], с приемлемой стоимостью. Из зарубежных станков наиболее дешёвыми являются Японские станки, наиболее дорогими – производства Швейцарии и ФРГ (по данным 2004 г.). В то же время все производители из промышленно развитых стран гарантируют высокое качество продукции. Это подтверждено многолетней практикой их эксплуатацией в СССР и в РФ [1, 2].

Из отечественных ОЦ сверлильно-фрезерно-расточной группы наивысшей репутацией пользуются все модели Ивановского ПО тяжёлых расточных станков, которые комплектуются приводами и УЧПУ зарубежных фирм: «Фанук», «Бош» и другими по заказу потребителей. Надёжные, отечественные токарные ОЦ в РФ к настоящему времени находятся в стадии освоения. За рубежом, в промышленно развитых странах, (Германии, Японии и др.) освоен большой спектр высоконадёжных и производительных станков подобного типа.

При выборе токарных ОЦ приоритет следует отдавать станкам, оснащённым двумя и тремя инструментальными головками, так как до 80% деталей типа тел вращения допускают параллельную обработку двумя инструментами и, в ряде случаев, изготовление и сборку двух – пяти деталей в самостоятельный узел.

ОЦ по технологическим возможностям и габаритам должны соответствовать техническим требованиям, предъявленным к намеченным для обработки деталям. Станки больших габаритов, с излишним набором инструментов в магазине повышают стоимость обработки до 30 – 40% и выше; станки с контурной системой обработки имеют большую себестоимость одного часа обработки, чем с позиционной системой управления, но в парке ОЦ преобладают контурные и контурно – позиционные системы, как более универсальные.

Производительность, надёжность и технологические возможности ОЦ и ТОЦ в решающей степени определяются их динамикой, качеством УЧПУ и автоматикой, связывающей приводы станка с УЧПУ. В результате внедрения за последние 5 – 6 лет множества инноваций станки ОЦ и ТОЦ существенно усовершенствованы и надёжно обеспечивают указанные в паспорте станка

высокие технические параметры: по мощности, частоте вращения шпинделя, по высокой и сверхвысокой скорости холостых ходов рабочего органа станка, по точности и качеству обработки. В частности, в токарных ОЦ фирмы «Гильдемайстер» (ФРГ) используется сверхскоростной привод в виде прецизионного бесступенчатого частотно регулируемого УЧПУ мотора - шпинделя. Таким образом, ликвидируются все промежуточные элементы (зубчатые зацепления, электромагнитные муфты, ременные передачи) между традиционным приводом и шпинделем станка. Этой же фирмой, впервые, в выпускаемых токарных ОЦ внедрен индуктивный линейный привод подачи на основе постоянных магнитов и электромагнитных индуктивных катушек без традиционного высоко-моментного двигателя постоянного тока и шариковой винтовой пары. Такие радикальные конструктивные нововведения существенно повышают жесткость системы станок – приспособление – инструмент – заготовка и обеспечивают: оптимально высокие режимы резания, точность обработки размеров до 7 – 8 квалитета и шероховатость поверхности – до Ra 0,63 – 0,50 мкм.

В заключении отметим, что перечень подсистем и их элементов в каждом конкретном случае для ОЦ - участков и предприятий уточняется применительно к производственным условиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шлишевский Б.Э. «Многоцелевые станки с ЧПУ для обработки корпусных деталей и пути повышения их эффективности». М.: ВНИИТЕМП. 1985 г. с. – 64.
2. Шлишевский Б.Э. «Гибкая автоматизация многосторонней обработки деталей типа не центрированных тел вращения». ВНИИТЕМП, М.: 1986 г. с. – 88.
3. Материалы симпозиума и каталоги фирмы «Гильдемайстер» 2004 г., г. Новосибирск.

© Б.Э. Шлишевский, А.Н. Соснов, 2006

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ СРЕД

Мониторинг нефтесодержащих сред, т. е. определение влагосодержания, солей, серы, температуры и расхода товарной нефти и нефтепродуктов тесно связано с точностью её коммерческого учета.

Известные к настоящему времени наиболее перспективные оптические однофункциональные методы [1] и средства мониторинга не обеспечивают высокой точности измерения из-за широкой области спектра поглощения тех или иных веществ, присутствующих в нефтесодержащих средах.

Использование многофункциональных систем с применением эффекта нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), определяющих одновременно несколько параметров, даёт возможность одновременно контролировать как физико-химические показатели (в том числе их изменение во времени, т. е. их динамическое состояние), так и физические процессы, сопровождаемые одновременным и неодновременным изменением во времени ряда физико-химических величин. Кроме того, применение многофункциональных оптоэлектронных систем не только повышает информативность измерений, но и позволяет уменьшить погрешности от влияния внешних факторов. Например, температура, влажность и уровень вибрации могут учитываться при автоматической коррекции погрешностей.

В данной работе на основе использования эффекта НПВО при взаимодействии с контролируемой средой рассматриваются вопросы разработки нового принципа построения оптоэлектронных систем для мониторинга нефтесодержащих сред. Предлагаемая идея состоит в одновременном применении n источников и n измерительных приемников оптического излучения (ПОИ), установленных на элементе НПВО, выполненного в виде полуцилиндра, и компенсационного (опорного) ПОИ, оптически связанного непосредственно с опорным источником излучения.

Общие принципы многофункциональных измерений

В однофункциональных оптоэлектронных контрольно-измерительных системах процесс преобразования измеряемой величины x_1 в информативный параметр электрического сигнала теоретически должен описываться как

$$Y = F(x_1). \quad (1)$$

А в практических случаях этот сигнал имеет вид

$$Y = f(x_1, y_1, y_2 \dots y_k), \quad (2)$$

где $y_1, y_2, \dots, y_k$ – ряд изменяющихся физических величин, изменений которых существенно влияет на величину Y .

Введение коррекции по одному из y , например, y_j требует использования второго преобразования, описываемого как [2]

$$Y_j = f_j(y_i). \quad (3)$$

Исходя из этого, для извлечения из многомерного сигнала, описываемого выражением (2), информации о величине x необходимо получить сигналы, описываемые уравнением (3), что очень трудно осуществить в практике.

Многофункциональные оптоэлектронные методы позволяют определять физико-химические величины за счет использования набора многомерных сигналов, т. е. зависящих от многих x_i , расширяют возможности оптоэлектронного метода измерения неэлектрических величин. Метод основан на том, что если на основе специального элемента НПВО (в наших случаях полуцилиндрического) можно получить n многомерных сигналов, информативные параметры которых зависят от n физических величин таким образом, что описывающие эти зависимости уравнения образуют систему n независимых уравнений:

$$\begin{aligned} Y_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n); \\ Y_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n); \\ &\dots\dots\dots \\ Y_n &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n), \end{aligned} \quad (4)$$

то в целом ряде случаев оказывается возможным с помощью значений информативных параметров $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ определять значения отдельных или всех n физико-химических величин x_i , поддающихся оптическому контролю.

Определяемые параметры $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$, называемые первичными сигналами, измеряются последовательно один за другим, запоминаются, и лишь затем применяется спектр измерений для определения параметров x_i , или все они измеряются одновременно и совместно используются для формирования выходных сигналов, пропорциональных подлежащим измерению x_i .

Разработка многофункциональных систем мониторинга на основе элемента НПВО

Авторам разработан ряд оптоэлектронных приборов [3] с использованием элемента НПВО для решения проблем автоматического анализа структурно-группового состава. Создано оптоэлектронное устройство НПВО для определения содержания эмульсионной воды в нефти и нефтепродуктах [4]. Преимущество НПВО-метода мониторинга, по сравнению с другими физико-химическими методами, заключается в точности и одновременном определении нескольких оптических параметров. Также, метод НПВО превосходит названные методы в оперативности и простоте, обеспечивая в тоже время неразрушающий контроль [5, 6].

В данной статье предложена оптоэлектронная система многофункционального мониторинга нефтесодержащих сред на основе элемента НПВО, т. е. определение содержания влаги, солей, серы, температуры и расхода товарной нефти и нефтепродуктов. Блок-схема системы, осуществляющей многофункциональный мониторинг при одновременной обработке всех n первичных сигналов Y_j , приведена на рис. 1, на рис. 2 – вид датчика по сечению А-А.

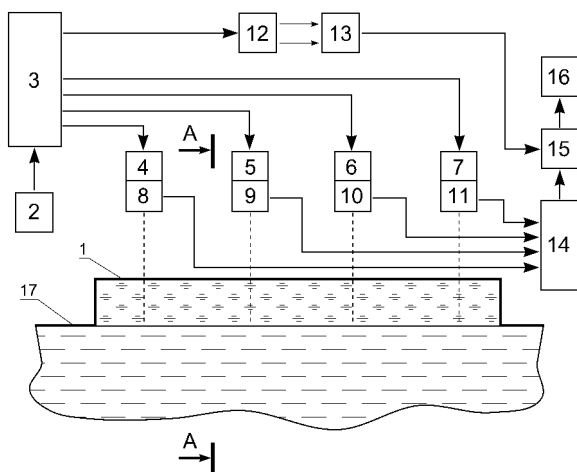


Рис. 1. Функциональная схема системы

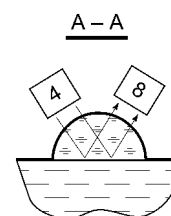


Рис. 2. Вид датчика

Система включает датчик НПВО, выполненный в виде полуцилиндра 1, по всей длине полуцилиндра 1 на его цилиндрической поверхности расположены источники излучения 4-7, оптически связанные с измерительными фотоприемниками 8-11. Система также включает компенсационный источник излучения 12 и фотоприемник 13, оптически связанные между собой. Задающий генератор 2, соединенный с коммутатором 3, один выход которого соединен с компенсационным источником излучения 12, а другие выходы – с источниками излучения 4-7, выход каждого измерительного фотоприемника 8-11 соединен с одним из входов усилителя 14, выход которого соединен с первым входом блока обработки фотозлектрического сигнала 15, второй вход которого соединен с компенсационным фотоприемником 13, а выход – с регистрирующим прибором 16. Каждый источник излучения 4-7 оптически связан через измерительный гран полуцилиндра 1 с соответствующим измерительным фотоприемником 8-11. Вместо регистрирующего прибора 16 может быть использована ЭВМ. В качестве источников излучения 4-7 и компенсирующего источника излучения 12 могут быть использованы светодиоды.

Система работает следующим образом. Задающий генератор 2 вырабатывает прямоугольные импульсы с частотой следования 8-10 кГц, поступающие на вход коммутатора 3, который делит их на две части. Одна часть импульсов поступает на источники излучения 4-7, а другая часть – на компенсирующий источник излучения 12. Потoki излучения от источников

излучения 4-7 фокусируются на измерительном грани полуцилиндра 1, отражаются и поступают на измерительные фотоприемники 8-11, где оптический сигнал преобразуется в электрический, который поступает на входы сумматора 14 и суммируется в нем. Оптическое излучение от компенсационного источника излучения 12 поступает на компенсационный фотоприемник 13.

Электрические сигналы с выхода усилителя 14 и компенсационного фотоприемника 13 поступают в блок обработки фотоэлектрического сигнала 15, где определяется отношение величин электрических сигналов, соответствующих компенсационному потоку и измерительным потокам излучения, которые пропорциональны параметрам среды. Электрический сигнал с выхода блока обработки фотоэлектрического сигнала 15 поступает на регистрирующий прибор 16 (или ЭВМ), по показаниям которого судят об измеряемых параметрах среды.

В последнее время для анализа содержания одного вещества в другом все чаще используют ИК-спектроскопию. Суть ИК-метода с использованием эффекта НПВО состоит в том, что длина волны измерительных светодиодов лежит в полосе поглощения ИК-спектра влаги, солей, серы, а опорных СИД – вне полосы поглощения, но близко к длине волны измерительных светодиодов и служит для компенсации неинформативных параметров.

Создание многофункциональных систем мониторинга нефтесодержащих сред

Применение ЭВМ в построении оптоэлектронных многофункциональных автоматических контрольно-измерительных систем (ОМАКИС) для решения конкретных задач анализа состава и свойств жидких сред является этапом дальнейшего более совершенного развития структуры оптических приборов.

ЭВМ обеспечивает выполнение аналого-цифровых измерительных преобразований, вычислительных процедур, выдачу полученной информации, формирование командной и другой служебной информации, необходимой для функционирования ОМАКИС.

Следует отметить, что создание аналитических измерительно-вычислительных комплексов с использованием микропроцессорной техники – одно из основных направлений развития комплексных автоматизированных аналитических систем контроля (ААСК) качества нефти и нефтепродуктов [7].

Применяя высокочувствительный метод на основе элемента НПВО, можно создать ААСК для качественного и количественного анализа нефти и нефтепродуктов. На рис. 3 приведена структурная схема ААСК качества нефти и нефтепродуктов на основе ОМАКИС. С помощью данной системы можно измерять одновременно следующие параметры: плотность, содержание воды, солей, серы, а также расход.

Во всех типах оптоэлектронных систем, предназначенных для контроля качества нефти и нефтепродуктов, использующих метод НПВО, всё чаще применяются микропроцессоры и ЭВМ, которые позволяют расширить функциональные возможности систем и повысить точность анализа за счет введения автоматической коррекции воздействия внешних факторов, например, температуры окружающей среды.

Встраивание современной ЭВМ позволяет автоматизировать процессы калибровки, наладки и диагностики ОМАКИС.

Создание высокочувствительной простой и надежной ААСК, обеспечивающей мониторинг нефтесодержащих сред, является в наше время актуальной задачей. Однако, как показано в данной статье, существуют различные и достаточно эффективные пути для достижения поставленной цели.

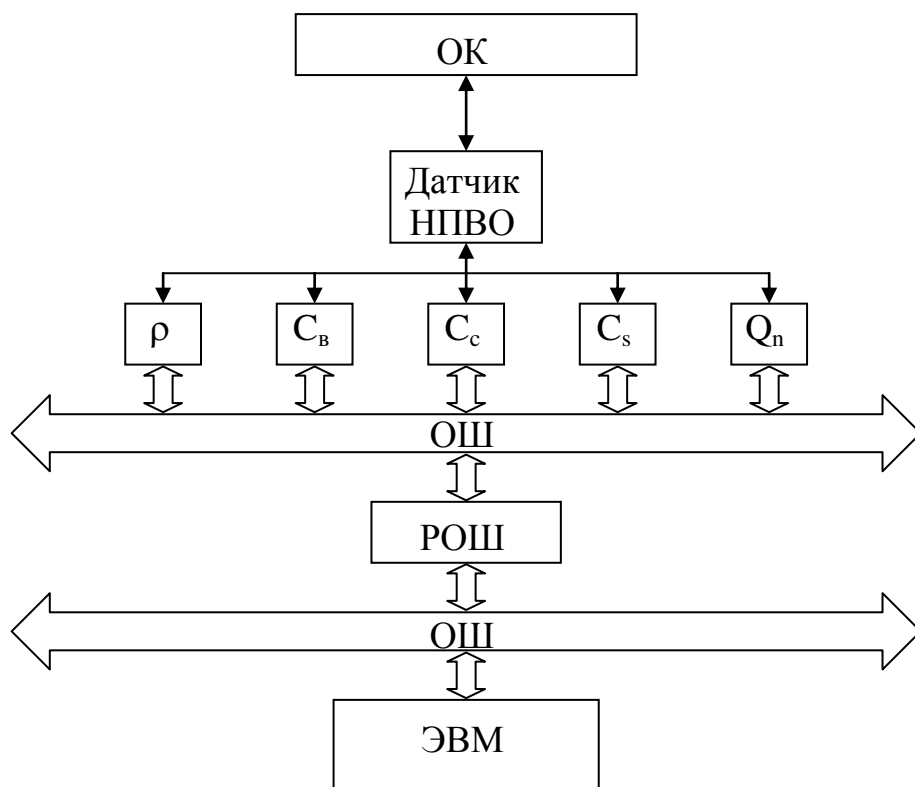


Рис. 3. Структурная схема ААСК качества нефти и нефтепродуктов на основе ОМАКИС: ОК – объект контроля; ОШ – общая шина; РОШ – расширитель общей шины. Автоматические измерители: ρ – плотности; $C_{\text{в}}$ – влажности; $C_{\text{с}}$ – солей; C_{s} – серы; Q_{n} – расхода

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ермаков, О.Н. Прикладная оптоэлектроника / О. Н. Ермаков. – М. Техносфера, 2004. – 416 с.
2. Госьков, П.И. Оптоэлектронные развертывающие полупроводниковые преобразователи в измерительной технике / П.И. Госьков. – Томск: ТГУ, 1978. – 190 с.
3. Рахимов, Н.Р. Оптический контроль в нефтеперерабатывающем производстве. монография / Н.Р. Рахимов. – Фергана: Техника, 2004. – 91 с.
4. Рахимов, Н.Р. Оптоэлектронные системы с применением эффекта НПВО для анализа состава нефти и нефтесодержащих сред / Н.Р. Рахимов // Современные проблемы геодезии и оптики. – Новосибирск: СГГА. – 2004. – С. 163 – 167.
5. Рахимов, Н.Р. Определение оптических параметров нефти и нефтепродуктов: сб. ст. / Н.Р. Рахимов, Р.Ж. Тожиев, А.А. Холмирзаев. – Бухара: INNOVATION, 2000. – С. 141 – 143.

6. Пат. РУз. IDP 0227 от 30.05.2001. Устройство для определения содержания эмульсионной воды в нефти и нефтепродуктах / Ш.М. Сайдахмедов, Р.Ж. Тожиев, Н.Р. Рахимов, А.Х. Хайдаров. – Оpubл. БИ. – 2005, № 6.

7. Телемеханические комплексы для нефтяной промышленности / А.А. Абдуллаев, А.А. Джавадов, А.А. Левин, И.А. Набиев. – М.: Недра, 1982.

© Н.Р. Рахимов, 2006

ОПТОЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

В настоящее время разрабатываются средства мониторинга физико-химического состояния различных материалов и технологических процессов. Этими средствами обеспечивается регулярное целенаправленное получение объективной информации об условиях эксплуатации технических объектов и дифференцированный учет расходования их ресурса. Самым массовым (благодаря сравнительной простоте и дешевизне) средством мониторинга могут стать оптоэлектронные системы на основе полупроводниковых светоизлучающих диодов (СИД), лазерных диодов (ЛД), приёмников оптического излучения (ПОИ) и волоконных световодов (ВС).

Одно из перспективных применений ВС в мониторинге строительных конструкций можно считать получение критериев, по которым оператор создаваемой системы мониторинга может делать вывод о надежности контролируемой конструкции, и, соответственно, об уровне безопасности.

В отличие от других методов (акустического, тензометрического и т. п.) оптоэлектронные системы с применением ВС позволяют проводить контроль по сколь угодно сложной конструкции, могут быть внедрены внутрь железобетонных изделий.

В последнее время значительно улучшено качество ВС т. е. получены ВС с потерями меньше 1 дБ/км. Подбором материала и конструкции оптоволокна добиваются увеличения потерь для мод, распространяющихся в оболочке, и их снижения для направленных мод в сердечнике [1].

Оптические волокна из чистого кварца, покрытые полимерной оболочкой, имеют сердечник большого диаметра и относительно большую апертуру (NA).

В наших исследованиях в основном используются полимерные волокна. Они имеют малый удельный вес, большую гибкость при относительно большом диаметре, механическую прочность, высокую технологичность. Достигнутое минимальное затухание при длине волны 0,66 мкм – 20 дБ/км [2, 3].

Технические характеристики некоторых типов полимерных оптических волокон исследованы достаточно полно [4 – 6].

В данной работе изложена методика и приведены результаты экспериментального исследования механических характеристик ВС, с целью использования в качестве датчика деформации и предразрушения элементов железобетонных конструкций.

Из многообразия выпускаемых световодов для определения предразрушения в наибольшей степени подходят полимерные и кварцевые с плотно прилегающей оболочкой из полиамида. Установка их на контролируемую поверхность производится с помощью известных в тензометрии клеев.

Рассмотрим здесь первичный преобразователь усилия, выполненный на основе плоского световода с нарушением условий полного внутреннего отражения. На рис. 1 изображена схема экспериментальной установки для снятия характеристик такого преобразователя усилия. Излучение от лазерного диода ИЛПН-301-1, накачиваемого импульсами тока амплитудой 2А и длительность 10 мкс, через оптический кабель (ОК) вводится в плоский световод (ПС). Первоначально динамометрическая установка (ДУ) находится в свободном (без прижатия) состоянии, то зазор между ней и верхней гранью плоского световода будет больше длины волны используемого излучения и свет от источника излучения путем последовательных полных внутренних отражений распространяется по световоду и попадает на ПОИ. Если к ДУ приложить усилие (например, с помощью винта), то она будет упруго деформироваться и прижиматься к плоскому световоду, что приведет к уменьшению зазора и нарушению условий полного внутреннего отражения на верхней грани световода. В результате излучение будет выходить через верхнюю грань световода, а ПОИ будет фиксировать уменьшение светового потока, выходящего с торца плоского световода.

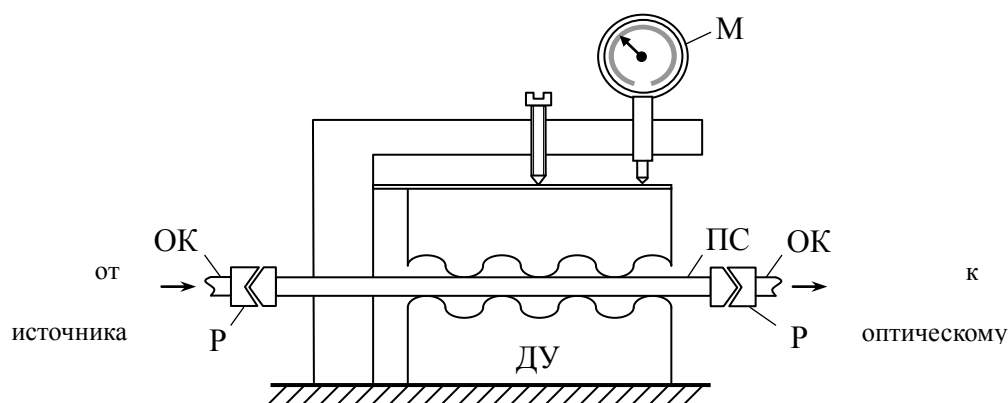


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для снятия динамометрических характеристик оптоволокну. ПС – плоский световод; Р – разъем; ОК – оптический кабель, ДУ – динамометрическое устройство; М – микрометр

Необходимость использования пластичного материала в таком преобразователе усилия вызвана тем, что для обеспечения оптического контакта зазор между двумя оптическими средами должен составлять доли микрона, что при использовании двух твердых сред вызывает необходимость в больших усилиях. Но самое главное, что при использовании твердых сред не обеспечивается воспроизводимость и повторяемость характеристик, а так не наблюдается гистерезис. Поэтому датчики с оптическим контактом, использующие две твердые оптические среды можно использовать лишь в качестве переключателей, работающих в релейном режиме. При этом для уменьшения гистерезиса необходимо использовать конкретную жидкость, наносимую тонким слоем на плоский световод. В этом случае характеристика будет линейной, и переключение будет происходить при малых усилиях.

Для защиты от фоновых засветок при проведении эксперимента использовалось импульсное излучение диода ИЛПН-301-1 и стандартные разъемы, что позволяло выделить и отфильтровать постоянную составляющую, появляющуюся в результате действия солнечного света и электрического освещения, попадающего на ПОИ.

При проведении эксперимента использовались плоские световода из полимерные волокна без защитной оболочки с размером отражающей оболочки $S_0 = 1100 \times 500$ мкм и диаметром сердцевины $d_c = 400$ мкм с показателем преломления $n_1 = 1,52$.

На рис. 2 изображены экспериментальные статические характеристики, отражающие зависимость выходного сигнала от величины упругой деформации пластичной прокладки плоского световода а), и протяженности контакта со светопоглощающей прокладкой. Величина деформации измерялась с помощью микрометрической головки. Анализируя оптические характеристики можно видеть, что при увеличении толщины W и уменьшении протяженности оптического контакта l , т. е. при уменьшении количества отражений

$k \approx b^n U_{\text{ср}} \frac{l}{2W}$, крутизна характеристик и глубина модуляции сильно падает.

Поэтому для практического использования пригодны лишь преобразователи, с толщиной плоского световода $W = 400$ мкм.

Как видно на рис. 2 оптические характеристики такого преобразователя усилия (давления) являются нелинейными.

Если аппроксимировать эти характеристики от точки перегиба до 200 ... 300 мкм, то они аппроксимируются с ошибкой 3% выражением

$$\frac{U}{U_0} = a e^{-b\varepsilon} + c e^{-d\varepsilon}.$$

Такой преобразователь усилия в сочетании с пороговой или релейной схемой можно с успехом использовать в качестве датчика деформации или предразрушения, т. е. в мониторинге строительных конструкций.

В системах оптоэлектронного мониторинга ОВ внедрены внутрь железобетонных изделий.

При появлении разрушения волокно повреждается, теряя проводимость оптического потока Φ [6]. Поток Φ измеряется в начальный момент времени t_0 , когда заведомо известно, что датчик цел, а затем в моменты времени t_i ($i = 1, 2, \dots, n$) – при нагружении испытываемой конструкции.

Конструкция считается разрушенной, если $\Phi(t_i) / \Phi(t_0) < \alpha$, где α ($\alpha < 1$) определяется исходя из условий нарушения пропускания светового потока в месте разрыва ОВ с учетом стабильности лазерного диода (ЛД) и приемника оптического излучения (ПОИ), а также аналогового тракта обработки сигналов.

На рис. 3 представлена оптоэлектронная измерительно-информационная система (ОИИС) для обнаружения усилий железобетонных изделий с помощью волоконных световодов. При этом ОИИС состоит из контролируемой конструкции (1), Y-образных световодов на каждом канале (2), с отражающим серебряным покрытием (3), блок питания (генератор импульсов) (4), лазерный

диод (5), измерительный приемник оптического излучения (6), блок обработки фотоэлектрического сигнала (7), измерительный прибор или ЭВМ (8).

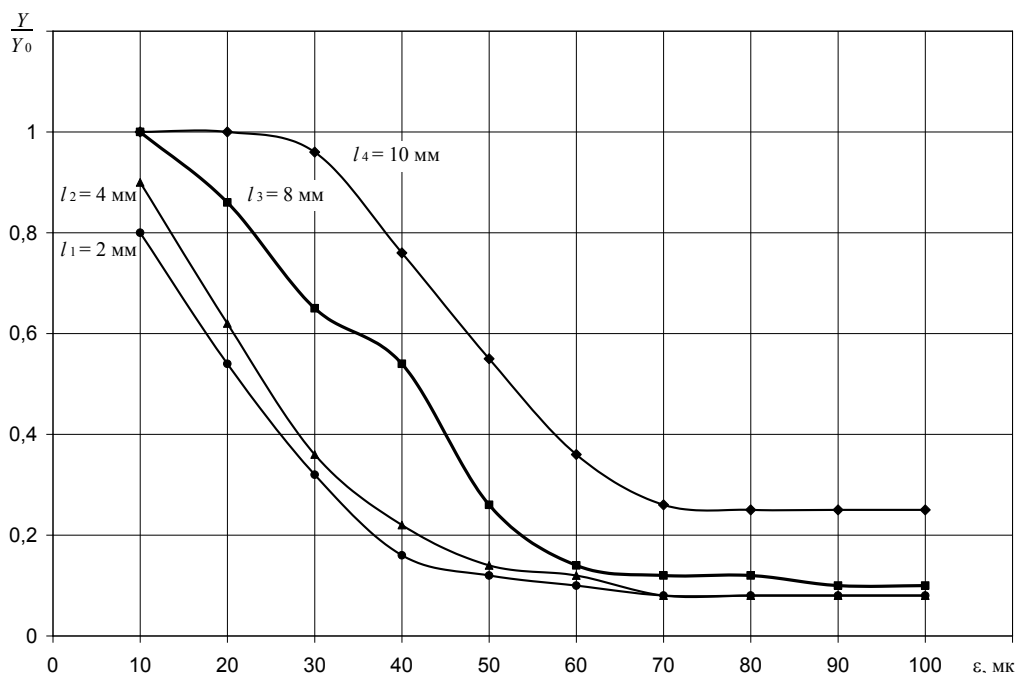


Рис. 2. Экспериментальные статические характеристики, отражающие зависимость выходного сигнала от величины упругой деформации пластичной прокладки плоского световода

Принцип работы системы следующий. ОВ с отражающим концом внедрены внутрь железобетонных изделий. Генератор электрических импульсов (4), вырабатывает короткие ≈ 10 нс импульсы, которые подаются на ЛД (5). В качестве ЛД использован ИЛПИИ-301-1 с длиной волны $0,81 \dots 0,89$ мкм.

Световой поток из ЛД подается одновременно на Y-образный измерительный световод (2), на конце которого нанесено отражающее покрытие (3).

Проходя через световоды, оптические сигналы попадают на светочувствительную поверхность ПОИ (6). Из ПОИ измерительные сигналы подаются в БОФС (7), где сравниваются, и их отношение передается на измерительный прибор или ЭВМ (8).

Сущность способа заключается в следующем. По принципу действия способ основан на применении оптического импульсного рефлектометра.

В настоящее время рефлектометры используются в технике оптической связи для определения координат места разрушения кабеля. Аналогичным образом рефлектометры можно использовать для определения мест разрушения датчиков.

В нашем случае принцип использования заключается в следующем: с помощью ЛД (5) в датчик (2) (через V-образный ответвитель) подается короткий импульс I. В случае разрушения датчика, оптический сигнал частично

отражается от места разрушения, а часть сигнала, пройдя через место разрушения, достигает конца датчика и, отражаясь от него, возвращается обратно. В результате, к ПОИ (6), кроме опорного импульса I_0 , возвращаются два импульса I_1 и I_2 , сформированные отражением сигнала от места разрушения и от свободного конца датчика соответственно. Временные интервалы между этими импульсами определяются длиной датчика и локализацией на нем места разрушения.

Используя современный уровень развития элементной базы, можно спроектировать рефлектометр с требуемыми параметрами.

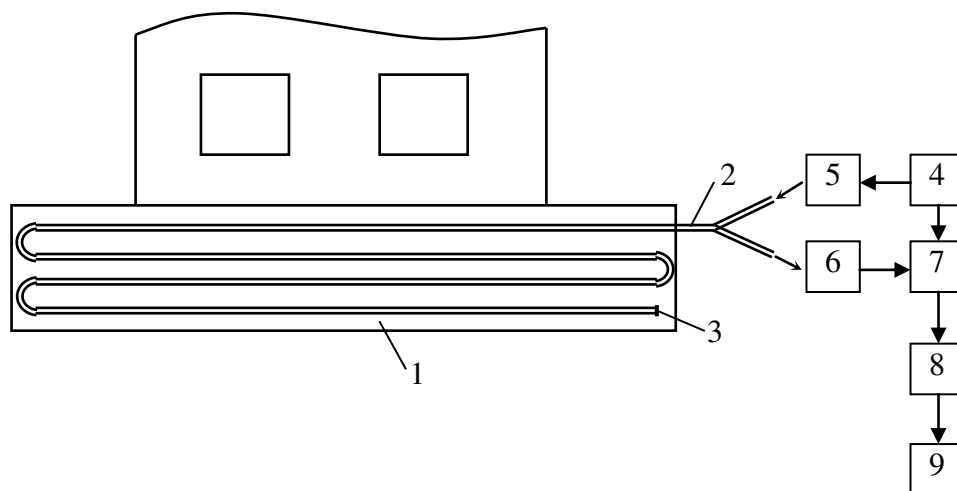


Рис. 3. Оптоэлектронная измерительно-информационная система (ОИИС) для обнаружения усилий железобетонных изделий с помощью волоконных световодов

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Артюпов, К.Б. Волоконно-оптические датчики параметров технологических процессов / К.Б. Артюпов. – М.: Информприбор. – 1989, Вып.1. – 210 с.
2. Niizeki. Development of Fiber. Japan Annual Reviews in Electronics, Computer + Telecommunications // Optical Devices + Fibers. – 1984. – Vol. 11. – P. 168 – 178.
3. Рахимов, Н.Р. Применение оптического волокна в системе оценки усталостной повреждаемости элементов конструкций / Н.Р. Рахимов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 48, № 1. – С. 39 – 43.
4. Серьезнов, А.Н. Исследование волоконных световодов для неразрушающего контроля целостности машиностроительных конструкций / А.Н. Серьезнов, Н.Р. Рахимов // Современные проблемы геодезии и оптики. – Новосибирск, 2004. – С. 158 – 163.
5. Рахимов, Н.Р., Шамирзаев, С.Х. // Узб. физ. журн. – 2004. – Т. 6, № 2. – С. 115 – 119.
6. Рахимов, Н.Р., Шамирзаев, С.Х. // Узб. физ. журн. – 2004. – Т. 6, № 4. – С. 288 – 293.
7. Пат. 2247412 Российская Федерация. Способ определения мест предразрушения конструкций / Рахимов Н.Р., Серьезнов А.Н.; заявитель и патнтообладатель СибНИА. – опубл. БИ. – 2005. № 8.

© А.Н. Серьезнов, Н.Р. Рахимов, 2006

КОЭФФИЦИЕНТ ПРОПУСКАНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА

Целью данной статьи является рассмотрение оптических характеристик микромеханических устройств с магнитоэлектрическим управлением при использовании последних в качестве модуляторов проходящего светового потока, а также теоретический расчет функций пропускания.

Современная концепция микромеханики состоит в использовании технологии производства кремниевых интегральных микросхем для создания различных типов устройств, имеющих подвижные элементы, микроскопические перемещения которых лежат в основе функционирования целого класса устройств – микроэлектромеханических систем (MEMS).

Один из типов MEMS устройств (микромеханический модулятор с магнитоэлектрическим управлением) был предложен в работе [1], а в отчете [2] подробно рассмотрены основные функциональные характеристики разных типов подобных микромеханических устройств.

Опытные образцы таких устройств изготовлены по стандартной кремниевой технологии и представляют собой одномерную матрицу микрополосок, закрепленных концами на неподвижной раме, и способных поворачиваться вокруг своей продольной оси. Каждая микрополоска с одной стороны зеркальная, а с другой стороны покрыта тонкой ферромагнитной пленкой (ТФП). Управление угловым положением микрополосок осуществляется при помощи взаимодействия внешнего магнитного поля с остаточной намагниченностью ТФП.

В статье [3] найдена теоретическая зависимость углов поворота разных участков поверхности микрополосок от величины индукции внешнего магнитного поля, что позволяет провести расчет режима статического отклонения при использовании данных устройств в качестве модуляторов. Модулируемой величиной в данных устройствах является интенсивность проходящего светового потока, а модулирующим фактором угол наклона микрополосок, от которого зависит видимая ширина щели.

Схема функционирования подобного модулятора в режиме статического отклонения приведена на рис. 1.

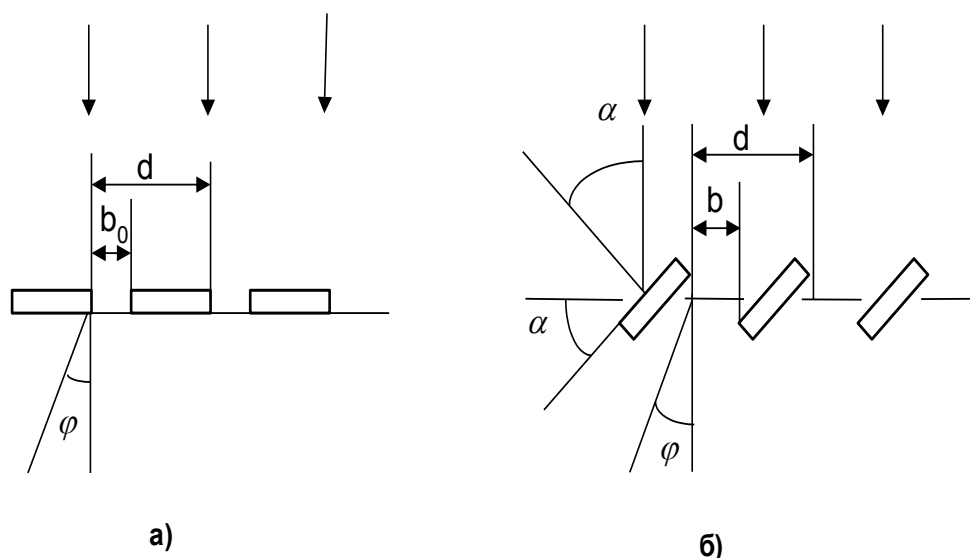


Рис. 1. Схема функционирования микромеханического модулятора: а) при нормальном падении, б) при падении на наклонные микрополоски

Матрица микрополосок представляет собой дифракционную решетку с периодом $d = 55$ мкм, и переменной шириной щели b . В опытных образцах микромеханических модуляторов видимый размер щели b зависит от угла наклона микрополосок α согласно:

$$b = b_0 + w(1 - \cos \alpha), \quad (1)$$

где: $b_0 = 5$ мкм — начальная ширина щели; $w = 50$ мкм — ширина микрополоски; угол α меняется в пределах от 0 до 1 рад.

Дифракционная решетка обеспечивает периодическую пространственную модуляцию падающей световой волны по амплитуде или по фазе. В том случае, если модуляция происходит только по амплитуде, вводят функцию пропускания решетки $A = A(m, b)$:

$$A = \frac{I_\varphi}{I_0}, \quad (2)$$

где: I_0 — интенсивность падающей световой волны;

I_φ — интенсивность дифрагировавшего излучения в направлении φ ;

m — порядок дифракционного максимума.

При дифракции лазерного пучка с длиной волны λ на структуре, состоящей из N длинных эквидистантных щелей, распределение интенсивности для дифрагировавшего излучения определяется по формуле [4]:

$$I_\varphi = H(N, \pi m d / \lambda) U(\pi b / \lambda) I_0^*, \quad (3)$$

$$\text{где: } U(\pi b / \lambda) = \left(\frac{\sin(\pi \frac{b}{\lambda} \sin \varphi)}{\pi \frac{b}{\lambda} \sin \varphi} \right)^2 - \text{функция пропускания одной щели;} \quad (4)$$

$$H(N, \pi m d / \lambda) = \left(\frac{\sin(N \pi m \frac{d}{\lambda} \sin \varphi)}{\sin(\pi m \frac{d}{\lambda} \sin \varphi)} \right)^2 - \text{интерференционная функция;} \quad (5)$$

I_o^* – интенсивность в центре дифракционной картины ($\varphi = 0$);

$$I_o^* = \frac{b^2}{\lambda L} I_o, \quad (6)$$

где L – расстояние от дифракционной решетки до экрана ($L = 1$ м).

В направлении главных максимумов ($\sin \varphi = m \lambda / d$), выражения (4) и (5) можно упростить:

$$U(\pi b / \lambda) = \left(\frac{\sin m \pi b / d}{m \pi b / d} \right)^2; \quad (7)$$

$$H(N, \pi m d / \lambda) = N^2, \quad (8)$$

тогда интенсивность излучения в главных максимумах можно определить, подставив в (3) выражения (6), (7), (8):

$$I_m = N^2 \left(\frac{\sin(m \pi b / d)}{m \pi b / d} \right)^2 \frac{b^2}{\lambda L} I_o. \quad (9)$$

Функция пропускания дифракционной решетки для главных максимумов равна:

$$A_m = N^2 \left(\frac{\sin(m \pi b / d)}{m \pi b / d} \right)^2 \frac{b^2}{\lambda L}, \quad (10)$$

определяется параметрами: количеством щелей решетки N ; шириной щели b ; длиной световой волны λ , постоянной решетки d , порядком максимума m .

Для главного максимума ($m = 0$, $\sin \varphi = 0$) $U(\pi b / \lambda) = 1$, функция пропускания:

$$A_o = \frac{b^2}{\lambda L} N^2. \quad (11)$$

На рис. 2, 3 представлены зависимости функции пропускания A_m от угла наклона микрополосок α , для разных порядков дифракции ($m = 0; 1; 2; 3$).

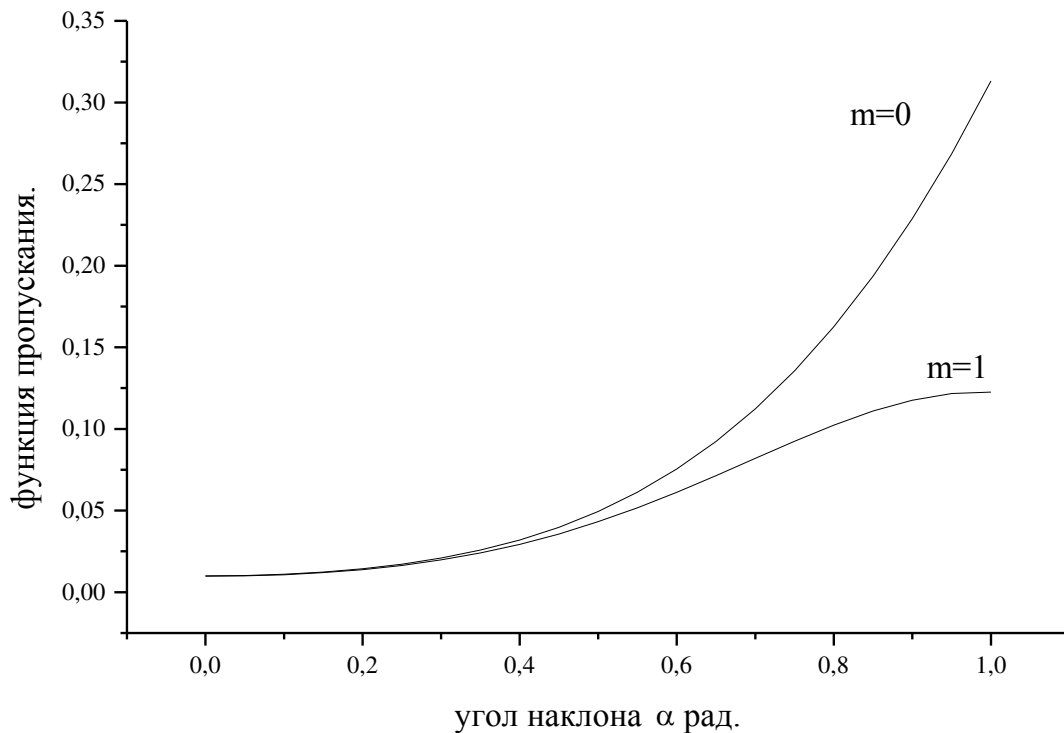


Рис. 2. Зависимость функции пропускания A_m от угла наклона α , для $m = 0; 1$

Функция пропускания A_m безразмерна и дает распределение плотности мощности излучения в различных максимумах дифракционной картины.

Изменение интенсивности излучения в каждом максимуме I_m (в зависимости от угла α), пропорционально функции пропускания:

$$I_m = A_m I_0, \quad (12)$$

где: I_0, I_m имеют размерность $[Вт/м^2]$.

Большая часть мощности дифрагировавшего излучения (92%) локализована в пределах телесного угла, определяемого соотношением:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{\lambda}{b}\right). \quad (13)$$

Этот угол уменьшается с увеличением видимой ширины щели. При выполнении условия:

$$m = \frac{d}{b}, \quad (14)$$

интенсивность излучения в соответствующем максимуме $I_m = 0$.

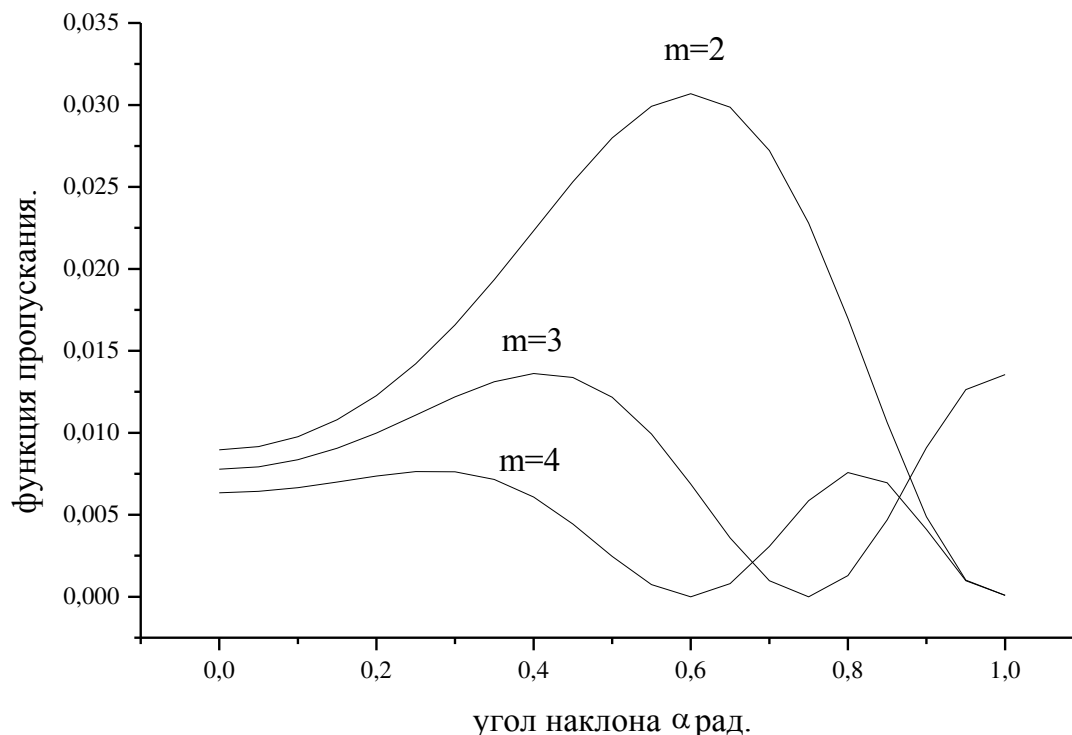


Рис. 3. Зависимость функции пропускания A_m от угла наклона α , для $m = 2; 3; 4$

Угловое расстояние между соседними дифракционными максимумами определяется отношением $\frac{\lambda}{d} \approx 0.01 \text{ рад}$ и не зависит от угла наклона α .

Представленный микромеханический модулятор может найти применение в оптоэлектронике, как устройство управляющее интенсивностью светового пучка с малой угловой расходимостью или как управляемый светоклапан.

В настоящее время автором проводятся технологические работы по созданию действующих образцов модуляторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чесноков, В.В. Микромеханический модулятор света [Текст] / В.В. Чесноков // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. 1990. – № 6. – С. 82.
2. Исследование физических проблем нано-и микрогабаритных функциональных механических устройств информационных оптоэлектронных систем [Текст] : отчет о НИР; рук. Чесноков В.В.; исполн.; Чесноков Д.В.; М-во обр. и науки РФ; СГГА, – Новосибирск, 2003. – С. 38 – 48. – № ГР01990010326.

3. Корнеев, В.С. Определение остаточной намагниченности микромагнита микромеханического дефлектора [Текст] / В.С. Корнеев // Сб. науч. тр. аспирантов и молодых ученых СГГА, – Новосибирск, 2005. – № 2. – С. 95 – 99.
4. Борн, М. Основы оптики [Текст] / М. Борн, Э. Вольф, – М., 1973. – Гл. 8. – С. 362 – 372.

© В.С. Корнеев, 2006

УДК 535.41

И.Х. Белоус, М.С. Комбаров, М.М. Кузнецов, М.Ф. Носков
СГГА, Новосибирск

ВЫДЕЛЕНИЕ МАЛОКОНТРАСТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ФОТОГРАФИЧЕСКИХ СНИМКАХ

В ряде случаев возникает необходимость усиления малоконтрастных участков фотографических изображений – технических и медицинских рентгенограмм, поиске слабосветящихся объектов на астрономических снимках, анализе фотографий быстропротекающих процессов. Применение цифровых методов обработки не всегда приводит к ожидаемому результату. Так, например, разрешающая способность по полю цифровых фотоприемников значительно уступает даже среднему по качеству фотоматериалу.

Самым простым методом усиления слабого фотоснимка является обработка негатива в каком-либо радиоактивном растворе, в результате чего микрокристаллы серебра связываются с радиоактивными изотопами. Такой слой копируют контактным способом на рентгеночувствительную фотоэмульсию, в результате чего контраст снимка повышается примерно на порядок [1]. Очевидным недостатком данного метода является необходимость применения радиоактивных растворов. В настоящее время данный способ вытеснен другими.

В работе [2] показана возможность цветного псевдокодирования фотоснимков, но этот способ, к сожалению, применим только к фотоснимкам с периодической структурой, например, муаровым или интерференционным полосам.

В настоящей работе рассматриваются практические вопросы применения разработанного ранее [3, 4, 5] метода, позволяющего повысить контрастную чувствительность и динамический диапазон примерно на порядок за счет анализа фотоснимка одновременно в проходящем и рассеянном свете.

Пропущенный экспонированным и проявленным фотослоем свет содержит две основные компоненты: регулярную составляющую, сохранившую свое первоначальное направление распространения и когерентность, и диффузную составляющую, потерявшую первоначальное направление распространения и когерентность. Отметим, что свойства диффузной составляющей в очень большой степени зависят от размеров и формы микрокристаллов серебра, то

есть от паспортной зернистости фотослоя, типа проявителя, его температуры, концентрации и времени проявления. Варьируя перечисленные параметры, можно получать фотослои с заданной зернистостью, и, соответственно, регулировать соотношение между регулярной и диффузной составляющей.

Каждый фотоснимок представляет собой чередование относительно светлых и относительно темных участков, разделенных переходными слоями серого оттенка. Сквозь самые светлые, практически не экспонированные участки проходит свет с преимущественно регулярной структурой, сквозь самые темные участки не проходит никакой свет. Следовательно, диффузное рассеяние той или иной интенсивности будет происходить только на участках перехода от сильно экспонированного к слабо экспонированному участку изображения, то есть на границах изображения, которые мы и хотим выделить.

Устройство для реализации предложенного способа включает в себя объектив наблюдательной оптической системы, анализируемую интерференционную картину и источник коллимированного излучения. Угол, под которым свет должен попадать на интерферограмму, должен лежать в интервале углов от β до $\alpha + \beta$. Под углом α в данной работе понимают предельный угол рассеивания света интерферограммой, под углом β – передний апертурный угол анализирующей оптической системы. Очевидно, что рассматриваемый метод будет работать только тогда, когда эмульсия относительно крупнозерниста, т. е. предельный угол диффузного рассеивания больше переднего апертурного угла. В работах [4, 5, 6] в качестве регистрирующего слоя использовался фотослой Микрат-300 с разрешающей способностью 300 линий на миллиметр, размер микрокристаллов серебра колеблется в интервале от 1 до 3 мкм.

Исходная и продифференцированная интерферограммы представлены на рис. 1.

Если же полученное изображение осветить двумя дополнительными цветами, например, красным и синим, причем одним из цветов, например, синим, по нормали к снимку, а другим цветом -красным – наклонно, в интервале углов от β до $\alpha + \beta$, то получится псевдоцветное изображение, а именно – совершенно прозрачные участки фотопленки приобретут синюю окраску, самые темные (но не черные) будут наблюдаться в рассеянном свете и казаться наблюдателю красными, а серые участки фотослоя приобретут зеленый цвет.

За счет того, что чувствительность и глаза, и любого другого фотоприемника к изменениям цвета на 1-2 порядка выше, чем к изменениям интенсивности серого цвета, повышается информационное содержание фотоснимка – а более конкретно – становятся видимыми мельчайшие полутона, которые ни глаз, ни денситометр не замечал на исходном черно-белом снимке.

Еще больший эффект достигается, если освещение дополнительными цветами производить со сдвижкой во времени, а именно – в противофазе. Данный эффект, по-видимому, объясняется тем, что чувствительность глаза к мерцаниям на порядок выше, чем к плавным изменениям интенсивности.

Авторы данной работы использовали для освещения фотоснимка стандартный набор цветного оптического стекла размером 40*40 мм. В качестве

синего стекла использовались стекла СЗС-20, СЗС-21 и СЗС-22, в качестве красных стекол марки КС-10, КС-11, КС-12 и КС-13. Каждое синее стекло использовалось в паре со всеми красными стеклами, всего было перебрано 12 вариантов.

К фотоснимкам, имевшимися в распоряжении авторов, лучше всего подошли комбинация светофильтров СЗС-22 и КС-11. Необходимо отметить, что интенсивность прямого, регулярного пучка в несколько раз превышает интенсивность пучка рассеянного. Для успешного смешения цветов, т. е. получения зеленого цвета для участков средней интенсивности, необходимо в несколько раз ослаблять прямой пучок. Это достигалось введением в него дополнительного нейтрального светофильтра марок НС-1, НС-2, НС-3 все из того же набора оптического цветного стекла. Для каждого из фотоснимков для оптимального цветового контраста плотность нейтрального стекла подбиралась экспериментально.

К сожалению, авторы не могут в данном докладе представить цветные интерферограммы.

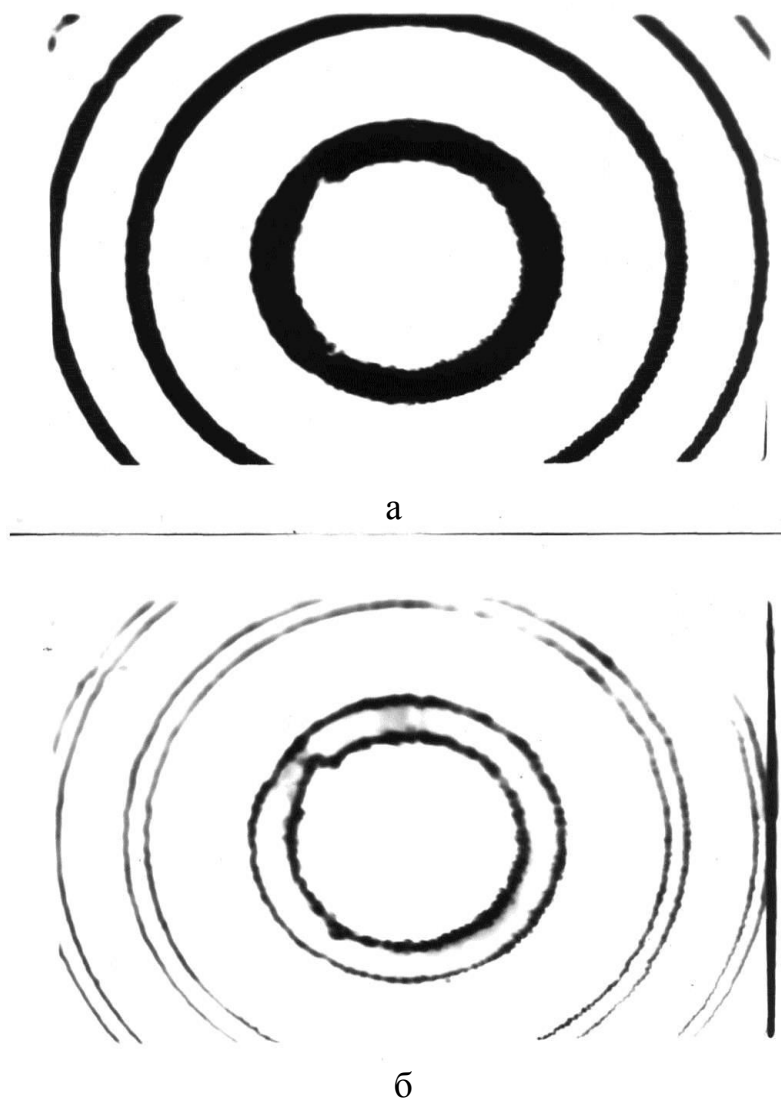


Рис. 1. Исходная интерференционная картина (а)
и обработанная интерференционная картина (б)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Русов В.Д. и др. ЖТФ. О возможности повышения контраста фотоснимка при обработке негатива в радиоактивном растворе. ЖТФ, 1989. Т. 59. Вып. 7. с. 181 – 183.
2. Ляликов А.М. Цветовое кодирование изображений деформированных зон диффузно рассеивающих поверхностей при оптической обработке снимков спроецированных полос. ЖТФ, Т. 68. Вып. 11. с. 102 – 105.
3. А. с. № 1651096. Носков М.Ф., Скоков И.В., Соснов А.Н., Трифонов Е.Е. Способ интерференционного измерения формы поверхности прецизионных оптических деталей. Оpubл. 23.05091, Бюл. № 19.
4. Патент РФ № 2166730. Носков М.Ф. Способ интерференционного измерения формы поверхности оптических деталей. Оpubл. 10.05.2001 Бюл. № 13.
5. Патент РФ. № 2224982. Носков М.Ф. Способ интерференционного измерения формы поверхности оптических деталей. Оpubл. 27.02.2004 Бюл. № 6.

© И.Х. Белоус, М.С. Комбаров, М.М. Кузнецов, М.Ф. Носков, 2006

ФОТОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ И ФОТОПРОВОДИМОСТЬ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ В ГЕОМЕТРИИ ФОЙГТА, ИССЛЕДОВАННЫЕ НА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ МЛЭ HgCdTe P-ТИПА ПРИ ДОМИНИРУЮЩЕЙ РЕКОМБИНАЦИИ ШОКЛИ-РИДА

Введение

Тройной сплав $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, где x – мольное содержание Cd, является базовым полупроводниковым материалом для создания фотоприемных устройств для среднего ($3 \div 5$ мкм) и дальнего ($8 \div 12$ мкм) инфракрасного диапазонов. Свойства фотоприемников во многом определяются такими рекомбинационно-диффузионными параметрами, как время жизни и подвижность неосновных носителей заряда (электронов), скорости поверхностной рекомбинации на передней и задней границах раздела эпитаксиальной пленки.

Ранее фотомагнитный эффект (ФМЭ) и фотопроводимость (ФП) в магнитном поле в геометрии Фойгта ($k \perp \vec{B} \perp \vec{E}$) успешно применялись для определения рекомбинационно-диффузионных параметров образцов HgCdTe [1 – 3]. Однако в данных работах предполагалось, что доминирует излучательная или Оже-рекомбинация, при которых времена жизни электронов и дырок равны друг другу: $\tau_n = \tau_p$. В настоящее время установлено, что в HgCdTe p-типа при температурах, близких к температуре жидкого азота доминирующей является рекомбинация Шокли-Рида [4]. Как известно [5], для этого механизма рекомбинации $\tau_n \neq \tau_p$ и выполняется соотношение $\tau_n / \Delta n = \tau_p / \Delta p$, где Δn и Δp – концентрации неравновесных электронов и дырок.

В работах [6, 7] показано, что значительная концентрация рекомбинационных центров может приводить к появлению особенностей на магнитолевых зависимостях ФП в геометрии Фарадея ($k \parallel \vec{B} \perp \vec{E}$). Поэтому использование условия $\tau_n = \tau_p$ при анализе измерений ФМЭ и ФП может привести к ошибкам при определении рекомбинационно-диффузионных параметров носителей заряда.

В данной работе проводится теоретический и экспериментальный анализ ФМЭ и ФП в геометрии Фойгта для эпитаксиальных слоев МЛЭ HgCdTe p-типа при доминирующей рекомбинации Шокли-Рида.

Образцы и методы исследования

Исследовались образцы, изготовленные из пленок, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs ориентации (013). Толщина пленок была $7 \div 10$ мкм, состав $0.21 \div 0.23$. После роста образцы имели n-тип проводимости, и для конвертирования в p-тип их отжигали в нейтральной атмосфере гелия или азота. Для измерения ФМЭ и ФП в геометрии Фойгта вырезались образцы в виде прямоугольных полосок длиной 10 мм и шириной 1.5 мм. Образцы укрепляли на сапфировой подложке, и к ним делали индиевые контакты.

Концентрация и подвижность основных носителей заряда (дырок) определялась из измерения эффекта Холла и магнитосопротивления методом «спектра подвижности» [8].

Экспериментальная установка для измерения ФМЭ и ФП описана в работе [6].

Теория

Исследуемый образец в виде полоски помещлся в стационарные скрещенные электрическое и магнитное поля, направления которых показаны на рис. 1.

Для получения выражений, описывающих магнитополевые зависимости ФМЭ и ФП будем исходить из уравнений непрерывности и транспортных уравнений для плотности токов электронов и дырок в магнитном поле:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta n}{\partial t} = \beta \alpha G - \frac{\Delta n}{\tau_n} + \frac{1}{e} \cdot \text{div} j_n; \\ \frac{\partial \Delta p}{\partial t} = \beta \alpha G - \frac{\Delta p}{\tau_p} - \frac{1}{e} \cdot \text{div} j_p; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} j_n = en\mu_n E + eD_n \text{grad} \Delta n - \mu_n [j_n \times B]; \\ j_p = en\mu_p E - eD_p \text{grad} \Delta p + \mu_p [j_p \times B], \end{cases} \quad (2)$$

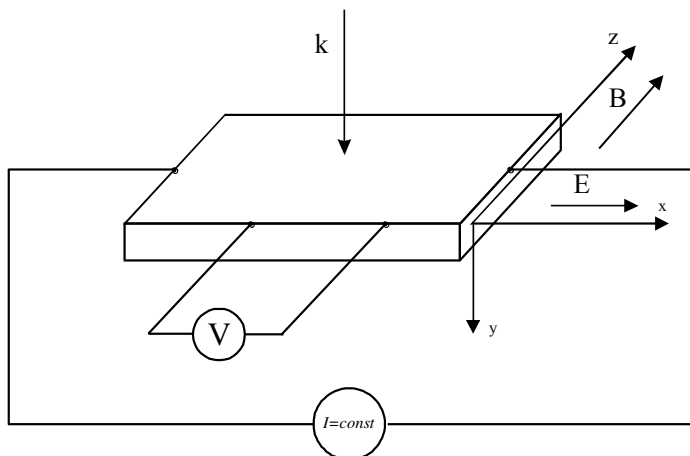


Рис. 1. Геометрия эксперимента

где e – величина элементарного заряда; μ_n и μ_p , n и p – подвижности и концентрации электронов и дырок; B – значение индукции магнитного поля; D_n и D_p , τ_n и τ_p – коэффициенты диффузии и время жизни электронов и дырок; β – квантовый выход; α – коэффициент поглощения; $G = G_0 \exp(-\alpha y)$ – скорость оптической генерации неравновесных носителей.

Будем рассматривать стационарный случай

($\partial \Delta n / \partial t = \partial \Delta p / \partial t = 0$) и малый уровень возбуждения: $p_0, n_0 \gg \Delta p, \Delta n$. Кроме того, будем считать, что толщина образца сравнима с диффузионной длиной неравновесных носителей заряда, проводимость имеет дырочный характер: $\mu_n n \ll \mu_p p$ и максимальное значение индукции магнитного поля является слабым для тяжелых дырок: $\mu_p B \ll 1$.

В случае поверхностной генерации, когда излучение поглощается на небольшой глубине, и при большой концентрации рекомбинационных центров уравнение электронейтральности для неравновесных электронов и дырок может

быть записано в виде: $\Delta p = (1 + K)\Delta n$, где K – коэффициент захвата неравновесных электронов на ловушки.

Исследуемые структуры имели профиль состава, изображенный на рис. 2.

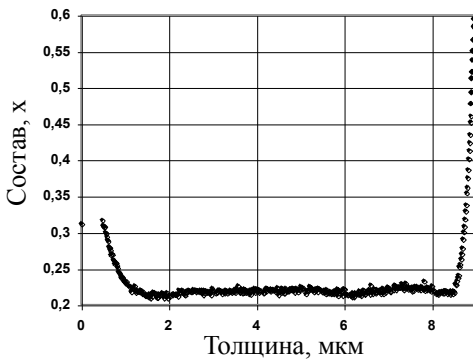


Рис. 2. Профиль состава исследуемых образцов по толщине

Как видно из рис. 2, на передней и задней границах раздела пленки состав x увеличен для уменьшения скорости поверхностной рекомбинации. Так как толщина варизонных областей много меньше длины диффузии неосновных носителей, то встроенные электрические поля, возникающие на границах, можно учесть с помощью введения эффективных скоростей поверхностной рекомбинации $s_{1,2}^*$. Тогда граничные условия для системы уравнений (1-2) можно написать в виде:

$$j(0) = \left(S_1 + \frac{e \cdot D_n}{k \cdot T} \cdot E_1 \right) \cdot \Delta n = s_1^* \cdot \Delta n;$$

$$j(d) = - \left(S_2 - \frac{e \cdot D_n}{k \cdot T} \cdot E_2 \right) \cdot \Delta n = -s_2^* \cdot \Delta n. \quad (3)$$

Решение системы уравнений (1-2) с граничными условиями (3), описывающее распределение концентрации неравновесных электронов по толщине $\Delta n(y)$ приведено в [3]. При низких температурах оно не зависит от коэффициента захвата K , значит, рекомбинация Шокли-Рида на распределение неравновесных электронов не влияет.

Напряжения фотоотклика в режиме постоянного тока через образец ($i_0 = \text{const}$) найдем из уравнения:

$$w \int_0^d (j_{nx} + j_{px}) dy = i_0 \quad (4)$$

с использованием уравнений (2). Для определения напряжения ФМЭ в (5) следует положить $i_0 = 0$. В результате получается следующее выражение для величины измеряемого сигнала:

$$U = U_{\Phi\Pi}(B, E_x) + U_{\Phi\text{МЭ}}(B, E_x); \quad (5)$$

$$U_{\Phi\Pi}(B, E_x) = -R_0 e w E_x \left(\frac{(\mu_n + \mu_p)(1 - \mu_n \mu_p B^2)}{1 + \mu_n^2 B^2} + K \cdot \mu_p \right) \cdot \int_0^d \Delta n(y) dy; \quad (6)$$

$$U_{\Phi M \Delta}(B, E_x) = -R_0 e w D_n \frac{(\mu_n + \mu_p) \cdot B}{1 + \mu_n^2 B^2} \cdot [\Delta n(0) - \Delta n(d)], \quad (7)$$

где w – ширина к образца; R_0 – темновое сопротивление;
 $L^* = \sqrt{\tau D_n / (1 + \mu_n^2 B^2)}$ – длина диффузии неосновных электронов в магнитном поле; $\varsigma = (\mu_n^2 E_x B) \cdot e / (k_B T)$; $P_{1,2} = -L^* \varsigma / 2 \pm \sqrt{(L^* \varsigma / 2)^2 + 1}$; $S_{1,2}^* = \tau_{1,2}^* / L^*$ – приведенные безразмерные скорости поверхностной рекомбинации на передней и задней границах пленки;

$$z = (S_1^* + P_2)(S_2^* - P_1) - (S_1^* + P_1)(S_2^* - P_2) \exp[(P_1 - P_2)d / L^*].$$

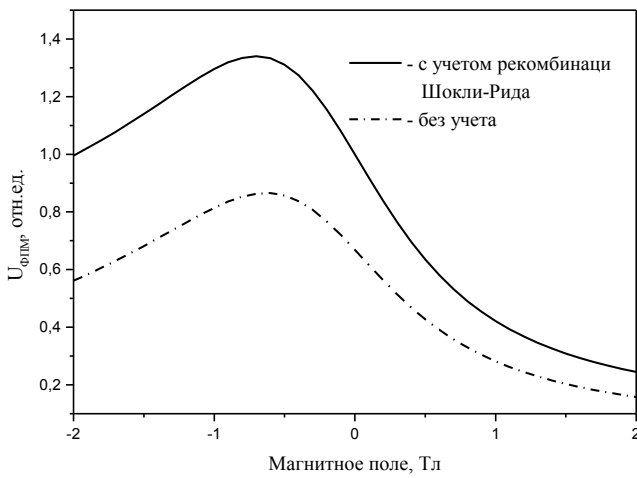


Рис. 3. Теоретические магнитополевые зависимости сигналов фотомагнитного эффекта и фотопроводимости подвижность дырок $p = 1.0 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ и $\mu_p = 0.05 \text{ м}^2/\text{Вс}$, подвижность электронов $\mu_n = 5.0 \text{ м}^2/\text{Вс}$, время жизни электронов $\tau_n = 10 \text{ нс}$, эффективные скорости поверхностной рекомбинации на передней и задней гранях пленки: $s_1^* = 100 \text{ м/с}$ и $s_2^* = 5 \text{ м/с}$, коэффициент захвата $K = 50$.

Как видно из рис. 3, учет рекомбинации Шокли-Рида увеличивает сигнал фотопроводимости, так как учитывается вклад тяжелых дырок. При большой плотности рекомбинационных центров концентрация неравновесных дырок превышает концентрацию неравновесных электронов:

Выражения для $\int_0^d \Delta n(y) dy$ и $[\Delta n(0) - \Delta n(d)]$ приведены в [3].

На рис. 3 приведены теоретические зависимости фотопроводимости от магнитного поля, рассчитанные по формулам (5 – 7) при следующих значениях рекомбинационно-диффузионных параметров: концентрация и

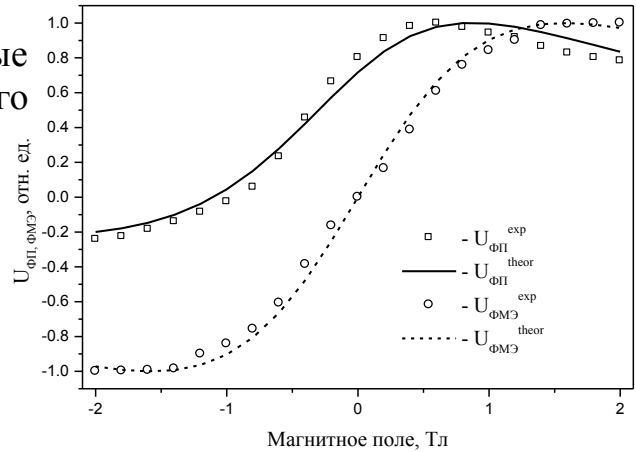


Рис. 4. Экспериментальные магнитополевые зависимости сигналов фотомагнитного эффекта и фотопроводимости

$\Delta p > \Delta n$. Поэтому, несмотря на низкую подвижность ($\mu_e/\mu_p = 100$), тяжелые дырки дают заметный вклад в фотопроводимость.

Эксперимент

На рис. 4 приведены измеренные магнитополевые зависимости ФМЭ (○) и ФП (□). Метод определения рекомбинационно-диффузионных параметров носителей из измеренных сигналов ФМЭ и ФП описан в [9]. Через экспериментальные точки проведены теоретические кривые, рассчитанные по формулам (5 – 7) при следующих параметрах: концентрация и подвижность дырок $p = 5.7 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$ и $\mu_p = 0.052 \text{ м}^2/\text{Вс}$, подвижность электронов $\mu_n = 4.0 \text{ м}^2/\text{Вс}$, время жизни электронов $\tau_n = 10.8 \text{ нс}$, эффективные скорости поверхностной рекомбинации на передней и задней гранях пленки: $s_1^* = 110 \text{ м/с}$ и $s_2^* = 20 \text{ м/с}$, коэффициент захвата $K = 15$.

Без учета рекомбинации Шокли-Рида, т. е. при $K = 0$, определенное из измерений сигнала ФП время жизни получается завышенным: 16.6 нс.

Заключение

В работе проведен теоретический анализ влияния рекомбинационных центров на ФМЭ и ФП в геометрии Фойгта. Показано, что время жизни электронов, определенное из измерений ФП, без учета рекомбинации Шокли-Рида завышается в 1.5 раза. Это происходит вследствие того, что не учитывается вклад тяжелых дырок в фотопроводимость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. S. Konczak and M. Nowak. Some comments to the photoelectromagnetic effect // Surface Science /- V. 87. – 1979. – P. 228 – 238.
2. G. Sarusi, A. Zemel, D. Eger, S. Ron, Y. Spira. Investigation of the bulk and surface electronic properties of HgCdTe epitaxial layers using photoelectromagnetic, Hall, and photoconductivity measurements // Journal of Applied Physics. – V. 74, N. 6. – 1992. – P. 2312 – 2321.
3. Фотомагнитный эффект и фотопроводимость тонких эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}$ / С.А. Студеникин и др. // Физика и Техника Полупроводников. – Т. 27, вып. 5. – 1993. – С. 744 – 756.
4. V.S. Lopes, A.J. Syllaio and M.C. Chen. Minority carrier lifetime in mercury cadmium telluride // Semiconductors Science and Technology. – V. 8. – 1993. – P. 824 – 841.
5. Бонч-Бруевич, В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, Л.Г. Калашников. – М.: Наука, 1977. – С. 672.
6. Подвижность неосновных носителей заряда в пленках p-HgCdTe / В.С. Варавини др. // Физика и Техника Полупроводников. – Т. 38, вып. 5. – 2004. – С. 532 – 537.
7. D.Yu. Protasov, V.Ya. Kostyuchenko, V.N. Ovsyuk. Influence of Traps on magnetophotoconductivity in p-HgCdTe // 6th international siberian Workshop and Tutorial of Electron Devices and Materials EDM-2005, 1-5 july, Russia, Erlagol. – 2005.
8. W.A. Beck, J.R. Anderson. Determination of electrical transport properties using a novel magnetic field-dependent Hall technique // Journal of Applied Physics. – № 2. – V. 62. – P. 541 – 554.
9. Исследование фотомагнитного эффекта и фотопроводимости в слоях $p\text{-CdHgTe}$ / С.А. Студеникин и др. // Австометрия. – № 4. – 1996. – С. 77 – 81.

© Д.Ю. Протасов, В.Я. Костюченко, 2006

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ДИАГРАММ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МАГНИЯ

Одна из важнейших общих проблем материаловедения – проблема создания сплавов с заранее заданными свойствами – не может быть решена без учета знаний о диаграммах состояния.

Как известно, диаграмма состояния – это графическое изображение фазового состояния сплавов в зависимости от концентрации компонентов и температуры.

С помощью диаграмм состояния определяют температуры плавления сплавов, наличие или отсутствие промежуточных фаз, устанавливают режимы термообработки и т. д.

На протяжении многих десятилетий работы по исследованию новых диаграмм состояния и уточнению отдельных областей уже известных продолжаются как у нас, так и за рубежом и публикуются в специальных изданиях [1].

Представляется целесообразной попытка систематизировать уже опубликованный материал с целью выявления каких-либо общих закономерностей, позволяющих делать прогнозы по поводу еще не изученных систем.

Такая попытка была сделана нами в отношении бинарных магниевых систем в монографиях Магниды и Магниетермия [2, 3].

Рациональной основой была выбрана периодическая систем элементов Д.И. Менделеева. Все известные к 1971 г. бинарные диаграммы состояния были нанесены на «матрицу» периодической системы, а металлохимическое взаимодействие было проанализировано с учетом роли образования стабильных электронных конфигураций в формировании свойств химических элементов и соединений.

Для анализа представлялось целесообразным разделить все элементы на 3 семейства однотипного характера взаимодействия с магнием.

Семейство I состоит из элементов Ia, IVa – VIIa подгрупп. С элементами этого семейства магний либо совершенно не вступает в химическое взаимодействие, либо оно характеризуется образованием эвтектик, перитектик или монотектик с широкой областью расслоения, широкой областью твердых растворов без признаков образования химических соединений.

Семейство II состоит из элементов Ib – IIIb, IIa, IIIa, VIIa подгрупп, включая лантаноиды, актиноиды и углерод.

Все эти элементы образуют с магнием интерметаллические соединения без признаков валентных отношений.

Наконец III семейство формируется из элементов IVb – VIIb подгрупп периодической системы.

С этими элементами магний образует соединения, отвечающие правилам валентности. Характерно, что с каждым из этих элементов, кроме углерода, магний образует только одно соединение.

Анализ характера взаимодействия в изученных системах, а также физико-химических свойств соединений, обнаруженных в них, дал возможность сделать ряд прогнозов для систем еще не изученных, в частности, лантаноидов и актиноидов.

За истекший период были построены свыше десятка бинарных диаграмм состояния магния и сделаны первые шаги в построении более 300 тройных.

Даже с такими элементами как бериллий, углерод и водород удалось построить бинарные диаграммы, правда, в ограниченной области концентраций.

Практически все диаграммы состояния магния с лантаноидами разработаны и, в целом, незначительно отличаются от прогнозируемых нами.

Подтвердилось наше предположение, что в системах $Mg - Yb$ и $Mg - Lu$ будут обнаружены металлиды типа Me_5Mg_{24} .

Не были обнаружены подобные соединения (как и предполагалось) в системах магния с лантаном, церием, празеодимом, неодимом, европием и гадолинием. Обнаружение в системах магния с La , Ce , Pr , Nd и Sm металлидов вида Me_5Mg_{41} приведет к некоторой корректировке известных диаграмм состояния. Существование некоторых металлидов таких, например, как $SmMg_{6.2}$ или Gd_9Mg еще требует проверки.

Нанесение вновь разработанных бинарных диаграмм на матрицу периодической системы элементов не меняет общей картины, т. е. целесообразности разделения всех элементов на три вышеуказанных семейства.

Многие технические проблемы и огромная трудоемкость разработки даже бинарных диаграмм делают понятным, почему практически ни одна тройная диаграмма, не говоря уже о многокомпонентных, не построена.

На рисунке сделана первая попытка совместить известные к настоящему моменту сведения о тройных диаграммах состояния магния на матрице периодической системы элементов, имеющей вид круга.

В центре круга – основа сплавов магний. По внешней окружности расположены по часовой стрелке в порядке возрастания атомного номера элементы Ia – VIIa подгрупп (за исключением Ru – Pt).

На внутренних окружностях в той же последовательности расположены элементы Ib – VIIb подгрупп, лантаноиды и актиноиды соответственно.

В прямоугольниках по периферии указаны третьи элементы диаграмм состояния, причем выше двойной горизонтали показаны элементы тройных диаграмм, известных ранее к моменту выхода монографий [2, 3], а ниже – разработанные в последующие годы вплоть до настоящего времени.

Не удивительно, что наиболее пристальное внимание исследователей было приковано к магниевым системам, являющимся основой конструкционных магниевых и алюминиевых сплавов, а также сплавов с особыми физико-химическими свойствами (бориды, гидриды и нитриды магния), называемых иногда магнидами.

Больше всего магнидов было обнаружено в системах Mg – Al – Э (свыше 3^x десятков) и Mg – Zn – Э (свыше 4^x десятков), где Э – элемент периодической системы (не обязательно металл).

Проблематично пока сформулировать общие закономерности, раскрывающие причины образования соединений, в частности магнидов, в одних системах и отсутствие их в других. Тем не менее, имеется принципиальная возможность предсказания характера взаимодействия в неизученных диаграммах состояния на основе анализа особенностей электронного строения компонентов и его изменения при образовании соединений.

Систематизация тройных диаграмм состояния на основе магния затруднительна из-за слишком малого количества исследований. Однако можно утверждать, что непрерывных твердых растворов между тремя компонентами с участием магния не существует. Все остальные семь типов по классификации Б.К. Вульфа [4] можно встретить среди уже исследованных систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Диаграммы состояния металлических систем, опубликованные – М.: ВИНТИ, 1969 – 1999, вып. 15 – 41; 1971 – 2000.
2. Самсонов, Г.В. Магниды / Г.В. Самсонов, В.П. Перминов. – Киев: Наукова думка, 1971. – 344 с.
3. Самсонов, Г.В. Магниетермия / Г.В. Самсонов, В.П. Перминов. – М.: Металлургия, 1971. – 174 с.
4. Вульф, Б.К. Тройные металлические фазы в сплавах / Б.К. Вульф. – М.: Металлургия, 1964.

© В.П. Перминов, 2006

МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ДЕФЛЕКТОР СВЕТОВЫХ ПОТОКОВ

Целью сообщения является обсуждение принципов функционирования и достижимых параметров микромеханических многоэлементных управляемых зеркал, пригодных для динамического непрерывного управления положением оптического луча в пространстве и использующих магнитные поля для управления элементами зеркал.

Оптико-механические методы сканирования широко известны и применяются в приемниках излучения [1], в системах лазерной локации [2], и др. Серьезной проблемой является необходимость уменьшения габаритов, потребления, увеличения быстродействия и улучшения разрешающей способности устройств управления лучом. Работы в этой области ведутся, в т. ч., с использованием принципов микромеханики. Так, в работе [3] приведены результаты по созданию кремниевого сканирующего зеркала с торсионной подвеской и электростатическим управлением; в статье [4] описаны результаты исследования микромеханического модулятора света с магнитоэлектрическим управлением положением микрошторок, изготавливаемого по кремниевой интегральной технологии. Кремниевые микрошторки длиной 5 мм, толщиной 3 мкм и шириной 50 или 100 мкм образуют одномерную матрицу, закреплены концами в кремниевой раме и поворачиваются каждая вокруг своей продольной оси, совершая крутильные колебания под действием переменного магнитного момента рамки с током, сформированной фотолитографически на плоскости каждой шторки.

В настоящей работе исследуется возможность создания быстродействующего микромеханического дефлектора, как и в [4] содержащего матрицу кремниевых узких полосок, совершающих крутильные колебания. Матрица должна быть помещена в магнитное поле.

Полоски образуют составное зеркало; каждый сегмент зеркала имеет индивидуальный «движитель» – фотолитографически сформированный проволоочный виток, через который необходимо пропускать переменный ток, или нанесенный микромагнит. В последнем случае переменным должно быть внешнее магнитное поле. На рис. 1 показана схема работы дефлектора, на рис. 2 – схемы вариантов его конструкции. Крутящий момент возникает вследствие взаимодействия магнитного момента витка или микромагнита с внешним магнитным полем и вынуждает полоску микрозеркала поворачиваться:

$$M_{кр} = P_M \cdot B \cdot \cos \alpha \cdot \cos \omega t, \quad (1)$$

где B – индукция внешнего магнитного поля; ω – частота крутильного момента; P_M – магнитный момент; в случае витка:

$$P_{1M} = S \cdot i, \quad (2)$$

в случае микромагнита:

$$P_{2M} = I_r \cdot V; \quad (3)$$

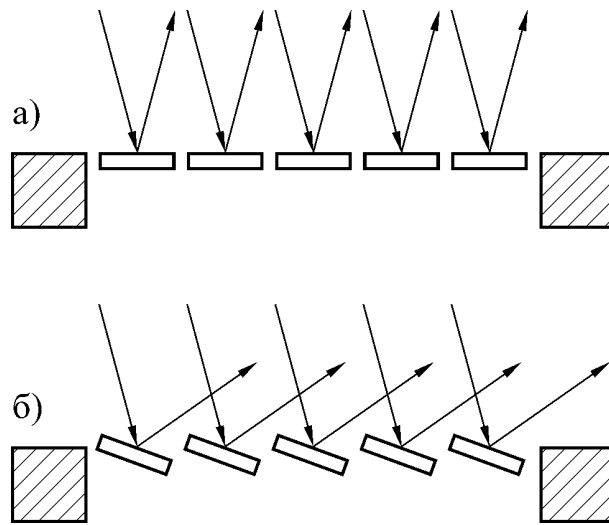


Рис. 1. Схема работы дефлектора

α – угол между направлением магнитного момента P_M и направлением внешнего магнитного поля; i – ток по витку; S – площадь витка с током; V – объем микромагнита; $I_r = B_{ост} / \mu_0$ – намагниченность; $B_{ост}$ – остаточная индукция микромагнита.

Выражение (1) можно представить в виде $M_{кр} = M_0 \cos \omega t$, где

$$M_0 = P_M \cdot B \cos \alpha. \quad (4)$$

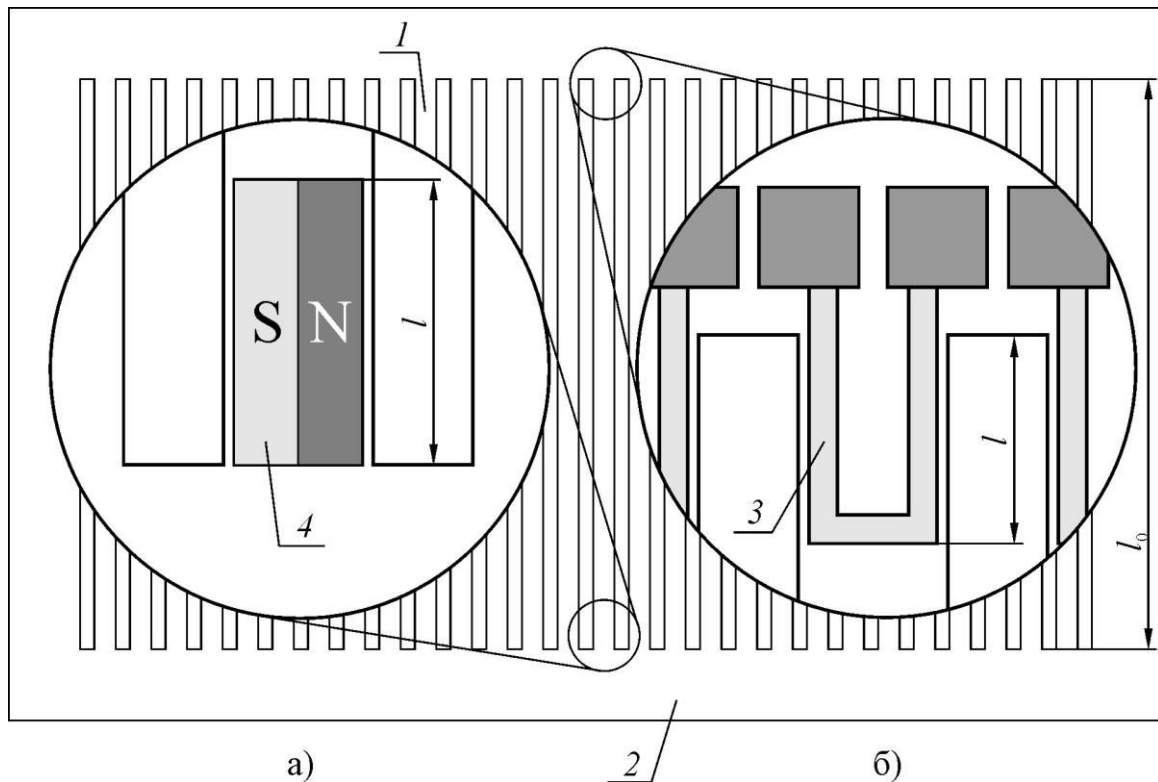


Рис. 2. Микромеханический дефлектор, представляющий собой матрицу микрозеркал, и элементы конструкции, создающие вращающий момент

Наибольшая скорость поворота микрозеркала достигается в случае формирования в его полоске упругой стоячей волны; при этом вдоль полоски располагается половина длины упругой крутильной волны $\lambda/2$.

Скорость упругой крутильной волны в полоске прямоугольного сечения толщиной b и шириной h ($h \ll b$) определяется выражением [6]:

$$V = \frac{2b}{h} \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (5)$$

где G – модуль сдвига; ρ – плотность материала полоски.

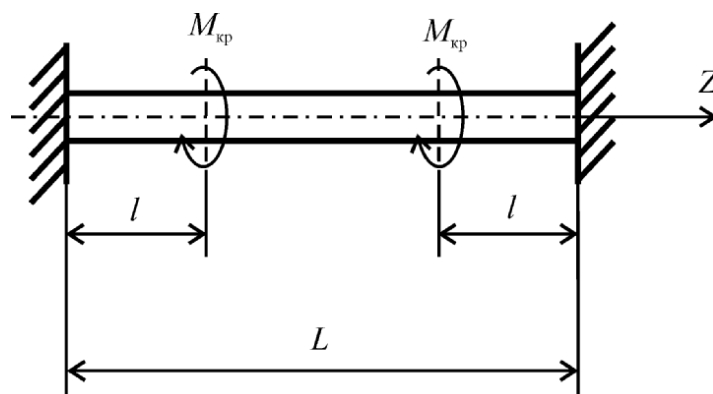


Рис. 3. Схема приложения крутящих моментов, возбуждающих в полоске крутильную стоячую волну на основной моде колебаний

При возбуждении крутильной волны в полоске вследствие отражений волны от закрепленных концов при резонансе (т. е. когда частота возбуждения обеспечивает равенство длины полоски половине длины волны) возникает пространственное распределение амплитуд углов поворота поперечных сечений полоски, определяемое бесконечным числом мод крутильных колебаний [5]:

$$\varphi(Z) = \sum_v \varphi_v(Z), \quad (6)$$

где $v = 1, 2, 3$ – целые числа, которыми обозначаются моды колебаний в полоске; $\varphi_v(Z)$ – распределение амплитуд углов поворота поперечных сечений полоски вдоль продольной оси полоски для моды с номером v .

В [5] для $\varphi_v(Z)$ получены следующие выражения. Для основной моды ($v = 1$):

$$\varphi_1(Z) = \frac{4QM_0 \sin \frac{2\pi l}{\lambda_1} \cdot \sin \frac{2\pi Z}{\lambda_1}}{\rho I_K \lambda_1 \omega_1^2}, \quad (7)$$

для моды с номером $v \neq 1$:

$$\varphi_v(Z) = \frac{4QM_0 \sin \left(\frac{2\pi v l}{\lambda_1} \right) \cdot \sin \left(\frac{2\pi v Z}{\lambda_1} \right)}{\rho I_K \lambda_1 (\omega_v^2 - \omega_1^2)}, \quad (8)$$

где Q – добротность колебательной системы (полоски микрозеркала); l – расстояние от конца полоски до точки приложения крутящего момента $M_{кр}$; M_0 – амплитуда крутящего момента; I_K – крутильный момент инерции сечения полоски относительно продольной оси полоски [7]:

$$I_K \approx \frac{hb^3}{3}, \quad (9)$$

ω_1 – частота возбуждения при резонансе основной моды; $\omega_\nu = \nu \cdot \omega_1$ – частота гармоник основной моды.

На рис. 3 показана схема приложения крутящих моментов к полоске.

Форма средней части волновода, выполняющей функцию микрозеркала дефлектора, определяется в основном первой, второй и третьей модами колебаний.

Расположение крутящих моментов симметрично относительно середины полоски позволяет, как показано в [5], подавить колебание на второй гармонике ($\nu = 2$).

Схематические изображения распределения амплитуд $\varphi_\nu(Z)$ поворота сечений волновода на первой и третьей гармониках, описываемое выражениями (7) и (8), и результат их суперпозиции, показаны на рис. 4.

Колебания полоски на всех модах совершаются с частотой ω вынуждающего кручение момента, т.е. синхронно; это означает, что реальное распределение амплитуды крутильных колебаний вдоль полоски микрозеркала является суперпозицией распределений амплитуд отдельных мод колебаний. Такая суперпозиция $\varphi_1(Z) + \varphi_3(Z)$ показана на рис. 4. Можно увидеть, что наложение двух видов колебаний приводит к некоторой линеаризации зависимости амплитуды от координаты Z . В средней части полоски (между координатами $Z/\lambda_1 = 1/6$ и $Z/\lambda_1 = 2/6$) условием наилучшей линеаризации можно считать равенство амплитуды третьей гармоники в точке с координатой $Z/\lambda_1 = 1/4$ и превышения амплитуды основной гармоники в этой же точке над амплитудами в точках на краях средней части (т.е. при $Z/\lambda_1 = 1/6$ и $Z/\lambda_1 = 2/6$):

$$\varphi_3(Z/\lambda_1 = 1/4) = \varphi_1(Z/\lambda_1 = 1/4) - \varphi_1(Z/\lambda_1 = 1/6). \quad (10)$$

Подставим в (10) соответствующие значения из (7) и (8), сократим на общие множители, получим:

$$\frac{1}{8} \sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda_1}\right) = \sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda_1}\right) \cdot \left(1 - \sin\frac{\pi}{3}\right). \quad (11)$$

Воспользуемся преобразованием:

$$\sin 3\theta = 3\sin\theta - 4\sin^3\theta, \quad (12)$$

из (11) получим:

$$3 - 4 \sin \left(\frac{2\pi l}{\lambda_1} \right) = 8(1 - \sin \pi/3); \quad \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda_1} \right) = 0,482; \quad \frac{2\pi l}{\lambda_1} = 0,767; \quad \frac{l}{\lambda_1} = 0,122. \quad (13)$$

Полученный результат означает, что наилучшая линейаризация средней части полосы микрозеркала должна наблюдаться при приложении крутящего момента в точках с координатами $Z_1 = l = 0,122\lambda_1$ и $Z_2 = 0,5\lambda_1 - l = 0,378\lambda_1$.

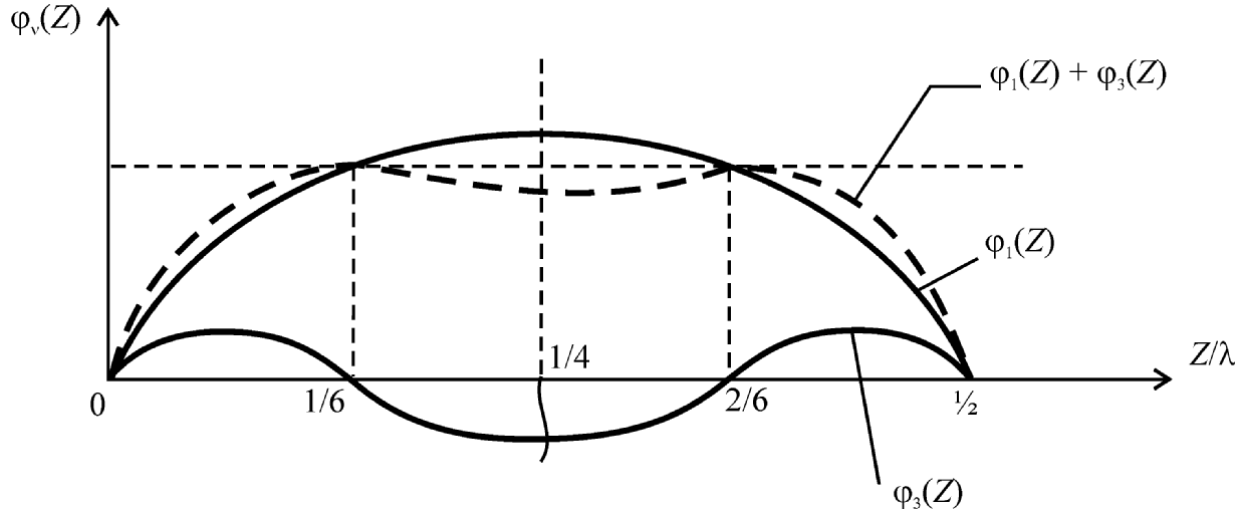


Рис. 4. Распределение вдоль полосы амплитуд крутильных колебаний на основной моде и третьей гармонике

Найдем, используя (7), (8) и условие (13), амплитуду крутильных колебаний при $Z = \lambda/4$ в условиях суперпозиции основного колебания и третьей гармоники и при возбуждении колебаний двумя вращательными моментами M_0 , как на рис. 3:

$$\varphi \left(Z = \frac{\lambda_1}{4} \right) = \varphi_1(Z) + \varphi_3(Z) = \frac{8QM_0}{\rho I_K \lambda_1 \omega_1^2} \left[\sin(2\pi l / \lambda_1) - \frac{1}{8} \sin \left(\frac{6\pi l}{\lambda_1} \right) \right] = \frac{4,8QM_0}{\rho I_K \lambda_1 \omega_1^2}. \quad (14)$$

Для кремниевых микрозеркал в виде полосок шириной $h = 50$ мкм, толщиной $b = 2$ мкм, длиной $L = \lambda_1/2 = 5$ мм (для кремния $G = 10^{11}$ Па, $\rho = 2,32 \cdot 10^3$ кг/м³) круговая частота возбуждения основной гармоники $\omega_1 = 3,3 \cdot 10^5$ с⁻¹. Если задаться приемлемым на практике значением амплитуды угла поворота $\pm 5,7^\circ$ ($\varphi(Z = \lambda/4) = 0,1$ рад), можно используя (14), найти значение $QM_0 \approx 5 \cdot 10^{-9} \text{ Н} \cdot \text{м}$.

При работе дефлектора в статике, например, в старт-стопном режиме, зеркало должно, отклонившись, оставаться неподвижным. При этом угол φ_{cm} его отклонения зависит от крутильного момента M_0 следующим образом [7]:

$$\varphi_{cm} = \frac{M_0 l}{GI_K}. \quad (15)$$

При этом средняя часть полоски микрозеркала между двумя приложенными к полоске моментами M_0 (рис.3) является примерно плоской и отклоненной от первоначального положения на угол φ_{cm} . Вблизи мест приложения M_0 некоторая неплоскостность будет иметь место, т.к. здесь совершается переход от закрученного состояния полоски в области длиной l к плоскому. Задав значения угла $\varphi_{cm} = 0,1$ рад, и $l = 1,2$ мм, получим для параметров кремниевых микрозеркал, приведенных выше, значения $M_0 = 8,3 \cdot 10^{-10} \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Следует отметить нелинейную зависимость угла отклонения зеркала от значения магнитного момента P_M микровитка или микромагнита, т.к., во-первых, крутильный момент изменяется с изменением угла α между направлением магнитного момента и направлением внешнего магнитного поля (4) при поворотах полотна микрозеркала в области приложения крутильного момента, и, во-вторых, при закручивании полоски возникает из-за ее деформации продольная сила, натягивающая полоску и увеличивающая ее жесткость. При малых углах отклонения этими эффектами можно пренебречь.

Для форсированного перевода в старт-стопном режиме микрозеркала из одного углового положения в другое необходимо прикладывать магнитные моменты, определяемые уравнением (14). Время перевода t_{nep} можно оценить как длительность четверти периода T собственных колебаний микрозеркала, т. е.:

$$t_{nep} = \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2\omega_1}. \quad (16)$$

Для приведенных выше геометрических параметров микрозеркал $t_{nep} \approx 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

В таблице 1 приведены расчетные параметры магнитных движителей, обеспечивающих для рассматриваемых в тексте микрозеркал повороты на $\varphi \approx 0,1$ рад. Принято значение механической добротности микрозеркала $Q = 10$.

Таблица 1. Расчетные параметры магнитных движителей

Режим	Тип движителя	Внешнее поле B , Тл	Крутильный момент M_0 , $\text{Н} \cdot \text{м}$	Площадь рамки, $l_0 \times h$, мм^2	Ток рамки, A	Объем микромагнита $l_0 \times h \times d$, мм^3	$B_{осм}$, Тл	P_M , $\text{А} \cdot \text{м}^2$
стоячая волна	Рамка с током	0,5	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \times 0,05$	0,02	-	-	$10 \cdot 10^{-8}$
	микромагнит	0,5	$5 \cdot 10^{-10}$	-	-	$1 \times 0,05 \times 0,001$	0,025	$10 \cdot 10^{-7}$

								8
старт- стопный	Рамка с током	0,5	$8,3 \cdot 10^{-10}$	$1 \times 0,05$	0,03	-	-	$15 \cdot 10^{-8}$
	микромагнит	0,5	$8,3 \cdot 10^{-10}$	-	-	$1 \times 0,05 \times 0,001$	0,038	$15 \cdot 10^{-8}$

Для изготовления экспериментальных образцов дефлекторов использовалась кремниевая планарная технология. Свободные полосы заданной 2-х микронной толщины получены с применением известной методики химического травления кремниевой пластины, легированной в поверхностном слое бором до концентрации $n \approx 10^{22} \text{ см}^{-3}$, что предотвращает растворение легированного слоя в избирательных травителях кремния. Рамка с током получена гальваническим наращиванием золота по рисунку, заданному фотолитографически. Микромагниты получают напылением в вакууме через маску соответствующего магнитотвердого сплава.

Рассмотрим особенности оптических характеристик дефлектора с составным зеркалом, обусловленные дискретным характером структуры его отражающей поверхности и строго периодическим расположением микрозеркал, образующим эту поверхность. Составное зеркало обладает свойствами отражательной дифракционной решетки, постоянная d которой равна шагу расположения микрозеркал. При нормальном падении монохроматического света с длиной волны $\lambda_{св}$ отраженный свет дифрагирует, дифракционная картина представляет собой веер лучей. Направления каждого из лучей соответствуют направлению определенного дифракционного максимума и определяются по формуле дифракционной решетки:

$$d \sin \gamma = m \lambda_{св}, \quad (17)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$ – целые числа, определяющие номер дифракционного максимума. При поворотах микрозеркал положение лучей в пространстве не изменяется, однако изменяется их интенсивность, энергия падающего светового монохроматического пучка при синхронных поворотах микрозеркал переключается последовательно от одного луча к другому.

Увеличение 2θ угловой расходимости отраженного луча определяется формулой:

$$2\theta = \frac{\lambda_{св}}{Nd}, \quad (18)$$

где N – число микрозеркал, освещенных падающим световым пучком.

Количество возникших лучей определяется известным выражением для числа максимумов в дифракционной картине:

$$m = \frac{2d}{\lambda_{св}} \approx \frac{2h}{\lambda_{св}}, \quad (19)$$

так как в дефлекторе $d \approx h$ – ширине полотна микрозеркала.

При условии $d \approx h$ энергия дифрагировавшего света сосредоточена, в основном, в нулевом максимуме дифракционной картины:

$$I_{отр} = I_0, \quad (20)$$

где $I_{отр}$ и I_0 – интенсивности отраженного дефлектором света и интенсивность в нулевом максимуме дифракции. Интенсивность световых лучей, соответствующих максимумам первого и более высоких порядков, мала.

На практике дефлектор используют часто, направляя лучи в ограниченное угловое пространство $2\Delta\theta$, и уравнение (19) можно преобразовать в следующее:

$$m' \approx \frac{2d}{\lambda_{св}} \cdot \sin(\Delta\theta), \quad (21)$$

где m' – число позиций луча в угловом пространстве $2\Delta\theta$. Для числа позиций $m' = 100$, $\Delta\theta = 0,1$ рад, длине волны $\lambda_{св} = 0,5$ мкм из (21) находим $d \approx 250$ мкм.

Необходимо отметить, что положения отклоненного луча не зависят от углов поворота микрозеркал дефлектора, его угловые координаты в каждой позиции определяются только конструктивными параметрами дефлектора, т.е. могут быть известны с высокой точностью.

Приведенные выше расчетные данные говорят о перспективности применения разрабатываемого прибора в различных системах оптоэлектроники. Так, возможно создание сканирующего проектора с телевизионным стандартом развертки и разрешением 1000×1000 элементов и более; лазерных локационных систем со скоростью перемещения луча $\sim 5 \cdot 10^3$ рад/с и более при уникально-малых массо-габаритных характеристиках (как у микросхемы) и сверхмалом потреблении; коммутаторов оптоволоконных линий связи с произвольным переключением в формате $m \times n$, где m и n могут быть равны $50 \div 100$, и временем переключения 1,0-10,0 мкс.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по инфракрасной технике / Ред. И. Вольф, Г. Цисис. В 4-х т.т. Т.2. Проектирование оптических систем; пер. с англ. – М.: Мир, 1998.
2. Ребрин, Ю.К. Управление оптическим лучом в пространстве. – М.: Сов. радио, 1977.
3. Petersen K.E. Silicon Torsional Scanning Mirror // IBM Y. Res. Develop. – 1980. – V. 24, № 5. – P. 631 – 637.

4. Cohn R.W., Sampsell Y.B. Deformable mirror devices uses in frequency excision and optical switching // Appl. Opt. – V.27, № 5. – P. 937 – 940.
5. Чесноков В.В., Чесноков Д.В. Возбуждение крутильных волн в микромеханическом упругом волноводе. (в этом же сборнике)
6. Ландау, Л.Д. Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1965. – 250 с.
7. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев; отв. ред. Писаренко Г.С. – Киев: Наукова думка, 1988.

© Д.В. Чесноков, 2006

УДК 535.213

В.С. Крылов, В.Я. Костюченко

СГГА, Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОДВИЖНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ ОТ МОЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ x В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ МЛЭ $P\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

Полупроводниковые растворы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (КРТ), где x – мольное содержание кадмия, широко используются при изготовлении фотоприемников ИК-излучения для спектральных диапазонов 3 – 5 и 8 – 12 мкм. В последнее время достигнут значительный прогресс в развитии технологии выращивания слоев КРТ методом молекулярно лучевой эпитаксии (МЛЭ). На основе эпитаксиальных слоев КРТ изготавливаются многоэлементные матричные фотоприемные устройства. При создании большеформатных матриц и линеек фотоприемников возникает проблема выращивания и контроля однородности мольного состава исходных фоточувствительных пластин вдоль поверхности. В процессе роста методом МЛЭ из-за разных расстояний от источников до подложки и из-за неоднородной температуры подложки мольный состав КРТ может быть неоднородным вдоль поверхности. Характеристики фотоприемников зависят от подвижности неосновных носителей заряда (электронов). В связи с этим целью работы являлось измерение зависимости подвижности неосновных электронов от состава тройного раствора.

Ранее в работах [1, 2] был предложен простой метод определения подвижности неосновных электронов в p -КРТ при слабом уровне генерации неравновесных носителей. В таблице 1 приведены значения подвижности электронов μ_e , рассчитанной этим способом для четырех образцов с разным составом x , при температуре 77К.

Таблица 1

№	$\mu_e, \text{м}^2/\text{Вс}$	x , моль
1	7,1	0,2178
2	5,5	0,2224
3	4,35	0,2253
4	4	0,2263

На рис. 1 приведены магнитополевые зависимости сигнала фотопроводимости в геометрии Фарадея, измеренные на двух образцах КРТ. Подвижность электронов определялась с помощью простого выражения:

$$\mu_e = \frac{1}{B_H}, \quad (1)$$

где B_H – индукция магнитного поля, соответствующая половине амплитуды сигнала фотопроводимости при нулевом магнитном поле.

Для сравнительного анализа использовалось теоретическое выражение зависимости подвижности электронов в n -КРТ от состава и температуры [3].

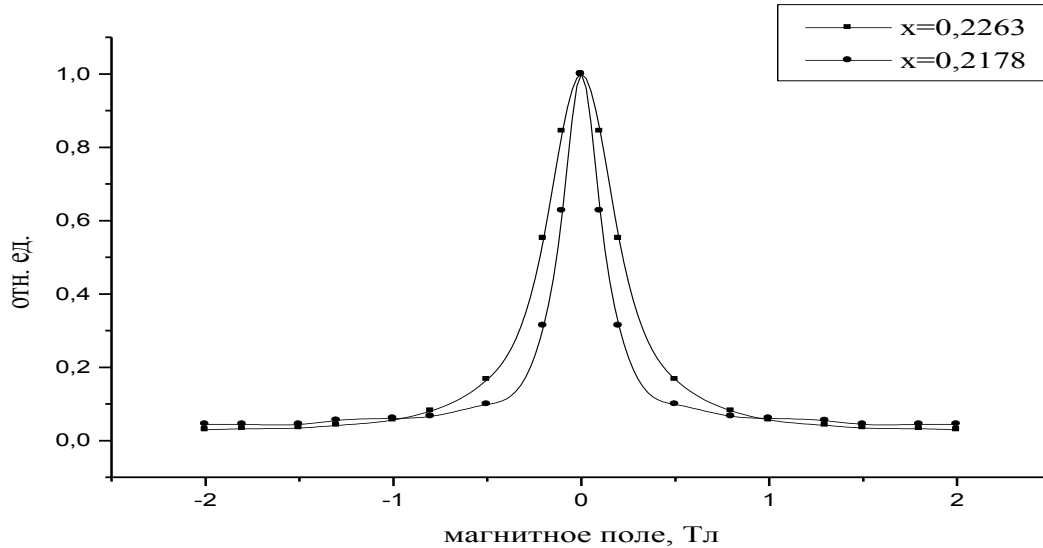


Рис. 1. Магнитополевые зависимости сигнала фотопроводимости для образцов с различным составом

$$\mu_e = 9 \cdot 10^4 \frac{a^{7.5}}{T^{2 \cdot a^{0.6}}}, \quad (2)$$

где $a = \frac{0.2}{x}$, T – абсолютная температура ($T = 77\text{K}$).

На рис. 2 приведены теоретическая кривая и аппроксимированные прямой экспериментальные точки.

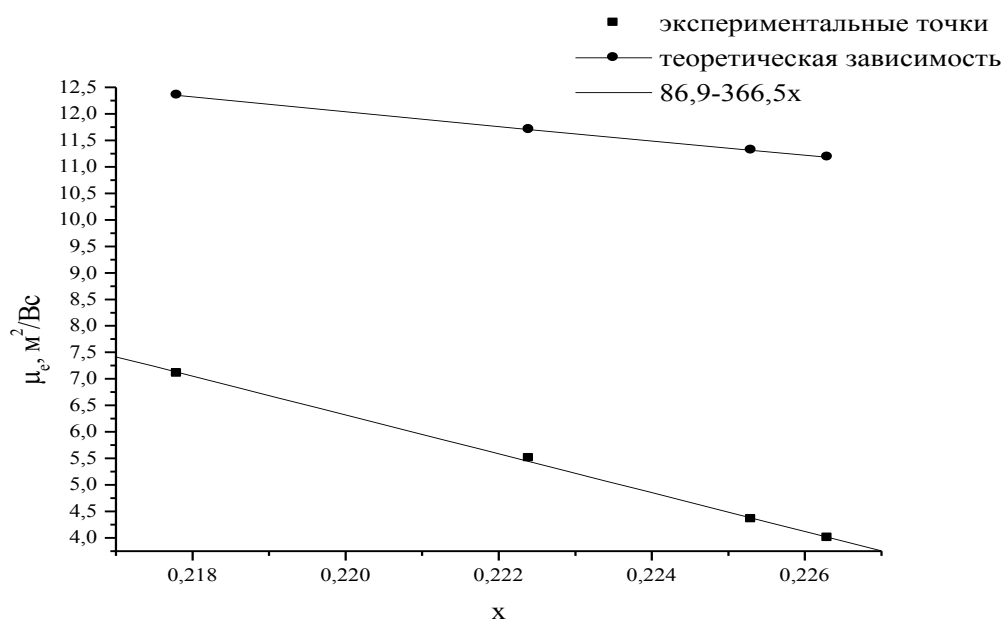


Рис. 2. Теоретическая и экспериментальная зависимости подвижности электронов от мольного состава КРТ

Характер зависимости подвижности электронов от мольного состава *p*-КРТ подобен ранее полученной теоретической зависимости для подвижности электронов в *n*-КРТ.

Таким образом, нами экспериментально получена и теоретически проанализирована зависимость подвижности электронов μ_e от мольного состава x . Различие наклона теоретической и экспериментальной кривой, как мы предполагаем, связано с типом полупроводника *p* или *n* и с ошибкой эксперимента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Подвижность неосновных носителей заряда в пленках *p*-HgCdTe / В.С. Варавин и др. // ФТП. – 2005- Т. 38. – вып. 5. – С. 532 – 536.
2. Протасов, Д.Ю. Немонотонное поведение магнитофотопроводимости в *p*-CdHgTe / Д.Ю. Протасов, В.Я. Костюченко, В.И. Овсяк // ФТП. – 2006. – Т. 40. – вып. 6. – С. 663 – 666.
3. Scott H.W. / – J. Appl. Phys. – 1972. – V.43. – P. 1055.

© В.С. Крылов, В.Я. Костюченко, 2006

УДК 621.382.002

В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков

СГТА, Новосибирск

ВОЗБУЖДЕНИЕ КРУТИЛЬНЫХ ВОЛН В МИКРОМЕХАНИЧЕСКОМ УПРУГОМ ВОЛНОВОДЕ

Целью настоящего сообщения является рассмотрение особенностей частотных характеристик и пространственного распределения колебаний в упругом микрополосковом волноводе, к отрезку которого приложен переменный крутящий момент.

Вопросы распространения крутильной бегущей волны в стержнях различной формы рассмотрены в [1], в работе [2] указан общий подход к определению особенностей частотных характеристик колебательных систем с сосредоточенными и распределенными параметрами. Однако в известной нам литературе отсутствует анализ характеристик крутильных стоячих волн и колебаний, возбуждаемых в отрезке упругого микрополоскового волновода. Этот анализ представляется актуальным в связи с попытками создания микромеханических устройств, использующих для управления световыми потоками крутильные деформации микрополосок [3].

Волновод механических волн, представляющий собой упругую узкую тонкую полоску с неподвижно закрепленными концами (рис. 1) испытывает воздействие сосредоточенного переменного крутящего момента. Если на одиночный такой волновод или матрицу волноводов [3] падает параллельный световой поток, то при крутильных колебаниях происходит модуляция проходящего матрицу света и угловые колебания отраженного светового пучка.

Если полоска волновода закреплена концами (на рис. 1 закреплён левый конец полоски; правая закреплённая сторона полоски не показана) и совершает собственные крутильные колебания, то крутильная волна является стоячей, и по длине полоски укладывается целое число ν полуволн упругих колебаний.

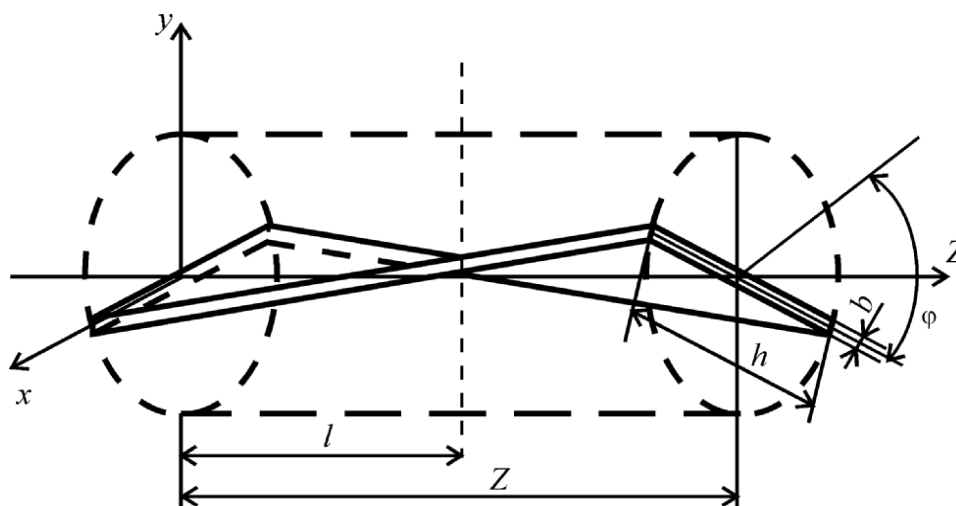


Рис. 1. Закрученный упругий полосковый волновод

Дальнейший анализ крутильных деформаций проводится в соответствии с общим подходом, развитым в [2] в приложении к продольным видам колебаний.

Угол поворота $\varphi(Z)$ любого сечения полоски является суперпозицией углов поворота φ_ν сечения на всех возможных типах колебаний, характеризующихся целым числом $\nu = 1, 2, 3, \dots$:

$$\varphi(Z) = \sum_{\nu} \varphi_{\nu}(Z) = \sum_{\nu} \varphi_{0\nu} \sin \frac{\nu\pi Z}{L}, \quad (1)$$

где $\varphi_{0\nu}$ – максимальная на длине L амплитуда волны типа колебаний с номером ν ; L – длина полосы.

Частота ω_{ν} поворотов сечений связана с волновым числом k_{ν} на каждом типе колебаний выражением:

$$\omega_{\nu} = k_{\nu} \cdot c_{кр}, \quad (2)$$

где $c_{кр}$ – фазовая скорость крутильной волны в полоске, одинаковая в случае крутильной волны для всех видов колебаний. Волновое число равно:

$$k_{\nu} = \frac{\nu\pi}{L}. \quad (3)$$

По длине L укладывается ν полуволн $\frac{\lambda_{\nu}}{2}$:

$$L = \nu \cdot \frac{\lambda_{\nu}}{2},$$

поэтому справедливо выражение:

$$k_{\nu} = \frac{2\pi}{\lambda_{\nu}}. \quad (4)$$

Приложим к полоске крутильный момент, отнесенный к единице длины полосы:

$$M_{кр}(Z, t) = M_Z \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha_l), \quad (5)$$

где M_Z – амплитуда крутильного момента в точке с координатой Z ; ω – его частота.

Дифференциальное уравнение вынужденных крутильных колебаний в полоске без учета потерь энергии колебаний запишем в обычном виде:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c_{кр}^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial Z^2} = \frac{M_Z}{\rho \cdot I} \cdot \cos(\omega t + \alpha_l), \quad (6)$$

где I – крутильный момент инерции поперечного сечения относительно продольной оси симметрии полосы; ρ – плотность полосы.

При вынужденных колебаниях их частота равна частоте вынуждающей силы, поэтому решение уравнения (6) можно искать в виде:

$$\varphi(Z, t) = \varphi(Z) \cdot \cos(\omega t + \alpha). \quad (7)$$

Учитывая (1), найдем:

$$\varphi(Z, t) = \sum_{\nu} \varphi_{0\nu} \sin\left(\frac{\nu\pi Z}{L}\right) \cdot \cos(\omega t + \alpha). \quad (8)$$

Найдем вторые производные уравнения (7) и заменим в них $\varphi(Z)$ в соответствии с (1):

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\varphi(Z) \omega^2 \cos(\omega t + \alpha) = \left[-\sum_{\nu} \varphi_{0\nu} \omega^2 \sin\left(\frac{\nu\pi Z}{L}\right) \right] \cos(\omega t + \alpha) \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial Z^2} = \frac{\partial^2 \varphi(Z)}{\partial Z^2} \cdot \cos(\omega t + \alpha) = \left[-\sum_{\nu} \varphi_{0\nu} \left(\frac{\nu\pi}{L}\right)^2 \sin\left(\frac{\nu\pi Z}{L}\right) \right] \cos(\omega t + \alpha). \quad (10)$$

Подставим найденные производные в (6):

$$\left[-\omega^2 \sum_{\nu} \varphi_{0\nu} \sin\left(\frac{\nu\pi Z}{L}\right) + c_{\kappa p}^2 \sum_{\nu} \varphi_{0\nu} \left(\frac{\nu\pi}{L}\right)^2 \sin\left(\frac{\nu\pi Z}{L}\right) \right] \cdot \cos(\omega t + \alpha) = \frac{M_z}{\rho I} \cos(\omega t + \alpha_l).$$

Примем $\alpha = \alpha_l$, получим:

$$-\omega^2 \sum_{\nu} \varphi_{0\nu} \sin\left(\frac{\nu\pi Z}{L}\right) + c_{\kappa p}^2 \sum_{\nu} \varphi_{0\nu} \left(\frac{\nu\pi}{L}\right)^2 \sin\left(\frac{\nu\pi Z}{L}\right) = \frac{M_z}{\rho I}. \quad (11)$$

Учитывая (2) и (3), преобразуем (11):

$$\sum_{\nu} \varphi_{0\nu} (\omega_{\nu}^2 - \omega^2) \cdot \sin\left(\frac{\nu\pi Z}{L}\right) = \frac{M_z}{\rho I}. \quad (12)$$

Домножим обе части уравнения (12) на $\sin\left(\frac{\nu\pi Z}{L}\right)$ и возьмем интеграл от обеих частей:

$$\sum_{\nu} \varphi_{0\nu} (\omega_{\nu}^2 - \omega^2) \int_0^L \sin^2\left(\frac{\nu\pi Z}{L}\right) dZ = \frac{1}{\rho I} \int_0^L M_z \sin\left(\frac{\nu\pi Z}{L}\right) dZ. \quad (13)$$

Так как ν – произвольное целое число, то в (13) в левой части должна стоять сумма интегралов от произведений $\sin\left(\frac{\nu\pi Z}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{\nu'\pi Z}{L}\right)$, где могут встречаться, как случаи $\nu = \nu'$, так и $\nu \neq \nu'$. В [2] показано, что когда $\nu \neq \nu'$, интеграл равен нулю.

Оставшийся интеграл в левой части (13) справочный; учитывая также, что ν – целое число, интеграл можно упростить:

$$\int_0^L \sin^2\left(\frac{\nu\pi Z}{L}\right) dZ = \frac{L}{2}. \quad (14)$$

Чтобы вычислить интеграл в правой части (13), необходимо задать функцию распределения M_Z крутильного момента вдоль оси Z .

Практически важным случаем распределения крутильного момента является приложение сосредоточенного момента к полоске в плоскости сечения с координатой l (рис.1). При этом значение момента везде равно нулю, за исключением бесконечно малой окрестности координаты l , где момент равен M_l , а $\sin\left(\frac{\nu\pi Z}{L}\right) = \sin\left(\frac{\nu\pi l}{L}\right)$.

Получим:

$$\int_0^L M_Z \cdot \sin\left(\frac{\nu\pi Z}{L}\right) dZ = \sin\left(\frac{\nu\pi l}{L}\right) \int_0^L M_l dZ = \sin\left(\frac{\nu\pi l}{L}\right) \cdot M_0, \quad (15)$$

где

$$\int_0^L M_l dZ = M_0. \quad (16)$$

Обозначим:

$$\sin\left(\frac{\nu\pi l}{L}\right) = \chi, \quad (17)$$

получим:

$$\int_0^L M_Z \cdot \sin\left(\frac{\nu\pi Z}{L}\right) dZ = \chi M_0. \quad (18)$$

Здесь χ обозначает долю приложенного момента, приходящуюся на возбуждение вида колебаний с номером ν и является функцией пространственного распределения момента, а M_0 – полный крутильный момент.

Учитывая (14) и (18), уравнение (13) можно записать в упрощенном виде:

$$\frac{\varphi_{0\nu} L}{2} (\omega_\nu^2 - \omega^2) = \frac{M_0}{\rho I} \sin\left(\frac{\nu\pi l}{L}\right). \quad (19)$$

Выразим из (19) максимальную амплитуду $\varphi_{0\nu}$ угла поворота сечения полоски для одного типа волны в полоске:

$$\varphi_{0\nu} = \frac{2M_0 \sin\left(\frac{\nu\pi l}{L}\right)}{\rho I L (\omega_\nu^2 - \omega^2)}. \quad (20)$$

С учетом (7), (8) и (20) можно записать общее решение для вынужденных колебаний полосы, вызванных сосредоточенным крутильным моментом без учета потерь:

$$\varphi(Z, t) = \sum_{\nu} \frac{2M_0 \sin\left(\frac{\nu\pi l}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{\nu\pi Z}{L}\right)}{\rho \cdot I \cdot L (\omega_\nu^2 - \omega^2)} \cdot \cos(\omega t + \alpha). \quad (21)$$

Распределение амплитуды крутильных колебаний вдоль полосы выражается формулой:

$$\varphi(Z) = \sum_{\nu} \frac{2M_0 \sin\left(\frac{\nu\pi l}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{\nu\pi Z}{L}\right)}{\rho \cdot I \cdot L (\omega_\nu^2 - \omega^2)}. \quad (22)$$

Возрастание амплитуды вынужденных колебаний до бесконечности при равенстве $\omega_\nu = \omega$ в последнем уравнении объясняется тем, что при выводе уравнений (21) и (22) не было учтено затухание колебаний вследствие потерь энергии.

Для оценочного определения влияния затухания можно считать, что амплитуда колебаний при резонансе примерно равна произведению статического смещения под действием вынуждающей силы на добротность.

Увеличение амплитуды колебаний, характеризуемое добротностью, возникает вследствие бесконечного ряда отражений бегущей волны от концов полосы и суммирования отраженных волн.

Статическое смещение наблюдается при $\omega = 0$, и из уравнения (22) найдем выражение для амплитуды угла поворота при резонансе колебаний полосы на основном виде колебаний, когда $\nu = 1$ и $L = \frac{\lambda_1}{2}$:

$$\varphi_1(Z) = \frac{4QM_0 \sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi Z}{\lambda_1}\right)}{\rho I \lambda_1 \omega_1^2}. \quad (23)$$

Найдем, используя (22), амплитуды углов поворота полосы на неосновных видах колебаний, когда $\nu \neq 1$ и $\omega = \omega_1$:

$$\varphi_\nu(Z) = \frac{4QM_0 \sin\left(\frac{2\pi\nu l}{\lambda_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi\nu Z}{\lambda_1}\right)}{\rho I \lambda_1 (\omega_\nu^2 - \omega_1^2)}. \quad (24)$$

Относительный вклад неосновных видов колебаний в величину и распределение значений амплитуд углов поворота вдоль полоски (по оси Z) найдем, считая $\nu \neq 1$ и разделив (24) на (23):

$$U_\nu(Z) = \frac{\varphi_\nu(Z)}{\varphi_1(Z)} = \frac{1}{\nu^2 - 1} \cdot \frac{\sin\left(\frac{2\pi\nu l}{\lambda_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi\nu Z}{\lambda_1}\right)}{\sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi Z}{\lambda_1}\right)}. \quad (25)$$

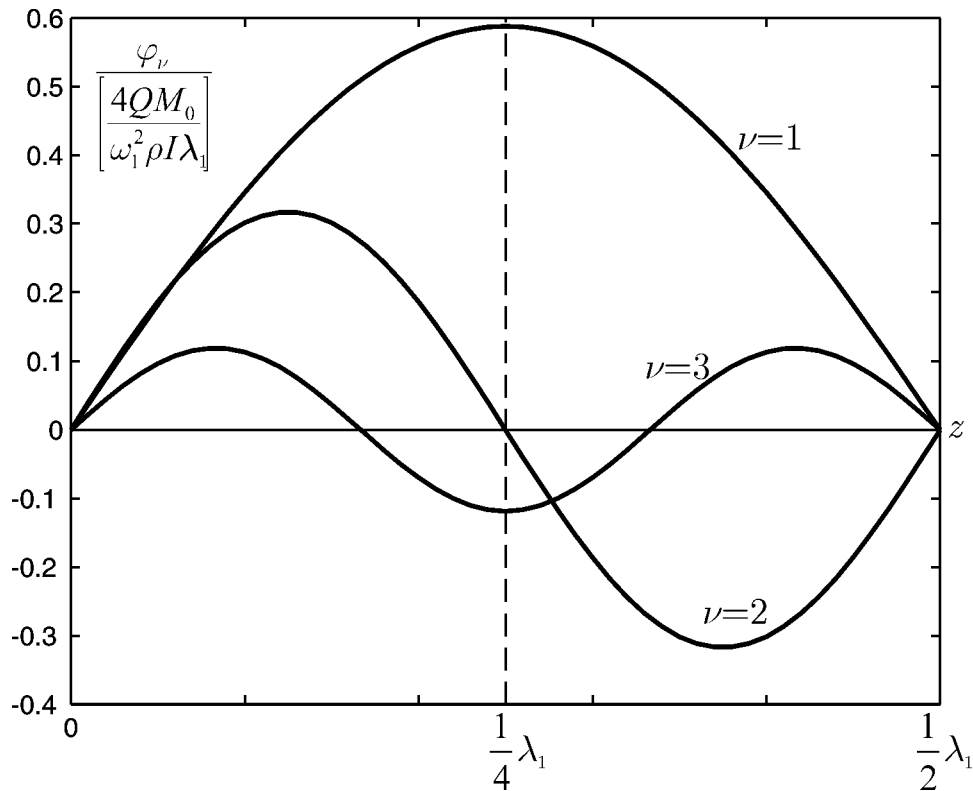
Рис. 2. Распределение амплитуды крутильных колебаний полоски на различных видах колебаний

Это уравнение справедливо при $\nu \neq 1$; при $\nu = 1$ необходимо принимать множитель $\frac{1}{\nu^2 - 1} = 1$.

Распределение амплитуды крутильных колебаний полоски по оси Z показано на рис. 2, где по оси ординат отложена величина $\varphi_\nu(Z) / \left(\frac{4QM_0}{\omega_1^2 \rho I \lambda_1} \right)$, при вычислении которой принято $l = 0,1\lambda_1$.

Соотношение максимальных амплитуд крутильных колебаний полоски на различных видах колебаний и при $l = 0,1\lambda_1$ показано на рис. 3.

Рис. 2 иллюстрирует тот факт, что в центре полоски при $Z = \lambda_1/4$ следует учитывать только нечетные виды колебаний; знак деформаций первого и третьего типов противоположный, что может приводить в области вблизи центра полоски к некоторой линеаризации зависимости угла отклонения от координаты.



Деформации, обусловленные колебанием $\nu=2$, могут приводить к заметной асимметрии результирующей формы средней части поверхности колеблющейся полосы.

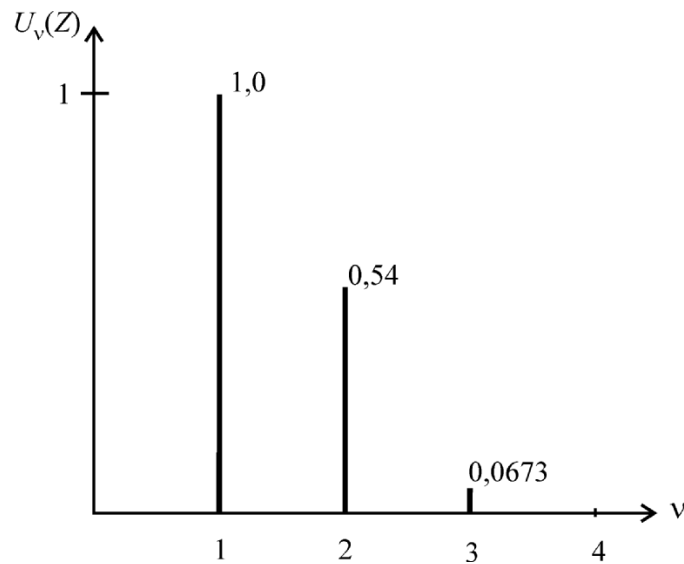


Рис. 3. Соотношение максимальных амплитуд крутильных колебаний полосы на различных видах колебаний

Из рис. 3 видна значительная величина деформаций на второй пространственной гармонике (при $\nu=2$) в сравнении с основным типом колебаний ($\nu=1$). Причина эффективного возбуждения второй гармоники в том, что точка приложения крутильного момента M_0 ($Z_\lambda = 0,1\lambda_1$) занимает в

пространственном периоде колебаний при $\nu = 2$ более выгодное положение, чем при $\nu = 1$.

Влияние второй пространственной гармоники можно ослабить, возбуждая колебания двумя источниками крутильных колебаний, работающими в одной фазе и расположенными симметрично относительно центра, так как крутильные колебания этой гармоники имеют по обе стороны от узла колебаний противоположные фазы.

Оценивая полученные результаты, можно сказать, что в данной работе найдены соотношения, позволяющие рассчитывать частотное и пространственное распределения крутильных вынужденных колебаний в отрезке волновода механических волн; проведен анализ влияния на эти распределения условий возбуждения крутильных волн. В частности, установлено, что подбирая точку приложения сосредоточенного вынуждающего кручения момента, можно управлять пространственным распределением крутильных волн, устранять или усиливать определенные пространственные гармоники крутильных стоячих волн.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ландау, Л.Д. Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1965. – 250 с.
2. Скучик, Е. Простые и сложные колебательные системы / Е. Скучик; пер. с англ. – М.: Мир, 1971.
3. Чесноков, В.В. Микромеханические модуляторы света / В.В. Чесноков // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. – 1990. – № 6. – С. 82.

© В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, 2006

УДК 574:669

В.П. Перминов

СГГА, Новосибирск

В.А. Неронов

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск

В.И. Мали, Т.С. Тесленко

Институт гидродинамики СО РАН, Новосибирск

М.А. Корчагин

Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск

Н.С. Черняк, А.А. Панькова

НГТУ, Новосибирск

ВЗРЫВНОЙ СИНТЕЗ СОЕДИНЕНИЙ В СИСТЕМАХ «БОР – КРЕМНИЙ» И «БОР – МАГНИЙ»

Бориды металлов, также как и неметаллические соединения бора, могут использоваться для изготовления сверл, применяемых при обработке точных технических камней в приборостроении. Спеченные бориды используются для обработки пластмасс, стекла и фарфора.

Соединения бора в виде порошка используются при шлифовании и полировании твердых материалов: технических камней, минералов, сплавов, стекол, керамики, кварца.

При этом некоторые соединения, например, порошки карбида бора обеспечивают чистоту обработки, уступающую таковой только после обработки алмазом. Хорошие показатели карбид бора обнаруживает при шлифовании рубина для часовой промышленности, что позволяет частично заменить алмаз карбидом бора на этой операции [1].

В.А. Нероновым показана высокая шлифспособность порошка додекаборида алюминия AlB_{12} при обработке стекол. При этом достигается высокая чистота поверхности.

Применение боридов магния и соединений бора с кремнием (силицидов бора), обладающих комплексом интересных свойств, сдерживается недостаточной разработкой способов их получения и недостаточной изученностью их свойств, в том числе шлифспособности.

В предлагаемой работе сделана попытка получить диборид магния MgB_2 и силициды бора B_4Si и B_6Si в экстремальных условиях.

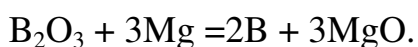
В настоящее время диборид магния получают в основном в поликристаллическом состоянии твердофазным синтезом из элементов [2].

Пока трудно судить о перспективности какого-либо из предложенных методов синтеза диборида магния.

Перспективным, по мнению авторов, является магниитермический способ восстановления борного ангидрида. Магний – чрезвычайно активный, низкокипящий восстановитель с большой летучестью. Поэтому процессы рекомендуется проводить в замкнутых объемах под повышенным давлением инертных газов.

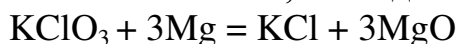
В.П. Перминовым и В.А. Нероновым [3] проводилось восстановление борного ангидрида магнием в присутствии окислителя (бертолетова соль KClO_3) в среде аргона в реакторе без внешнего подогрева.

Основная реакция восстановления борного ангидрида имеет следующий вид:



Однако фактически в результате восстановления B_2O_3 получается значительное количество боридов магния разного состава – от MgB_2 до MgB_{12} , а также субоксиды бора.

Процесс происходит с выделением около 0,55 ккал на грамм шихты, что недостаточно для инициирования реакции восстановления борного ангидрида магнием без дополнительно вводимого окислителя. Реакция взаимодействия окислителя с магнием, по-видимому, протекает согласно уравнению:



с большим тепловым эффектом.

В силу взрывной природы процессов, содержание окислителя следует брать минимально необходимое, которому соответствует следующее массовое отношение:

$$\frac{B_2O_3 + 3Mg}{KClO_3 + 3Mg} = 10 - 20.$$

Рассмотренный метод дает большее извлечение бора в смеси с боридами, чем известные способы Муассана и Кролля, но меньшее по сравнению с печными способами, однако имеет перед ними преимущество в простоте.

В работе [4] сделана попытка получения MgB_2 динамическим взрывным нагружением. В качестве исходных материалов использовались порошки магния Mg 96, представлявшие собой чешуйки размером 80 – 250 мкм, и аморфного бора В 94 марки «А», частицы которого не превышали 1 мкм. Тщательно перемешанные порошки в соотношении, отвечающем составу MgB_2 , загружались в стальную цилиндрическую ампулу с внутренним диаметром 8 мм и толщиной стенки 3 мм. Ампулу помещали по оси цилиндрического заряда взрывчатого вещества (промышленный аммонит 6 ЖВ) плотностью 0,9 г/см³ и диаметром 60 мм. Слой того же взрывчатого вещества диаметром 60 мм и высотой 25 мм помещали сверху ампулы и инициировали с помощью высоковольтного электродетонатора из центра. Все взрывные работы проводились в специальной взрывной камере диаметром 11,5 м.

Процесс динамического компактирования смеси порошков осуществлялся при сжатии ампулы продуктами детонации, проходящей вдоль оси ампулы со скоростью 3,6 км/с, а в радиальном направлении – на порядок меньше (0,36 км/с). Давление на стенки ампулы можно оценить как давление в детонационной волне ~ 3 ГПа. В результате внутренний диаметр ампулы уменьшался примерно до 5 мм, что приводило к увеличению плотности смеси порошков.

Визуальный осмотр поперечных изломов образцов показал, что их центральная и периферийная части отличаются. Электронно-микроскопическое исследование поперечных изломов образцов, выполненное на растровом электронном микроскопе JSM T – 20 и рентгеноструктурный анализ на дифрактометре ДРОН – 3 в $Cu\ K\alpha$ – излучении показали, что периферийная зона представляет собой уплотненную смесь исходных порошков в виде крупных блоков с незначительной пористостью. Центральная часть диаметром примерно 1/3 диаметра образца – наиболее интересна. Она напоминает спеченную пенистую массу с пустотами сферической формы. Есть основание полагать, что на этом месте находились частицы магния, которые при нагружении расплавились (возможно, частично испарились), продиффундировали в окружающее пространство и прореагировали с бором, образовав, по данным рентгеновского анализа, диборид магния.

Содержание MgB_2 в центральной части составляло около 10% и возрастало примерно вдвое в образцах, полученных при давлении в детонационной волне ~ 7 ГПа.

Таким образом, можно констатировать следующее:

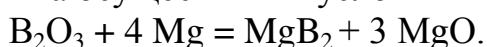
– Малые времена действия высоких давлений и температур при динамическом нагружении смеси порошков бора и магния оказываются достаточными для получения диборида магния;

– Высокие скорости динамического сжатия порошков, превышающие в 10^5 – 10^6 раз скорости горения смеси порошков бора и магния при синтезе MgB_2 в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза указывают на аномально высокие скорости реакций взаимодействия компонентов.

Схему процесса синтеза MgB_2 при взрывном нагружении смеси порошков бора и магния можно представлять следующим образом:

1. Разогрев, плавление и, возможно, частичное испарение магния;
2. Диффузия магния в окружающее пространство;
3. Взаимодействие жидкого и газообразного магния с бором;
4. Образование диборида магния.

Кроме вышеописанной методики получения MgB_2 была предпринята попытка осуществить в условиях взрывного нагружения реакцию



Этот процесс выгодно отличается от рассмотренного выше магнийтермического восстановления борного ангидрида в присутствии бертолетовой соли [3, 5]. Бертолетова соль, взаимодействуя с магнием и внося необходимое для осуществления процесса тепло, приводит к взрывной реакции, сопровождающейся выносом материалов из тигля. Процесс материалоемкий.

Одновременно магнийтермическое восстановление B_2O_3 в условиях взрывного нагружения также выгодно отличается от процесса синтеза MgB_2 взрывным нагружением смеси элементарного бора и магния, поскольку с образованием MgB_2 и MgO повышается термичность процесса.

Эксперименты были проведены в условиях, аналогичных синтезу MgB_2 из порошков бора и магния при давлении в детонационной волне ~ 3 ГПа. Рентгеноструктурный анализ, выявил следующую картину.

После взрывного нагружения смеси $\text{B}_2\text{O}_3 + 4 \text{Mg}$ в верхней части ампулы и в периферийном слое средней по высоте части обнаружены только линии исходной смеси порошков. Среднюю и нижнюю части ампулы пронизывал расширяющийся полый оплавленный центральный канал. Стенки этого канала, а в нижней части вся масса представляла темное твердое вещество, частью растрескавшееся при вскрытии ампулы, оказавшееся, в основном, MgB_2 (около 90%) с небольшим количеством оставшегося Mg (не более 10%). Линии B_2O_3 и MgO не выявлены.

В условиях, аналогичных синтезу MgB_2 из порошков бора и магния при давлении в детонационной волне 3 ГПа, была сделана попытка осуществить процессы синтеза силицидов бора B_4Si и B_6Si .

Пытались реализовать 2 процесса:

1. Синтез из аморфного бора В 94 с размером частиц менее 1 мкм и порошка кремния крупностью 5 – 30 мкм, полученного дроблением «хвостов» монокристаллического кремния;
2. Силикотермическое восстановление B_2O_3 .

Рентгеновский и электронномикроскопический анализ показали, что синтез из элементов обеспечивает получение смеси фаз B_4Si и B_6Si . Процесс силикотермического восстановления борного ангидрида при выбранных условиях динамического взрывного нагружения инициировать не удалось. Однако как показали дополнительные эксперименты, он может быть осуществлен методом традиционной металлотермии (при введении в шихту подогревающей добавки $Al_2(SO_4)_3 + 6Si$ и предварительном подогреве шихтовых материалов до $600^\circ C$).

Таким образом, в работе показано, что соединения систем бор-магний и бор-кремний могут быть получены как синтезом из элементов в условиях динамического взрывного нагружения, так методом металлотермии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бор, его соединения и сплавы / Г.В. Самсонов, Л.Я. Марковский, А.Ф. Жигач, М.Г. Воляшко. – Киев: АН УССР. 1960 – 591 с.
2. Ивановский, А.Л. Сверхпроводящий MgB_2 и родственные соединения: синтез, свойства, электронная структура / А.Л. Ивановский // Успехи химии. – 70. – 2001. – С. 811 – 829.
3. Перминов, В.П. Магнито-термическое внепечное получение бора из борного ангидрида / В.П. Перминов, В.А. Неронов // Порошковая металлургия. – 1969. – №1. – С. 1 – 5.
4. Взрывной синтез диборида магния / В.И. Мали, В.А. Неронов, В.П. Перминов, М.А. Корчагин, Т.С. Тесленко // Химия в интересах устойчивого развития. – 2005. – Т. 13. – С. 451 – 453.
5. Самсонов, Г.В. Магнитиды / Г.В. Самсонов, В.П. Перминов. – Киев: Наукова думка, 1971. – 344 с.
6. Серебрякова, Т.И. Высокотемпературные бориды / Т.И. Серебрякова, В.А. Неронов, П.Д. Пешев. – М.: Металлургия, Челябин. отд., – 1991. – 368 с.

© В.П. Перминов, В.А. Неронов, В.И. Мали, Т.С. Тесленко,
М.А. Корчагин, Н.С. Черняк, А.А. Панькова, 2006

УДК 519.8; 536.521

В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, Д.С. Шелковой, Н.С. Лебедев
СГГА, Новосибирск

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПИРОМЕТРА ИСТИННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Детальное рассмотрение методик расчета энергетической чувствительности ИК аппаратуры представлено в работах [1–4]. Отдельно влияние излучения оптических элементов на точность пирометрических измерений рассматривалось в работе [5], вследствие чего возникает необходимость учитывать влияние излучения окружающего фона и оптических элементов при расчетах энергетических характеристик пирометра.

В настоящей работе расчет температурной чувствительности рассматривается применительно к пирометру истинной температуры [6–8], работающего по излучению объектов с окружающей температурой, в котором учитывается собственное излучение объекта и влияние излучения фона и оптических элементов пирометра.

Рассмотрим подробно предлагаемую математическую модель температурной чувствительности.

Суммарный выходной сигнал на заданной длине волны, снимаемый с приемника излучения пирометра, описывается следующим выражением:

$$U_{\Sigma}(\lambda) = U(\lambda) + U_{\text{фон}}(\lambda) + U_o(\lambda), \quad (1)$$

где $U(\lambda)$ – выходной сигнал, формируемый собственным излучением поверхности исследуемого объекта, В;

$U_{\text{фон}}(\lambda)$ – выходной сигнал, формируемый отраженным излучением фона от поверхности объекта, В;

$U_o(\lambda)$ – выходной сигнал, формируемый излучением поверхности оптических элементов, В.

Представим в развернутом виде каждую составляющую суммарного выходного сигнала:

$$U(\lambda) = \pi^{-1} A \varpi S_{\lambda} \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_{\phi}(\lambda) \varepsilon(\lambda) M_e(\lambda, T), \quad (2)$$

где λ – длина волны, мкм;

A – площадь входного зрачка объектива пирометра, см²;

ϖ – телесный угол поля зрения объектива, ср;

S_{λ} – абсолютная спектральная чувствительность приемника излучения, В/Вт;

$M_e(\lambda, T)$ – спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела (АЧТ) с абсолютной температурой T , Вт·см⁻²·мкм⁻¹;

$\tau_o(\lambda), \tau_a(\lambda), \tau_{\phi}(\lambda)$ – спектральные коэффициенты пропускания соответственно объектива, слоя атмосферы и спектрального фильтра;

$\varepsilon(\lambda)$ – спектральный коэффициент теплового излучения поверхности объекта.

$$U_{\text{фон}}(\lambda) = K(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_{\phi}(\lambda) \rho(\lambda) M_e(\lambda, T_{\text{фон}}), \quad (3)$$

где $K(\lambda) = \pi^{-1} A \varpi S_{\lambda}$;

$\rho(\lambda)$ – коэффициент отражения поверхности исследуемого объекта;

$T_{\text{фон}}$ – абсолютная температура фона (окружающей среды), К;

$$U_o(\lambda) = K(\lambda) \varepsilon_o(\lambda) M_e(\lambda, T_o), \quad (4)$$

где $\varepsilon_o(\lambda)$ – коэффициент теплового излучения поверхности оптических элементов;

T_o – абсолютная температура поверхности оптических элементов, К.

Для получения функциональной связи приращения суммарного сигнала $U_{\Sigma}(\lambda)$ от приращения температуры поверхности объекта, продифференцируем формулу (1) по dT с учетом формул (2) и (4):

$$\frac{dU_{\Sigma}(\lambda)}{dT} = K(\lambda)\tau_o(\lambda)\tau_a(\lambda)\tau_{\phi}(\lambda)\varepsilon(\lambda)\frac{dM_e(\lambda, T)}{dT} + \\ + K(\lambda)\tau_o(\lambda)\tau_a(\lambda)\tau_{\phi}(\lambda)\rho(\lambda)\frac{dM_e(\lambda, T_{\text{фон}})}{dT}. \quad (5)$$

После математических преобразований получено следующее выражение:

$$\Delta T_{\text{пор}} = \frac{\pi\mu K_{\text{э}}(1 + U_o/U_{\text{пэ}} + U_{\text{фон}}/U_{\text{пэ}})\sqrt{ab\Delta f}}{A\varpi D^* C_2 \left[\left(\frac{1}{T^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda)\tau_o(\lambda)\tau_a(\lambda)\tau_{\phi}(\lambda)\varepsilon(\lambda)\lambda^{-1}M_e(\lambda, T)d\lambda \right) + \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{T_{\text{фон}}^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda)\tau_o(\lambda)\tau_a(\lambda)\tau_{\phi}(\lambda)\rho(\lambda)\lambda^{-1}M_e(\lambda, T_{\text{фон}})d\lambda \right) \right]}. \quad (6)$$

где μ – отношение «сигнал/шум»;

$K_{\text{э}}$ – коэффициент использования приемником излучения эталонного источника;

D^* – удельная обнаружительная способность приемника излучения, $\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$;

$S(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность приемника излучения;

λ_1, λ_2 – левая и правая граница чувствительности приемника излучения;

Полученное выражение (6) представляет собой рабочее соотношение для расчета температурной чувствительности пирометров, которые функционируют по собственному излучению объектов с учетом излучения окружающего фона и собственного излучения оптических элементов пирометра.

Для проведения расчетов были выбраны следующие исходные данные оптико-электронной схемы пирометра истинной температуры [6–8], содержащей зеркально-линзовый объектив, диск обтюратора, включающий три ИК спектральных фильтра, приемник излучения, усилитель и устройство управления и вычисления. В качестве приемника излучения использован пироприемник МГ-32; его основные характеристики:

$S_{\text{э}} = 7 \cdot 10^3 \text{ В/Вт}$ – интегральная чувствительность (при излучении АЧТ с $T_{\text{э}} = 573 \text{ К}$);

$\Phi_{\text{п}} = 7 \cdot 10^{-10} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$ – пороговый поток приемника излучения на единицу полосы частот;

$\Delta f = 450 \text{ Гц}$ – полоса частот электрической схемы включения приемника;

$a = b = 1 \text{ мм}$ – размеры чувствительной площадки;

Параметры оптической системы пирометра:

$A = 27,7 \text{ см}^2$ – площадь входного зрачка;

$\varpi = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ ср}$ – телесный угол поля зрения.

Диапазон исследуемых температур:

$T \in [243 \text{ К (5 К) } 313 \text{ К}], T_o = T_{\text{фон}} \in [243 \text{ К (5 К) } 313 \text{ К}]$.

Расчеты проведены с использованием программы «Mathcad». На рисунке приведены графики зависимости $\Delta T_{\text{пор}}$ в функции температуры T объекта при различных значениях температур фона и оптических элементов $T_o = T_{\phi}$.

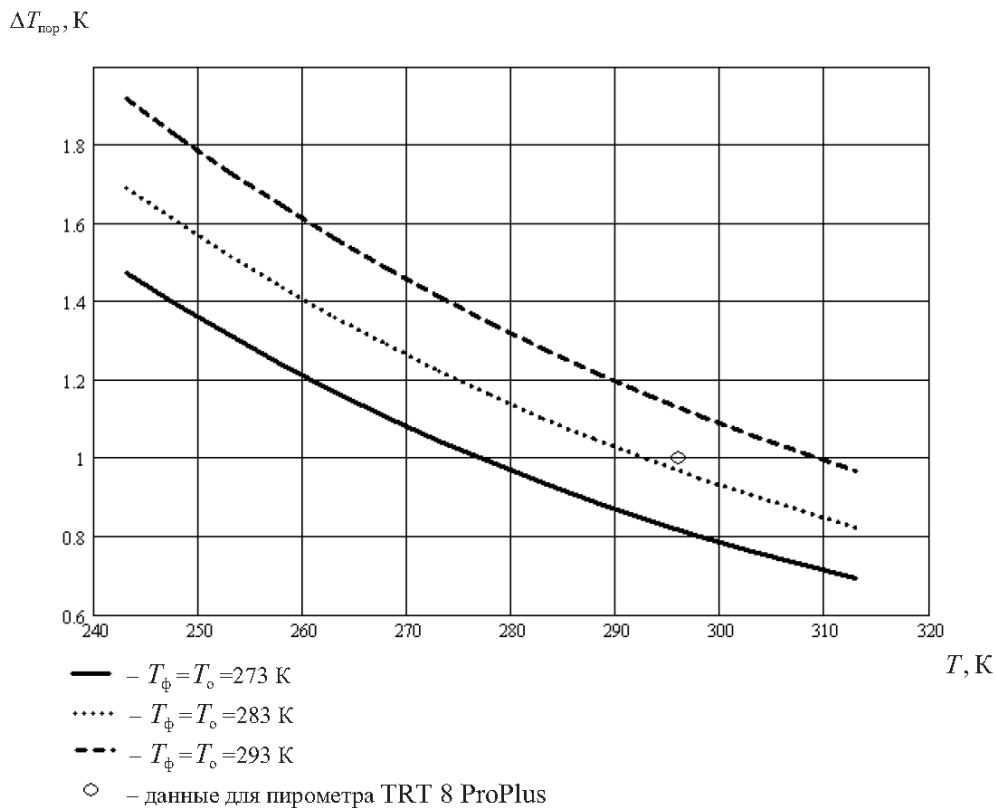


Рис. Зависимость температурной чувствительности $\Delta T_{\text{пор}}$ пирометра от температуры поверхности исследуемого объекта T , при $T_{\phi} = T_o$

Из рисунка видно, что с ростом температуры объекта T , $\Delta T_{\text{пор}}$ уменьшается, а увеличение значений температур T_{ϕ} и T_o в диапазоне от 273 до 293 К приводит, как и следовало ожидать, к ухудшению температурной чувствительности пирометра за счет «подсветки» приемника излучения отраженным излучением фона и собственным излучением оптических элементов.

Выводы:

1. На основании работ М.М. Мирошникова и Н.Ф. Соболевой развита методика расчета и представлена математическая модель температурной чувствительности пирометра, работающего по собственному излучению объектов с учетом отраженного излучения окружающего фона и излучения оптических элементов схемы.

2. Применительно к схеме пирометра истинной температуры подготовлены исходные данные и проведены расчетные исследования его температурной чувствительности в зависимости от температуры объекта, окружающего фона и оптических элементов схемы.

3. Для сопоставления значений чувствительности рассматриваемого пирометра с данными зарубежного пирометра FLIR Systems TRT 8 ProPlus [9], то следует отметить следующее. При $T_{\phi} = 273 \text{ К}$ точность измерения температуры зарубежного пирометра составляет значение $\Delta T = \pm 1^{\circ}\text{С}$ на уровне $T = 293 \text{ К}$. На рисунке эти данные приведены в виде круглой точки, которые заимствованы из технических характеристик [9].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соболева Н.Ф. К расчету энергетической чувствительности ИК сканирующей аппаратуры // Оптико-механическая промышленность. 1970. № 10. С. 9–11.
2. Соболева Н.Ф. Расчет погрешности при измерении температуры нечерных тел с помощью ИК радиометра // Оптико-механическая промышленность. 1971. № 6. С. 13–15.
3. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1983. 696 с.
4. Мирошников М.М., Овчаренко Г.М. Влияние побочных потоков излучения на работу ИК-радиометра // Оптико-механическая промышленность. 1970. № 10. С. 3–6.
5. Голубь Б.И., Пахомов И.И., Хорохоров А.М. Собственное (тепловое) излучение элементов оптических систем оптико-электронных приборов. М.: Машиностроение, 1978. 144 с.
6. Воронин С.А., Тымкул В.М. Теория способа измерения истинных температур объектов // Совр. проблемы геодезии и оптики. LI научно-техн. конф., 16-19 апр. 2001 г.: Тез. докл. – Новосибирск: СГГА, 2001. С. 171.
7. Патент РФ 2219504, МКИ G 01 J 5/00. Пирометр истинной температуры / В.М. Тымкул, Н.С. Лебедев, Д.С. Шелковой, С.А. Воронин /РФ/ – №2002104325/28; заяв. 18.02.2002; опубл. 20.12.2003; Бюл. № 35.
8. Тымкул В.М., Лебедев Н.С., Шелковой Д.С. Пирометр истинной температуры. Проблемы метрологического обеспечения топографо-геодезического производства и землеустроительных работ. Научно-техн. конф., 17-21 дек. 2001 г. Материалы конф. – Новосибирск: СГГА, 2001. С. 57.
9. ThermoPoint TRT 8 ProPlus. Инструкция по эксплуатации. Бесконтактный термометр. Фирма FLIR Systems. 2001. 9 с.

© В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, Д.С. Шелковой, Н.С. Лебедев, 2006

**ОТРАЖЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЬЮ ОБЪЕМНЫХ ТЕЛ
С НАПРАВЛЕННО-РАСSEИВАЮЩИМ ПОКРЫТИЕМ**

При решении задач отражения оптического излучения объектами сложной формы, а также ряда вопросов атмосферной оптики и оптической локации сталкиваются с явлением отражения излучения их поверхностями в оптическом диапазоне длин волн в представлении физической оптики или геометрическом (фотометрическом). Вопросу отражения оптического излучения объемными телами с диффузными поверхностями, размеры которых значительно больше длины волны λ падающего излучения, в фотометрическом представлении посвящен ряд работ [1 – 8]. Так, в работах [1 - 3] излагается матричный метод расчета пространственного распределения силы излучения, отраженного обобщенной квадратичной поверхностью, и выводятся формулы для точного расчета силы излучения, отраженного диффузными цилиндром, сферой, полусферой и конусом.

В работе [5] рассмотрен вопрос о применении метода Монте-Карло для расчета оптического излучения, отраженного объемными телами с диффузной поверхностью при их произвольном положении относительно источника и приемника оптического излучения.

В работах [6, 7] для количественного анализа свойств отражения объемных тел предлагается использовать понятие коэффициента габаритной яркости (КГЯ) тела, физически характеризующего среднее значение его яркости по всей освещенной и наблюдаемой поверхности. И, наконец, в работе [8] предложен операторный метод расчета отраженного излучения объемных тел, и получено выражение для расчета пространственного распределения силы излучения, отраженного эллипсоидом вращения с диффузным покрытием. Что касается вопроса отражения поляризованного излучения поверхностью объемных тел, то некоторые данные представлены в работах [9, 10], однако, этот вопрос заслуживает отдельного рассмотрения, что выходит за рамки настоящей статьи.

В этой связи, настоящая работа посвящена развитию предложенного ранее операторного метода для расчета отраженного излучения поверхностью объемных тел с направленно-рассеивающим покрытием.

Рассмотрим в общем виде квадратичную поверхность в декартовых координатах, описываемую уравнением 2-й степени [9]:

$$\begin{aligned} f(x, y, z) &= a_1x^2 + a_2y^2 + a_3z^2 + a_4xy + a_5xz + a_6yz + \\ &a_7x + a_8y + a_9z - 1 = 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где $a_1, a_2, a_3 \dots a_9$ – коэффициенты квадратичной поверхности.

В предлагаемом анализе задача рассматривается при условии освещения поверхности объекта параллельным пучком света, а наблюдение происходит с расстояния, значительно превышающего его линейные размеры. Относительно

направления на источник света и на наблюдателя отражающая поверхность является выпуклой.

В качестве оптической характеристики отраженного излучения объемного тела мы выбираем коэффициент габаритной яркости (КГЯ) [6].

С учетом работ [6 - 8] КГЯ $\bar{\beta}(\alpha_o, \alpha_n)$ объекта с направленно-рассеивающим покрытием можно представить в виде:

$$\bar{\beta}(\alpha_o, \alpha_n) = \frac{\rho \iint_{S^*} \beta(\alpha_o, \alpha_n) \cos \alpha_o \cos \alpha_n dS}{\iint_S \cos \alpha_n dS}. \quad (2)$$

В этом выражении $\beta(\alpha_o, \alpha_n)$ и ρ - индикатриса и коэффициент отражения покрытия поверхности объекта; α_o и α_n - углы между локальной нормалью элемента dS поверхности и направлениями на источник излучения и на наблюдателя; S^* - поверхность объекта, которая одновременно освещена и видима с направления наблюдения.

Индикатрису отражения направленно-рассеивающего покрытия поверхности объекта представим в виде

$$\beta(\alpha_o, \alpha_n) = \beta(\alpha_o = \alpha_n) \cos^{2k} \alpha, \quad (3)$$

где $\beta(\alpha_o = \alpha_n)$ - коэффициент яркости элемента dS покрытия объекта в направлении зеркального отражения ($\beta(\alpha_o = \alpha_n) \geq 1$); α - угол между направлениями наблюдения и зеркального отражения излучения от элемента dS ; k - параметр, характеризующий степень вытянутости индикатрисы отражения, при чем $k \geq 0$; при $k=0$ задача сводится к случаю диффузного отражения света поверхностью объекта.

Воспользуемся соотношениями:

$$\cos \alpha_o = (\vec{n} \cdot \vec{r}_o); \quad \cos \alpha_n = (\vec{n} \cdot \vec{r}_n); \quad \cos \alpha = (\vec{r}_o \cdot \vec{r}_n), \quad (4)$$

где $\vec{n}$ - локальная нормаль к элементу dS поверхности объекта; $\vec{r}_o$ и $\vec{r}_n$ - единичные векторы направлений соответственно освещения и наблюдения элемента dS поверхности объекта; $\vec{r}_3$ - единичный вектор направления зеркального отражения излучения элементом dS поверхности объекта.

Тогда выражение (2) принимает вид:

$$\bar{\beta}(\alpha_o, \alpha_n) = \frac{\rho \beta(\alpha_o = \alpha_n) \iint_{S^*} (\vec{n} \cdot \vec{r}_o)(\vec{n} \cdot \vec{r}_n)(\vec{r}_o \cdot \vec{r}_n)^{2k} dS}{\iint_S (\vec{n} \cdot \vec{r}_n) dS}. \quad (5)$$

Когда поверхность описывается уравнением 2-го порядка (1), локальная нормаль определяется следующим образом:

$$\vec{n} = \frac{\vec{\nabla} f(x, y, z)}{|\vec{\nabla} f(x, y, z)|}, \quad (6)$$

где символ $\vec{\nabla}$ представляет собой оператор Гамильтона:

$$\vec{\nabla} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}. \quad (7)$$

Если направление на источник излучения составляет угол θ_o с осью OZ декартовой системы координат, его проекция на плоскость XOY – угол φ_o с осью OX, а для направления на наблюдателя и зеркального отражения эти углы соответственно (θ_n, φ_n) и (θ_z, φ_z) , то вектора $\vec{r}_o, \vec{r}_n$ и $\vec{r}_z$ выражаются так:

$$\vec{r}_o = \sin \theta_o \cos \varphi_o \vec{i} + \sin \theta_o \sin \varphi_o \vec{j} + \cos \theta_o \vec{k}, \quad (8)$$

$$\vec{r}_n = \sin \theta_n \cos \varphi_n \vec{i} + \sin \theta_n \sin \varphi_n \vec{j} + \cos \theta_n \vec{k}, \quad (9)$$

$$\vec{r}_z = \sin \varphi_z \cos \varphi_z \vec{i} + \sin \theta_z \sin \varphi_z \vec{j} + \cos \theta_z \vec{k}. \quad (10)$$

Для нахождения углов θ_z и φ_z воспользуемся следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \cos \alpha_o &= \cos \alpha_z; \\ \cos \alpha &= \cos(\alpha_o - \alpha_n). \end{aligned} \quad (11)$$

На основании этих выражений и соотношений (8) – (10), сформируем систему 2-х уравнений с неизвестными углами θ_z и φ_z , предварительно принимая во внимание что вектор нормали $\vec{n}$ равен:

$$\vec{n} = n_x \vec{i} + n_y \vec{j} + n_z \vec{k}, \quad (12)$$

где n_x, n_y, n_z - проекции вектора нормали на координатные оси OX, OY и OZ.

Тогда система двух уравнений принимает вид:

$$\begin{cases} n_x \sin \theta_o \cos \varphi_o + n_y \sin \theta_o \sin \varphi_o + n_z \cos \theta_o = \\ = n_x \sin \theta_z \cos \varphi_z + n_y \sin \theta_z \sin \varphi_z + n_z \cos \theta_z; \\ \sin \theta_z \cos \varphi_z \sin \theta_n \cos \varphi_n + \sin \theta_z \sin \varphi_z \sin \theta_n \sin \varphi_n + \cos \theta_z \cos \theta_n = \\ = \cos \alpha_o \cos \alpha_n + \sin \alpha_o \sin \alpha_n = (\sin \theta_o \cos \varphi_o n_x + \\ + \sin \theta_o \sin \varphi_o n_y + \cos \theta_o n_z)(\sin \theta_n \cos \varphi_n n_x + \sin \theta_n \sin \varphi_n n_y + \cos \theta_n n_z + \\ + \sqrt{1 - (\sin \theta_o \cos \varphi_o n_x + \sin \theta_o \sin \varphi_o n_y + \cos \theta_o n_z)^2}] \times \\ \times \sqrt{1 - (\sin \theta_n \cos \varphi_n n_x + \sin \theta_n \sin \varphi_n n_y + \cos \theta_n n_z)^2}; \end{cases} \quad (13)$$

В системе уравнений (13) известными величинами являются проекции n_x, n_y, n_z нормали, углы освещения (θ_o, φ_o) и наблюдения (θ_n, φ_n) объекта; необходимо решить эту систему относительно углов (θ_z, φ_z) . После нахождения углов (θ_z, φ_z) , с учетом выражений (10) и (4), находятся множители $(\vec{r}_z \cdot \vec{r}_n)^{2k}$, $(\vec{n} \cdot \vec{r}_o)$ и $(\vec{n} \cdot \vec{r}_n)$, входящие в выражение (5) для расчета КГЯ объекта.

Выражение для элемента dS находится по формуле [11]:

$$dS = \sqrt{BG - F^2} du dv, \quad (14)$$

где u и v – криволинейные координаты точек поверхности объекта;

$$B = \left(\frac{\partial x}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial u} \right)^2;$$

$$F = \frac{\partial x}{\partial u} \cdot \frac{\partial x}{\partial v} + \frac{\partial y}{\partial u} \cdot \frac{\partial y}{\partial v} + \frac{\partial z}{\partial u} \cdot \frac{\partial z}{\partial v}; \quad (15)$$

$$G = \left(\frac{\partial x}{\partial v} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial v} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial v} \right)^2.$$

На рисунке приведены результаты расчета на ПЭВМ нормированного КГЯ для сферы с различными видами покрытия ее поверхности. На рисунке приняты обозначения: 1 – полированная сфера ($\nabla=10$); 2 – анодированная сфера (после полировки); 3 – сфера с диффузным покрытием. Кривая 4 соответствует индикатрисе КГЯ зеркальной сферы [7], а кривая 3 получена по теоретической зависимости для идеальной диффузно отражающей сферы [12]:

$$\frac{\bar{\beta}}{\rho} = \left[\frac{2}{3\pi} \right] [\sin \varphi_n + (\pi - \varphi_n) \cos \varphi_n] \quad (16)$$

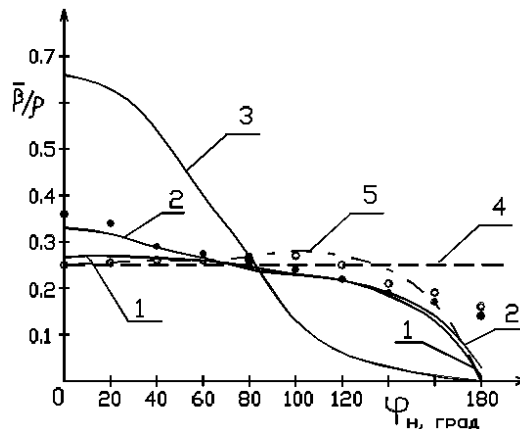


Рис. Индикатрисы нормированного КГЯ сфер при различных покрытиях

Расчет для полированной и анодированной сфер проводился при следующих значениях параметров $\beta(\alpha_o = \alpha_n)$ и κ :

$\beta(\alpha_o = \alpha_n) = 10$; $\kappa = 3$ - для полированной сферы;

$\beta(\alpha_o = \alpha_n) = 5$; $\kappa = 1$ - для анодированной сферы.

Кривая 5 соответствует расчетным данным, взятым из работы [13], при представлении индикатрисы $\beta(\alpha_o, \alpha_n)$ в виде эллипсоида вращения [14] с отношением большой и малой осей равным 10.

Не зачерненные точки соответствуют результатам экспериментальных исследований индикатрисы КГЯ для полированной сферы, а черные точки - для анодированной сферы [7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Brand K. W., Spagnolo F. A. – "JOSA", 1967, vol. 57, p.452.
2. Spagnolo F. A., Brand K. W. – "Appl. Opt.", 1968, vol. 7, p.189.
3. Spagnolo F. A. – "Appl. Opt.", 1972, vol. 11, p.2890.
4. Rambauke W., Gruenzel R., "JOSA", 1965, vol. 55, p.315.
5. Захаров П. А., Калинин Г. В., Лазарев А. И. // ОМП, 1976, №2, с. 7.
6. Холопов Г. К., Шуба Ю. А. // ОМП, 1974, №1, с. 8.
7. Аксютлов Л. Н., Тымкул В. М., Холопов Г. К., Шуба Ю. А. // ОМП, 1974, №11, с. 45.
8. Тымкул В. М., Шуба Ю. А. // ОМП, 1978, №11, с. 11.
9. Тевяшов В. И., Тымкул В. М., Шуба Ю. А. // ОМП, 1979, №10, с. 8.
10. Тевяшов В. И., Тымкул В. М., Шуба Ю. А. // ОМП, 1979, №8, с. 11.
11. Каган В. Ф. - Основы теории поверхностей. М.: Гостехиздат, 1947, 512с.
12. Г. ван де Хюлст. Рассеяние света малыми частицами. Изд. иностр. лит., 1961 с. 134.
13. Холопов Г. К., // Светотехника, 1970, №7, с. 25.
14. Холопов Г. К., // ОМП, 1968, №1, с. 1.

© В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, К.В. Кудряшов, 2006

УДК 621.397: 621.391.8

Г.Н. Попов, З.М. Цетиногова, С.А. Егорова, В.В. Малинин

СГГА, Новосибирск

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ В СРЕДЕ MATLAB

В работе [1] описана методика компьютерного моделирования приборов ночного видения с телевизионным трактом. Здесь мы рассмотрим конкретную вычислительную модель, разработанную в среде MATLAB, которая предоставляет широкие возможности для моделирования. Разработанная модель позволяет решить следующие задачи:

1. Определение дальности опознавания объекта при различных исходных данных. При этом исходные данные заносятся в массивы, соответствующие узлам модели ПНВ. Эти массивы значений должны храниться постоянно в ПК. Некоторые из значений в массивах изменяются очень редко, а часть значений меняется по несколько раз за сеанс моделирования.

2. Исследование влияния любых параметров на дальность опознавания ПНВ. Для этого задается диапазон значений и шаг изменения исследуемого параметра. В результате многократных вычислений строится график зависимости дальности опознавания от значений исследуемого параметра.

3. Режим пошаговых вычислений с запоминанием массивов результатов для отладки программ.

Вид пользовательского интерфейса показан на рис. 1. Сверху изображена функциональная схема ПНВ. Под ней даны четыре таблицы.

– В таблице «Обобщенная функциональная схема прибора ночного видения» дана расшифровка обозначений и комментарии к составляющим модели. При щелчке левой кнопкой мыши по каждой ячейке появляется соответствующий пояснительный текст.

– В таблице «Режимы работы» по умолчанию задается «Пассивный режим». Оператор может выбрать активно-непрерывный или активно-импульсный режим.

– В таблице «Ввод исходных данных» при щелчке по каждой ячейке появляется соответствующая таблица данных (рис. 2). Для каждой составляющей модели возможен выбор из 4 наборов данных со значениями по умолчанию. Эти значения можно изменять и сохранять новые наборы данных под уникальным номером. Для их считывания нужно использовать ячейку N, в которой задается номер требуемого набора данных.

– В таблице «Построение графиков»: можно заказать Графический режим (по умолчанию – нет); выбрать изменяемый параметр (**Выбор аргумента**) из списка параметров; задать **Диапазон** изменения аргумента (от, до); задать **Шаг** изменения аргумента в этом диапазоне.

На рис. 3 приведены диаграммы результатов вычисления дальности опознавания для двух различных массивов исходных данных. Для наглядности на рисунках показаны результаты по первым одиннадцати итерациям. Отсюда видно, что процесс нахождения дальности опознавания сходится не более, чем за 5..6 итераций. В процессе реального моделирования после каждой итерации проверяется условие останова [1].

Обобщенная функциональная схема ПНВ															
Вн. Усл.		ЕНО		ОФС		Атм		Вх об		ЭОП		Излуч. подсветки			
Тел. тракт		ОС2		ФПМ ПЗС		БОВС		ВКУ		Наблюдатель					
Режимы работы ПНВ											Реж. вычисл.				
пассив	Да	нет	Ак-непр	да	нет	Ак-имп	Да	нет	Обыч.		Отл.				
Ввод исходных данных															
Вн. Усл.			Вх. об.			ЭОП			Тел. тракт			Изл. подств.			
1	2	N	1	2	N	1	2	N	1	4	N	1	2	N	
График		Да	Нет	Выбор Арг.		Сп. пар.		Диап		от	до	Шаг		шаг	

Рис. 1. Пользовательский интерфейс вычислительной модели

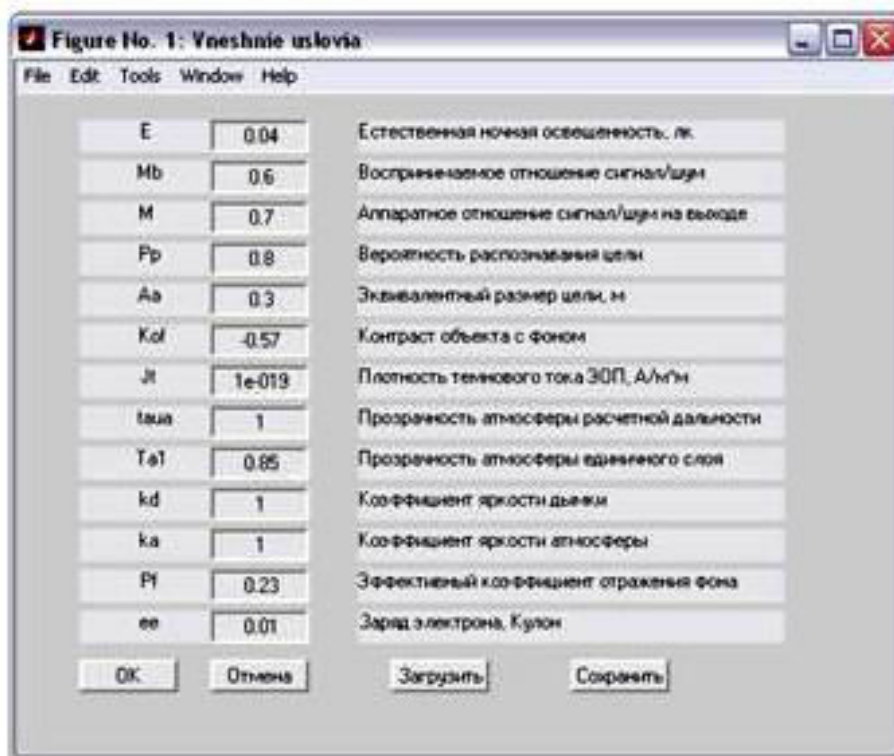


Рис. 2. Экранное окно ввода исходных данных «Внешние условия»

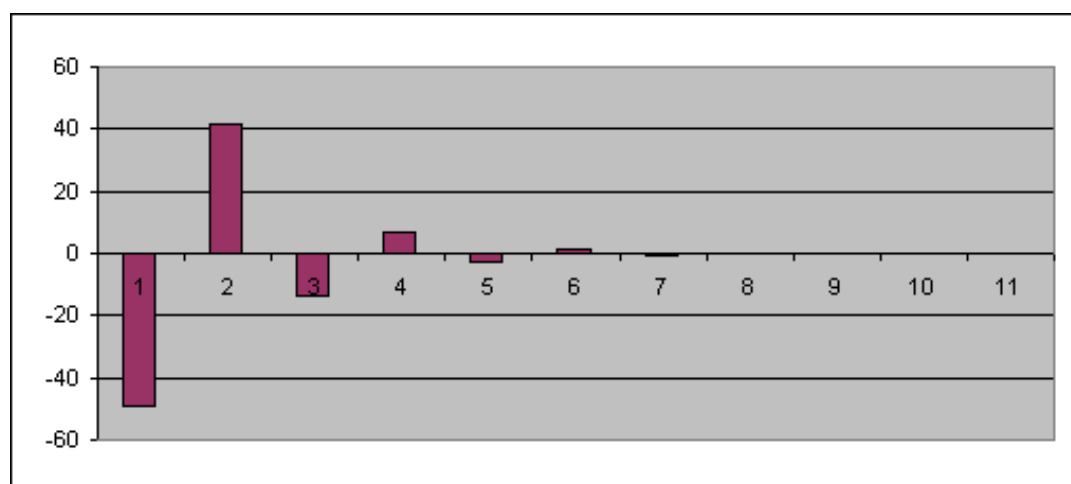


Рис. 3. Диаграмма вычисления дальности опознавания

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Компьютерное моделирование приборов ночного видения с телевизионным каналом / Г.Н. Попов, В.В. Моисеенко, Г.А. Моисеенко, В.В. Малинин // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 5.

© Г.Н. Попов, З.М. Цепиногова, С.А. Егорова, В.В. Малинин, 2006

РАЗРАБОТКА КАБИНЕТА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВИДЕОСЕМИНАРОВ

Назначение кабинета для проведения видеосеминаров состоит в следующем:

1. Проведение научных семинаров с количеством участников до 23 человек;
2. Отображение в процессе семинара видеоинформации с ноутбука (презентации, DVD фильмы) на плазменной панели;
3. Демонстрация бумажных документов, негативов, слайдов, "прозрачек" и 3D-объектов на той же панели;
4. Проведение видео-конференции с другими городами при двусторонней звуковой связи;
5. Организация локальной сети в кабинете (при наличии беспроводных сетевых карт в ноутбуках или стационарных компьютерах) с выходом на ЛВС СГГА и Интернет;
6. Вывод в сеть звуковых сигналов от ноутбука, стационарного компьютера, двух видеокамер, радиомикрофона.

На рис. 1 показана упрощенная функциональная схема связи кабинета с удаленными абонентами, а в табл. 1 представлен минимальный состав оборудования кабинета для проведения видеоконференций.



Рис. 1

Таблица 1. Перечень оборудования кабинета для проведения видеоконференций

Наименование	Кр. характеристика	Назначение
Плазменная панель	Диагональ 42", макс. разрешение 1024*768, http://www.nec-cebit.com/en/exhibits/plasma-displays2/42xm4.html	Отображение видеоинформации от ноутбука, стационарного компьютера, документ-камеры
Ноутбук	Ноутбук	Проведение видеопрезентаций с цифровых носителей
Документ-камера	AVerVision 330 http://www.aver.ru/products/product.shtml?arc=43	Позволяет показывать документы, негативы, слайды, "прозрачки" и 3D-объекты на плазменной панели
Стационарный компьютер	Файловый сервер	Хранение данных
Веб-камера (2 шт.)	D-link DCS-6620 http://www.dlink.ru/products/prodview.php?type=29&id=554	Отображение видеоинформации (общий план зала, место оператора) через Интернет, для просмотра из любой точки мира
Усилитель, колонки, радиомикрофон		Для «подзвучки» в зале, усиления звука от ноутбука, стац. Компьютера, 2-х веб-камер
Точка доступа, коммутатор	D-Link DWL-2100AP http://www.dlink.ru/products/prodview.php?type=17&id=243	Обеспечение связи с Интернет и ЛВС СГГА для ноутбука, стац. Компьютера, приносных ноутбуков
Шкаф напольный 19"	Etap 22U	Для размещения оборудования – акустики, стац. Компьютера, точки доступа, коммутатора, базы радиомикрофона, ИБП
Маркерная доска		

© Е.С. Мустаева, А.И. Гареев, В.В. Малинин, 2006

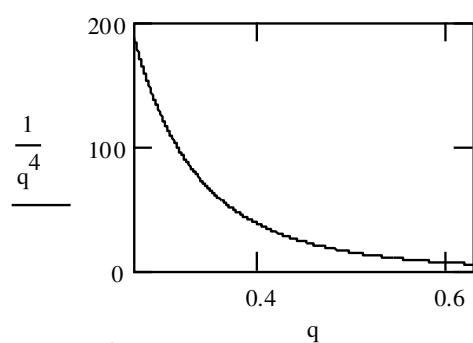
МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ТРАСС ДЛЯ ЛИНИЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ БЕЗ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

Системы передачи оптического сигнала в условиях отсутствия прямой видимости между приемником и передатчиком могут применяться в различных областях науки и техники, в частности для организации линий связи при геодезических и геологических работах.

Для реализации возможности передачи данных в оптическом диапазоне в условиях отсутствия прямой видимости, как правило, используется принцип рассеяния светового потока. Обычно элементарными рассеивателями являются молекулы воздуха - явление молекулярного или Рэлеяского рассеяния, которое несложно наблюдать для нижней границы видимого и УФ диапазонов длин волн в чистой незамутненной атмосфере. В сложных метеорологических условиях доминирует явление «аэрозольного» рассеяния, или рассеяния Ми. В этом случае рассеивателями являются многочисленные частицы воды, либо ее паров, а также различные пылевые частицы, содержащиеся в атмосфере. Коэффициент аэрозольного рассеяния, как правило, на порядок превышает коэффициент молекулярного, что позволяет уменьшать чувствительность приемников рассеянного оптического сигнала, однако сильная пространственная и временная неоднородность аэрозолей в атмосфере не позволяет реализовать стабильный оптический канал связи без прямой видимости.

Таким образом, можно выделить следующие основные моменты, которые необходимо учитывать при построении модели оптической трассы без прямой видимости:

- Длина волны излучателя – основная характеристика, влияющая на коэффициенты рассеяния в атмосфере, изменение коэффициента рэлеяского рассеяния в зависимости от длины волны изображено на рис. 1;
- Метеорологические условия – характеристика, описывающая явление аэрозольного рассеяния;
- Диаграммы направленности приемника и излучателя.



$$\frac{0.7^4}{0.27^4} = 45.179$$

îòíîáíèà èíòááðàèüíé
îüíîðè ðàññàýíèý
íàæäó âîëíàè è
äèèíé 270 è 700 ì

Рис. 1. Качественная зависимость коэффициента рассеяния от длины волны

Мною была написана программа в программной среде MathCad, описывающая величину оптического сигнала для произвольных длин волн в различных пространственных координатах, относительно оптической оси излучателя. За основу расчета взята модель подробно изложенная в [1].

Проведенное аналитическое исследование влияния Рэлеевского рассеяния на дистанцию устойчивого приема рассеянного сигнала, совместно с экспериментами Лаборатории Лазерных Информационных Систем Института Лазерной Физики СО РАН [2] показало, что на больших расстояниях наблюдается существенное ослабление сигнала, вызванное главным образом атмосферным поглощением света УФ диапазона (рис. 2). При расчетах принимались следующие начальные данные:

Длина волны $\lambda = 380$ нм

Интенсивность светового потока $I = 1$ Вт

Коэффициент затухания атмосферы $k = 0.002$ 1/см

Оптическая трасса имеет следующие характеристики:

– Горизонтальное расстояние между приемником и передатчиком составляет $X = 1000$ м

– Начальное положение приемника $Y = 1$ м в направлении перпендикулярном лучу передатчика

– Диаметр пучка $D = 1$ м

– Апертура приемника $d = 10$ см

При этом стоит отметить, что непосредственный вклад молекулярного рассеяния в затухание сигнала не вносит существенных изменений в картину, т. к. даже для дальнего УФ диапазона коэффициент Рэлеевского рассеяния значительно меньше коэффициента атмосферного поглощения света. Использование когерентных источников УФ излучения, позволяет существенно увеличить передаваемую мощность и соответственно улучшить дальность и помехоустойчивость канала связи [7].

Исходя из теории молекулярного рассеяния, очевидно, что само молекулярное рассеяние является достаточно малой величиной, накладывающей жесткие требования к чувствительности приемной системы, что особенно остро проявляется на значительных расстояниях. В решении данной проблемы особую роль играют оптические антенны приемников, формирующие диаграмму направленности.

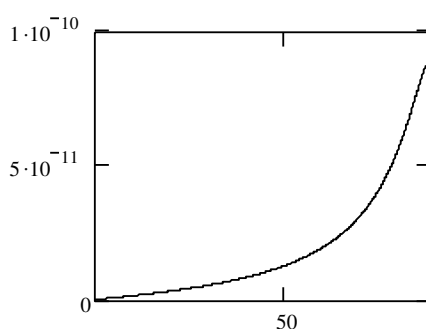


Рис. 2. Зависимость уровня принимаемого сигнала от ширины диаграммы направленности приемника

С точки зрения геометрической оптики в условиях чистой незамутненной атмосферы вне зависимости от угла расходимости передатчика, при условии захвата всего сечения оптического потока антенной приемника, интенсивность светового потока, захватываемая приемником, будет величиной постоянной. Это позволяет существенно упростить модель, рассматривая световой поток передатчика, как бесконечно тонкий не расходящийся луч, распространяющийся вдоль оси абсцисс геометрической системы координат.

Из чего следует, что увеличения величины непрерывного рассеянного сигнала на приемном модуле достаточно расширить угол захвата приемной оптической антенны.

На рис. 2 приведена итоговая зависимость величины непрерывного рассеянного сигнала от угла захвата приемной антенны, в условиях ортогональной направленности приемника и излучателя. Расчет производился по формуле:

$$I_{int1}(Y, \theta) := \int_{\frac{\pi}{2} - \theta}^{\frac{\pi}{2} + \theta} K_z(Y) \cdot I(\phi, X) \cdot e^{-(k+\sigma) \cdot \frac{Y}{\sin(\phi)}} \cdot \frac{Y}{\sin(\phi)^2} d\phi \quad (1)$$

Однако учет индикатрисы молекулярного рассеяния [2] показывает, что величина захватываемого приемником рассеянного светового потока, существенно зависит также и от угла наклона приемника относительно перпендикуляра к оси передатчика. Данная зависимость изображена на рис. 3 совместно с индикатрисой Рэлеявского рассеяния.

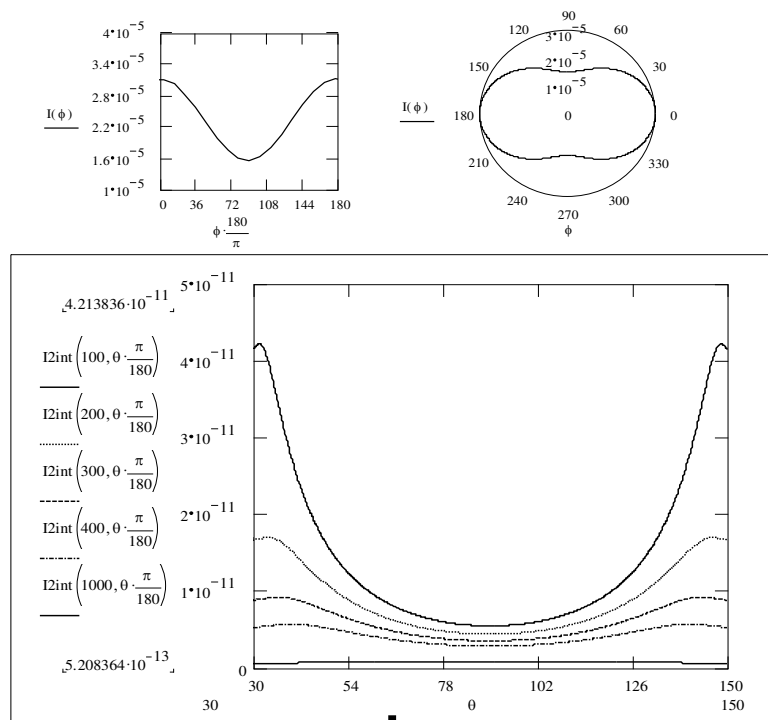


Рис. 3. Индикатриса молекулярного рассеяния и изменение уровня принимаемого рассеянного сигнала при поворотах приемника вдоль оптической оси

Таким образом, наибольшая интенсивность принимаемого светового потока соответствует направлению приемника вдоль оптической оси при приеме прямого и обратного рассеяния.

Ситуация значительно изменяется в условиях приема импульсного, либо амплитудно-модулированного сигнала [5]. В связи с тем, что любой оптический импульс обладает конечной длительностью во временной области и распространяется в пространстве со скоростью света, его можно также охарактеризовать и «пространственной длиной»:

$$l = t_{\text{и}} \cdot c,$$

где $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с – скорость света в вакууме;

$t_{\text{и}}$ – длительность импульса.

Конечная длительность импульса в свою очередь создает эффект искажения фронта и затягивания импульса, что приводит к искажению импульса в целом.

Распространение рассеянного сигнала в пространстве происходит по следующему закону [1, 6]:

$$I(\phi) := \frac{9 \cdot \pi^2}{2 \cdot N_1^2 \cdot \lambda^4} \cdot \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \cdot (1 + \cos(\phi))^2 \cdot \frac{c}{8 \cdot \pi} \cdot E^2 \quad (2)$$

С учетом изменения функции угла от времени по закону:

$$\phi(t) := \arctan\left(\frac{y_0}{x_0 - x(t)}\right) \quad (3)$$

интегрируя (2) по всем значениям t можно записать искажение формы импульса во времени.

На рис. 4 изображено искажение формы импульса для импульсных сигналов различной длительности $t = 0.1$ мкс и $t = 0.01$ мкс, значения оптической мощности рассеянного сигнала приведены в ближней зоне на расстоянии 3 метра между приемником и передатчиком. При удалении приемника от передатчика происходит экспоненциальное уменьшение принимаемого сигнала, обусловленное атмосферным поглощением.

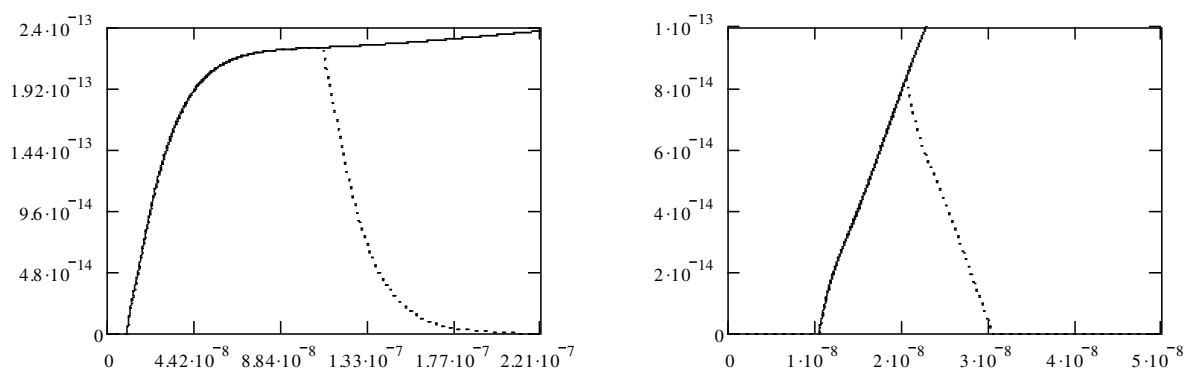


Рис. 4. Деформация формы прямоугольных импульсов длительности 0,1 мкс и 0,01 мкс за счет рассеяния

Таким образом, можно наблюдать, что при увеличении частоты импульсных последовательностей наблюдается перекрытие соседних импульсов, что может привести к нарушению стабильности системы.

Решением данной проблемы может являться ограничение диаграммы направленности приемника пространственной длиной импульса в горизонтальной плоскости луча передатчика, что не позволит приемнику принимать одновременно более одного импульса, однако при этом существенно падает интенсивность принимаемого сигнала, что приводит к ужесточению требований по чувствительности приемного модуля.

Закключение: На основании всех вышеизложенных аспектов рассеяния оптического сигнала была написана программа в ПК MathCad, позволяющая строить аналитические модели произвольных оптических трасс для лазерных линий связи без прямой видимости, работающих в произвольном диапазоне длин волн. Аналитическая модель в достаточной степени соответствует экспериментально полученным данным по рассеянию оптического излучения в атмосфере, что позволяет использовать ее для определения основных параметров приемников и передатчиков оптической линии связи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Д.В. Сивухин, Оптика, М., Наука, 1980 (1-е изд.) – Общий курс физики в 5-ти томах, т. 4.
2. Поллер Б.В., Щетинин Ю.И., Коняев С.И. и др. Характеристики атмосферного канала связи с рассеянием. VIII МНТК «Радиолокация, навигация, связь», стр. 735-745, Воронеж, 2002.

3. Poller B.V., Bagaev S.N., Belyakov. Problem of Building Laser Information of New Generation // Proc. Of Intern. Symp. On Modern Problems of Laser Physics, Novosibirsk 1995, p. 27.
4. А. Исимару Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. – Москва: Мир, 1981. – 598 с.
5. Поллер Б.В., Щетинин Ю.И., Федоров Б.В. Об эффективности передачи сообщений в атмосферных оптических каналах связи с рассеянием. IX МНТК «Радиолокация, навигация, связь», стр. 397-402, Воронеж, 2003.
6. А.Н. Матвеев Оптика // М.: Высшая школа, 1985.
7. Г.С. Ландсберг, Общий курс физики, Оптика, М. «Наука», 1976.

© Д.Ф. Складов, 2006

УДК 681.7

М.П. Егоренко

СГГА, Новосибирск

ХРОМАТИЗМ УВЕЛИЧЕНИЯ МНОГОСПЕКТРАЛЬНОГО ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОГО ОБЪЕКТИВА

В настоящее время стоят задачи по повышению информативности оптико-электронных приборов (ОЭП). Одним из возможных решений является обнаружение объекта комбинированными ОЭП, работающими в нескольких диапазонах спектра одновременно. К числу таких приборов относится многоспектральный зеркально-линзовый объектив (МЗЛО).

Сегодня для обнаружения и опознавания объекта в разных диапазонах спектра используются оптические системы, выполненные из различных оптических материалов [1]. Такие конструкции получаются очень громоздкие, особенно при наблюдении удаленных объектов. Предлагается разработка многоспектрального зеркально-линзового объектива, который пропускает излучение в диапазоне спектра от 0,5 до 12 мкм и выполнен из одного оптического материала - селенида цинка (ZnSe). Этот прибор предназначен для замены трех оптических систем одним МЗЛО, что позволяет уменьшить его весогабаритные характеристики и упростить юстировку, так как не требуется совмещения трех визирных каналов и применения специальных контрольно-юстировочных приборов для тепловизионного диапазона спектра.

Многоспектральный зеркально-линзовый объектив (МЗЛО) позволяет строить изображение предмета, находящегося на бесконечном расстоянии (рис. 1). В связи с этим введем ряд ограничений на углы наклона второго полевого параксиального луча и высоту полевого луча [2]: $\beta_1=1$, $\beta_3=-\beta_4$, $y_3=0$, $y_2=-y_4$ (это основные ограничения), а также на показатели преломления среды: $n_1=1$, $n_2=1$, $n_3=-1$, $n_4=1$, $n_5=1$.

$$S_{II21} = y_{II21}C_{II21} - y_{II24}C_{II22} + y_{II24}C_{II24} = 0, \quad (3)$$

$$S_{II31} = y_{II31}C_{II31} - y_{II34}C_{II32} + y_{II34}C_{II34} = 0. \quad (4)$$

Введем обозначения [4]

$$C = \frac{\delta\beta}{\delta(1/n)} \delta \frac{\Delta n}{n}, \quad \mu = \frac{1}{n} \quad (5)$$

где β – угол наклона второго полевого параксиального луча;

Δn – разность показателей преломления;

μ – величина, обратная показателю преломления;

δ – приращение функции.

В случае системы, расположенной в воздухе, когда линзы заменены главными плоскостями, применяется формула [4]:

$$\beta_{k+1} = \beta_k + y_k \varphi_k. \quad (6)$$

Запишем формулы (5) и (6) с учетом индексов, обозначающих номера диапазонов спектра и компонентов

$$\begin{aligned} C_{II11} &= (\beta_2 - \beta_1) \delta \frac{\Delta n}{\mu n}, \\ \beta_2 &= \beta_1 + y_{11} \varphi_{11}, \\ \beta_2 - \beta_1 &= y_{11} \varphi_{11}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} C_{12} &= (\beta_3 - \beta_2) \delta \frac{\Delta n}{\mu n}, \\ \beta_3 &= \beta_2 + y_{12} \varphi_{12}, \\ \beta_3 - \beta_2 &= y_{12} \varphi_{12}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} C_{14} &= (\beta_5 - \beta_4) \delta \frac{\Delta n}{\mu n}, \\ \beta_5 &= \beta_4 + y_{14} \varphi_{14}, \\ \beta_5 - \beta_4 &= y_{14} \varphi_{14}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ – углы наклона второго параксиального луча первого, второго, третьего, четвертого и пятого компонентов соответственно;

$\varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{14}$ – оптические силы первого, второго и четвертого компонентов соответственно;

y_{11}, y_{12}, y_{14} – высота пересечения (второго) полевого параксиального луча с первым, вторым и четвертым компонентами соответственно.

Подставив выражения (7), (8) и (9) в формулу (2) получим

$$S_{II11} = y_{11}(\beta_2 - \beta_1) \delta \frac{\Delta n}{\mu n} - y_{14}(\beta_3 - \beta_2) \delta \frac{\Delta n}{\mu n} + y_{14}(\beta_5 - \beta_4) \delta \frac{\Delta n}{\mu n} = 0,$$

или

$$\frac{S_{111}}{\sigma\left(\frac{\Delta n}{\mu n}\right)} = y_{11}y_{11}\varphi_{11} - y_{14}y_{12}\varphi_{12} + y_{14}y_{14}\varphi_{14} = 0. \quad (10)$$

Выражение $\sigma\left(\frac{\Delta n}{\mu n}\right) = \cos \Delta$, так как остается неизменным показатель преломления n .

Уравнение (10) можно представить в следующем виде

$$(y_{11})^2 \varphi_{11} + y_{14}(y_{14}\varphi_{14} - y_{12}\varphi_{12}) = 0.$$

Согласно нашему упрощению: $y_{12} = -y_{14}$, проведем преобразования

$$(y_{11})^2 \varphi_{11} + y_{14}(y_{14}\varphi_{14} + y_{14}\varphi_{12}) = 0.$$

Тогда из решения уравнения (11)

$$(y_{11})^2 \varphi_{11} + (y_{14})^2 (\varphi_{14} + \varphi_{12}) = 0 \quad (11)$$

получим

$$\left(\frac{y_{11}}{y_{14}}\right)^2 = -\frac{\varphi_{14} + \varphi_{12}}{\varphi_{11}}. \quad (12)$$

Аналогичным способом преобразуем формулы (3), (4). В результате будем иметь

$$\left(\frac{y_{21}}{y_{24}}\right)^2 = -\frac{\varphi_{24} + \varphi_{22}}{\varphi_{21}}, \quad \left(\frac{y_{31}}{y_{34}}\right)^2 = -\frac{\varphi_{34} + \varphi_{32}}{\varphi_{31}}. \quad (13)$$

В результате анализа формул (12) и (13) можно сделать вывод, что хроматизм увеличения многоспектрального зеркально-линзового объектива не зависит от материала, а зависит от оптической силы первого, второго и четвертого компонентов.

Задача замены трех оптических систем одним МЗЛО может быть решена с использованием конструкции объектива (рис. 2), выполненного на основе *ZNSE*, который обладает достаточно высокими физико-химическими свойствами и является прозрачным в заданном диапазоне спектра от 0,5 до 12 мкм [6].

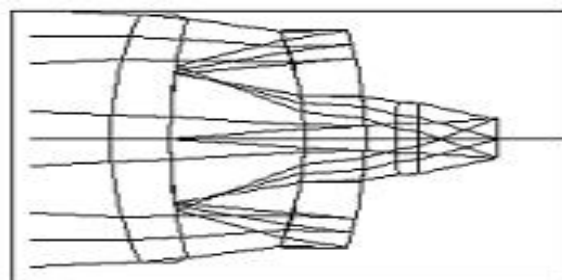


Рис. 2. Оптическая схема МЗЛО

С использованием пакета прикладных программ «SYNOPSIS» выполнен абберрационный расчет для трех диапазонов спектра многоспектрального зеркально-линзового объектива. Исходными данными для расчетов приняты параметры:

$$f' = 100 \text{ мм}, 2w = 10^\circ, \quad D/f' = 1:1,$$

где f' – фокусное расстояние, $2w$ – угол поля зрения, D/f' – относительное отверстие.

Диапазон длин волн изменяется от 0,486 до 12 мкм.

На рис. 3, 4, 5 представлено распределение энергии для различных диапазонов спектра в точках, имеющих различное положение на оси Y .

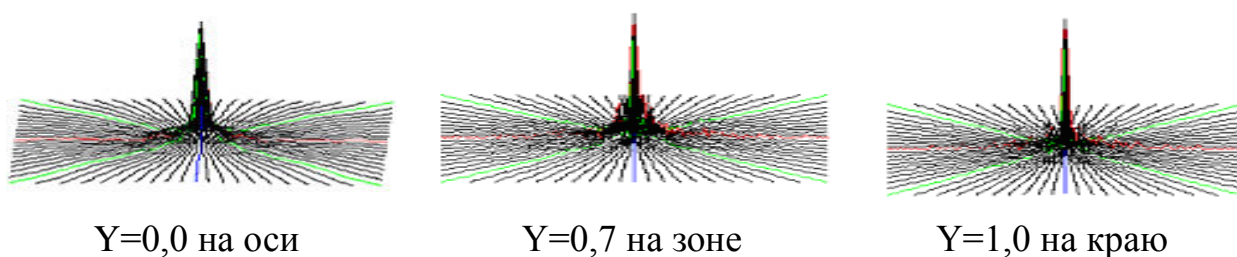


Рис. 3. Распределение энергии в точке для видимого диапазона спектра

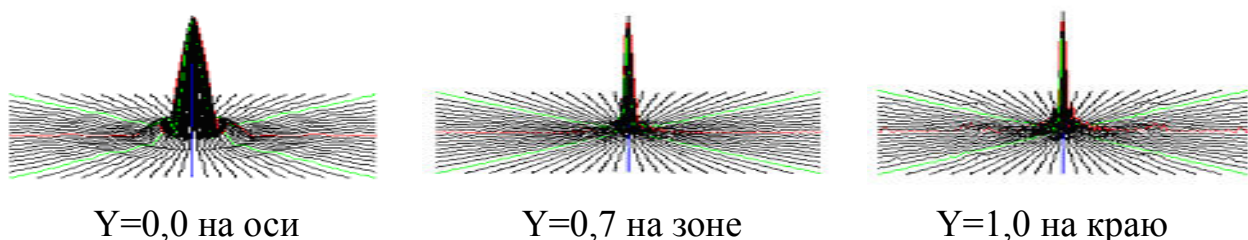


Рис. 4. Распределение энергии в точке для среднего ИК диапазона спектра

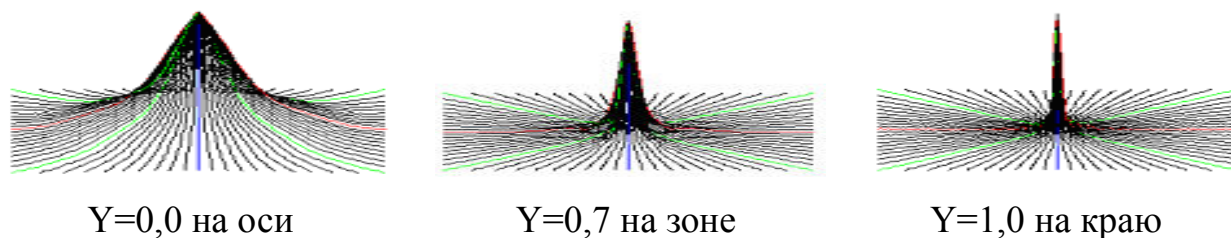


Рис. 5. Распределение энергии в точке для тепловизионного диапазона спектра

Полученные результаты показали допустимые значения aberrаций многоспектрального зеркально-линзового объектива в каждом из диапазонов спектра. Таким образом, теоретические исследования доказывают, что данный

МЗЛО строит достаточно хорошее изображение в каждом из диапазонов спектра, хотя и требуют дальнейшего развития и реализации на практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Jamieson T.H. Ultrawide waveband optics // Optical Engineering. – 1984. – № 2. – С.111 – 116.
2. Слюсарев, Г.Г. Расчет оптических систем [Текст] / Г.Г. Слюсарев. – Л.: Машиностроение, 1975. – 250 с.
3. Гаврилов, Д.В. Расчет простой линзы с одной отражающей поверхностью [Текст] / Д.В. Гаврилов // Оптика и спектроскопия. – 1962. – Т. 13. – С. 436 – 431.
4. Прикладная оптика [Текст]: учеб. пособие для вуз. / А.С. Дубовик и др. – М.: Недра, 1982. – 612 с.
5. Слюсарев, Г.Г. Методы расчета оптических систем [Текст] / Г.Г. Слюсарев. - изд. 2-е, доп. и перераб. – Л.: Машиностроение, 1969. – 372 с.
6. Оптико-механические и оптико-электронные приборы [Текст]: межвуз. сб. – Новосибирск: НИИГАиК, 1985. – 163 с.

© М.П. Егоренко, 2006

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПАНКРАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ ЗЕРКАЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

В настоящее время существуют программы автоматизированного расчета двухкомпонентных панкратических систем [1], однако они предназначены для расчета только линзовых систем, так как не учитывают показателя преломления материала между компонентами. Поэтому представляет интерес разработка программы автоматизированного расчета двухкомпонентных панкратических систем (ПАРДПС), включающих отражающие элементы. Данная программа позволяет проводить исследование двухкомпонентных систем, а также проводить расчет закона перемещения компонентов конкретной оптической системы.

На рис. 1 главными плоскостями $H_1H'_1$ и $H_2H'_2$ представлена двухкомпонентная панкратическая система [2]. В случае зеркальных компонентов главные плоскости H и H' совпадают. Положение предмета на оси определено точкой A , а изображения A' . Изменение увеличения системы происходит при перемещении компонентов относительно друг друга и положений предмета и изображения.

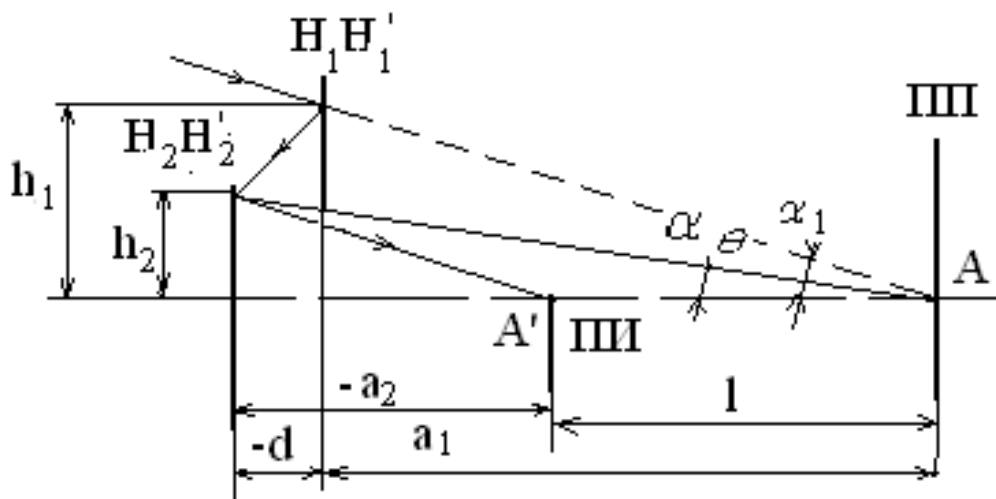


Рис. 1

По формулам параксиальной оптики линейное увеличение для каждого компонента можно выразить в виде

$$V_1 = \frac{a'_1}{a_1}, \quad V_2 = \frac{a'_2}{-a_2}.$$

И тогда общее увеличение системы

$$V = -\frac{a'_2}{a_1 x}, \text{ где } x = \frac{a_2}{a'_1}.$$

Положение компонентов относительно предмета и изображения определяется через параметр x выражениями:

$$a_1 = \frac{f'_1 f'_2 (n_3 - V n_1)}{V (x f'_1 n_3 + f'_2 n_2)}, \quad (1)$$

$$a'_2 = \frac{x f'_1 f'_2 (n_3 - V n_1)}{x f'_1 n_3 + f'_2 n_2}, \quad (2)$$

где n_j ($j = 1, 2, 3$) показатель преломления j -ой среды.

Расстояние между компонентами

$$d = \frac{n_2 f'_1 f'_2 (x - 1)(n_3 - V n_1)}{V x f'_1 n_1 n_3 + n_2 n_3 f'_2}, \quad (3)$$

Коэффициент центрального экранирования для систем с первым зеркальным компонентом определяется отношением углов α_θ и α_1 :

$$\theta = \frac{\alpha_\theta}{\alpha_1};$$

после преобразования получим

$$\theta = \frac{a_1 \eta}{\alpha_1 - d} \quad (4)$$

или выраженный через параметр x

$$\theta = \frac{\eta (x n_1 n_3 V f'_1 + n_2 n_3 f'_2)}{x^2 n_2 n_3 V f'_1 + x V (n_1 n_3 f'_1 - n_2 n_3 f'_1 + n_2^2 f'_2) + n_2 f'_2 (n_3 - n_2 V)}, \quad (5)$$

где $\eta = D_2 / D_1$ – отношение внешних диаметров компонентов.

В случае если предмет находится в бесконечности, выражение для θ имеет вид $\theta = \eta$.

Для исследования свойств двухкомпонентных панкратических систем, содержащих отражающих поверхности, выразим

$$V = f(x) \text{ и } \theta = f(x).$$

Представим (1), (2), (3) в известное выражение для расстояния между плоскостями предметов и изображения:

$$l = -a_1 + d + a'_2.$$

После введения нормировки $l = \xi_1 f'_1, f'_2 = \xi_2 f'_1, f'_1 = 1$ получим кубическое уравнение вида

$$AV^3 + BV^2 + CV + D = 0, \quad (6)$$

где $A = x^2 n_1^2 n_3 \xi_2$,

$$B = x^2 n_1 n_3 (n_3 \xi_1 - n_3 \xi_2 - n_2 \xi_2) + x n_1 \xi_2 (n_2 n_3 \xi_1 - n_1 n_3 + n_2 n_3 \xi_2 + n_2 n_3 - n_2^2 \xi_2) + n_1 n_2^2 \xi_2,$$

$$C = x^2 n_2 n_3^2 \xi_2 + x n_3 \xi_2 (n_2 n_3 \xi_1 + n_1 n_3 - n_2 n_3 \xi_2 - n_2 n_3 + n_2^2 \xi_2) + n_2 n_3 \xi_2 * (n_2 \xi_1 - n_1 \xi_2 - n_2 \xi_2),$$

$$D = n_2 n_3^2 \xi_2^2.$$

Уравнение (6) показывает связь между линейным увеличением панкреатической системы и параметром x .

Приведем уравнение (6) к виду $k^3 + ak^2 + bk + c = 0$.

Получим

$$k^3 + \frac{B}{A}k^2 + \frac{C}{A}k + \frac{D}{A} = 0, \quad (7)$$

$$\text{где } a = \frac{B}{A}, b = \frac{C}{A}, c = \frac{D}{A}.$$

Для нахождения его корней, в случае действительных коэффициентов, вначале вычисляются:

$$Q = (a^2 - 3b)/9, R = (2a^3 - 9ab + 27c)/54$$

или

$$Q = (\frac{B^2}{A^2} - 3\frac{C}{A})/9, R = (2\frac{B^3}{A^3} - 9\frac{B}{A}\frac{C}{A} + 27\frac{D}{A})/54. \quad (8)$$

Далее, если $R^2 < Q^3$, то уравнение имеет три действительных корня, вычисляющихся по формулам (Виета):

$$t = a \cos(R / \sqrt[3]{Q^3}) / 3,$$

$$k_1 = -2 * \sqrt[3]{Q} \cos(t) - a / 3,$$

$$k_2 = -2 * \sqrt[3]{Q} \cos(t + (2 * \pi / 3)) - a / 3, \quad (9)$$

$$k_3 = -2 * \sqrt[3]{Q} \cos(t - (2 * \pi / 3)) - a / 3.$$

В том случае, когда $R^2 \geq Q^3$, то действительных корней один (общий случай) или два (вырожденные случаи). Кроме действительного корня, имеется два комплексно-сопряженных. Для их нахождения вычисляются (формула Кардано):

$$A1 = -\text{sign}(R)[|R| + \sqrt[3]{R^2 - Q^3}]^{1/3}, \quad (10)$$

$$B1 = Q / A \text{ при } A1 \neq 0 \text{ или } B1 = 0 \text{ при } A1 = 0.$$

Действительный корень будет:

$$k_1 = (A1 + B1) - a/3.$$

Комплексно сопряженные корни:

$$k_{2,3} = -(A1 + B1)/2 - a/3 + i * \sqrt{3} * (A - B)/2.$$

В том случае, когда $A1=B1$, то комплексно-сопряженные корни вырождаются в действительный:

$$k_2 = -A1 - a/3.$$

Следующий этап – это расчет коэффициентов определяющих отношение расстояния между плоскостями предметов и изображения (L) к фокусному расстоянию первого компонента панкратической системы ($f_{1\text{панкр}}$), ξ_1 и отношение фокусного расстояния второго компонента панкратической системы ($f_{2\text{панкр}}$) к фокусному расстоянию первого компонента той же системы, ξ_2 .

Описанная методика расчета двухкомпонентных панкратических систем, содержащих зеркальные компоненты была положена в основу программы автоматизированного расчета данного типа систем. Программа расчета двухкомпонентных панкратических систем, содержащих зеркальные компоненты написана с помощью системы визуального объектно-ориентированного программирования C++Builder [3]. ПАРДПС, содержащих зеркальные компоненты не только позволяет проводить исследование зависимости увеличения V от некоторого параметра x , но и с ее помощью можно плавно перемещать компоненты конкретной системы с изменением x от 0,1 до 0,5. Кроме этого ПАРДПС, содержащих зеркальные компоненты позволяет анализировать положение компонентов относительно предмета и изображения, а также расстояние между компонентами системы, в реальном масштабе времени.

Для сравнения данных реальной двухкомпонентной панкратической зеркально-линзовой системы с данными этой же системы, но для тонких компонентов необходимо в ПАРДПС, содержащих зеркальные компоненты задать показатели преломления для разных оптических сред $n_1=1$, $n_2=-1$, $n_3=1$, а так же полученные значения коэффициентов $\xi_1 \approx -3$, $\xi_2 \approx -5$, и посмотреть положение графика. Расчет проведен для каждого x , линейно изменяя на величину Δx в диапазоне от 0,1 до 0,5.

В результате проведенного анализа при помощи ПАРДПС, содержащих зеркальные компоненты получены оптическая схема и графические данные, представленные на рис. 2.

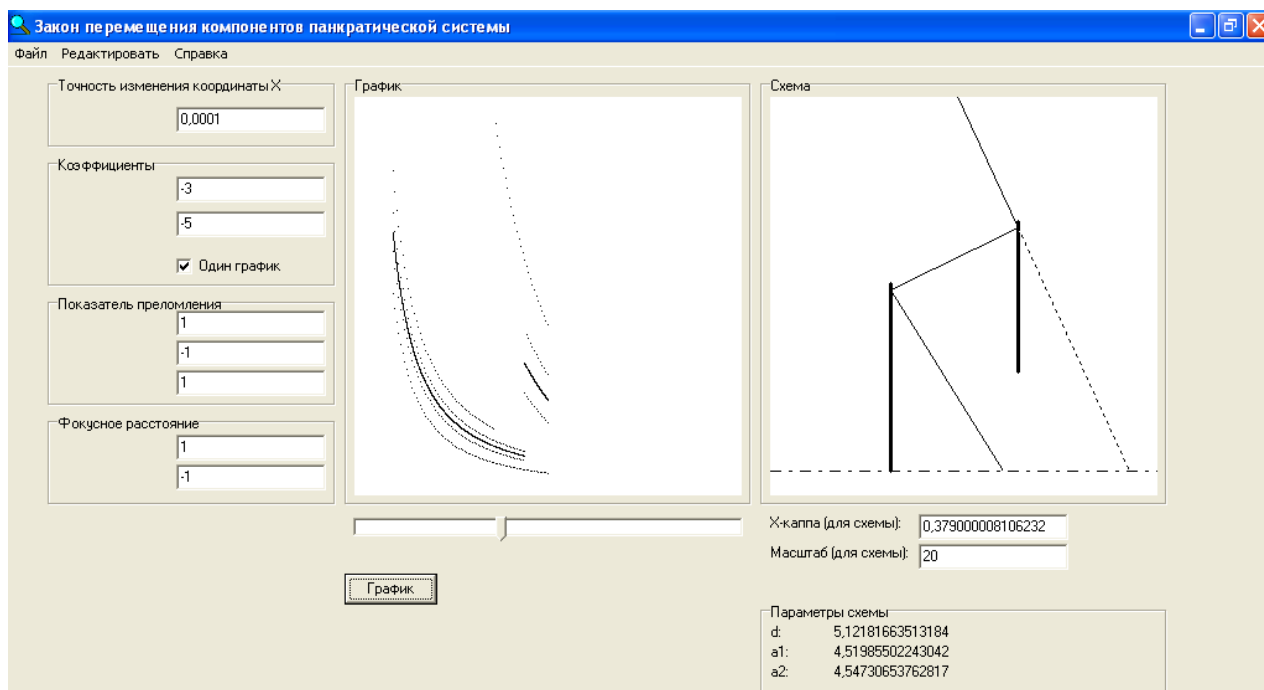


Рис. 2

В результате график зависимости увеличения V от некоторого параметра x (от взаимного положения перемещаемых компонентов) лежит между аналогичными графиками с коэффициентами $\xi_1 = -3, \xi_2 = -7,5$; $\xi_1 = -3, \xi_2 = -2,5$; $\xi_1 = -1,5, \xi_2 = -5$; $\xi_1 = -4,5, \xi_2 = -5$, что подтверждает сформулированную методику.

Рассмотренный алгоритм и программа автоматизированного расчета двухкомпонентных панкратических систем, содержащих зеркальные компоненты обладают высоким быстродействием и универсальностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автоматизированный расчет двухкомпонентных панкратических систем / И.И. Пахомов, А.М. Хорохоров, З.Г. Николаева, В.Е. Зеленков // Вестн. МГТУ. Сер. Приборостроение. – 1994. – № 3. – С. 117 – 125.
2. Ефремов В.С. Расчет в параксиальной области двухкомпонентных панкратических систем, содержащих зеркальные компоненты // ОМП. – 1978. – № 8. – С. 24 – 26.
3. Архангельский А.Я. Программирование в C++Builder 5. – М.: ЗАО «Изд-во БИНОМ», 2000. – 1152 с.

© Ю.Г. Рахманова, 2006

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАНАРНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ АНТЕНН С ЛЮМИНОФОРАМИ
ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Для приема ультрафиолетовых и видимых сигналов в качестве антенн предложено использовать полимерные пленки или волокна с примесью люминесцентных веществ [1]. Такие среды, обладая коэффициентом преломления большим, чем коэффициент преломления воздуха, приобретают волноводные свойства, концентрируя значительную долю преобразованного в видимый диапазон излучения в торец пленки или волокна, где оно может быть зарегистрировано фотоприемником (рис. 1).

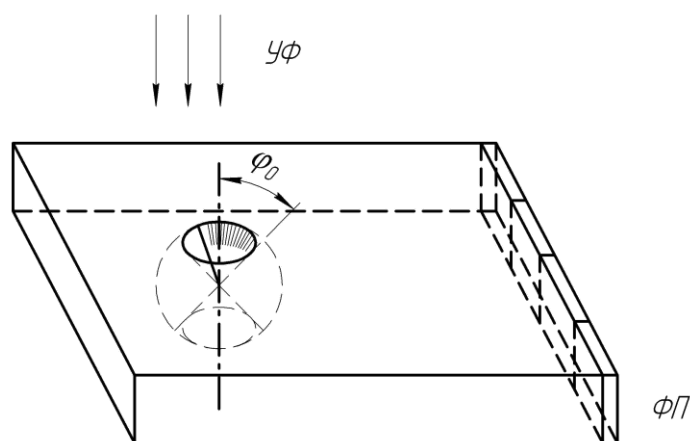


Рис. 1. Люминесцентный преобразователь

Схожие идеи использовались для создания люминесцентных солнечных концентраторов (ЛСК), для применения в гелиоэнергетике. Важным преимуществом ЛСК является то, что они не требуют систем солнечного слежения в отличие от зеркальных и зеркально – линзовых концентраторов, и могут усиливать не только прямой, но и диффузный солнечный свет [3].

Световой выход люминофора зависит от его поглощательной способности (коэффициента экстинкции). Как правило, доля поглощенного люминофором излучения не превышает 25%. Квантовый выход люминесценции современных люминофоров достигает значений превышающих 0,5, а для отдельных люминофоров достигает 1.

Для большинства люминесцирующих соединений существует перекрытие спектров поглощения и испускания. Это приводит к тому, что часть испускаемого излучения вновь поглощается другими молекулами люминофора (реабсорбция). Для полимерных образцов длиной менее 10 см потери света, связанные с реабсорбцией, составляют 20%, для более длинных пластин (20-25 см), потери света величиной порядка 30%. В ряде работ [3, 4] было также замечено, что потери на неполное внутреннее отражение

возрастают при неровностях поверхности пластин. При неровностях поверхности $\sim 0,05$ мм и $\varnothing = 2$ мм вероятность потерь на неполное внутреннее отражение увеличивается на 3% [3], а в некоторых работах для улучшения сбора света поверхность пленки матируют [5]. В то же время выход преобразованного излучения увеличивается, если «нерабочие» торцы пластины имеют зеркальное покрытие.

Световой выход преобразованного излучения в планарной антенне зависит от ряда факторов: от показателя преломления материала пластины; от типа применяемого люминофора; гомогенности и чистоты среды; качества полировки поверхностей; формы антенны и ее размеров; потерь света в материале антенны. Кроме того, оптическая антенна, как переносчик информации, должна обладать достаточно малым временем срабатывания. Следовательно, люминофор должен обладать очень малым временем послесвечения – порядка наносекунд.

К настоящему времени создано много полимерных материалов и полимерных веществ, которые используются в различных областях техники, науки и быта [2, 3, 5, 6, 7, 8, 9]. Полимерные материалы, которые являются матрицей для внедряемых в нее люминофоров, должны быть прозрачными как для УФ – излучения, так и для излучения люминесценции. Исходный полимер должен быть высокой степени очистки, максимальной оптической однородности, не должен содержать ионов переходных металлов. Ионы металлов Fe^{3+} , Fe^{2+} , V^{3+} , V^{*+} , Mn^{3+} , Ni^{2+} , Q^{3+} , Cu^{2+} , а также примеси Ti , Co , Sn и др. имеют электронные переходы в области $0,4 - 3$ мкм и приводят к появлению в материалах полос поглощения значительной ширины, для отдельных ионов различающихся длинам волн максимального поглощения. Интенсивность поглощения отдельного атома этих металлов зависит с заряда иона и от концентрации примеси [3, 4].

К люминофорам предъявляются следующие требования:

- Эффективное поглощение излучения;
- Максимальное перекрытие кривых испускания красителя и чувствительности ФЭП (полоса наибольшей спектральной чувствительности ФЭП на основе кремния $0,5 - 0,95$ мкм, на основе арсенида галлия $0,6-0,8$ мкм);
- Минимальное перекрытие спектров поглощения и люминесценции (соотношение коэффициентов экстинкции на длине волны максимума флуоресценции и максимума полосы поглощения должно быть около 10^{-4});
- Хорошая растворимость в полимерах;
- Малое концентрационное и температурное тушение;
- Устойчивость к УФ излучению (срок службы не менее 5 лет).

Проверялась возможность создания планарной антенны с люминофором на основе полиакрилата «Акрилат - 13», выпускаемой отечественным производителем.

Полиакрилаты отверждаются под действием УФ – излучения. Полимеризация происходит в диапазоне длин волн до 460 нм, с максимальным эффектом в области длин волн $360-370$ нм без полного доступа воздуха. Это

свойство полиакрилатов было использовано для получения пленок с примесью люминофора.

Пленки отличаются прозрачностью, хорошей адгезией со стеклом, высокой химической и свето – и атмосферостойкостью, прозрачностью к ультрафиолету в области около 300 нм [8].

Схема изготовления планарного волновода изображена на рис. 2.

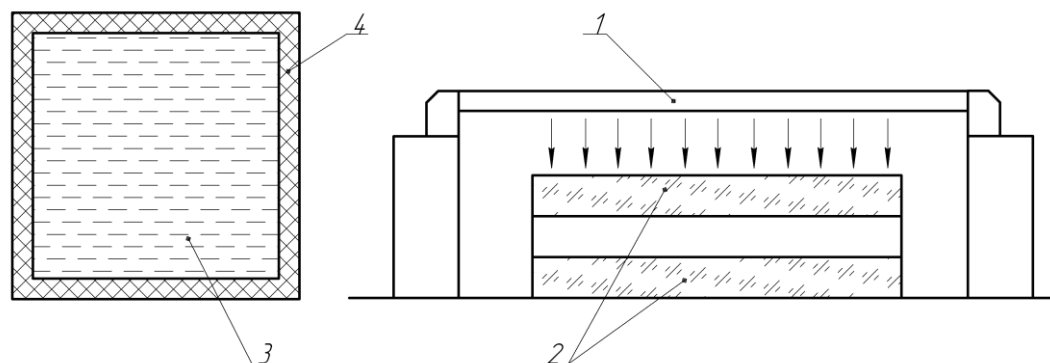


Рис. 2. Схема получения планарного волновода: 1 – лампа БУФ – 90; 2 – стеклянная пластины; 3 – акрилат с примесью люминофора; 4 – акриловая пленка

Лампа БУФ – 90 имеет максимум излучения в области 360 нм с уменьшением мощности в видимой области до 500 нм. Кювета представляет собой стеклянную подложку с бортиками из акриловой пленки. Экспонирование смолы длилось 40 минут при температуре 18 – 20°C.

Акриловая смола за указанное время хорошо затвердевает, оставаясь в тоже время достаточно эластичной, что позволяет нанести ее на любую неровную поверхность.

Измерение энергетического выхода проводилось в темной комнате для снижения помех от других источников света. Энергетический выход определялся микроваттметром «Электроника ОТ 6» при облучении образцов ультрафиолетовой лампой. Фотоэлементом в микроваттметре является фотодиод ФД-11к. Излучение люминесценции подводилось к детектору с помощью полимерного волновода длиной 1,5 м диаметром 1 мм. Для уменьшения излучения лампы в видимой части спектра применялся ультрафиолетовый фильтр УФС-1. На рис. 3 приведен общий вид эксперимента.

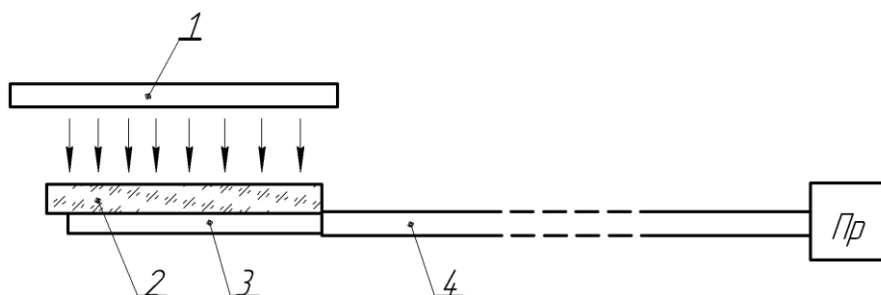


Рис. 3. Основной вид экспериментальной установки: 1 – УФ лампа; 2 – фильтр; 3 – исследуемая пленка; 4 – волновод

Расстояние от лампы до фильтра 2 см. Мощность лампы на расстоянии 2 см, измеренная этим же приемником, 1 мкВт.

Сравнивался энергетический выход трех люминофоров (Родамин 6g, РОРОР, пара – Терфенил) различной концентрации, а также смесь двух люминофоров (Родамин 6g + РОРОР). Второй тип измерений проводился с пленками с зеркальным покрытием нерабочих ребер. В качестве зеркального покрытия была применена алюминиевая пудра.

Все пленки имеют толщину 0,65 мм, длину 75 мм и ширину 5 мм.

Так как чувствительность фотоприемника в области 400 – 550 нм (область люминесценции люминофоров) менее 10%, полученные данные прибора были приведены к максимуму чувствительности фотоприемника.

На рис. 4 и 5 представлены зависимости энергетического выхода от концентрации для люминофоров РОРОР и пара – Терфенил.

Пленки с люминофором Родамин 6g имеют вдвое больший энергетический выход, чем другие люминофоры за счет высокого квантового выхода.



Рис. 4. Зависимость энергетического выхода для люминофора РОРОР



Рис. 5. Зависимость энергетического выхода для люминофора пара – Терфенил

По результатам измерений видно, что увеличение концентрации люминофора приводит к резкому снижению энергетического выхода. Наблюдается эффект внутреннего фильтра. Чтобы этого избежать концентрация не должна превышать $10^{-4} - 10^{-3}$ моль/л [10].

Применение зеркальных покрытий позволяет увеличить энергетический выход в $\sim 1,3$ раза. Использование смеси двух красителей со значительно перекрывающимися спектрами поглощения и испускания (например РОРОР $\lambda_{\text{исп}} = 400$ и Родамин 6g $\lambda_{\text{погл. max}} = 450$ нм) также позволяет повысить энергетический выход в 1,5 раза. Использование пластин с разными люминофорами, при последовательном размещении, с перекрывающимися спектрами поглощения и испускания позволит выбрать легко доступные и дешевые фотоприемники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голубенков А.А., Плюснин В.Ф., Поллер Б.В. Статья «Приемник УФ излучения на основе люминофора в пленке». VII международная научно-техническая конференция. Радиолокация, навигация, связь. Т 2. Воронеж, 2001.
2. Вяземский В.С. и др. Сцинтилляционный метод в радиометрии. М.: Госатомиздат, 1961 г.
3. Барашков Н.Н., Сахно Т.В. Оптически прозрачные полимеры и материалы на их основе. М.: Наука, 1991 г.
4. Шевердиев О.Н. Полимерные материалы. М.: Химия, 1995 г.
5. Барисенко Н.Н., Гундер О.А. Флуоресцирующие полимеры. М.: «Химия» 1987 г.
6. Красовицкий Б.М., Афанасиади Л.М. Моно- и бифлуорофоры. М.: «Химия», 2002 г.
7. Такахси Г. Пленки полимеров Л.: Химия, 1971 г.
8. Карякин М.И., Певцов В.Е. Технология полимерных покрытий М.: «Химия», 1983 г.
9. «Органические люминофоры и люминесцентные вещества». Каталог. Черкассы, 1988 г.

10. Левшин Л.В., Салецкий А.М. Оптические методы исследования молекулярных систем. Ч. 1. Молекулярная спектроскопия. – М.: Изд-во МГУ, 1994 г.

© Б.В. Поллер, Ю.Д. Коломников, Д.Е. Трушченко, 2006

УДК 396.321

С.И. Коняев, Б.В. Поллер, Е.В. Удальцов

ИЛФ СО РАН, Новосибирск

ОБЗОР НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ СВЕТОДИОДОВ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Интерес к ультрафиолетовым (УФ) источникам излучения обусловлен широким использованием данных приборов в различных областях науки и техники. Для оптических информационных систем использование УФ – диапазона имеет ряд преимуществ. Почти полное отсутствие помех от Солнца на длинах волн меньше 300 нм за счет поглощения УФ радиации озоновым слоем. Увеличение пропускной способности и разрешения информационных и измерительных систем.

До недавнего времени УФ передатчики были не компактны, т.к. используемые в них источники, основанные на твердотельных лазерах с удвоением частоты, на перестраиваемых лазерах на красителях, на газоразрядных и эксимерных лампах имели большие габаритные размеры, требовали специализированных источников питания, имели малый КПД и срок службы.

Полупроводниковые светоизлучающие диоды – светодиоды – называют источниками света будущего. Если говорить о современном состоянии "твердотельной светотехники", можно констатировать, что она выходит из периода младенчества и стремительно развивается.

Голубые и УФ СИД появились совсем недавно. В 1989 году доктор Ш. Накамура из фирмы Nichia Chemical, исследуя пленки нитридов элементов III группы получил эффективно инжектирующие слои р-типа в GaN-гетероструктурах и получил голубой светодиод, а позже в InGaN и AlGaN ультрафиолетовый.

Фирма Nichia запатентовала ключевые этапы технологии лишь к концу 1997 года, а в январе 1998 года приступила к выпуску первых белых и УФ светодиодов [1].

На сегодняшний день достигнутые характеристики светодиодов в корпорации Nichia для белых светодиодов световая отдача до 100 Лм/Вт при мощности прибора до 45 Вт. Срок службы 100 000 часов. Более того, уровень эффективности 100 люмен/Вт, достижение которого не прогнозировалось до 2008-2010 годов, сравним с эффективностью люминесцентных ламп. Дальнейшую планку эффективности, 150 люмен/Вт, компания собирается взять через год [2].

Кроме японской корпорации Nichia, за рубежом ультрафиолетовые светодиоды сейчас производят почти все крупнейшие производители СИД. В России можно встретить УФ СИД: Lumileds - ведущая американская компания по производству сверхмощных светодиодов; Ligitek electronics - один из ведущих тайваньских производителей светодиодов; KingBright Electronic Co - крупнейший производитель светодиодов на Тайвань город Тай-пей; Osram Semiconductors - ведущая немецкая компания по производству оптоэлектронных компонентов.

Определившись с производителем нужно решить, какие светодиоды лучше всего подходят в качестве источника для оптической информационной системы. С одной стороны они должны иметь большую излучаемую мощность, чтобы обеспечить связь на максимальное расстояние. С другой стороны длина волны излучения, должна быть, как можно короче, чтобы выйти в солнечно слепой диапазон, но с уменьшением длины волны падает мощность. Поэтому здесь нужно идти на компромисс при проектировании передатчика в каждом конкретном случае. Кроме того, важен угол излучения и размер кристалла, чтобы определить облученность, которую дает светодиод на заданном расстоянии.

В табл. 1 по данным [3-12] приведены основные характеристики УФ светодиодов, которые можно приобрести в России по цене от 2\$ за штуку для светодиодов с $\lambda = 395-400$ нм и до 30-40\$ за штуку для светодиодов с $\lambda = 350-380$ нм. Минимальная партия поставки через фирмы посредники около 10шт, с завода изготовителя промышленная упаковка 100 или 1000 шт.

Таблица 1

Название / Обозначение	Длина волны λ (нм)	Мощность (мВт) при I = 20 мА	Угол расходимости (градусы)
RLT350-TO-18	350	0,05	15
RLT360-0.5-10	360	0,5	10
RLT360-1.5-30-3CC	360	1,5 (3·20 мА)	30
RLU0408N65	365	4,7 (80 мА)	20
UVLED365-10	365	1,4	20
RLU365-1.4-30	365	1,4	30
NS370L-5CLA-4	370	0.8 - 1.2	10
RLS-UV370E	370	1	30
RLU370-1.7-30	370	1,7	30
RLT370-10	370	0,75	10
UVLED370-10	370	0,75	10
NS375L-5CLA-5	375	1,2 - 1,8	10
NSHU-590	375	0,75 - 1	10
RLU375-2-30	375	2	30
LED375-04	375	2,5	17
380D30	380	3 - 5	30
UVLED380-10	380	2 - 3,4	10
RLS-UV380	385	2	30
RLU385-2-30	385	2	30

Название / Обозначение	Длина волны λ (нм)	Мощность (мВт) при I = 20 мА	Угол расходимости (градусы)
LED385-04	385	3-5	17
385D30	385	3-5	30
385D15	385	3-5	30
LED385-33	385	3,5	11
E1L5M-4POA2-01	385	1,5-2,3	16
E1L5M-4POA2-01	385	3-3,5	16
HUUV-5102L	395	2-3	20
RLS-UV395	395	6	30
RLU395-8-30	395	8	30
LED395-03V	395	6	12
5UV 4SC	395	3 - 4	15
L-7113UVC	400	160 мкКд	20

Несмотря на свою цену, такие светодиоды представляют большой интерес для научных исследований.

Из данных табл. 1 видно, что с уменьшением длины волны существенно снижается к.п.д. излучателя. Также предприятия изготовители к сожалению не приводят параметры светодиодов в импульсном режиме.

В диапазоне короче 300 нм в соответствии с проектом DARPA [13] также разработаны опытные образцы УФ светодиодов с мощностью 0,3 мВт на 285 нм и 0,1 мВт на 276 нм, которые используются в экспериментах по солнечно – слепой связи и имеют полосу излучения около 10 нм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Internet: <http://www.transistors.ru/article/all/led-faq.htm>
2. Internet: <http://www.ixbt.com/news/hard/index.shtml?05/73/53>
3. Internet: <http://www.roithner-laser.com/newsletter.html>
4. Internet: <http://www.rib.by>
5. Internet: <http://www.transistors.ru>
6. Internet: <http://www.nichia.com>
7. Internet: <http://www.lumileds.com>
8. Internet: <http://www.ligitek.com>
9. Internet: <http://www.luxeon.com>
10. Internet: <http://www.kingbright.com>
11. Internet: <http://www.osram-os.com>
12. Internet: <http://ledmuseum.home.att.net/leduv.htm>
13. G.A. Shaw, A.M. Siegel, J. Model, D. Greisokh Recent Progress in Short – Range Ultraviolet Communication / Proc. Of SPIE Vol. 5796

© С.И. Коняев, Б.В. Поллер, Е.В. Удальцов, 2006

УДК 004:681.7

В.С. Лужных, Т.Н. Хацевич

СГТА, Новосибирск

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

На кафедре оптических приборов Сибирской государственной геодезической академии ведутся разработки информационных систем для разностороннего их применения в образовательном процессе. Главные направления разработок представлены двумя системами.

Одной из разработок является компьютерная система, позволяющая проводить командные соревнования студентов, внося игровой момент в процесс обучения. Правила игры следующие. Студенты разбиваются на группы и располагаются за компьютерами, соединёнными в локальную сеть. Игра состоит из произвольного количества туров. Сценарии каждой игры содержит набор тем с вопросами различной стоимости. Стоимость – это количество баллов, которое получает команда в случае правильного ответа. Чем выше сложность вопроса, тем выше его стоимость. Команды играют по очереди. Команда выбирает тему и номер вопроса любой стоимости. Время на ответ ограничено. Команда должна выбрать правильный ответ из предложенных вариантов, после чего система сообщит, правильный ли он. Далее игра переходит к следующей команде. Вопросы, выбранные предыдущими командами, становятся недоступными для дальнейшего выбора. По окончании тура подводятся итоги игры: отображается список команд и количество набранных баллов. В этот момент ведущий может либо закончить игру, либо начать следующий тур.

Система состоит из трех модулей: программы для составления сценария игры (т. е. списка тем и ввода вопросов для каждой темы); программа-сервер для управления ходом игры; программа-клиент. Программа-клиент может работать в трех различных режимах (режимы задаются при её запуске): в режиме ведущего, режиме игрока и режиме проектора. Программа в режиме ведущего показывает ему правильный ответ и комментарии к вопросу, которым и ведущий может воспользоваться, внося обучающий элемент в процесс игры. Программы, работающие в режиме игрока, запускаются на компьютере команд, обеспечивая очередность игры. Когда наступает очередь той или иной команды отвечать, программа предоставляет ей возможность выбора темы и ответа. При этом программы, работающие на других компьютерах, лишь отображают действия активной команды, но не позволяют производить собственные действия. Программа-клиент, работающая в режиме проектора, разработана с целью обеспечить возможность для большого числа зрителей наблюдать за ходом игры.

Программа используется для проведения блиц-туров региональных студенческих олимпиад по оплотехнике.

Другой разработкой является системы для тестирования и самоконтроля знаний учащихся по различным дисциплинам. В основе разработки была поставлена задача создать систему, способную как можно более точно оценивать знания студентов.

Для выполнения данной задачи предусмотрена сложная система оценки знаний. Ответы студентов оцениваются не по двубальной системе

«правильно/не правильно» а по более сложной, предусматривающей «степень правильности ответа» студентов на вопрос.

Кроме того, для достижения поставленной цели в системе предусмотрен расширяемый набор типов вопросов. Каждый тип вопросов представляет собой отдельный модуль, импортируемый в систему. Такой подход позволяет независимо от системы разрабатывать разнообразные типы вопросов, в том числе, разными специалистами.

Система может использоваться студентами для самостоятельного тестирования (в рамках самоподготовки), и преподавателями для контроля знаний студентов в рамках рубежных проверок знаний.

Система содержит блок, позволяющий преподавателю самому формировать задания учащимся. Правила, по которым проводится тестирование, изначально не заложены в систему. Вместо этого предусмотрен механизм, позволяющий реализовывать любые правила проведения тестов. Преподаватель при формировании задания выбирает по какому сценарию должно проводиться то или иное задание.

При формировании преподаватель определяет, как будет выставляться оценка за задание. Для этого он может вводить формулу, по которой на основании оценок и свойствах вопросов будет вычисляться величина. Кроме того, преподаватель также задает числовые промежутки. На основании числовых промежутков и значения, полученного по формуле, определяется оценка студента за задание.

Информация об ответах студентов хранится в базе данных. В неё входит оценка, а также подробная информация о том, как конкретно студент ответил на тот или иной вопрос.

© В.С. Лужных, Т.Н. Хацевич, 2006

УДК 681.3.07

Г.А. Сырецкий

НГТУ, Новосибирск

А.И. Радионов

СГГА, Новосибирск

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Современные достижения в микроэлектронике, микроэлектромеханике, наноэлектронике, молекулярной биологии и нарождающейся фотонике придают новый мощный стимул для интенсивного развития разнообразных направлений искусственного интеллекта, разработке и широкому использованию интеллектуальных информационных систем для решения трудноформализуемых и неформализуемых задач [5-12]. Существующие методы решения большинства прикладных задач (например, связанных с управлением производственными комплексами, принятием ответственных

административных решений, синтезом сложных человеко-машинных систем, организацией оптимального управления отраслью, оптимизацией процессов управления воздушным движением, прогнозированием социальных последствий от принятых правительством решений) либо очень сложны, либо неизвестны. Обычно это обусловлено большой размерностью исходных данных, громоздкостью описания, неполнотой имеющихся данных, частичной истинностью информации, различными физическими и информационными неопределённостями, касающимися как объектов изучения и их групповых образований, так и внешних сред, в которых они располагаются. Поэтому необходимость решения трудноформализуемых и неформализуемых задач диктует создание новых вычислительных и информационных технологий. Обычно они ориентированы на особенности оперирования имеющейся информацией.

Термин «искусственный интеллект» (ИИ, *Artificial Intelligence, AI*) был предложен Джоном Маккарти (J. McCarthy) в 1956 году для обозначения в то время области знаний, связанной с выявлением, исследованием и построением средств, приведенных в поведенческом тесте интеллектуальности А. Тьюринга (A. Turing) [19]. По мнению этого британского математика успешное прохождение теста любой искусственной системой позволяет именовать ее системой искусственного интеллекта. Согласно тесту система интеллектуальна тогда, когда она обладает средствами

- Обработки текстов на естественном языке (вычислительной лингвистики). Благодаря таким средствам возможно естественное для человека общение с системой;
- Зрительного восприятия объектов (машинного зрения);
- Представления знаний. С их помощью воспринятые знания преобразуются в форму, доступную в системе для оперирования и записи в ее память;
- автоматического формирования логических выводов. Они могут обеспечить на поступивший запрос решение поисковых задач и получение новых заключений на основе хранимой информации;
- Машинного обучения. Они нужны для выявления и прогнозирования признаков стандартных ситуаций и адаптации к изменяющимся условиям;
- Перемещения в пространстве и манипулирования объектами (робототехники).

В настоящее время тематика искусственного интеллекта охватывает существенно больший перечень научных направлений. Поэтому стали часто различать

- Сильный ИИ (Strong AI). Это направление связано с созданием программного обеспечения, которое наделяет компьютер способностями рассуждать и сознанием разумного существа;
- Слабый ИИ (Weak AI). Это направление ориентировано на построение встраиваемых в существующие системы средств, которые придают им «разумные»

свойства. Такими средствами оснащены, например, программы-переводчики ООО «ПРОМТ».

Одним из возможных путей решения указанных выше классов задач является заимствование механизмов извлечения, передачи, обработки и хранения информации, встречающихся и появляющихся в природе на различных уровнях организации материи, в их числе на уровне групп живых существ, клеточном, молекулярном и квантовом уровнях [1-4, 16-18].

Ныне особенно перспективны для использования молекулярные и эволюционные вычисления, возникшие вследствие потрясающих открытий, прежде всего в молекулярной биологии, в частности принципы кодирования генетической информации, функционирования молекулярно-генетических самовоспроизводящихся систем клеток и эволюционирующих структур. Примером служит знаменитый опыт Элдмана, проведенный в 1994 году с молекулами ДНК (*Дезоксирибонуклеиновой Кислоты*). Он показал возможность решения с их помощью задач, которые сложны для традиционных компьютеров. В связи с этим появилась такая парадигма молекулярных вычислений, как ДНК-вычисления [8]. В общем случае их практическое воплощение базируется на совместном использовании в различных сочетаниях методологий жёстких (*Hard Computing*) и мягких (*Soft Computing*) вычислений. Мягкие вычисления – это методологическое объединение основ нечёткой логики Л. А. Заде, нейровычислений, генетических вычислений, вероятностных выводов, рассуждений на базе свидетельств, сетей доверия, теории хаоса и теории машинного обучения. Ныне на основе теории нечётких множеств развита методология вычислений со словами (*Computing with Words*), являющаяся в свою очередь базисом вычислительной теории восприятия (*Computational Theory of Perceptions*). Методология вычислений со словами ориентирована на моделирование процессов мышления и принятия решений в определённой предметной области. Описание предметной области даётся на так называемом уточнённом естественном языке (*Precisiated Natural Language*). В вычислительной теории восприятия оперируют не результатами измерений, а перцептивными оценками (впечатлениями).

В настоящее время эволюционные вычисления организуют на основе эволюционных моделей изучаемых биологических систем, их объединений и виртуального мира не только с функциональной либо структурной точки зрения, но и поведения. Важной стороной поведения является когнитивная (познавательная) способность биологических систем и ход её эволюции от условного рефлекса к логике человеческого мышления. Это послужило толчком к появлению двух взаимосвязанных научно-практических направлений в эволюционных вычислениях: Искусственная Жизнь (*Artificial life* или *A-life*) и Адаптивное Поведение (*Adaptive Behaviour*). Первое направление в большей степени связано с принципами формальной организации жизни, а второе – с принципами интеллектуального поведения.

Искусственная жизнь – раздел искусственного интеллекта, ориентированный на выработку методов воссоздания компьютером биологических феноменов в различных их проявлениях.

В основе современной теории искусственной жизни, возникшей в конце 80-х годов, лежит понятие автономного агента-объекта, наделённого:

- Сенсорной моторной способностью;
- Памятью;
- Средствами переработки информации, нужной для выполнения определённой реакции.

Сенсоры обеспечивают агента информацией, возникающей во внешнем мире. Исполнительная система способна изменять состояние агента и воздействовать на окружающую среду. Агенты могут действовать автономно и/или в группах. Собственно *A-life* трактуется как компьютерное моделирование разных вариантов жизни и эволюции живых существ (<http://alife.santafe.edu>, <http://www.scs.carleton.ca/~csgs/resources/gaal.html>).

Теперь к *A-life* относят компьютерные системные модели, обладающие:

- Способностью адаптироваться к условиям внешнего мира путём приобретения знаний в ходе взаимодействия с другими объектами и средой;
- Механизмом порождения новых компонентов системы (потомства) в процессе её эволюции, с наследованием или дублированием свойств существующих объектов;
- Механизмом порождения новых форм объектов;
- Свойствами естественного отбора и выживания в условиях внешнего мира и присутствия разнородных объектов.

Составной частью *A-life* моделей служат генетические алгоритмы (*Genetic Algorithms*, ГА) (<http://www.aic.nrl.navy.mil/galist>, <http://www.genetic-programming.org>, <http://www.cs.gmu.edu/research/gag/>), которые впервые отражены в монографии Джона Холланда [17]. С математической точки зрения ГА считаются одной из разновидностей методов оптимизации, вобравших в себя черты вероятностных и детерминированных оптимизационных алгоритмов, ориентированных на обеспечение «выживаемости» искомым решением (параметрических, функциональных, алгоритмических и структурных). Обычно ГА не требует создания сложной модели внешнего мира. Реакция внешнего мира заменяется наперёд заданной целевой функцией. С её помощью оценивается качество получаемых решений и выбираются приемлемые.

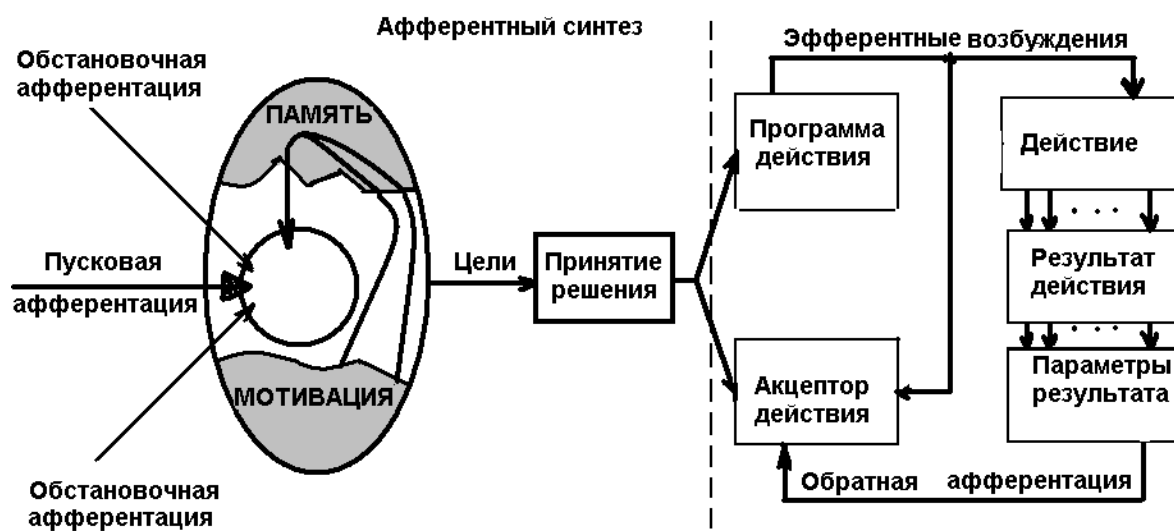
На сегодняшний день к перспективным подходам развития методов эволюционных вычислений следует отнести вычисления, ориентированные на:

- Включение ламарковских свойств (то есть приобретённых в течение жизни индивидуума);
- Неслучайное спаривание и видообразование;
- Вовлечение в процессы спаривания и видообразования иммунной системы и запахов здоровых и больных особей;

- Учёт вида и пола индивидуумов при случайном спаривании. Это важно при выработке кооперативного поведения индивидуумов;
- Учёт моделей молекул-циклинов, регулирующих процессы развития (открыты в наше время нобелевскими лауреатами П. Нерсом, Т. Хантом и Л. Харвеллом);
- Использование механизма программируемой гибели клеток, названной *апоптозом*. Его открытие удостоено Нобелевской премии: Сидни Бреннер (*Sydney Brenner*) стал нобелевским лауреатом за результаты исследований процессов, ведущих к развитию многоклеточного организма, Джон Салстон (*John E. Sulston*) — за идентификацию первого гена, принимающего участие в апоптозе (он установил: а) закономерность деления и гибели клеток не имеет вариаций; б) генерируется фиксированное число клеток, определённая часть которых гибнет); Роберт Хорвиц (*H. Robert Horvitz*) – выявил два гена апоптоза и ген, защищающий клетку от программируемой гибели;
- Учёт гена старости и инициируемых им веществ старения;
- Использование механизмов существования, развития и самовоспроизведения эмбриональных и взрослых стволовых клеток, обеспечивающих защиту и регенерацию различных типов клеток тканей и органов. Их транспортирование в требуемое место возможно путём инъектирования или направления химическими сигналами;
- Введение в эволюционные алгоритмы механизмов самоадаптации для управления параметрами, включая внутреннее представление, мутации, рекомбинации (взаимообмен) и размер популяции;
- Создание и использование описаний коэволюционных систем. Такие системы представляют собой модель развития индивидуумов в присутствии паразитов;
- Использование механизмов работы иммунной системы во время вирусного заражения организма;
- Использование биологических механизмов существования и эволюции колоний бактерий.

В наши дни, как отмечают С. Рассел (S. Russell) и П. Норвинг (P. Norving), имеет место тенденция к новому взгляду на искусственный интеллект: как на науку проектирования рациональных агентов – искусственных агентов, действующих в среде с учетом полезности. Интерес к таким агентам и проектам агентов особенно заметен среди исследователей и разработчиков, занимающихся изучением и созданием интеллектуальных мобильных роботов (роботика), способных распознавать окружающую среду и ориентироваться в пространстве, и программных роботов для сети Интернет, мультиагентных технологий и многоагентных систем различного назначения. По этому поводу следует отметить, что многие принципы построения современных систем искусственного интеллекта на базе агентов перекликаются с результатами, зафиксированными в 30-х годах XX века академиком П.К. Анохиным в его теории функциональной системы [2-4]. Теория была разработана для

исследования приспособительной деятельности организма при достижении цели. Обобщенная схема функциональной системы в соответствии с теорией П.К. Анохина:



Важное значение для развития интеллектуальных мобильных роботов приобретают концепции отечественных ученых М.Л. Цетлина по различным аспектам коллективного поведения автоматов [14] и М.Н. Амосова по робототехническим системам [1].

Во многих областях науки и технике остро ощущается потребность в такой разновидности информационных систем как системы поддержки принятия решений (СППР). В организациях СППР требуются на разных уровнях организационного управления. Они, как правило, поддерживают принятие индивидуальных решений. Так, например, на стратегическом уровне управления используются системы поддержки стратегических решений, а на управленческом уровне – управляющие (исполнительные) информационные системы.

Как известно общая постановка задачи многокритериального принятия решения состоит в выборе наилучшего решения из множества имеющихся вариантов, удовлетворяющего принятым критериям и предпочтениям аналитика или ЛПР (лица, принимающего решение) и, возможно, последствиям от его реализации. Поэтому разрабатываемые ныне многопользовательские интерактивные СППР должны [12, 13]:

1. Эффективно извлекать и фильтровать данные из независимых операционных баз данных (БД) и иных внешних источников;
2. Накапливать необходимую хронологическую информацию предметной области и управлять ее хранением;
3. Помогать проводить анализ ситуаций в предметной области и формулировать проблему (структурированную, слабоструктурированную или неструктурированную). Для чего в системе должны быть инструментальные средства

- Для формирования конечным пользователем запросов к внешним и внутренним БД и оптимизации;
- Моделирования и визуализации данных конечному пользователю (например, в форме круговых диаграмм, гистограмм и карт);
- 4. Помогать выявлять предпочтения аналитиков или ЛПР;
- 5. Позволять выбрать количество значимых критериев и задать их тип (скалярные, векторные и нечеткие), принимая во внимание измерительную шкалу оценки результатов по каждому из них;
- 6. Помогать задавать цель по каждому критерию;
- 7. Синтезировать и/или генерировать желаемый набор гипотез, решений (сценариев, действий);
- 8. Осуществлять оценку гипотез по принятым критериям и предлагать лучшие варианты из возможного набора;
- 9. Обеспечивать постоянный обмен информацией об обстановке принимаемых решений и помогать согласовать групповые решения экспертов (например, методом идеальной точки, методом ранжирования по Парето или с использованием λ -коэффициентов);
- 10. Моделировать принимаемые решения;
- 11. Анализировать возможные последствия от принимаемых решений.
- 12. Производить сбор сведений о результатах реализации принятых решений и осуществлять их оценку.

Ныне базисом построения СППР служит хранилище данных. Обобщенная структурная схема СППР имеет следующий вид:



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Амосов Н.М.* Нейрокомпьютерные и интеллектуальные роботы. – Киев: Наукова думка, 1991
2. *Анохин П.К.* Проблемы центра и периферии в физиологии нервной деятельности. – Горький, 1935.
3. *Анохин П.К.* Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. – М.: АН СССР, 1971.
4. *Анохин П. К.* Узловые вопросы теории функциональной системы. – М.: Наука, 1980.
5. *Барсуков А.П.* Компоненты и решения для создания роботов и робототехнических систем. – М.: ДМК-Пресс, 2005.
6. Квантовые вычисления. За и против. – Ижевск: Изд-во Удмуртского университета, 1999.
7. *Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В.* и др. Интеллектуальные робототехнические системы: тенденции развития и проблемы разработки. Часть 1. //Мехатроника, автоматизации, управление. 2004. № 9. С. 22-35.
8. *Паун Г., Розенберг Г., Саломаа А.* ДНК-компьютер: новая парадигма вычислений / Пер. с англ. – М.: Мир, 2004.
9. *Потапова Р.К.* Речевое управление роботом: лингвистика и современные автоматизированные системы. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: КомКнига, 2005.
10. *Пупков К.А., Коньков В.Г.* Интеллектуальные системы. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.
11. *Сырецкий Г.А.* Информатика. Том I. Основы информационной и вычислительной техники. Учеб. для вузов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
12. *Сырецкий Г.А.* Информатика. Том II. Информационные технологии и системы. Учеб. для вузов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006.
13. *Трахтенгерц Э.А.* Компьютерная поддержка принятия решений. – М.: СИНЕГ, 1998.
14. *Цетлин М. Л.* Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. – М.: Наука, 1969.
15. *Юревич Е.И.* Основы робототехники. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
16. *Goldenberg D. E.* Genetic Algorithms.in search, optimization and machine lerning / Addison-Westley Publ. Cong, 1989.
17. *Holland J. H.* Adaptation in Natural and Artificial Systems. The University of Michigan Press, 1975.
18. *Ivakhnenko G. A.* Self-Organization of Neuronet with Active Neurons for Effects of Nuclear Test Explosions Forecastings. System Analysis Modeling Simulation (SAMS), 1995, Vol. 20, PP. 107–116.
19. *Turing A.* Computing machinery and intelligence. Mind, 1950, 59, pp.433-460.

© Г.А. Сырецкий, А.И. Радионов, 2006

УДК 535:66.093.8

Д.С. Михайлова, А.С. Сырнева

СГГА, Новосибирск

ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ ГИДРОЗОЛЯ

Проблема создания и исследования наноструктур с контролируемыми размерами и заданными свойствами входит в число важнейших технических

проблем, прежде всего потому, что ее решение приведет к революционным изменениям в нанoeлектронике, наномеханике, биологии, медицине, материаловедении и других областях.

Наночастицы металлов в жидкости и твердом теле являются весьма перспективными оптическими элементами. На базе упорядоченных структур таких сред в настоящее время созданы и исследованы фотонные кристаллы. Возможность направленно изменять структуру и химический состав наночастиц представляет несомненный интерес для применения в медицине, в частности, для направленной доставки медикаментов в организм и лечение опухолей.

Целью данной работы являлось изучение методов наноструктурирования частиц и получение суспензии для проведения лабораторной работы.

Исследования, проводившиеся нами, были основаны на методике диспергирования вещества при его растворении в особых растворах.

Данный метод позволяет получать системы с размерами частиц $\approx 10^{-6} - 10^{-7}$ см. Следует иметь в виду, что с помощью этого метода в зависимости от условий могут быть получены системы любой дисперсности, с частицами любого размера.

Важным этапом в рассматриваемой методике получения дисперсных систем является замена растворителя.

Метод замены растворителя основан на изменении параметров системы, при котором химический потенциал компонента в дисперсионной среде становится выше равновесного и тенденция к переходу в равновесное состояние приводит к образованию новой фазы. В отличие от метода конденсации паров (изменение температуры), в методе замены растворителя изменяют состав среды. Так, если насыщенный молекулярный раствор канифоли в этиловом спирте влить в большой объем воды, то получающийся спиртоводный раствор окажется уже пересыщенным. Перенасыщение приведет к агрегированию молекул канифоли с образованием частиц новой фазы – дисперсионной.

Опыты проводились на установке представленной на рисунке (вид сверху).

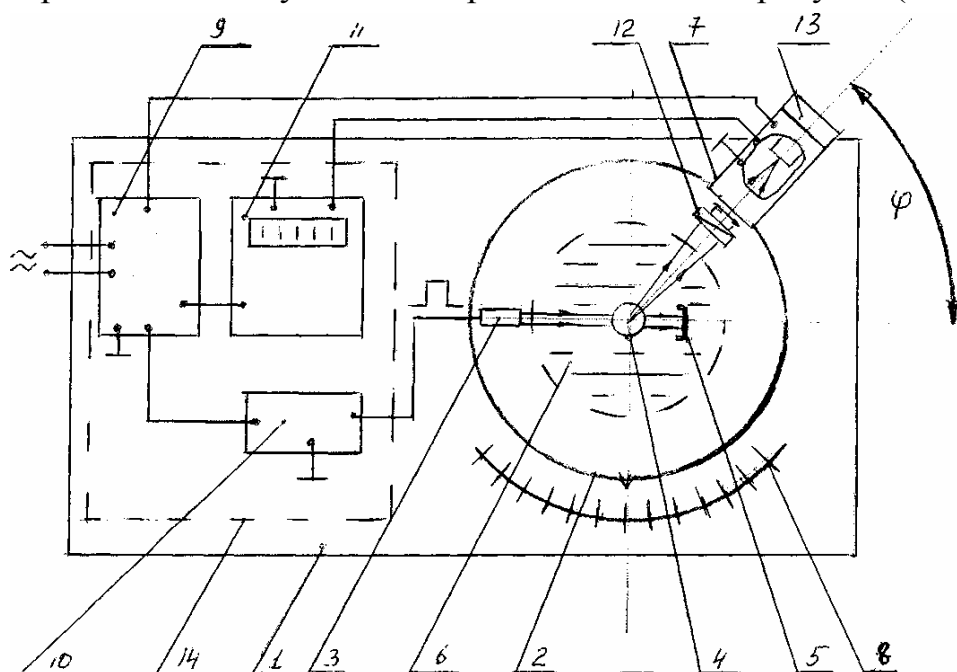


Рис.

На общей плите 1 расположены: светогерметичная камера 2, внутри которой закреплен полупроводниковый лазер 3, ампула 4 с исследуемой суспензией, оптическая ловушка 5. Ампула 4 погружена в иммерсионную жидкость 6. К боковой стенке камеры прикреплен фотоприемник 7, поворачивающийся при измерениях вместе с камерой вокруг ампулы и устанавливающийся под углом φ , считываемым по лимбу 8.

Кроме того, на плите 1 закреплен измерительный блок, в общем корпусе которого находятся блок питания 9, генератор 10 импульса питания лазера, осциллограф 11. Перед входным окном фотоприемника 7 установлен анализатор 12 поляризации рассеянного света. 13 – корпус измерительной фотодиодной головки и предусилителя, 14 – корпус измерительного блока.

Излучение лазера имеет характер повторяющихся импульсов, что позволяет выделить полезный сигнал, имеющий также импульсный характер, на фоне мешающих сигналов.

Установка позволяет определить зависимость интенсивности рассеянного суспензией света от угла рассеяния φ , т. е. определить индикатрису рассеяния света частицами суспензии. По форме индикатрисы можно определить средний размер частиц в суспензии.

Для получения частиц нужного размера в ходе эксперимента необходимо было определить оптимальную концентрацию веществ в растворе. Подбор необходимых концентраций осуществлялся опытным путем.

Нами были исследованы частицы канифоли и наноразмерные шарики SiO_2 . Размеры частиц определялись по измеренной индикатрисе рассеяния света по формуле:

$$a = \frac{0,61\lambda}{\sin \varphi},$$

где λ – длина волны, φ – угол рассеяния, соответствующий первому минимуму интенсивности рассеянного света

С помощью конденсационного метода опытным путем нами была получена суспензия и определены размеры частиц. Данные исследования необходимы для выполнения лабораторной работы и будут внедрены в учебный процесс.

© Д.С. Михайлова, А.С. Сырнева, 2006

УДК 681.7.069.24 : 681.615.41
С.Л. Шергин, П.Г. Михайлов
СГГА, Новосибирск

РАЗРАБОТКА ЛАЗЕРНОГО ГРАВИРОВАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Общая характеристика работ

Цель работы заключалась в разработке технологии сборки и юстировки лазерного гравировального устройства. Проведение технологических экспериментов по лазерному гравированию рисунков на различных материалах.

Актуальность проблемы заключается в ее применении: возможность резки металла, дерева, пластика, оргстекла по контуру высокой сложности; высокая скорость резки материала, а также гравировки (изготовление печати, печатных плат, микросхем, изображений на стекле и металле); в микротехнологии, где требуется высокая точность резки либо гравировки материалов (отсутствие микротрещин, изломов и сколов).

Одной из решаемых проблем была передача лазерного излучения от неподвижного лазера к перемещаемому манипулятору объективу, фокусирующему излучение на поверхность обрабатываемого изделия.

Эта проблема решена путем создания конструкции и разработке технологии изготовления оптического шарнира (рис. 1).

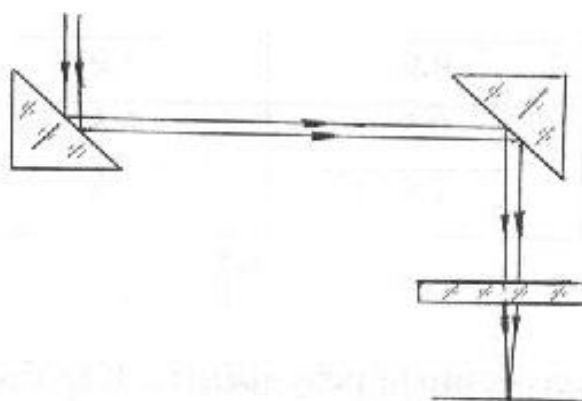


Рис. 1. Оптическая схема шарнира

А также разработка нового программного обеспечения позволяющего управлять устройством с компьютера, что дает возможность проектирования изделий и их изготовление при помощи популярных программ: AutoCad, CorelDraw и PatCad.

© С.Л. Шергин, П.Г. Михайлов, 2006

УДК 535.345.6

Д.С. Михайлова

СГГА, Новосибирск

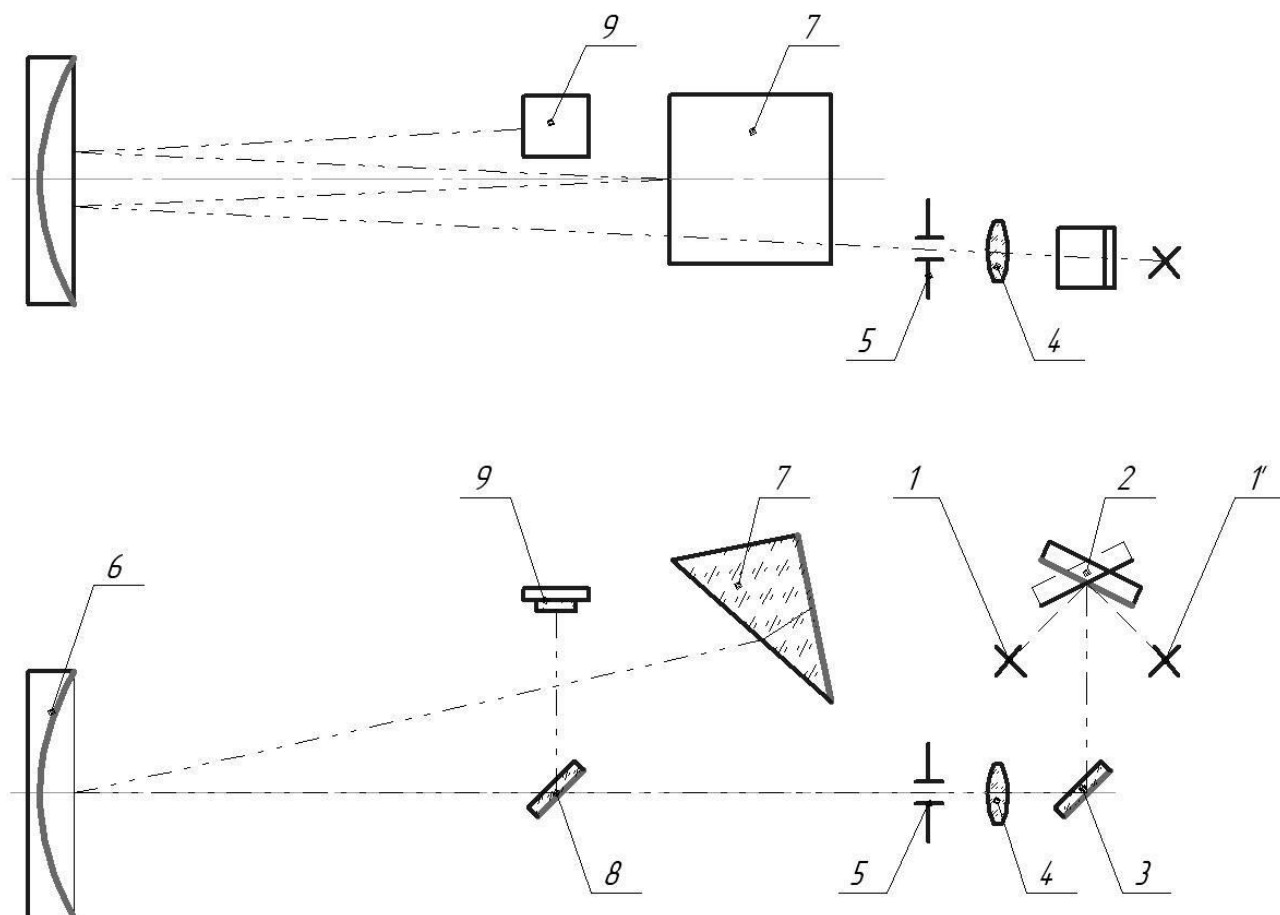
РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ СВЕТОФИЛЬТРОВ

Развитие оптического приборостроения на современном этапе приводит к необходимости создания комплексных, автоматизированных оптико-электронных приборов и систем.

Целью настоящей работы является автоматизация проведения измерений на спектрофотометре СФ-26.

Одним из недостатков спектрофотометра СФ-26 является необходимость снимать измерения в ручную по точкам. В ходе разработки была изменена оптическая и электрическая схема прибора, что позволило автоматизировать его работу. Суть модернизации заключается в установке вместо одного фотоприемника линейки фотодиодов и изменении оптической схемы так, чтобы весь спектр падал на все диоды линейки. Линейка осуществляет сканирование под управлением ПК, на экране наблюдается схема, представляющая собой спектральные поглощения света исследуемым образцом.

Оптическая схема разрабатываемой установки



Изображение источника света 1 или 1', установленного в фокусе эллиптического зеркала 2, после поворота светового пучка плоским зеркалом 3, пройдя через призму 4, проектируется на входную щель 5 монохроматора, установленную во втором фокусе эллиптического зеркала. Параллельный пучок лучей, отраженный от сферического зеркала 6, падает на 30-градусную кварцевую призму 7, разлагается ею в спектр и, отразившись от ее задней

алюминированной грани, идет назад, на зеркало 6, затем отражается зеркалом 8 попадает на фотодиодную линейку 9.

© Д.С. Михайлова, 2006

РАЗРАБОТКА СВЕТОФИЛЬТРОВ ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ЭФФЕКТ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

В настоящее время широко используются и разрабатываются оптические фильтры для всего оптического спектра от УФ до ИК диапазона. В УФ-диапазоне традиционно используются интерференционные и поглощающие фильтры имеющую частичную прозрачность в полосе пропускания.

Целью настоящего исследования является разработка и исследование светофильтров использующих эффект нарушенного полного отражения пропускание которых может иметь большое значение.

Основным элементом в любой конструкции узкополосного интерференционного светофильтра являются сильно отражающие зеркала, число которых должно быть не меньше двух. В качестве зеркал используются или простые полупрозрачные металлические слои, или диэлектрические многослойные зеркала. Возможно также применение комбинированных металлодиэлектрических просветленных зеркал.

Особым типом узкополосных светофильтров являются светофильтры, в которых используется нарушенное полное отражение. Зеркалами в таких фильтрах служат тонкие диэлектрические слои, в которых выполнено условие полного отражения, т. е. $n < n_0 \sin \varphi_0$. Ясно, что, в отличие от светофильтров прочих типов, угол падения должен быть здесь обязательно отличен от нуля. Поэтому ограничивающие среды в таком фильтре оформляются в виде двух стеклянных призм, между которыми находится пленка. В простейшем случае пленка состоит из трех слоев. Крайние из них являются зеркалами, на которых происходит нарушенное полное отражение (рис 1).

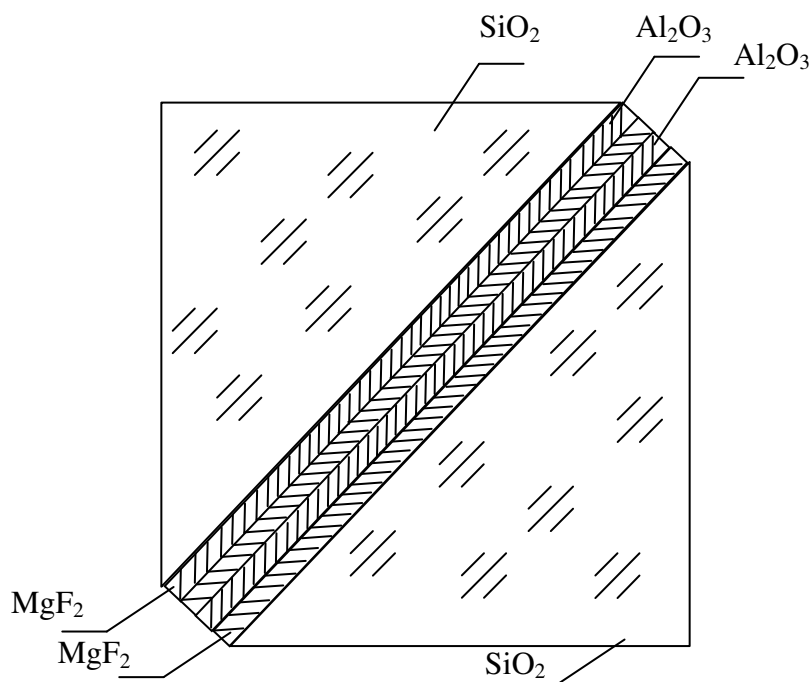


Рис. 1. Конструкция светофильтра

Поскольку все слои в светофильтре с нарушенным полным отражением являются диэлектрическими, то, по крайней мере теоретически, коэффициент пропускания фильтра в максимуме должен быть равен единице, тогда:

$$\frac{1}{D} = 1 + \frac{4R_1}{D_1^2} \sin^2(\alpha - \mu_1 + \nu_1) \quad (1)$$

где индекс 1 относится к одному зеркалу, т. е. в простейшем случае к одному полноотражающему слою, и притом в случае, когда свет падает на него изнутри, т. е. из промежуточного слоя. Очевидно, полоса пропускания будет тем уже, чем больше коэффициент отражения R_1 и чем меньше коэффициент пропускания $D_1 = 1 - R_1$. Это значит, что чем толще полноотражающие слои, тем уже полоса пропускания.

Отсюда вытекает кажущаяся весьма заманчивой теоретическая возможность получения светофильтра со сколь угодно узкой полосой пропускания при сохранении коэффициента пропускания равным (или, по крайней мере, близким) единице. Практика не оправдала, однако, этих надежд. Оказалось, что коэффициент пропускания получается действительно довольно высоким и близким к единице, но только тогда, если полноотражающие слои не слишком толсты. При дальнейшем увеличении толщины этих слоев ширина полосы пропускания перестает уменьшаться, а коэффициент пропускания резко падает, приближаясь к нулю.

Тем не менее, светофильтры на основе полного отражения имеют немалый практический интерес, так как они могут дать для многих применений достаточно узкие полосы пропускания. Тогда $R + D = 1$, и формулу (1) можно переписать в виде:

$$\frac{R}{D} = \frac{4R_1}{D_1^2} \sin^2(\alpha - \mu_1 + \nu_1) \quad (2)$$

Обозначив амплитудный коэффициент отражения на границе призма/полноотражающий слой через $e^{i\rho}$ (ς — сдвиг фазы при полном отражении), будем иметь амплитудный коэффициент пропускания равным

$$e^{i(\frac{\rho}{2} - \frac{\pi}{4})} \sqrt{2 \sin \varsigma}$$

$$a_1 = \frac{ish\gamma}{\sin \varsigma}, \quad (3)$$

$$b_1 = ch\gamma + ictg \varsigma * sh\gamma, \quad (4)$$

$$\gamma = kh_1 \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - n_1^2} \quad (5)$$

Формулы (3) и (4) можно переписать в виде:

$$a_1 = \frac{sh\gamma}{\sin \varsigma} e^{i\mu_1}, \quad \mu_1 = \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

и

$$b_1 = \frac{ch\gamma}{\cos \nu_1} e^{i\nu_1}, \quad (7)$$

где

$$\tan \nu_1 = th\gamma ctg \varsigma, \quad -\frac{\pi}{2} < \nu_1 < \frac{\pi}{2}. \quad (8)$$

Теперь из формул (6) и (7) вытекает:

$$\frac{R_1}{D_1^2} = \frac{sh^2 2\gamma}{4 \sin^2 \varsigma * \cos^2 \nu_1}. \quad (9)$$

Следовательно, подставляя в (2), имеем:

$$\frac{R}{D} = \frac{sh^2 2\gamma * \cos^2(\alpha + \nu_1)}{\sin^2 \varsigma * \cos^2 \nu_1}. \quad (10)$$

Обозначим коэффициент отражения на границе двух сред через

$$r = e^{i\rho} \quad (11)$$

где ς зависит от поляризации:

$$\begin{cases} \tan \frac{\varsigma_{\parallel}}{2} = \frac{sh 2\beta}{\sin 2\theta_0}, \\ \tan \frac{\varsigma_{\perp}}{2} = th\beta \tan \theta_0 \end{cases} \quad (12)$$

и

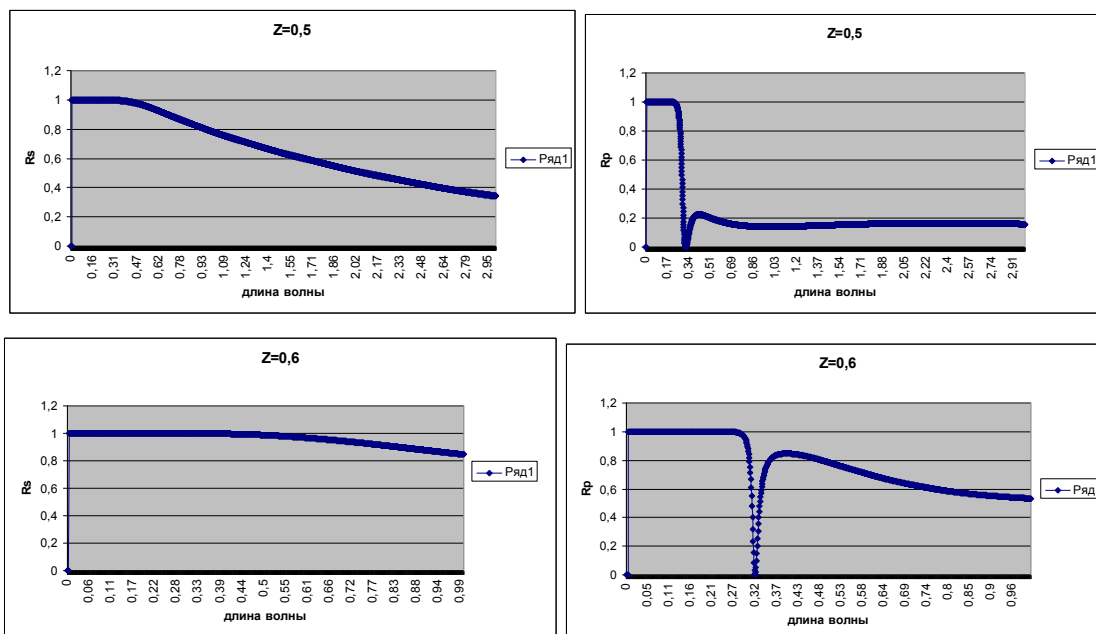
$$ch\beta = \frac{n_0 \sin \theta_0}{n} \quad (13)$$

Для изготовления макетного образца фильтра использовалась, главным образом, технология вакуумного напыления (установки ВУ-1А и ВУП4 с интерференционным датчиком контроля толщины). Подготовка образцов производилась по стандартным для технологии интерференционных покрытий методикам. Толщина полученных слоев измерялась с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4.

В результате проведенных исследований рассчитаны параметры светофильтра и разработана конструкция макетного образца фильтра.

В нашем случае угол падения на поверхность θ составляет 45° , показатель преломления призмы 1,5. В качестве материала для пленки применялись Al_2O_3 , MgF_2 . Используя выше приведенные формулы в программе EXEL был сделан расчет и построены спектральные кривые для $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,02$ и $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,04$ мкм.

$h = 0,02$ мкм.



$h = 0,04$ мкм

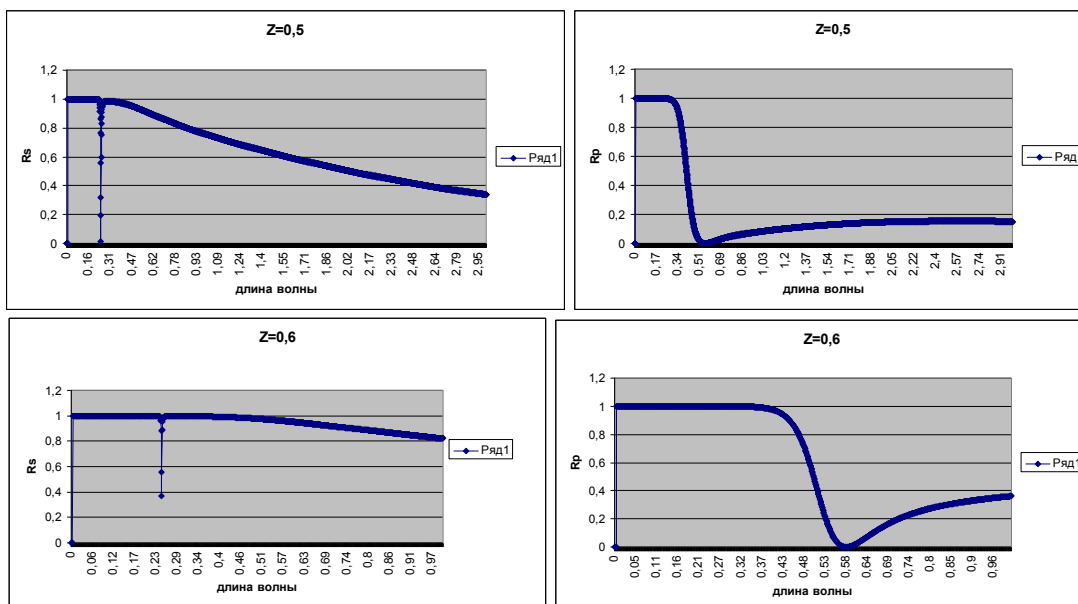


Рис. 2

Из приведенных графиков спектров отражения можно сделать выводы;

1. Один вид поляризации исчезает из-за материала подложки.
2. При определенной полосе пропускания пропускание светофильтра полное.

3. Из рис. 2 видно, что светофильтр может выполнять функцию поляризатора во всем видимом диапазоне и до длины волны 3 мкм.

© А.С. Сырнева, 2006

УДК 681.2:536.6
В.Я. Черепанов
СГТА, Новосибирск

АДИАБАТИЧЕСКИЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ЭТАЛОНАХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

В государственных эталонах России, воспроизводящих единицы энергетических величин, содержащих в размерности джоули или ватты, используется преобразование измеряемых величин в тепловые эффекты, значения которых определяют обычно калориметрическими методами [1]. Метрологические характеристики этих эталонов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Некоторые сведения по государственным эталонам энергетических величин (ГПЭ – государственный первичный эталон, ГСЭ – государственный специальный эталон)

Наименование эталона	Д [*]	S	Θ	Метод измерения
ГСЭ единицы электрической мощности в диапазоне (40-2500) Гц	0,01–6 · 10 ³ Вт	(0,5 – 1) · 10 ⁻⁵	(2 – 4) · 10 ⁻⁵	Термоэлектрическое компарирование
ГПЭ единицы количества теплоты	7 – 35 кДж	(4 – 60) · 10 ⁻⁵	(5 – 150) · 10 ⁻⁵	Калориметрический
ГСЭ единицы количества теплоты в области калориметрии растворения и реакций	0,05 – 1 кДж	2 · 10 ⁻⁴	3 · 10 ⁻⁴	Калориметрический
ГПЭ единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне (0,03 – 37,5) Гц	1 · 10 ⁻⁴ – 1 · 10 ⁻¹ Вт	1 · 10 ⁻⁴	2 · 10 ⁻³	Калориметрическое компарирование
ГСЭ единицы потока излучения при длине волны 0,95 мкм	1 · 10 ⁻² – 2 · 10 ⁻² Вт	2 · 10 ⁻³	4 · 10 ⁻³	Термоэлектрическое компарирование
ГСЭ единицы потока энергии тормозного излучения с максимальной энергией фотонов 8 – 8,0 пДж	1 · 10 ⁻⁴ – 10 Вт	(0,8 – 1,0) · 10 ⁻²	(3 – 5) · 10 ⁻²	Калориметрический
ГПЭ единиц поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы фотонного и электронного излучений	0,08 – 8 Вт	2 · 10 ⁻³	2 · 10 ⁻³	Калориметрический с термоэлектрическим

				компарированием
* Примечание: Д – диапазон воспроизводимых значений; S – случайная составляющая погрешности; Θ – неисключенная систематическая погрешность				

Из таблицы следует, что уровень точности эталонов невелик: их суммарная погрешность находится, в лучшем случае, на уровне одного – двух порядков ниже одного процента. Основным источником погрешности при этом является измерение количества теплоты, выделяемой в калориметрических ячейках. Данная работа посвящена оценке возможностей получения максимальной точности при определении тепловых эффектов в прецизионных средствах измерения энергетических величин.

Обзор и классификация методов и средств калориметрии приведены в работы [2 – 6]. Их анализ показывает, что наиболее точным из этих методов является абсолютный адиабатический метод измерений, основанный на тепловом взаимодействии двух тел – ядра и окружающей его оболочки (рис.1). Связь между ними обычно характеризуется тепловым потоком Q_Σ , интенсивность которого зависит от свойств поверхности тел и разделяющей их среды (теплопроводности λ , коэффициентов теплоотдачи α и теплового излучения ε).

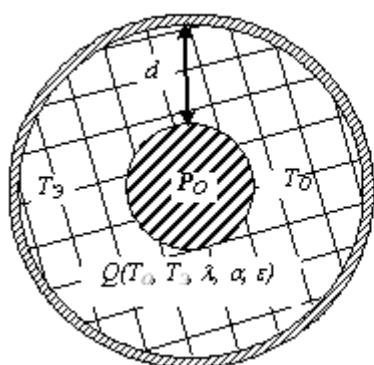


Рис. 1. Замкнутая адиабатическая оболочка ($T_\Sigma = T_O$, $Q_\Sigma = 0$)

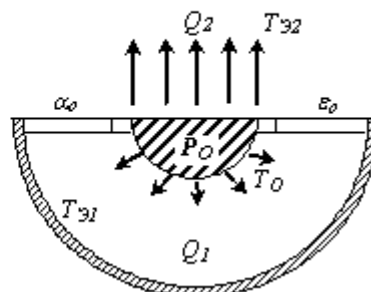


Рис. 2. Открытая (полуадиабатическая) оболочка ($T_{Э1} = T_O$, $P_O = Q_2$)

Уравнение баланса тепловых потоков в системе ядро – оболочка имеет вид

$$P_O(\tau) - Q_\Sigma(T_O, T_\Sigma, \lambda, \alpha, \varepsilon) = C(T_O) \frac{dT_O}{d\tau}, \quad (1)$$

где $P_O(\tau)$ - поток, сформированный источником тепла, например, электрическим нагревателем, расположенным в ядре; $Q_\Sigma(T_O, T_\Sigma, \lambda, \alpha, \varepsilon)$ - тепловой поток, образованный тепловыми утечками; $C(T_O)$ - полная теплоемкость ядра измерительной ячейки; $dT_O/d\tau$ - скорость изменения температуры ядра.

В адиабатическом методе поток Q_{Σ} сводится к минимуму за счет того, что температура T_{Σ} адиабатической оболочки поддерживается равной температуре образца T_0 путем регулирования мощности нагревателя оболочки.

Остаточный тепловой поток Q_{Σ} между ядром и оболочкой в случае, когда $\Delta T = T_0 - T_{\Sigma} \rightarrow 0$, является суммой потока Q_{λ} , обусловленного теплопроводностью среды между ядром и оболочкой, теплового потока Q_{α} , обусловленного конвективной составляющей (в случае газовой среды) и радиационным тепловым потоком Q_{ε} (в случае прозрачной среды)

$$Q_{\Sigma} = Q_{\lambda} + Q_{\alpha} + Q_{\varepsilon}, \quad (2)$$

где d – толщина слоя среды; ε , F – эффективные значения коэффициентов теплового излучения и площади взаимного облучения ядра и оболочки, σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Здесь

$$Q_{\lambda} = \frac{\lambda}{d} \Delta T F, \quad Q_{\alpha} = \alpha \Delta T F, \quad Q_{\varepsilon} = \sigma \varepsilon (T_0^4 - T_{\Sigma}^4) F. \quad (3)$$

Для близких значений T_0 и T_{Σ} термическое сопротивление среды между ядром и оболочкой R_{Σ} , равное отношению ΔT к плотности теплового потока $q_{\Sigma} = Q_{\Sigma}/F$, имеет вид

$$R_{\Sigma} \cong \left[\frac{\lambda}{d} + \alpha + 4\sigma \varepsilon T_0^3 \right]^{-1}. \quad (4)$$

В табл. 2 приведены расчетные значения R_{Σ} для различных вариантов заполнения пространства между ядром и оболочкой.

Таблица 2. Значения суммарного термического сопротивления R_{Σ} между ядром и оболочкой для различных сред ($\varepsilon = 0$ – непрозрачная среда, $\alpha = 0$ – вакуум или твердотельная изоляция)

Среда	$\frac{\lambda, \text{ Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$d, \text{ мм}$	$\alpha, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	ε	$T_0, \text{ К}$	$R_{\Sigma}, \frac{\text{К}}{\text{Вт}}$
Вакуум ($5 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст.)	0	3	0	0,05	200	11,1
–“–	0	3	0	0,05	400	1,37
–“–	0	3	0	0,05	800	0,17
–“–	0	3	0	0,05	1300	0,04
Воздух (760 мм.рт.ст.)	0,03	3	5	0,05	200	0,04
–“–	0,03	3	10	0,05	400	0,01
Стеклотекстолит	0,3	3	0	0	200	0,01
Экранно-вакуумная изоляция	$3 \cdot 10^{-5}$	3	0	0	200	100
Пенопласт	0,06	3	0	0	200	0,05

Анализ таблицы показывает существенный вклад радиационной составляющей теплообмена, сильно возрастающий с ростом температуры. В этой ситуации целесообразно вместо вакуумирования среды использовать непрозрачные для излучения теплоизоляционные материалы и, прежде всего, экранно-вакуумную изоляцию.

Если задать в рамках решаемой измерительной задачи значение мощности P_o и значение ΔT погрешности поддержания равенства температур ядра и оболочки, то относительная погрешность определения мощности, расходуемой на нагрев ядра равна

$$\delta_p = \frac{\Delta T F}{P_o R_\Sigma}. \quad (5)$$

Для наиболее эффективной экранно-вакуумной изоляции при $P_o = 1 \text{ Вт}$, $\Delta T = 10 \text{ мК}$, $F = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, $R_\Sigma = 100 \text{ К/Вт}$ получаем $\delta_p = 10^{-4} \%$, для воздуха ($R_\Sigma = 0,04$) – $0,4 \%$

Примером использования адиабатического метода является калориметр для изучения температурной зависимости удельной теплоемкости жидкостей, с помощью которого были получены основные термодинамические функции теплоносителей [7]. Принцип действия калориметра предусматривает ступенчатый подвод теплоты в исследуемый контейнер, наполненный теплоносителем, путем эпизодического включения на небольшой промежуток времени источника нагрева. Адиабатические условия поддерживались в условиях вакуума тремя автоматическими регуляторами нулевой разности температур между контейнером и адиабатическим экраном, между контейнером и охранным кольцом, исключающим отвод тепла по проводам нагревателя и термометра – носителя шкалы, а также между контейнером и капилляром, служащим для заливки теплоносителя. Такой метод измерения теплоемкости обычно называют стационарным адиабатическим.

Адиабатический нестационарный (динамический) метод измерения обычно используется для исследований температурной зависимости теплоемкости твердых тел в широком диапазоне температур. Метод предусматривает непрерывный подвод тепла к исследуемому образцу вещества (ядро), окруженному адиабатической оболочкой.

Опыт использования «адиабатических» измерительных технологий привел к идеи их применения в установке высшей точности для воспроизведения, и передачи размера единицы поверхностной плотности теплового потока [8]. Для формирования эталонного теплового потока был предложен вариант адиабатической оболочки, отличающийся тем, что измерительная ячейка содержит ядро в виде плоского нагревателя, который с одной стороны окружен адиабатической оболочкой, а его другая сторона открыта и обращена в окружающее пространство или прижата к объекту исследования – преобразователю теплового потока, а также к исследуемым образцам теплопроводности или коэффициентов теплового излучения (рис.2). В

зависимости от требований к погрешности измерений в качестве среды между ядром и оболочкой, использовались вакуум или воздух [9].

Такой «полуадиабатический» метод автор предложил называть методом открытой адиабатической оболочки. Наиболее перспективно использовать этот метод при создании эталонов мощности электромагнитного излучения в различных диапазонах спектра. При этом ядро измерительной ячейки выполняется в виде модели абсолютно черного тела, которая в зависимости от значений температуры может выполнять функцию абсолютного излучателя [10] или абсолютного приемника (радиометра) [11]. Как было показано, использование метода в этих случаях позволяет повысить точность определения тепловых эффектов на 2 – 3 порядка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Государственные эталоны России: Каталог/ Вступ. ст. Г.П. Воронина. – М.: Изд-во «Андреевский флаг», 2000. – 184 с.
2. Кириллин, В.А., Шейндлин, А.Е. Исследования термодинамических свойств веществ. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 560 с.
3. Олейник, Б.Н. Точная калориметрия. — М: Изд-во стандартов, 1973. — 208 с.
4. Сергеев, О.А. Метрологические основы теплофизических измерений. — М.: Изд-во стандартов. — 1972. — 154 с.
5. Теплофизические измерения и приборы // Е.С. Платунов, С.Е. Буравой, В.В. Курепин, Г.С. Петров; под общей ред. Е.С. Платунова. — Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд., 1986. — 256 с.
6. West, E.D. Heat exchange in adiabatic calorimeters // J. Res. NBS, 1963. — v. 67 A. — No. 4. — P. 331—341.
7. Томбасов, Е.А., Курочкина, Л.А., Черепанов, В.Я. Калориметрическая установка для измерения теплоемкости низкокипящих жидкостей // Труды Сибирского НИИ метрологии. Вып. 1. — 1969. — С. 134—141.
8. Томбасов, Е.А., Лозинская, О.М., Черепанов, В.Я. Образцовая установка для градуировки и поверки преобразователей теплового потока // Метрология. — 1987. — № 1. — С. 34—38.
9. Черепанов, В.Я. Измерения параметров теплообмена // Мир измерений. — 2005. — № 9. — С. 4-19.
10. Черепанов, В.Я. Разработка методов и средств метрологического обеспечения измерений коэффициентов теплового излучения материалов // Сборник материалов научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2005». Специализированное приборостроение, метрология. — Новосибирск: СГГА, 2005. — т.6. — С. 176—181.
11. Куин, Т. Температура. — М.: Мир, 1985. — 448 с.

© В.Я. Черепанов, 2006

УДК 389:621.38

Б.С. Могильницкий

ФГУП СНИИМ, Новосибирск

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ

Наша планета вращается неравномерно, ось вращения меняет свое положение в пространстве. Изменение длительности суток и положения оси вращения в настоящее время контролируется технологиями определения параметров вращения Земли (ПВЗ). В нашей стране определение ПВЗ осуществляется как классическим методом - астрооптика, так и современными средствами - лазерная дальнометрия искусственных спутников Земли (ИСЗ) и Луны и радиотехническими методами: радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ) и навигационными глобальными системами ГЛОНАСС и GPS. Среди этих технологий лазерные дальнометрические системы (ЛДС) являются альтернативным и дополняющим способом, обладающим наивысшей точностью. К настоящему времени технология ЛДС достаточно развита в мире, но в России до сих пор находится в состоянии становления. Это обусловлено, в первую очередь, техническим отставанием в разработке ЛДС из-за кризиса экономики после известных событий в нашей стране в 1991г. В России в настоящее время используются данные только одной ЛДС в Комсомольске.

Лазерная дальнометрия, как метод, стартовала еще в 1964г., используя импульсное излучение рубинового лазера. Совершенствование методик и средств измерений привело к тому, что к настоящему времени СКП лазерных измерений снижена с нескольких метров до нескольких сантиметров.

Типичная структурная схема работы ЛДС следующая: сформированный передающей оптической системой выходной импульсный сигнал излучается в направлении ИСЗ. Небольшая часть этого сигнала поступает на вход стартового фотоприемника с пороговым устройством, запускающего измеритель временных интервалов (ИВИ). Отраженный эхо-сигнал, поступивший в приемную оптическую систему останавливает счетчик времени. Точно измеренный временной интервал прохождения лазерного импульса до ИСЗ и обратно поступает в вычислительное устройство совместно с информацией о параметрах атмосферы (температура, давление, влажность), измеренных на трассе лазерного сигнала.

Расстояние до ИСЗ вычисляется из соотношения [1]

$$L = c\tau/2\tilde{n} + \delta L,$$

где c - скорость света, τ - время прохождения импульса до ИСЗ и обратно, $\tilde{n}$ - усредненный показатель преломления атмосферы вдоль траектории лазерного луча

$$\tilde{n} = (1/z) \cdot \left(\int_z n dl \right),$$

где l - лучевая траектория, n - текущее значение показателя преломления воздуха, z - длина траектории, δL - поправка разности длины траектории лазерного луча в реальной атмосфере и геометрической длины траектории (по прямой линии).

Траектория лазерного луча искривляется и отличается от геометрически прямой из-за неоднородности показателя преломления в разных слоях атмосферы. Суммарная задержка прохождения импульса по такой трассе зависит от температуры, давления, влажности воздуха вдоль трассы луча.

Оценка этого вида погрешности представляет собой непростую задачу и требует специальной технологии определения указанных параметров атмосферы на траектории импульса локации.

Отсюда видно, что наиболее важными факторами точности измерений являются: точность измерения времени τ распространения сигнала, точность определения $\tilde{n}$ и поправки δL .

По типу лазерного передатчика и достигаемой точности ЛДС классифицируют следующим образом: 1-е поколение: с временным разрешением (10-30) нс, 2-е поколение: с временным разрешением (1-5)нс, 3-е поколение: с временным разрешением (0.1-0.5)нс. Международная лазерная сеть оснащена ЛДС третьего поколения. В нашей стране аналогичные устройства в стадии разработки. Возможный алгоритм вычисления ПВЗ для технологии ЛДС представлен в [2].

Факторы, определяющие точностные характеристики ЛДС

К настоящему времени проведен анализ следующих составляющих погрешностей:

- Инструментальная погрешность, связанная с точностью измерения τ ;
- Атмосферная составляющая погрешности в зависимости от выбранной модели атмосферы;
- Погрешность синхронизации времени τ и астрономической временной шкалы;
- Погрешности геометрической редукции ЛДС.

Для примера, численные значения погрешностей определения расстояний до ИСЗ для ЛДС 2-го поколения представлены в таблице [3].

Таблица

№	Вид операций	Погрешность, см
пп		
1	Калибровка	1.7
2	Погрешность измерения τ	3.3
3	Нестабильность системы	4.0
4	Временная привязка	3.5
5	Атмосферная поправка	3.0
6	Поправка по отражателю	2.9
7	Суммарная среднеквадратическая ошибка	7.7

Видно, что наибольший вклад в ошибки измерений вносит составляющая системы и погрешность атмосферы. Погрешность системы уменьшается калибровочными измерениями до мишени с точным расстоянием, и способы ее уменьшения будут рассмотрены ниже. Значительно же уменьшить величину атмосферной погрешности весьма трудно. Выходом из этой ситуации является использование технологии ЛДС четвертого поколения - двухволнового метода локации [4]. Уже проведены экспериментальные испытания таких систем. Удобными для этого метода являются излучатели на основе гранатового YAG:Nd-лазера, излучающих на двух достаточно разнесенных длинах волн 1.06

и 0.53 мкм. Анализ прохождения двухволнового лазерного импульса указывает на несколько меньшую величину потерь для первой гармоники излучения.

В двухволновом методе локации используется явление дисперсии показателя преломления воздуха. В силу этого явления оптические длины на двух разных частотах отличаются пропорционально усредненной по пути луча плотности атмосферы. Разница оптических путей на этих частотах используется для оценки неустранимой в одноволновом случае атмосферной поправки. Остается неучтенная погрешность из-за плотности водяных паров в атмосфере. Но она весьма мала и дает ошибку в пределах долей сантиметра.

Снижение инструментальной погрешности достигается [5]:

- Созданием лазеров сверхкоротких световых импульсов пикосекундного диапазона;
- Созданием сверхбыстродействующих приемников лазерного излучения;
- Учетом теплового распыливания и самоотклонения луча в поглощающей атмосфере;
- Учетом влияния бокового ветра на лазерный пучок.

Реализация указанных проблем позволит снизить инструментальную погрешность в определении расстояний до уровня долей сантиметра. Погрешности привязки к передающей и приемной плоскостям отсчета - плоскостям, совмещенным с элементами конструкции ЛДС и ИСЗ - подробно проанализированы методом имитационного моделирования [5]. Погрешности временной привязки к внешнему эталону времени в зависимости от формы импульса исследованы в [6,7].

Поведенный анализ погрешностей показывает, что суммарная погрешность измерений расстояний современными ЛДС может составлять доли сантиметра.

Применение лазеров фемтосекундного диапазона для целей дальнометрии в настоящее время нецелесообразно из-за неустранимых остаточных погрешностей в измерении расстояний и неизученности вопросов прохождения лазерного излучения в реальной атмосфере. Кроме этого, к настоящему времени отсутствуют приемные устройства с фемтосекундным временным разрешением. Тем не менее, первые работы по зондированию атмосферы фемтосекундным излучением уже проведены. Устройства с фемтосекундными излучателями наиболее перспективны в космических задачах, вне атмосферы Земли.

Вывод: дальнейшее улучшение качества определения ПВЗ с помощью технологии ЛДС связано, в основном, с дополнительными усилиями в области уменьшения рассмотренных погрешностей, а не в направлении создания излучателей ЛДС с более коротким импульсом зондирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кравченко Н.И., Литовченко М.В. Зарубежная радиоэлектроника-1985, №12, с.59
2. Могильницкий Б.С., Тиссен В.М., Толстиков А.С. Параметры вращения Земли: технологии обработки данных.// Сб. материалов научн. Конгресса «ГЕО-Сибирь-2005», СГГА, 2005, с.166
3. Гамал К. Квантовая электроника -1978, т.5, №11, с.2428.

4. Abshire J., Gardner Ch.S. – IEEE Trans.- 1985, v.GE-23, №4.
5. Buchman M.G., Willans K.F.- IEEE Southeaston 85: Conf. Proc. Raleigh- 1985.
6. Rielek W.- Publ. Astron. Inst. Czechosl. Acad. Ski.- 1984, №58.
7. Мещеряков Н.А., Тиссен В.М. Оптимизация методов приема и обработки информации в спутниковых ЛДС.// Измерит. Техника.- 2001.-№3- с.12

© Б.С. Могильницкий, 2006

НАНОСЕКУНДНЫЙ ЛАЗЕР ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Целый ряд современных измерительных технологий используют импульсное излучение нано- и пикосекундной длительности. Кроме этого, когерентное интенсивное импульсное излучение необходимо для задач изучения и изменения свойств веществ и создания новых материалов. Особый интерес представляет такое излучение для задач метрологии, в частности, в области определения ПВЗ методом лазерной дальнометрии. Источниками излучения с указанными параметрами являются в основном твердотельные лазеры, генерирующие мощные когерентные световые импульсы света. Необходимая длительность импульса излучения зависит от выбора механизма модуляции и возможности его реализации для данного типа излучателя.

Импульсный излучатель на основе YAG:Nd-лазера создан по классической схеме: задающий генератор, формирующий «затравочный» импульс заданной длительности и формы, и один или два каскада усиления. Работа генератора в режиме гигантского импульса обеспечивается пассивным затвором на основе Li:F^{-2} , размещенного совместно с кристаллом граната в коротком неустойчивом резонаторе, что гарантирует воспроизводимость выходных параметров. Простота конструкции обеспечивает надежность работы лазера. Использование пассивного затвора резко упрощает механизм получения режима гигантского импульса, избавляя от проблем получения высоковольтного (5-и киловольтного) напряжения модуляции активного модулятора на основе КДР-кристалла. Оптимальное временное согласование каскадов усиления с задающим генератором позволяет максимальным образом мгновенно извлекать запасенную в усилительных кристаллах достаточно большую световую энергию. Схема лазера представлена на рис. 1.

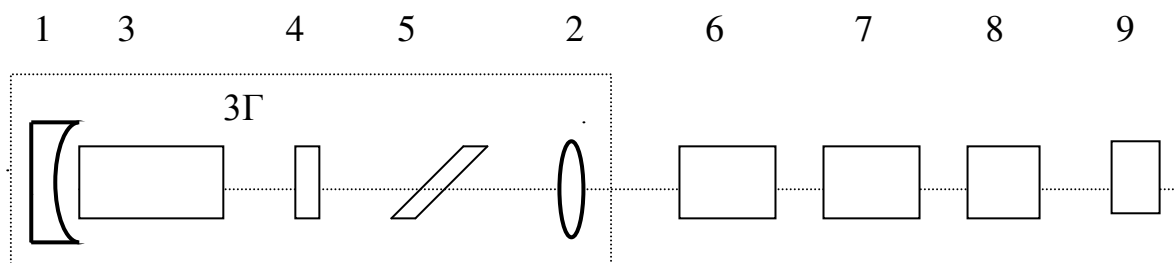


Рис. 1. ЗГ - задающий генератор с неустойчивым резонатором: 1 - глухое зеркало, $R = 1.5\text{м}$; 2 - выходное зеркало, $R = -1\text{м}$, $T = 60\%$; 3 - кристалл YAG:Nd: $5 \times 50\text{мм}$, 4 - затвор пассивный LiF:F^{-2} ; 6,7 - каскады усиления; 8 - генератор второй гармоники МЧ-105 (СДА); 9 - УВВ: устройство вывода излучения

Основными параметрами выходного излучения лазера являются форма импульса, его длительность и выходная энергия моноимпульса. Метрологические требования к форме зондирующего импульса общеизвестны - форма зондирующего импульса должна иметь гауссово распределение интенсивности излучения. Такую форму импульса в твердотельных лазерах можно получить только в условиях «мягкого» режима генерации - когда выход когерентного излучения относительно невелик по сравнению с предельно возможным. В таком режиме возможна воспроизводимость параметров излучения

Длительность импульса генерации определяется выражением

$$\tau = nL/cV,$$

где n - показатель преломления среды резонатора, L - оптическая длина резонатора, $V=(\alpha-\beta)$ - превышение усиления α над потерями β .

Уменьшение длительности импульса возможно двумя путями: уменьшением размера резонатора или увеличением параметра V . Эти величины взаимнопротивоположного действия: уменьшение длины кристалла генерации неизбежно приводит к уменьшению параметра V , что нивелирует процесс сужения длительности импульса. На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость длительности импульса генерации от длины резонатора.

При постоянном уровне ламповой накачки (28Дж) и низменном размере кристалла длина резонатора изменялась до минимально возможного значения.

Зависимость линейна, и как видно из аппроксимации $\tau \sim 1$ нс может быть достигнута при $L=5$ см, что технически трудно реализуемо и требует другой техно-логии. Варьируя рассмотренными двумя параметрами можно получить оптимальную длину резонатора для минимально возможной длительности импульса в данной конструкции. Отметим, что для получения воспроизводимой гауссовской формы «затравочного» импульса необходимо работать при небольших превышениях усиления над порогом генерации. Энергия моноимпульса при этом составляет величину 30-50 мДж. Первый каскад усиления поднимает уровень энергии до 0.3-0.5Дж, а второй усиливает в 1.5-2 раза и выходная энергия моноимпульса достигает уровня в 1Дж при длительности 2.5-3.5нс.

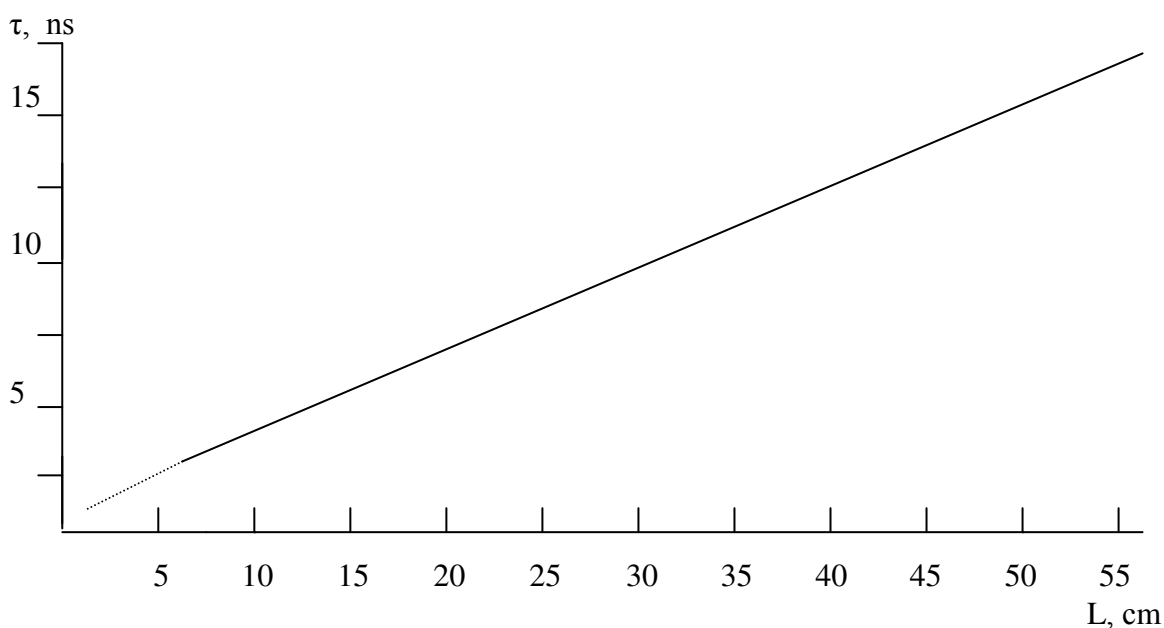


Рис. 2

Отметим характерные особенности работы лазера с неустойчивым резонатором:

- Значительно (в 2 раза) уменьшилась расходимость лазерного пучка до 2-х мрад по сравнению с плоским резонатором;
- Наблюдалось однородное пространственное распределение интенсивности по сечению пучка. Это характерно при работе ОКГ на основной поперечной моде и подтверждает высокую селективность такого резонатора по поперечным модам;
- Происходит более эффективное заполнение основной модой объема активного элемента, что подтверждается хорошими энергетическими параметрами ЗГ.

Основные преимущества

- Малая длительность зондирующего импульса лазерной генерации;
- Относительно большая энергия моноимпульса как на основной, так и на второй гармонике;
- Возможность использования метода двухволнового зондирования для повышения точности определения больших и сверхбольших расстояний путем компенсации погрешности из-за интегральной остаточной рефракции атмосферы.

Технические характеристики

Длина волны излучения, мкм	1.064	0.532
Энергия моноимпульса, мДж	1000	80-100
Длительность импульса, нс	—5	
Частота повторения, Гц	1—10	
Режим работы	одномодовый, одночастотный	

Диаметр пучка, мм	5—8
Расходимость, мрад	2—4
Потребляемая мощность, КВт	5
Области применения	

- Дальнометрия ИСЗ. Погрешность определения сверхбольших расстояний 1—10см;
- Навигация в космосе. Привязка данных спутниковых измерений для определения местонахождений природных аварий;
- Свехдальняя наземная и космическая связь;
- Экологический контроль атмосферы;
- Лазерная импульсная спектроскопия;
- Лазерная селективная фотофизика и фотохимия;
- Лазерная технология и анализ материалов.

Вывод: для получения достоверных и воспроизводимых данных локации высокоорбитальных ИСЗ необходимы **только** качественные зондирующие импульсы, которые формируются в рассмотренном излучателе.

© Б.С. Могильницкий, 2006

УДК 621.396.2

И.Е. Макаров, А.С. Толстиков
ФГУП СНИИМ, Новосибирск

МЕТОДЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗНЕСЁННЫХ ЧАСОВ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРИМЕНЕНИИ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Существует ряд задач научно-технического плана, требующих высокоточной согласованности моментов шкал пространственно-разнесённых хранителей времени (часов). Сюда могут быть отнесены задачи космической и наземной навигации, баллистики, геодезии и геофизики, связи, эфемеридной астрономии и геодинамики. Наиболее высокие точности синхронизации в настоящее время востребованы в спутниковых навигационных технологиях при определении расхождений шкал времени бортовых часов и для целей эфемеридно-временного обеспечения (ЭВО) спутниковых навигационных систем (СНС), при организации траекторных измерений по навигационным спутникам с сети беззапросных измерительных станций.

Задача синхронизации пространственно-разнесённых часов в настоящей работе заключается в определении расхождений шкал времени, приведённых на определённый момент (или интервал) времени, и к оцениванию характеристик нестабильности генераторов синхронизируемых часов. Для этих целей

используются те или иные сигналы, содержащие информацию о точном времени, передаваемую различными радиотехническими средствами.

Достаточно полный сравнительный анализ методов синхронизации, отличающихся величиной зоны обслуживания (или дальностью действия), а также величинами погрешности синхронизации, приведён в [1]. К рассмотренным в [1] методам следует добавить метод “TWO-WAY” [2], который является развитием принципов, реализованных в системах метеорной синхронизации и связи [3], где применяется ретрансляция и встречный обмен частотно-временной информацией между пунктами синхронизации по УКВ каналам с отражением сигналов от метеорных следов. Если погрешности синхронизации шкал времени “метеорными” методами, требующими применения специальной аппаратуры и зависящих от числа метеорных следов в течении сеанса синхронизации, удаётся уменьшить до 10-30 нс.(СКО), то погрешности метода “TWO-WAY” не превышают 100 пс. При этом метод “TWO-WAY” также требует применения специальной аппаратуры и, что не менее важно, аренды дорогостоящего канала обмена информацией через геостационарные спутники.

Из множества отмеченных методов синхронизации далее будем рассматривать те, которые опираются на использование навигационных сигналов спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС (Россия), GPS (США) и, в дальнейшем, – GALILEO (европейское сообщество) [6], позволяют применять для целей синхронизации традиционную аппаратуру потребителя СНС и требуют лишь специализированных алгоритмических и программных приложений. Эти методы положены в основу беззапросных технологий траекторных измерений, выполняемых по орбитальным группировкам навигационных спутников для целей эфемеридно-временного обеспечения СНС ГЛОНАСС.

Обсуждаемые в настоящей работе методы синхронизации относятся к группе дальномерных методов [1], использующих кодовые измерения псевдодальности стандартной точности $C1$ в частотном диапазоне $L1$ и кодовые измерения повышенной точности $D1$ и $D2$ в частотных диапазонах $L1$ и $L2$.

Фазовые [4] и интерферометрические [1] методы, обладающие потенциально более высокой точностью в сравнении с дальномерными методами, в настоящее время не находят широкого применения из-за трудностей, связанных с необходимостью разрешения неоднозначности фазовых измерений.

Основное соотношение, связывающее измерение дальности $D(t)$ с отклонением момента шкалы времени часов измерительной станции $T_H(t)$ относительно шкалы центрального синхронизатора системы имеет вид,

$$D(t) = r + c[T_B(t) - T_H(t)] + D_H + D_{TP} + D_{ФЦ} + D_{РЕЛ} + V(t) \quad (1)$$

где $r = \sqrt{(X_B - X_H)^2 + (Y_B - Y_H)^2 + (Z_B - Z_H)^2}$;

$\bar{U}_B^T = [x_B, y_B, z_B]$, $\bar{U}_H^T = [x_H, y_H, z_H]$ - векторы координат навигационного спутника и измерительной станции, определённые в гринвичской системе координат;

$D_{II}, D_{TP}, D_{ФЦ}, D_{РЕЛ}$ – поправки на задержку радиосигнала в ионосферном, тропосферном слоях, поправки на смещение фазового центра навигационного спутника и релятивистская поправка, выраженные в единицах длины;

c – скорость света;

$V(t)$ – шумы приёмной аппаратуры.

В компактном представлении уравнение измерений (1) имеет вид

$$D(t) = cT_{II}(t) + P(t) + V(t). \quad (2)$$

Для решения задачи синхронизации введём в рассмотрение математическую модель нестабильности часов [7]. Уход шкалы времени синхронизируемых часов $T(t)$ от шкалы центрального синхронизатора системы связан с отклонением частоты генератора этих часов от номинального значения $f(t)$ дифференциальным уравнением

$$\dot{T}(t) = f(t), \quad T(t_0) = T_0, \quad t \in [t_0, t_K]. \quad (3)$$

В отклонении частоты $f(t)$, согласно [7] выделим две составляющие:

$$f(t) = s(t) + w(t). \quad (4)$$

Долговременную составляющую нестабильности

$$s(t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(t) a_i, \quad (5)$$

представляющую собой линейную комбинацию ортонормированных на интервале $[t_0, t_K]$ базисных функций $\varphi_i(t)$ и неизвестных коэффициентов a_i , и кратковременную составляющую нестабильности $w(t)$, которую можно трактовать как выходной сигнал формирующего фактора, описывающегося дифференциальным уравнением

$$\dot{w}(t) = B(t) \cdot w(t) + \xi(t), \quad w(t) = w_0, \quad (6)$$

на входе которого действует порождающий гауссовский случайный процесс $\xi(t \in N(0, \sigma_\xi^2))$ с ограниченной дисперсией σ_ξ^2 типа “белый шум”. Характеристиками долговременной нестабильности в этом случае будут коэффициенты a_i (при разложении (5) в виде степенного полинома для $i = 2$, a_1 – среднее на интервале $[t_0, t_K]$ значение частоты; a_2 – дрейф частоты). Кратковременную нестабильность характеризуют текущие значения $w(t)$ или коэффициент формирующего фильтра $B(t)$ и величина дисперсии σ_ξ^2 . Дифференциальные уравнения (4), (6), дополненные формальными уравнениями

$$\dot{a}_i(t) = 0, \quad a_i(t_0) = a_{i0}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (7)$$

образуют полную математическую модель нестабильности синхронизируемых часов

$$\dot{\bar{R}}(t) = A\bar{R}(t) + \bar{w}(t), \quad \dot{\bar{R}}^T(t_0) = \dot{\bar{R}}_0^T [T_0, a_{i0}], \quad (8)$$

совместно с уравнением измерений (2) составляющих основу для построения алгоритмов синхронизации.

Интегрируя (8) с учётом (4) и (5), получим уравнение:

$$T(t) = \bar{F}^T(t) \bar{R}_0 + \delta w(t), \quad (9)$$

где

$$\bar{F}^T(t) = [1, \int_{t_0}^t \varphi_i(\tau) d\tau, i = 1, \dots, n], \delta w(t) = \int_{t_0}^t w(\tau) d\tau.$$

Задача оценивания характеристик нестабильности $T(t)$, a_i , $i = 1, \dots, n$. (характеристики кратковременной нестабильности не рассматриваются исключительно из соображений упрощения изложения) сводится к оцениванию вектора начальных условий $\bar{R}_0$ на основе решения системы алгебраических уравнений

$$M\bar{R}_0 = \bar{q} + \Delta\bar{q}, \quad (10)$$

где

$$M = \int_{t_0}^{t_K} c\bar{F}(t) \cdot \bar{F}^T(t) dt; \quad \bar{q} = \int_{t_0}^{t_K} \bar{F}(t) D(t) dt;$$

$$\Delta\bar{q} = \int_{t_0}^{t_K} \bar{F}(t) [P(t) + V(t) + \delta w(t)] dt,$$

полученной непосредственно из (2) с учётом (9).

Заключение. В работе показана общая схема оценивания характеристик нестабильности удалённых от центрального синхронизатора СНС часов по результатам измерений наклонных дальностей от навигационного спутника до измерительной станции. Задача сводится к оцениванию вектора начальных условий обобщённой модели нестабильности синхронизируемых часов и последующему восстановлению долговременной и кратковременной составляющих нестабильности.

Точность оценивания начальных условий определяется свойством матрицы M в системе (10) и уровнем неизмеримых компонент в векторе правой части системы $\Delta\bar{q}$.

Методы синхронизации, построенные на основе изложенного подхода, отличаются способом компенсации компонент $P(t)$ на уровне предварительной подготовки уравнений измерений (1). Так, известный метод “in common view” предполагает расчёт геометрических дальностей с учётом известных координат станции и компенсацию составляющей $r(t)$ в (1), полную компенсацию уходов бортовых шкал $T_b(t)$ и частичную компенсацию ионосферной и тропосферной погрешностей за счёт введения дифференциальной поправки.

Важным обстоятельством, следующим из вида уравнения измерений (1), является симметричность задачи оценивания уходов наземных часов и уходов бортовых часов $T_b(t)$ от шкалы времени центрального синхронизатора. Это позволяет применить изложенную методику для решения задачи оценивания характеристик нестабильности бортовых часов по данным траекторных измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков И.А., Рабкин В.С., Филатченков С.В., Шебанов А.А., Шебшаевич В.С. Использование спутниковой радионавигационной системы NAVSTAR для синхронизации шкал времени // Зарубежная радиоэлектроника. – 1985. - № 11, С. 3 – 15.
2. Koudelka O., Ressler H.. Two-Way Satellite Time Transfer for the Synchronization of reference Clocks for Satellite Navigation Systems. Proceeding of GNSS 2003. – European Navigation Conference. 22-25 April 2003. Graz, Austria. - P. 1 – 7.
3. Сидоров В.В., Мерзакреев Р.Р., Эпиктетов Л.А., Логашин А.В., Базлов А.Е. Аппаратура метеорной синхронизации и связи // Труды 5-го российского симпозиума “Метрология времени и пространства”, 11-13 сентября 1994. – ИМВП ГП “ВНИИФТРИ”, - Менделеево. – С. 405 – 410.
4. Tu K. Y., Pen H. M., Liao C. S., Chan F. R.. Clock Synchronization using GPS/GLONASS carrier Phase Proceedings of 32nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, Virginia, 2000. - P. 171-180.
5. de Jong G. and Kroon E.. Analysis of one Year of Zero-Baseline GPS Common-View Time Transfer and Direct measurement using two co-located Clocks Proceedings of 34th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. - P. 29 – 38
6. Moudrak A., Furthner J., Konovaltsev A., Denks H., Hammesfahr J. Time Dissemination and Synchronization for Galileo Users. Proceedings of ION NTM 2004, 26-28 January 2004, San Diego, CA. - P. 323 – 332
7. Тиссен В.М., Толстиков А.С. Математические модели неустойчивости КСЧ. // Материалы 7-ой Международной конференции “ Актуальные проблемы электронного приборостроения”. АПЭП – 2004. Том 3. 2004. – Новосибирск, НГТУ. – С. 263 – 269.

© И.Е. Макаров, А.С. Толстиков, 2006

УДК 528.5:006

А.В. Березовский

НФ ФГУП ПО УМЗ, Новосибирск

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КОМПАРАТОР УК10-05

Универсальный компаратор (далее по тексту - компаратор), предназначен для исследования фазового цикла и линейных метрологических характеристик электронных тахеометров, светодальномеров и лазерных рулеток.

Условия эксплуатации:

температура окружающего воздуха, °С	20±5
относительная влажность воздуха, %	45-80

Технические характеристики

Диапазон измеряемых расстояний	2-12м
Отклонение каретки отражателя по оси Z-Y, не более	±15мм
СКП определения расстояния, не более	0,5мм
Дискретность минимального отсчета	0,1мм (0,01°)
Корректировка коэффициента пересчета	0,000000-9,000000
Напряжение питания УЦО-210	220В
Потребляемый ток	0,2А
Масса компаратора, не более	200кг
Сила натяжения троса компаратора	50□±5Н

Комплектность

Универсальный компаратор УК10-05	1
Цифровое отсчетное устройство УЦО-210	1
Датчик линейных перемещений ЭОП-50	1
Установочный стол	1
Дополнительное основание стола	2

Компаратор (рис. 1) представляет собой стальное основание длиной 11 м, которое шестью кронштейнами крепится к стене. По направляющим основания компаратора перемещается каретка, к которой с помощью карданной подвески на подшипниках крепится призменный отражатель. Приводом каретки отражателя служит колесо, со сквозной обмоткой стального плетеного троса диаметром (0,3-0,4) мм. В колесо привода компаратора встроен растровый датчик линейных перемещений ЭОП-50, который отслеживает величину перемещения каретки отражателя. Относительное или абсолютное линейное значение перемещения отражателя в цифровом виде выводится на дисплей цифрового отсчетного устройства УЦО-210 (рис. 2). Отсчетное устройство УЦО-210 позволяет выполнять корректировку реперной (опорной) точки компаратора, коэффициента пересчета (масштаба) по линейной или угловой координате и сохранять их в энергонезависимой памяти. Для автоматизации процесса измерений и вычислений в УЦО-210 предусмотрена связь с персональным компьютером через последовательный интерфейс RS-232.

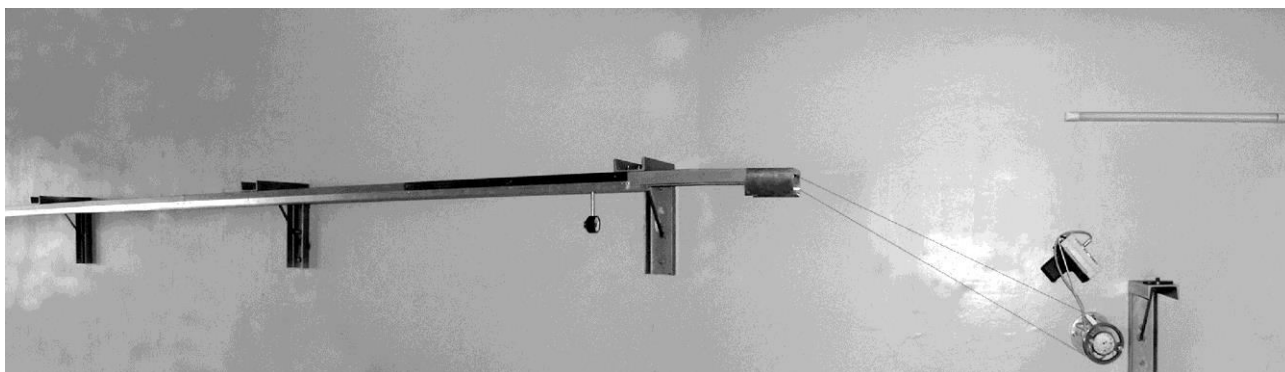


Рис. 1. Общий вид компаратора

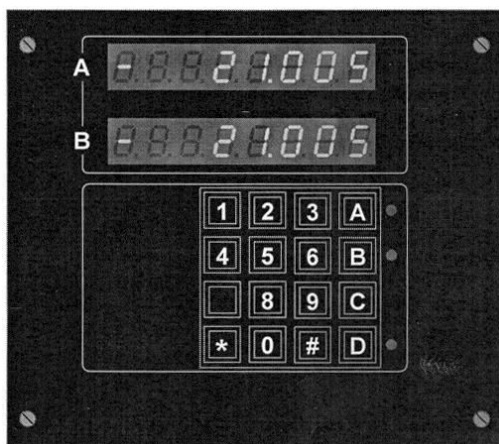


Рис. 2. Пульт управления
УЦО-210

Унифицированное цифровое отсчетное устройство УЦО-210 предназначено для приема и обработки сигналов с растровых преобразователей, установленных в контрольно-измерительных приборах (КИП) и индикации результатов обработки с абсолютным или относительным отсчетом.

При абсолютном отсчете линейная и угловая координата измеряются от абсолютного нуля координат компаратора (центра инструментального стола). Абсолютный отсчет доступен только после

привязке отсчета к реперной метке компаратора.

При относительном режиме отсчета можно обнулить координаты в любой точке рабочей области перемещений. Сразу после включения устройства включается относительный отсчет.

Переключение между абсолютным и относительным отсчетом осуществляется нажатием кнопки (D). Кроме того, относительный отсчет автоматически включается при обнулении одной из координат.

В табл. 1 приведены операции и средства поверки компаратора.

Таблица 1

Наименование операции (параметра)	Наименование средства поверки. Номер документа, регламентирующего технические характеристики
1. Внешний осмотр	
2. Поверка силы натяжения струны компаратора	Динамометр
3. Определение плавности хода каретки отражателя	
4. Определение отклонения отражателя по оси Y-Z	Теодолит WILD T2. Погрешность измерения углов $\pm 2,0''$. Линейка ГОСТ 427
5. Определение расстояния до реперной точки	Теодолит WILD T2. Погрешность измерения углов $\pm 2,0''$. Светодальномер DISTOMAT WILD DI 2002. Погрешность измерения расстояния в диапазоне 1-50м $\pm 0,1$ мм
6. Определение СКП компаратора	Теодолит WILD T2. Погрешность измерения углов $\pm 2,0''$. Светодальномер DISTOMAT WILD DI 2002. Погрешность измерения расстояния в диапазоне 1-50м $\pm 0,1$ мм

1. Внешний осмотр

При проведении внешнего осмотра необходимо проверить комплектность компаратора, убедиться в отсутствии механических повреждений, влияющих на эксплуатационные свойства, метрологические характеристики и сохранность компаратора.

2. Определение силы натяжения струны компаратора:

– По шкале динамометра компаратора определить силу натяжения троса компаратора, и установить её паспортное значение (40 ± 5 Н);

3. Определение плавности хода каретки отражателя

– Установить каретку отражателя в реперной точке;
– Включить отсчетное устройство УЦО-210;
– Плавным вращением ручки датчика линейных перемещений переместить каретку отражателя в конечную точку компаратора и обратно, наблюдая за показаниями дисплея УЦО-210;

– Перемещение каретки компаратора должно быть плавным, без замедления хода.

4. Определение отклонения отражателя по оси Y-Z:

- Закрепить на отражателе линейку (ГОСТ 427) в горизонтальном положении;
- Установить на инструментальный стол компаратора теодолит WILD T2 (ЗТ2КП);
- Привести теодолит Т2 в рабочее положение по собственным уровням;
- Совместить вертикальную нить сетки теодолита с центром отражателя и снять отсчет по линейке y_0 ;
- Переместить отражатель на 1 м и снять отсчет по линейке y_1 и т. д.
- Выполнить измерения на интервалах 1, 2, ..., 10 м;
- Вычислить разности для каждого из интервалов $y_{1-0}, y_{2-0}, y_{3-0} \dots y_{10-0}$;

Компаратор пригоден к применению, если отклонение отражателя по оси Y не превышает ± 15 мм.

- Закрепить на отражателе линейку (ГОСТ 427) в вертикальном положении;
- Установить на инструментальный стол компаратора теодолит WILD T2 (ЗТ2КП);
- Установить каретку отражателя в реперную точку;
- Включить УЦО-210 (относительный режим);
- Установить на теодолите отсчет ВК = $0^\circ 00' 00''$;
- Подъемными винтами подставки совместить горизонтальную нить сетки теодолита с центром призмы отражателя;
- Отгоризонтировать теодолит по уровню, измерить его высоту h_i и записать в паспорт компаратора;
- Снять отсчет по линейке h_0 ;
- Переместить отражатель на 1 м и снять отсчет по линейке h_1 и т. д.
- Выполнить измерения на интервалах 1, 2, ..., 10 м;
- Вычислить разности $D_{h_{i-0}}$ для каждого интервала 1, 2, ..., 10;

Компаратор пригоден к применению, если отклонение отражателя по оси H не превышает ± 15 мм.

5. Определение расстояния до реперной точки:

- Установить на инструментальный стол компаратора теодолит WILD T2 с дальномером DISTOMAT WILD DI 2002;
- Линейкой измерить высоту дальномера h_d ;
- Дальномером измерить расстояние до реперной точки компаратора
- Расхождение отсчетов до реперной точки не должно превышать 0,2 мм;
- Вычислить горизонтальное расстояние до реперной точки;

$$D_{1.гориз.} = \sqrt{D_{1.}^2 - (h_0 - h_i)^2}; \quad (1)$$

- Включить УЦО-210 и установить начальное значение линейной координаты реперной точки (5.3).

6. Определение СКП компаратора:

- Установить на инструментальный стол теодолит WILD T2 с дальномером DISTOMAT WILD DI 2002;
- Включить УЦО-210 и выполнить привязку реперной точки (5.4);
- Дальномером измерить расстояние до реперной точки и вычислить его горизонтальное проложение;
- Записать показание линейной координаты УЦО-210 и занести результаты измерений в протокол поверки (таблица 3);
- Повторить измерения, перемещая отражатель через 1 м;
- Для каждой перестановки отражателя (n) вычислить разности Δ_i ;

$$\Delta_i = D_{\text{изм.гор.}} - D_{\text{комп.}} \quad (2)$$

- Вычислить расстояние до реперной точки, установить его в УЦО-210 (5.3) и записать в паспорт компаратора;

$$D_{\text{реп}} = D_{\text{реп.нач}} + \Delta D_{\text{реп}} \quad (3)$$

$$\Delta D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i; \quad (4)$$

- Вычислить СКП компаратора с учетом исправленного расстояния до реперной точки .

$$m_{\text{комп.}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2}; \quad (5)$$

В табл. 2 приведен пример определения СКП компаратора.

Начальные установки УЦО -210: $D_{\text{реп.нач.}}=2001,8$; $K=0,118204$.

Таблица 2

Установка компаратора	0-2	0-3	0-4	0-5	0-6	0-7	0-8	0-9	0-10	0-11	0-12
Эталонное измерение, $D_{\text{эт.}}$ (мм)	2001,8	3039,2	4070,5	5066,6	6032,7	7056,9	8021,6	9012,2	10024,4	11010,9	12007,8
Поправка, $\Delta D_{\text{н}}$ (мм)	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
$D_{\text{эт.гор.}}$	2001,3	3038,8	4070,2	5066,4	6032,5	7056,7	8021,5	9010,1	10024,3	11010,8	12007,7
Измерение компаратора, $D_{\text{комп.}}$	2002,0	3039,1	4070,3	5066,1	6032,3	7056,7	8021,4	9010,2	10024,4	11011,3	12008,4
$\Delta_i = D_{\text{эт.гор.}} - D_{\text{комп.}}$	-0,7	-0,3	-0,1	+0,3	+0,2	0	+0,1	-0,1	-0,1	-0,5	-0,7
$\Delta_i = \Delta_i' - \Delta D_{\text{реп.}}$	-0,5	-0,1	+0,1	+0,5	+0,4	+0,2	+0,3	+0,1	+0,1	-0,3	-0,5
Δ_i^2	0,25	0,01	0,01	0,25	0,16	0,04	0,09	0,01	0,01	0,09	0,25

$$\Delta D_{\text{реп.}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{-1,9}{11} = -0,2 \text{ мм};$$

$$m_{\text{комп.}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2} = \sqrt{\frac{1,17}{10}} = \pm 0,34 \text{ мм};$$

$$D_{\text{реп.}} = D_{\text{реп.нач.}} + \Delta D_{\text{реп.}} = 2001,8 - 0,2 = 2001,6 \text{ мм};$$

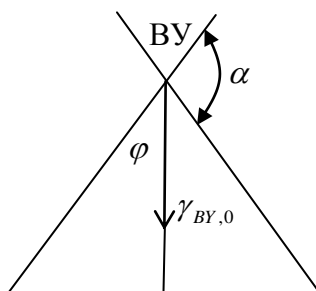
© А.В. Березовский, 2006

МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ РАДИУСОВ В СУЩЕСТВУЮЩИХ КРИВЫХ И ЗАКРУГЛЕНИЯХ

При каждом виде ремонта пути (текущем, среднем, капитальном) выполняется соответствующее им геодезическое сопровождение, а именно – инструментальная съемка и нивелирование пути. По результатам этих работ (геодезической информации) составляются продольный и поперечный профили и рассчитываются кривые для постановки их в проектное положение. При эксплуатации пути съемку кривых производят с целью проверки их состояния и расчета рихтовки (выправки) сбитых кривых. Расчет выправки сбитых кривых (снятых способом Гоникберга Н.В., или Лютца А.Ф., или Моргунова Н.Ф., или другими) производят методом "стрел изгиба" кривых. Эти способы расчета сложны, трудоемки и реальны только на момент съемки, они не эффективны в ремонтных работах и имеют низкую точность из-за большого количества линейных и угловых измерений, что убедительно подтверждается математическим анализом обработки результатов съемки кривых, выполненных способами "стрел изгиба" (Матвеев С.И. Диссертация на соискание ученой степени д.т.н., М., 1992). По полученным "стрелам изгиба" (f_{cp}) вычисляют сдвиги Δf в точках разбивки, а затем по измеренным ординатам (F) находят проектные ординаты по формуле:

$$F_0 = F + \Delta f, \quad (1)$$

В работах [1], [2] и [3] авторами определяется (на основе съемки существующих действующих путей) проектное положение кривой на местности через геодезические координаты с использованием устройств для рихтовки пути (рисунок). Проектный угол поворота и проектные координаты вершин углов (ВУ) и центров кривых вычисляются по формулам (2-6) через координаты и дирекционные углы точек 7, 8 и 11, 12 и 3, 4, 2, 5, 1, 6 (рисунок).



$$Q = (a^2 - b^2 - l_1^2) / 2l_1, \quad (4)$$

где $l_1 = \sqrt{d^2 - (a-b)^2}$, расстояние по перпендикуляру между полухордами a и b .

Радиус круговой кривой вычисляется по формуле

$$R_1 = \sqrt{Q^2 + a^2} \text{ или } R_2 = \sqrt{Q_1^2 + b^2};$$

$$R_{cp} = R_1 + R_2 / 2, \quad (5)$$

а также из решения системы уравнений (11), с изменением номеров точек.

Следует заметить, что при вычислении радиуса кривой, в данном способе, необходимо соблюдать перпендикулярность расположения хорд А, В и С и обратной биссектрисы, которая вычисляется через дирекционные углы по зависимостям:

$$(\gamma_{BY;0} \pm \gamma_{ixxxop}) \pm 90^0 = \sigma',$$

где $\gamma_{BY;0} = \gamma_{12,11} \pm \varphi$, и регламентируется при оценке точности m_R (в горизонтальных кривых) по формуле

$$m_{R_i} = \sigma' R_i / \rho' \leq 10m, \quad (6)$$

с учетом стандартов радиусов.

Далее по известным зависимостям [5] вычисляются координаты центра кривой (О) и элементы кривой Т, Б, а именно:

$$\varphi = 90^0 - \alpha/2; T = R/tg\varphi; B = R(cos\varphi - 1);$$

и дирекционный угол $\gamma_{By,0}$, т.е.

$$\gamma_{(By;0)} = \gamma_{(3,4)} \pm 90^0, \text{ или } \gamma_{(By;0)} = \gamma_{(12,11)} \pm \varphi, \quad (7)$$

а далее

$$X = X_{BY} \pm \Delta X_{B+R_{cp}}; Y = Y_{BY} \pm \Delta Y_{B+R_{cp}}, \text{ а}$$

$$\Delta X_{(B+R_{cp})} = (B + R_{cp}) \cdot \cos \gamma_{(BY;0)} \text{ и } \Delta Y_{(B+R_{cp})} = (B + R_{cp}) \cdot \sin \gamma_{(BY;0)}.$$

Вычислив координаты центра кривой в точке $O_{(x,y)}$ и имея координаты в точке $3_{(x,y)}$ или 1, 2, 4 и так далее на кривой, используем уравнение окружности второго порядка, $x^2 + y^2 = R^2$, или в нашем случае:

$$R^2 = x_3^2 + y_3^2 - 2x_0x_3 - 2y_0y_3 + x_0^2 + y_0^2, \quad (9)$$

Имея n точек на кривой независимых координат, можно составить $n! : 2$ систем уравнений. Число уравнений в конечном счете определяется целью поставленной задачи, решаются они на ЭВМ.

При съемке (обмере) железнодорожных кривых или других закруглений основная задача состоит в определении общей сдвижки эксплуатируемой кривой от проектного положения для последующей выправки железнодорожного полотна. Величина общей сдвижки для каждой точки определяется из формулы:

$$(P \pm \Delta) = R_i - R_{np} \text{ или } R_i = R_{np} + (P \pm \Delta), \quad (10)$$

где R_i - расстояние от центра до точек на кривой;

R_{np} - проектный радиус кривой;

P - сдвижка от переходной кривой;

Δ - сдвижка кривой от эксплуатации.

Формула (10) идентична формуле (1).

Расстояние R зависит от координат центра кривой, за окончательное значение которых можно принять среднее арифметическое из полученных по формулам (3), (5) и (9).

Более надежно координаты центра вычисляют через проектные элементы кривой R_{np}, α_{np} . В этом случае за исходные принимаются точки, расположенные на прямых участках, по которым определяют координаты вершин угла (ВУ). По проектным значениям элементов от координат (ВУ) получают координаты центра О, начала (НК) и конца (КК) кривой. Зная координаты НК и КК, можно определить, имеется ли в данной кривой переходная кривая.

2 способ: для определения радиуса кривой необходимо найти координаты ее центра-точки пересечения линий ОМ и ОN (рисунок), используя систему уравнений (3), где

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= (X_3 - X_{10}) / (Y_{10} - Y_3); K_2 = (X_{10} - X_4) / (Y_4 - Y_{10}); \\ b_1 &= (Y_{10} + Y_3) / 2 - K_1(X_{10} + X_3) / 2; \\ b_2 &= (Y_4 - Y_{10}) / 2 - K_2(X_4 + X_{10}) / 2, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

тогда

$$\left. \begin{aligned} X &= (b_2 - b_1) / (K_1 - K_2); \\ Y &= b_1 + K_1 X = b_2 + K_2 X. \end{aligned} \right\}$$

Зная координаты центра О и угла поворота (ВУ), получим R_{np} по формуле:

$$R_{np} = (O, ВУ) \sin \varphi_{np},$$

где расстояние (О, ВУ) теоретически есть сумма величин $(R_{np} + P_{np} + B_{np})$.

Для удобства выправки кривой точки закрепляют через 20-10 метров как при съемке (обмере) кривой, так и при детальной разбивке проектной кривой.

В заключении необходимо отметить, что:

1. Расчет радиусов и координат центра вертикальных кривых (вогнутых или выпуклых) выполняется по схеме 1-го способа с вычислением l_1, l_2 и т.д., через альтитуды (отметки) координированных точек по кривой, т.е. $l_1 = H_2 - H_1$, $l_2 = H_3 - H_2$ и т.д. [5].

2. Данная методология вычисления радиусов кривых или закруглений может применяться не только в реконструкции и ремонтах на криволинейных участках линейных сооружений (железные дороги, трубопроводы, автодороги и другие), но и при экспертных заключениях по отклонению фактического местоположения осей линейных сооружений от проектного после окончания строительства.

3. Данная разработка по определению проектных радиусов существующих линейных сооружений, особенно железнодорожных, метрополитенов и других скоростных магистралей актуальна и особенно будет востребована при наличии программного обеспечения.

4. Точность определения элементов кривой зависит от погрешности определения координат точек на оси кривой. Так как электронные тахеометры позволяют измерить расстояния с ошибкой до 0,01 м, углы с ошибкой 3"-5" [4], то ошибка определения координат при расстоянии до 500 м будут не более 0,02 м. Такие же результаты по точности определения координат точек на кривой, легко получить, используя современные GPS-приемники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зверев, Л.А. Метод расчета радиусов существующих железнодорожных кривых / Л.А. Зверев // Труды КузбассТИСИС.- Кемерово, 1976.
2. Зверев, Л.А. Вычисление углов поворота сопряженных и обратных кривых [Текст] / Л.А. Зверев // Геодезия и картография. - 1979. - № 7. - с.43-45.
3. Трицкий, Н.Н. Применение тахеометров для обмера железнодорожных кривых [Текст] / Н.Н. Трицкий // Геодезия и картография. - 1982. - № 9. - с.30-31.
4. Научно-технический отчет об исполнительной топографической съемке в цифровой модели базового масштаба 1:500. - Новосибирск, НИР СГГА, 2001.
5. Зверев, Л.А. Таблицы для разбивки кривых [Текст] / Л.А. Зверев // Геодезия и картография. - 1979. - № 8. - с.30-32.

© Л.А. Зверев, 2006

К ВОПРОСУ О ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ ВЕСОВ В ДИАПАЗОНЕ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР

Утверждение типа средств измерений является видом государственного метрологического контроля и проводится в целях обеспечения единства измерений в стране. Решение об утверждении типа принимается Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии по результатам испытаний, проводимых государственными центрами испытаний средств измерений (ГЦИ СИ). При испытаниях средств измерений для целей утверждения типа проверяют их соответствие технической документации и метрологических, а так же технических характеристик средств измерений требованиям распространяющихся на них нормативных и эксплуатационных документов.

Одним из сложных в реализации вопросов является подтверждение сохранности метрологических характеристик весоизмерительных устройств в диапазоне температур. Если для торговых, складских, крановых и других типов весов эта задача решается помещением испытываемых весов в термо-крио-камеры, то для весов с большими пределами измерений и габаритами (автомобильные и вагонные весы, для взвешивания в статике и динамике – большегрузные весы, далее БВ) эта задача в большинстве случаев не может быть решена подобным образом.

В мировой практике диапазон рабочих температур БВ, как правило, не превышает $-10 \dots +40$ °С. При этом огромный практический опыт их эксплуатации позволяет ограничиться проведением однократных испытаний, а диапазон рабочих температур подтверждать расчетным способом на основе результатов испытаний модулей, из которых состоят весы, как изложено в [2].

Для климатических условий России необходимо расширять диапазон рабочих температур вновь утверждаемых типов БВ в сторону отрицательных значений вплоть до -50 °С.

Кроме того, необходимо отметить следующие аспекты отечественного проектирования и производства БВ в настоящий момент, которые делают вопрос о проведении испытаний БВ в диапазоне рабочих температур особенно актуальным.

Как было отмечено в [1], более 70% новых типов БВ (в особенности единичных экземпляров) представляют на испытания небольшие фирмы, не имеющие собственной производственной базы и средств метрологического обеспечения, а самое главное – профессиональных кадров. Вследствие этого отсутствует тщательная проработка конструкции весов, не проводятся необходимые испытания на стадии разработки, упрощаются конструкции весов, зачастую повторно используются металлоконструкции выработавших свой ресурс механических весов.

Наиболее достоверным способом подтверждения метрологических характеристик большегрузных весов в диапазоне рабочих температур являются натурные испытания в летнее-зимний период в условиях естественной эксплуатации. В ходе таких испытаний не допускается какое-либо вмешательство в метрологические характеристики весов с целью их корректировки. Проведение подобных испытаний случается достаточно редко, чаще в регионах Урала и Сибири. Высокая стоимость подобных испытаний и их большая продолжительность приводят как разработчиков, так и организации, проводящие испытания, к другим подходам.

Один из этих подходов изложен в МР 76 МОЗМ [2].

Суть метода заключается в разделении исследуемых БВ на составляющие модули, каждый из которых, по отдельности, испытывается или уже был испытан в диапазоне рабочих температур. Этот метод должен применяться в следующих случаях:

- Когда проведение испытаний прибора в целом является сложным или невозможным,
- Когда модули изготавливаются и/или поставляются для продажи как отдельные встраиваемые в прибор единицы,
- Когда заявитель хочет иметь набор модулей, включаемых в утверждаемый тип.

Типовыми модулями являются:

- Силоизмерительные датчики;
- Весоизмерительные приборы (вторичные электронные блоки);
- Связующие элементы, электрические и механические.

Метод применим, если выполнены нижеследующие условия.

Пределы погрешностей модуля M_i при его отдельном исследовании составляют долю p_i предельно допускаемых погрешностей БВ в целом. Эти составляющие погрешности каждого модуля должны относиться к одному классу точности (сравнимому числу поверочных делений), что и исследуемые БВ в целом.

Составляющие погрешности p_i должны удовлетворять следующему соотношению:

$$p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + \dots \leq 1.$$

Рекомендуется, чтобы у каждого модуля составляющая погрешности p_i не превышала 0,7 и не была менее 0,3.

Для удобства пользования в МР76 приводится таблица соответствия, согласно которой, если доли p_i погрешности каждого из модулей не превышают указанных в ней значений, то условие выполнено.

Таблица 1

Эксплуатационные критерии	Силоизмерительный датчик	Электронный индикатор	Связующие элементы и т.д.
Комбинированное воздействие *	0.7	0.5	0.5
Влияние температуры при нулевом показании	0.7	0.5	0.5
Колебание напряжения питания	-	1	-
Дрейф	1	-	-
Влажный нагрев	0.7	0.5	0.5
(*) Комбинированное воздействие: нелинейность, гистерезис, влияние температуры на диапазон измерений. После прогрева, продолжительность которого устанавливается изготовителем, составляющие погрешности при комбинированном воздействии относят к модулям. Знак “ - ” означает “ не применим ”.			

Гармонизировать метод, изложенный в [2], и российские нормативные документы, регламентирующие разработку, производство и эксплуатацию средств измерений больших масс, призвана разработанная и утвержденная во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологической службы (ВНИИМС) программа [3]. Необходимость разработки этого документа была обусловлена невозможностью непосредственного применения положений [2] из-за несовпадения номенклатуры параметров БВ и используемых в них элементов.

В соответствии с [3], для весов с интервалом температур грузоприемного устройства $(T_{г, \max} - T_{г, \min}) \geq 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ процессе испытаний в диапазоне рабочих температур определяют следующие составляющие погрешности весов, связанные с:

- Метрологическими характеристиками весоизмерительных тензорезисторными датчиков;
- Изменениями линейных размеров грузоприемного устройства с грузоприемной платформой и фундамента или основания, на котором установлено грузоприемное устройство, при изменении температуры окружающего воздуха;
- Изменением сопротивления проводов линии связи весоизмерительных тензорезисторных датчиков с весоизмерительным прибором при изменении температуры окружающего воздуха;
- Метрологическими характеристиками весоизмерительного прибора.

Хотя подавляющее большинство испытаний для целей утверждения типа БВ в части подтверждения диапазона рабочих температур проводятся именно по [3], многие положения программы требуют дополнительных исследований.

Так, в частности, открыт вопрос о неравномерном изменении температуры различных частей БВ. При расчете изменения линейных размеров грузоприемного устройства делается предположение, что все части БВ принимают температуру окружающего воздуха, в то время как в зависимости от

конструкции весов закладные рамы и близкие к фундаменту конструкции будут иметь более низкую температуру по сравнению с грузоприемной платформой.

Недостатком метода, изложенного в [3], можно назвать и сложность расчетов по предлагаемой методике, которая делает возможными различные трактовки требований, предъявляемых к результатам и исходным данным для такого расчета, а также недостаточность экспериментальных данных, подтверждающих справедливость метода.

Следует отметить, что в распоряжении представителей организации, проводящей испытания, как правило, имеются лишь крайне скудные и несистематизированные данные об изменении метрологических характеристик БВ в процессе их эксплуатации.

В связи с вышесказанным, требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований изменения метрологических характеристик компонентов (модулей) БВ при влиянии на них предельных значений температуры и градиентов температуры в элементах конструкции БВ. В частности, испытания весоизмерительных датчиков, встраиваемых в весы одновременно при воздействии температуры и невертикальном приложении к ним нагрузки, вызванной изменениями линейных размеров грузоприемного устройства при этой температуре. При этих испытаниях может быть исследована вся измерительная цепь (датчики – соединительные кабели – вторичная аппаратура), при температурах, близких к температурам эксплуатации БВ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цибин И.Г., Тюменцева С.П., Воргасова Э.В.//Измерительная техника. – 2004. – №8. – С.14–17.
2. OIML R76. Non-automatic weighing instruments / Международная рекомендация МОЗМ, 1992.
3. «ТПР 153 – 02. Типовая программа испытаний для целей утверждения типа весов большегрузных для статического взвешивания, работающих в широком диапазоне температур.», ВНИИМС, Москва, 2004.

© А.А. Коллер, И.Г. Цибин, В.Я. Черепанов, 2006

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОПРОФИЛЯ РЕЛЬСА

Определение геодезическими способами микропрофиля рельса является одной из наиболее актуальных задач диагностики пути. В результате воздействия подвижного состава на рельс на поверхности катания возникают различного рода дефекты. Для предотвращения развития дефектов необходим постоянный контроль его микропрофиля. В настоящее время на всей сети железных дорог России работают рельсошлифовальные поезда. Для планирования и контроля их работы необходимо иметь объективную информацию о микропрофиле рельсов и дефектах. Отсутствие объективной информации приводит к тому, что шлифовка выполняется в объеме не соответствующем фактическому состоянию рельсов. Кроме того, для рационального использования РШП необходимо выбирать правильные приоритеты по очередности выполнения работ на различных участках. Решением этой проблемы занимаются многие научно-исследовательские организации в России, включая такие крупные, как НПО «Инфотранс». Имеется несколько образцов путеизмерительных тележек для определения микропрофиля рельсов, однако широкого распространения они не получили.

В Сибирском Государственном Университете Путей Сообщения на базе координатного способа (патент № 2261302) разработана и изготовлена путеизмерительная тележка ПТ «Волна». Прибор в 2004 году сертифицирован (сертификат № 19127) и поставляется на железные дороги России.

ПТ «ВОЛНА» позволяет непрерывно измерять неровности поверхности катания головки рельсов, в том числе такие дефекты, как пробоксовка (код 14.1-2 в соответствии с каталогом дефектов рельсов НТД/ЦП-2-2002), волнообразные неровности (код 40.0), смятие (код 41.0), седловины в зоне сварных стыков (код 46.1) и болтовых стыков (код 47.1), рифли (код 49).

ПТ «ВОЛНА» может использоваться как на оборудованных, так и на не оборудованных автоблокировкой участках железной дороги с укладкой пути железнодорожными рельсами типа РП50, РП65 и РП75.

Принцип работы ПТ «ВОЛНА» основан на координатном способе измерения приращений высот относительно условной плоскости горизонта с использованием тензодатчиков линейных перемещений (сканеров). Определение неровности по высотным отметкам и её длины позволяет выполнять анализ дефектов при различных значениях измерительной базы, которую оператор выбирает в зависимости от поставленной задачи при обработке данных и детализации исследований.

Достоинством ПТ «ВОЛНА» является наличие широких функциональных возможностей, простота в эксплуатации и обслуживании.

ПТ «Волна» состоит из следующих узлов:

- Разборная рама круглого сечения, штанга рамы с одной стороны подвижная и подпружиненная для обеспечения бокового прижатия и контакта колес с рельсами;
- Съёмная платформа, предназначена для крепления контроллера и аккумулятора;
- Четыре колеса с межосевой базой 1 м;
- Ручка для перемещения, имеющая возможность вращения относительно вертикали на 360°;
- Оптический датчик пройденного пути, установленный на метровой межосевой базе;
- Контроллер, установленный на платформе и предназначенный для приема и исполнения команд от карманного персонального компьютера (КПК), считывания информации с датчиков и передачи информации в КПК;
- КПК используется для управления работой ПТ «Волна», накопления и обработки данных, полученных в результате измерений и проведения регламентных работ (установка начальных данных, калибровка, настройка). В процессе движения на экране КПК отображается пройденный путь, показания датчиков, график неровностей.

Технические характеристики:

Диапазон измерений:

- Глубины неровностей, мм ± 5;
- Длины неровностей, м 0,03 – 2,0;
- Расстояний, км 0 – 99,999.

Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений

глубины неровностей, мм ± 0,02.

Вариация показаний при измерении глубины неровностей, мм 0,01.

Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений

длины неровностей, мм ± 10.

Пределы допускаемой относительной погрешности измерений

расстояний, % ± 0,1.

Электропитание от аккумулятора 12 В емкостью 7,2 А·ч.

Ток потребления, А, не более 0,3.

Габаритные размеры (без ручки), мм, не более 1090x1700x300

Масса, кг, не более 27.

ПТ «ВОЛНА» эксплуатируется на открытом пространстве и устойчива к воздействию следующих климатических факторов:

температура окружающего воздуха, °С от минус 10
до плюс 40;

относительная влажность при плюс 35 °С и более низких

температурах, без конденсации влаги, %, не более 95.

Средний срок службы, лет, не менее 6.

Единица младшего разряда (ЕМР_н) датчика сканера, мм 0,005.

Отсечка шага сканера EMR_L , мм	5.
EMR_S оптического датчика пути (дискретность приращения пути), мм	7.
Рабочая скорость движения, км/ч	1-6.
Объем памяти КПК, МБ.....	64.
Время работы без дозарядки, ч, не менее	16.

С использованием ПТ «Волна» на Западно-Сибирской железной дороге выполнен большой объем работ по определению микропрофиля рельсов и планированию работ. Наибольший интерес представляет мониторинг микропрофиля по сети ЗСЖД. Работа выполнена с целью определения динамики изменения характеристик микропрофиля рельсов с течением времени на различных по грузонапряженности и другим параметрам пути. Для этого выбран 21 участок длиной один километр в различных отделениях ЗСЖД. Первые измерения микропрофиля на экспериментальных участках выполнены в апреле 2005 года, повторно на этих же участках измерения выполнены в октябре-ноябре 2005года. На основании полученного материала, изучены особенности развития дефектов, динамика изменения характеристик микропрофиля, а также некоторые закономерности их развития в зависимости от геометрических параметров пути, включая наличие кривых, продольного профиля, а также грузонапряженности. Получены уникальные данные, которые не совпадают или не полностью совпадают с данными, приведенными в нормативных документах по планированию шлифовки рельсов. Результаты мониторинга являются темой отдельного исследования и в данной работе не рассматриваются.

На рис. 1, в качестве примера представлен фрагмент графика микропрофиля рельсов на перегоне «Тягун-Аламбай». При сравнении графиков микропрофиля рельсов, полученных с помощью тележки ПТ «Волна», хорошо видна динамика развития дефекта (18.1). Программа обработки позволяет более детально исследовать любой проблемный участок как по длине, так и по высоте, а также задать базу длины неровности от 0,03 - до 2м. Программа обработки позволяет выполнять наложение и сравнение графиков.

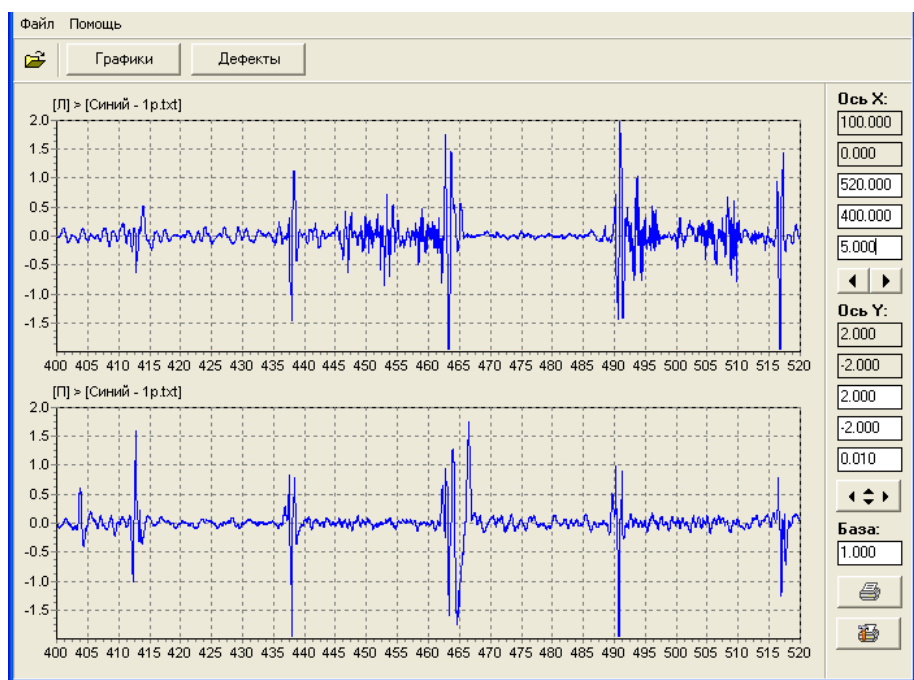


Рис. 1

На рис. 2 представлены графики микропрофиля на перегоне «Мариановка-Лузино».



Рис. 2

На рис. 3 в таблице представлены данные о характеристиках дефектов, включая длину и глубину неровности, ее линейную координату.

файл Помощь					
Графики Дефекты					
№ п/п	Начало, м	Конец, м	Длина, м	Высота, мм	Рельс
1	12.288	12.763	0.475	-1.986	П->
2	12.342	12.858	0.515	-1.753	<-Л
3	13.156	13.549	0.393	-0.591	П->
4	37.217	37.705	0.488	-1.599	П->
5	37.271	37.759	0.488	-1.191	<-Л
6	62.363	62.810	0.448	-0.723	П->
7	62.403	62.851	0.448	-0.909	<-Л
8	86.573	86.871	0.298	-0.577	П->
9	87.264	87.766	0.502	-0.795	<-Л
10	87.332	87.780	0.448	-1.488	П->
11	88.187	88.634	0.448	-0.503	П->
12	112.275	112.763	0.488	-1.705	П->
13	112.315	112.803	0.488	-0.958	<-Л
14	136.376	136.796	0.420	-0.732	П->
15	137.325	137.800	0.475	-2.752	П->
16	137.393	137.881	0.488	-2.950	<-Л
17	138.193	138.627	0.434	-0.548	П->
18	162.268	162.810	0.543	-1.462	<-Л
19	162.322	162.810	0.488	-1.241	П->
20	187.278	187.780	0.502	-1.461	<-Л
21	187.291	187.766	0.475	-1.866	П->
22	188.187	188.648	0.461	-0.664	П->
23	212.329	212.790	0.461	-2.518	П->

Рельс:

рельс <-Л

рельс П->

Н, мм:

0.5 - 3.0

0.5 - 1.0

1.0 - 2.0

2.0 - 3.0

L, м:

0.03 - 1.00

0.03 - 0.25

0.25 - 1.00

Рис. 3

Эксплуатация и обслуживание прибора не требует больших материально-технических затрат. Опыт использования ПТ «Волна» на ЗСЖД показал высокую эффективность, простоту в эксплуатации и надежность измерительной системы. Программное обеспечение позволяет с высокой производительностью обрабатывать и выполнять визуализацию неровностей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии, том1 М-ФГУП Картгеоцентр, 2005г.
2. Нормативно-техническая документация М-ИКЦ «Академкнига», 2004г.
3. Нормативно-техническая документация МПС РФ.- М.: Транспорт,2002г.

© В.В. Щербаков, В.Н. Васёха, 2006

УДК 379.85
А.С. Дульянинов
СГГА, Новосибирск

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КЛИНИНГОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. СОСТОЯНИЕ И ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

В настоящее время клининг-технологии, то есть методы определения и контроля загрязнения помещений, а так же уборки различных помещений, находят все более широкое применение. Контроль микрозагрязнений нужен в аэрокосмической, микроэлектронной, фармацевтической и пищевой промышленности, производстве медицинских изделий, здравоохранении и прочих отраслях [1-7].

Существующие и действующие в настоящее время системы стандартов ГОСТ Р ИСО 14644 «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды», а так же стандарт ГОСТ Р 51890–2002 «Услуги по уборке зданий и сооружений» являются основой метрологического обеспечения отечественных клининговых технологий.

Целью настоящей работы является проведение анализа метрологического обеспечения клининговых технологий и предоставление информации, которую следует учитывать при контроле чистоты поверхностей различных помещений.

Стандарт ГОСТ Р 51870-2002 [1] устанавливает общие технические требования к услугам по уборке (внутри и снаружи) зданий и сооружений, прилегающей территории, по уходу за оргтехникой, компьютерами, мебелью, полами, деталями отделки внутренних и наружных поверхностей зданий, сооружений, а также требования безопасности услуг для жизни и здоровья потребителей, сохранности их имущества и охраны окружающей среды. Этот стандарт распространяется на организации и индивидуальных предпринимателей, оказывающих услуги по уборке.

Стандарт ГОСТ Р 51870-2002 является основополагающим при разработке нормативных документов на конкретные виды услуг по уходу и уборке. В стандарте приведены 11 наименований связанных с этим операций. В большинстве из них методом контроля качества является внешний осмотр. Критерии оценки носят субъективный характер, так как, например, качество влажной уборки помещений проверяют внешним осмотром убранных поверхностей и оценивают как «чистое», «среднее» и «неприемлемое». Оценка «чистое» означает, что убранная поверхность совершенно чистая от загрязнений. В этом случае каждый квадратный метр оценивается в 2 балла. Оценка «среднее» означает, что общая площадь загрязнения, оставшегося после влажной уборки, составляет не более 4 м^2 на 100 м^2 убранной поверхности. В этом случае каждый квадратный метр грязной поверхности получает 1 балл. «Неприемлемое» означает, что общая загрязненная поверхность после влажной уборки более 4 м^2 на 100 м^2 . При этом каждый квадратный метр грязной поверхности получает 0 баллов. Качество влажной уборки определяют делением количества баллов, полученных в результате оценки, на возможное количество баллов, как если бы каждые убранные 100 квадратных метров поверхности получили по 2 балла. Для признания поверхности приемлемой коэффициент ее чистоты должен быть не менее 0,85.

Предложенная в стандарте ГОСТ Р 51870-2002 трехбалльная система оценки качества обладает существенными недостатками: не указано, как сравнивать между собой качество уборки двух разных помещений, если каждое из них проверялось разными специалистами; на сколько выставляемые ими оценки соответствуют действительному качеству уборки и ухода помещений; как следует оценивать качество уборки и ухода одного и того же помещения в случае расхождения оценок специалистов. Отмеченные недостатки являются следствием одного основного недостатка стандарта ГОСТ Р 51870-2002, а именно, отсутствия объективных критериев оценки уборки и ухода помещений,

что связано с отсутствием стандартных методов, способов и приборов соответствующих объективной оценки качества уборки и ухода помещений.

Таким образом, указанные недостатки стандарта ГОСТ Р 51870-2002 ограничивают его применение не только для оценки качества уборки помещений, но и сдерживают разработку других стандартов и нормативных документов на его основе. На мой взгляд требуется существенная доработка и дополнение стандарта ГОСТ Р 51870-2002 методами объективной проверки качества уборки помещений. Это позволило бы устранить все вышеуказанные недостатки. Так же в этот стандарт можно было бы включить нормативные требования, такие как детальная классификация чистоты офисных и бытовых помещений, указание стандартных методов и способов уборки помещений, более детальная классификация типов загрязнения и другие нормативные требования, не регламентированные существующими и действующими нормативными документами.

В настоящее время сделаны определённые шаги в этом направлении. В частности разработана серия стандартов для чистых помещений. Они охватывают широкий спектр важных вопросов, таких как проектирование, испытания и эксплуатация чистых помещений. Первым документом в этой серии стал ГОСТ Р ИСО 14644–1–2000 [2] «Классификация чистоты воздуха», устанавливающий классификацию чистоты воздуха помещений и связанных с ними контролируемых средах только по одному критерию – по концентрации взвешенных в воздухе частиц (аэрозолей). Взвешенные частицы, учитываемые в данном стандарте, имеют размеры от 0,1 мкм до 5 мкм. Распределение частиц с меньшими и большими размерами обычно не предсказуемо, так как может резко изменяться в каждой точке пространства со временем. Концентрации ультрамелких частиц размером менее 1 мкм задаются, но не классифицируются, при помощи U–дескриптора (U-описания), а макрочастиц размером более 5 мкм – при помощи M–дескриптора (M-описания), и также не классифицируются.

Количественной оценкой чистоты по взвешенным в воздухе частицам является классификационное число N ИСО. Максимально допустимая концентрация частиц C_n для каждого данного размера частиц D определяется по формуле

$$C_n = 10^N \left(\frac{0,1}{D} \right)^{2,08}, \quad (1)$$

где C_n – максимально допустимая концентрация (число частиц в кубометре воздуха) взвешенных в воздухе частиц, равных или больших, чем данный размер частиц. Величина концентрации C_n округляется до ближайшего целого числа. При этом используется не более трех значащих цифр;

N – классификационное число ИСО, которое не должно превышать значения 9. Промежуточные числа классификации ИСО могут быть определены с наименьшим допустимым приращением N , равным 0,1;

D – рассматриваемый размер частиц, в мкм;

0,1 – константа, в мкм.

Стандарт ГОСТ ИСО 14644–1–2000 ограничивает классы чистоты пределами от класса 1 ИСО до класса 9 ИСО. Помещения высшей степени чистоты относятся к первому классу, помещения низшей степени чистоты к девятому классу. Обозначение класса чистоты по взвешенным в воздухе частицам для чистых помещений и чистых зон включает:

- Классификационное число, выраженное как «класс N ИСО»;
- Состояние чистого помещения, для которого применяется классификация;
- Рассматриваемый размер частиц и соответствующая концентрация, определенные по формуле (1), где каждый данный пороговый размер частиц находится в пределах 0,1–5,0 мкм.

Для определения концентрации взвешенных в воздухе частиц используется прибор дискретного счета частиц, позволяющий измерить их количество в воздухе с возможностью разделения по размерам. Точки пространства, где производятся измерения, называются точками пробы. Точки проб равномерно распределяются по площади чистого помещения или чистой зоны и устанавливаются на высоте производственной деятельности. В каждой точке отбирается не менее двух литров воздуха за время более одной минуты. Минимальное количество точек проб равно квадратному корню из площади чистого помещения или чистой зоны. По результатам измерения каждой пробы определяют концентрации взвешенных частиц для соответствующей классификации чистоты воздуха.

Таким образом, стандарт ГОСТ ИСО 14644–1–2000 определяет классификационные уровни, которые следует использовать для обозначения чистоты воздуха в производственных помещениях и связанных с ними контролируемых средах, а также стандартный метод контроля и определения концентрации взвешенных частиц. Применение этого стандарта для целей классификации ограничено указанным в нем диапазоном размеров (0,1–5,0 мкм) частиц. Стандарт не определяет классификационные уровни чистоты помещений при наличии в воздухе ультрамелких частиц (которые имеют особо важное значение в полупроводниковой промышленности) и макрочастиц (важны при производстве медицинских изделий, где наличие мелких частиц не существенно), имеющих размеры вне этого диапазона. Он лишь устанавливает методы для определения и обозначения их концентраций.

Следующие в данной серии стандарты ГОСТ Р ИСО 14644-2-2001 [3] «Требования к контролю и мониторингу для подтверждения постоянного соответствия ГОСТ Р ИСО 14644-1» и ГОСТ Р ИСО 14644-4-2002 [4] «Проектирование, строительство и ввод в эксплуатацию» подробно в моём докладе не рассматриваются, поскольку они не несут информации по загрязнённости чистых помещений, а лишь содержат требования к проведению определённых видов работ и контролю.

Новый стандарт ГОСТ Р ИСО 14644-5-2005 [5] «Эксплуатация» устанавливает основные требования к эксплуатации чистых помещений. В их числе требования по уборке чистых помещений, которые включают в себя: классификацию убираемых поверхностей; основные требования к уборке; требования к обработке специфических поверхностей; требования к специальной обработке поверхностей; требования к персоналу, выполняющему уборку; требования к инструкции по уборке; контроль эффективности уборки.

В данном стандарте приведены следующие основные методы уборки, которые применяются в зависимости от состояния чистого помещения и требуемого уровня чистоты: грубая, промежуточная и прецизионная. Данные методы реализуются путём применения различных видов уборки: вакуумная, влажная и уборка салфеткой. Оценка чистоты поверхности после проведения уборки в большинстве случаев выполняется визуальным осмотром. Также могут применяться и другие методы обнаружения загрязнённости, такие как контроль с помощью ленты и контроль приборами обнаружения частиц на поверхностях.

На мой взгляд, основным недостатком данного стандарта является отсутствие критериев оценки качества уборки поверхностей в чистых помещениях. Непонятно, как определить эффективность уборки, если нет определённых норм чистоты поверхностей. Целесообразно в этот стандарт включить нормативные требования, такие как детальная классификация чистоты различных поверхностей чистых помещений, указание стандартных методов и способов уборки чистых помещений, детальную классификацию типов загрязнения и другие нормативные требования, нерегламентируемые существующим стандартом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р №51890-2002 Услуги по уборке зданий и сооружений. Общие технические условия. [Текст]. М.: Изд-во стандартов 2002. – 11с.
2. ГОСТ Р ИСО №14644-1-2000 Чистые помещения и связанным с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха. [Текст]. М.: Изд-во стандартов 2000. – 19с.
3. ГОСТ Р ИСО №14644-2-2001 Чистые помещения и связанным с ними контролируемые среды. Часть 2. Требования к контролю и мониторингу для подтверждения постоянного соответствия ГОСТ Р ИСО 14644-1. [Текст]. М.: Изд-во стандартов 2001. – 4с.
4. ГОСТ Р ИСО №14644-4-2002 Чистые помещения и связанным с ними контролируемые среды. Часть 4. Проектирование, строительство и ввод в эксплуатацию. [Текст]. М.: Изд-во стандартов 2002. – 34с.
5. ГОСТ Р ИСО №14644-5-2005 Чистые помещения и связанным с ними контролируемые среды [Текст]. М.: Изд-во стандартов 2005. – 31с.
6. В. Уайт «Технология чистых помещений. Основы проектирования, испытаний и эксплуатации». М.: Изд-во "Клинтрум", 2002. - 304 с.
7. В. Уайт «Проектирование чистых помещений» М.: Изд-во "Клинтрум", 2005.

© А.С. Дульянинов, 2006

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЧИСТОТЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ЧИСТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Измерение чистоты поверхностей в чистых помещениях - это важная часть любой программы контроля загрязнений, поскольку полученные таким образом данные позволяют персоналу, ответственному за обеспечение чистоты, оценить эффективность процедур очистки деталей и компонентов, рабочих поверхностей, ручных и иных инструментов, устройств для транспортировки, нового оборудования и поступающих снаружи в чистое помещение материалов и т.д.

Несмотря на то, что в чистых помещениях грязь никогда невозможно увидеть взглядом, результат уборки такого помещения может быть различен. Уборка может быть проведена хорошо, а может иметь неудовлетворительный результат. Поэтому эффективность уборки чистых помещений оценивается с помощью специальных методов контроля, определяющих количество загрязнений на поверхности до и после уборки.

Методы контроля уровня загрязнений в чистых помещениях можно разбить на две основные группы: методы, основанные на визуальном осмотре, и методы с использованием специальных устройств для количественной оценки чистоты поверхностей. К первой группе относятся следующие методы:

- Размещение на входе в чистое помещение липких ковриков (покрытий). Метод контроля заключается в определении количества загрязнений по следам от обуви. Если уборка проведена эффективно, то следов ведущих из чистого помещения не должно быть видно. Могут быть заметны только следы, ведущие в чистое помещение, но не из него;

- Протирание влажным протирачным материалом (черного или белого цветов) поверхностей в чистом помещении для сбора возможных загрязнений. Степень загрязнения поверхности определяется в таком случае по количеству загрязнений, собранных материалом;

- Осмотр поверхностей чистого помещения с использованием ультрафиолетовых источников света. Этот метод позволяет увидеть флуоресценцию частиц и волокон, находящихся на поверхности (например, таким методом можно обнаружить свечение волокон от одежды, используемой в чистых помещениях).

- Воздействие на поверхность чистого помещения луча света высокой интенсивности, направленного в затемненном помещении под острым углом к поверхности. Таким методом контроля возможно определять загрязнение поверхности чистого помещения мелкими частицами и волокнами.

Очевидным недостатком визуальных методов оценки загрязнённости поверхностей является их субъективность, так различные специалисты могут по-разному оценить чистоту одной и той же поверхности. К тому же в первых

двух, из перечисленных методов, заметным фактором, влияющим на процесс определения загрязнений, являются силы адгезии, удерживающие частицы на поверхности.

Вторая группа методов по оценке чистоты поверхностей включает в себя следующие методы:

- Нанесение на поверхность липкой ленты, с последующим ее удалением, и подсчет, прилипших к её поверхности, частиц с помощью микроскопа;

- Подсчет частиц с использованием оптического счетчика - в жидкости или в воздухе - в зависимости от среды, которая применяется для того, чтобы доставить в измерительный прибор частицы, предварительно удаленные (с затратами некоторой энергии) каким-либо способом с контролируемой поверхности. Например, в некоторых случаях, для определения загрязнённости изготавливаемой продукции, используют ультрачистую воду, счетчик частиц в жидкости, ультразвуковой излучатель и емкость для воды, достаточно большую для того, чтобы в нее поместился контролируемый объект.

После измерения чистоты воды, залитой в резервуар, в него помещают исследуемую деталь и на определенное время включают ультразвуковой излучатель на фиксированной частоте. Затем вода вновь пропускается через счетчик частиц в жидкости. Сравнение результатов измерений до и после обработки детали позволяет оценить чистоту ее поверхности.

Преимуществом такого подхода является возможность измерения уровня чистоты всей поверхности контролируемой детали или изделия. К недостаткам следует отнести косвенный характер измерений, поскольку на результат могут влиять как эффективность транспортировки частиц, так и возможные изменения их физических или химических свойств вследствие погружения в воду или воздействия ультразвука.

Другим примером является оптический счетчик частиц со специальной измерительной головкой. Струя воздуха под давлением попадает внутрь измерительной головки и проходит над измеряемым участком поверхности. На центральной оси измерительной головки расположен выходное отверстие, соединенное с источником разрежения (прибором). Частицы с поверхности эффективно засасываются в него и попадают в счетчик аэрозолей. Преимуществом этого способа является возможность проведения измерений чистоты любого плоского участка поверхности. К очевидным недостаткам следует отнести зависимость точности измерений от условий окружающей среды вокруг контролируемого объекта. Другим заметным фактором, влияющим на процесс измерений, являются силы адгезии, удерживающие частицы на поверхности. Практически уже частицы диаметром менее 1,0 мкм трудно удалить с поверхности, а если при этом частицы несут электростатические заряды, то лишь незначительная часть таких частиц оторвется от поверхности и достигнет счетчика. Третьим фактором, влияющим на результаты измерений, являются индивидуальные особенности техники измерений конкретного оператора. Поскольку измерительная головка

перемещается вручную, результат измерения может зависеть как от скорости, с которой перемещается головка, так и от того, насколько плоской является контролируемая поверхность.

Все рассмотренные методы имеют один общий недостаток: их результаты нельзя считать полностью объективными, поскольку отсутствует непрерывность контроля загрязненности и недостаточна быстрота проводимых анализов, вследствие чего снижается точность определения эффективности уборки поверхностей.

Таким образом, проведенный анализ существующих методов контроля загрязненности поверхностей чистых помещений, позволяет сделать вывод, о необходимости разработки нового метода и приборов, которые бы удовлетворяли всем требованиям объективной оценки загрязненностей поверхностей в современных чистых помещениях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р ИСО №14644-5-2005 Чистые помещения и связанным с ними контролируемые среды [Текст]. М.: Изд-во стандартов 2005. – 31с.
2. В. Уайт «Технология чистых помещений. Основы проектирования, испытаний и эксплуатации» М.: Изд-во "Клинтрум", 2002. - 304 с.
3. В. Уайт «Проектирование чистых помещений» М.: Изд-во "Клинтрум", 2005.

© А.С. Дульянинов, 2006

УДК (550.83:528.4:621.396):389

А.Г. Прихода, Т.И. Новоселова

ФГУП «СНИИГГиМС», Новосибирск

А.С. Толстиков

ФГУП СНИИМ, Новосибирск

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И СОПРОВОЖДАЮЩИХ ИХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТ

Воспроизводство минерально-сырьевой базы осуществляется за счет открытия новых и доразведки существующих месторождений полезных ископаемых по результатам различных геолого-геофизических исследований, обобщения и интерпретации огромных массивов информации, получаемой различными геолого-геофизическими методами. Качество этой информации зависит от целого ряда факторов: состава (номенклатуры), объема и полноты исследований на изучаемом объекте, соблюдения единых (установленных) требований к результатам этих исследований, качества и состава используемых технических средств и методов, единства и достоверности выполняемых измерений и определений. Все эти вопросы относятся к сфере стандартизации, сертификации и метрологического обеспечения.

Основными направлениями стандартизации в геологической отрасли должны являться стандарты, определяющие требования к следующим видам продукции:

- Различные технические регламенты по содержанию, оценке точности, достоверности и форме представления геолого-геофизической информации, включая проектно-сметную и отчетную документацию, применяемые термины, определения, условные знаки и т.п.;

- Методы и технические средства выполнения геолого-геофизических исследований и сопровождающих их навигационно-геодезических, топографических и картографических работ.

При этом хотелось бы обратить особое внимание на разработку первоочередных нормативно-технических документов, устанавливающих единый порядок ведения работ в сфере недропользования:

- Состав, очередность (стадийность), порядок выполнения работ и основные понятия (терминологию);

- Контроль за соблюдением правил ведения работ, требований существующих стандартов и наличия сертификатов на используемые технические средства и методы;

- Единые требования к приемке геолого-геофизических, навигационно-геодезических, топографических и картографических работ;

- Оптимальный состав работ и применяемых технических средств;

- Положение о супервайзерской службе при проведении основных видов полевых геофизических и сопровождающих их геодезических работ;

- Структура системы стандартизации и метрологии в сфере недропользования;

- Реестры исходных и рабочих отраслевых эталонов единиц физических величин, используемых в геологической отрасли;

- Требования к экологии окружающей среды;

- Методика контроля за соблюдением требований к метрологическому обеспечению средств геофизических, геохимических, геодезических и иных измерений органами государственного геологического контроля.

Одним из основных факторов надежности и достоверности результатов работ по воспроизводству минерально-сырьевой базы является их метрологическое обеспечение. Без целостной, точной и объективной информации выполняемых измерений невозможно обеспечить достоверность конечного результата, а соответственно учета запасов полезных ископаемых.

Основным средством достижения достоверности и точности измерительной информации является метрологическое обеспечение соответствующих измерительных систем и технологий. В этой связи метрологическое обеспечение геофизических и сопровождающих их геодезических работ, связанных с геологическим изучением и использованием недр, должно быть обязательным элементом работ. К измерениям и

определениям при геологическом изучении недр должны предъявляться следующие основные требования:

- Результаты должны быть выражены в установленных (стандартных) единицах;

- Результаты, выраженные в количественных или полуколичественных значениях должны включать погрешность выполняемых работ, не превышающую пределов допустимых значений;

- Методика выполнения измерений и определений должна быть реализована во взаимосвязи с изучаемым геологическим объектом и методикой обработки результатов измерений.

Таким образом, метрологическое обеспечение должно предусматривать следующие основные элементы:

- Перечень измеряемых параметров, характеризующих по своим физическим, физико-географическим и геологическим характеристикам особенности изучаемого объекта и точностных требований к ним;

- Систему (поверочные схемы) эталонов или образцовых средств измерений, предназначенных для воспроизводства и хранения единиц измерений определяемых параметров;

- Систему передачи размера единиц измеряемых параметров от исходных эталонов к рабочим средствам измерений;

- Методику аттестации методов измерения конкретных параметров.

Если измерения попадают в сферу государственного контроля и надзора, то для них должны использоваться средства, внесенные в «реестр средств измерений», и поддерживаться периодической поверкой.

Геолого-геофизическую информацию в настоящее время получают предприятия различных отраслей и различных форм собственности, что в значительной степени затрудняет контроль ее качества со стороны государственных структур и непосредственно заказчиков работ. Поэтому система метрологического обеспечения должна быть единой для всех организаций, работающих на территории Российской Федерации при поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых независимо от их административной или ведомственной подчиненности и форм собственности. При этом контроль за качеством работ должен осуществляться на всех этапах получения геолого-геофизической информации, что во многом определяется состоянием метрологического обеспечения выполняемых работ и строгим соблюдением следующих положений:

- Наличием первичных эталонов измерений физических величин и рабочих эталонов, для поверки и калибровки средств измерения;

- Соблюдением требований к достоверности конечного результата, в том числе метрологическому обеспечению применяемых измерительных средств и методов определений.

Однако, из-за ряда объективных и субъективных причин отраслевая (геологическая) система метрологического обеспечения в настоящее время

практически (за редким исключением) не функционирует [Симаков В.С. и др., 2004] [Глаголев и др., 2003].

Выпускаемая и закупаемая в настоящее время геофизическая и геодезическая аппаратура характеризуется целым рядом параметров, которые необходимо обеспечить при изготовлении, поверке и эксплуатации. Однако дать оценку точности измерения или определения основных параметров не всегда представляется возможным ввиду отсутствия в отрасли единого подхода к аттестации и системе их контроля методик поверки.

Практически очень небольшой процент используемой геофизической и геодезической (спутниковой) аппаратуры обеспечен контролем точности измерений. Сейсморазведочные и электроразведочные станции, как единое целое контролем и поверкой в большинстве случаев не обеспечены. Только в ряде геофизических организаций осуществляют поверку стандартных средств измерений, входящих в комплекс станций [Федотов С.А. и др., 2001].

В свое время Мингео СССР, посчитало целесообразным отнести основную геофизическую аппаратуру (сейсморазведочную и электроразведочную) к индикаторной, что позволило исключить необходимость ее обязательной метрологической поверки, несмотря на то, что входящие в нее основные составляющие (таймер, частотомер, вольтметр, амперметр и др.) являются средствами измерения, объясняя это тем, что конечная информация, получаемая посредством электроразведочной и сейсморазведочной аппаратуры, по формальным признакам не относится к измерительной.

Прекращения проведения государственных и ведомственных приемочных испытаний или процедуры испытаний с целью утверждения типа средств измерения и внесения в государственный реестр, снижения требовательности к калибровке средств измерений, прекращения метрологической аттестации методик выполнения измерений, контроля состояния метрологического обеспечения в производственных организациях - утрачена полная и объективная информация о состоянии метрологического обеспечения используемых аппаратурно-методических средств. В тоже время значимость вопросов, связанных с метрологическим обеспечением, возрастает в связи с расширением круга геолого-геофизических задач при поиске и разведке полезных ископаемых, более жестких требований к оценке месторождений, а также созданием и применением высокоточных аппаратурных комплексов и программных систем.

В настоящее время предусматривается дальнейшее освоение природных ресурсов Сибири и Дальнего Востока, отличающихся почти сплошной залесенностью, отсутствием дорожной сети, суровым климатом и сложным рельефом. Освоение этих регионов возможно при условии применения новейших разработок геофизической техники и технологии, что в свою очередь потребует постоянного совершенства технологии их метрологического обеспечения. Возникла потребность и появилась возможность перейти на принципиально новый подход метрологической аттестации не только непосредственно геофизической и геодезической аппаратуры, но и всей

технологической цепочки того или иного геофизического и геодезического методов.

Точность и достоверность геодезических измерений, выполняемых при геологических и геофизических исследованиях, имеет принципиальное значение, т.к. на их основе вычисляются и вводятся различные корректирующие поправки в геофизические данные, а также осуществляются различные геолого-геофизические построения, отчетные и прогнозные карты, определяющие, в конечном счете, количественные характеристики месторождения [Прихода А.Г. и др., 2001].

В последние годы для навигационно-геодезического обеспечения геологоразведочных работ широкое применение находит технология спутниковых определений координат, основанная на использовании глобальных спутниковых систем. Однако, в залесенной местности, из-за не большого видимого количества спутников или сильного искажения электромагнитных сигналов (явление многопутности сигналов) применение спутниковой технологии становится проблематичным [Антонович К.М., 2006]. Для оптимального решения этой проблемы необходимы специальные методики спутниковых наблюдений, что вызывает необходимость разработки соответствующие методики их метрологической поверки.

При поверке спутниковой аппаратуры в качестве средства воспроизводства измеряемых координат (рабочего эталона) не могут быть использованы в качестве рабочего эталона только приборы повышенной точности, поскольку результаты геодезических спутниковых измерений в большей степени зависят от внешних условий прохождения радиосигналов по трассе «спутник-приемник». Поэтому в качестве рабочего эталона необходимо использовать, в первую очередь сеть эталонных геодезических пунктов, расположенных в различных условиях прохождения электромагнитных сигналов, координаты которых определены с достаточной (необходимой) точностью [Генике А.А. и др., 2003] [Прихода А.Г. и др., 2002].

В условиях современных рыночных отношений, в том числе в области недропользования, особое значение приобретают вопросы сертификации геофизической и геодезической продукции и соответствующих услуг (работ).

С выходом закона «О техническом регулировании» принципиально изменились требования к продукции и услугам (работ). Взамен единой государственной системы сертификации (регулирования) введена система добровольной. Однако, для видов продукции и услуг, связанных с защитой жизни и здоровья граждан, имущества, независимо от форм собственности, и охраной окружающей среды, сертификация является обязательной и регулируется государством. Вполне понятно, что при выполнении всех геолого-геофизических работ выполнение требований по безопасности и охране окружающей среды является также обязательным. Выполнение требований по качеству и эффективности выполняемых работ в области геологии и геофизики относится к области добровольной сертификации, целью которой является повышение конкурентоспособности продукции и выполняемых работ [Федеральный закон, 2002].

Приход на российский рынок зарубежной аппаратуры и работ иностранных фирм, для которых наличие сертификата обязательно, вынуждает отечественных исполнителей сертифицировать свою продукцию, т.к.; отсутствие или неисполнение принятого на добровольной основе сертификата подрывает имидж его владельца.

Однако, несмотря на сложившуюся в геологической отрасли ситуацию нельзя не отметить значимость работ проведенных в последние годы в области сертификации Евро-Азиатским географическим обществом, которым за последние 5 лет сертифицировано более 100 видов продукции.

В Министерстве природных ресурсов РФ, при его очередной реорганизации, ликвидирована служба стандартизации и метрологии, что безусловно отразилось на надежности и достоверности результатов выполняемых геофизических работ. Выполнение Федерального закона «О техническом регулировании», в соответствии с которым все вопросы технических регламентов, т.е. вопросы, касающиеся стандартизации, сертификации и метрологического обеспечения, должны быть реализованы до 2010 г. Для решения этих вопросов необходимо, по-видимому, в аппаратах Министерства природных ресурсов России и Федеральном агентстве по недропользованию создать подразделения, курирующие и обеспечивающие выполнение работ по стандартизации и метрологическому обеспечению. Соответствующие службы должны иметь место также в производственных и научно-исследовательских геолого-геофизических организациях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. М: ФГУП «Картгеоцентр, 2005.
2. Генике А.А., Бланк Л.М. и др. О методах метрологического контроля спутниковых координатных определений. М.: Геодезия и картография – 2002. - № 12 – с.-25-29.
3. Глаголев В.А., Лаврентьева Е.С. и др. Метрологическое обеспечение спутниковых навигационно-геодезических технологий при геолого-геофизических исследованиях. Санкт-Петербург.: Российский геофизический журнал. – 2003. - № 6. – с. 92-99.
4. Прихода А.Г., Лапко А.П. и др. Спутниковое обеспечение сейсморазведочных работ. Новосибирск.: ФГУП СНИИГГиМС, 2002 – 144 с.
5. Прихода А.Г., Лапко А.П. и др. Оценка достоверности определения координат пунктов геолого-геофизических наблюдений. Новосибирск.: ФГУП СНИИГГиМС, 2001 – 122 с.
6. Симаков В.С., Стакало А.В. Роль ВНИИГеофизики в стандартизации и метрологии геофизических исследований. М.: Разведка и охрана недр – 2004. - № 7. – с. 31-36.
7. Федеральный закон «О техническом регулировании» от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ.
8. Федотов С.А., Симаков В.С. и др. М.: Разведка и охрана недр. – 2001 - № 4. – с. 41-43.

© А.Г. Прихода, Т.И. Новоселова, А.С. Толстиков, 2006

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦМР

При создании или обновлении топографических карт стереофотограмметрическим методом одним из этапов обработки снимков является построение геометрической модели местности и её внешнее ориентирование. Если внешнее ориентирование модели выполняется по опорным точкам, то их координаты определяются в результате построения сети фототриангуляции. Но в ряде случаев, например при создании тематических карт, или обновлении карт, при подготовке планово-высотного обоснования используются имеющиеся топографические карты. Однако здесь возникают трудности вследствие того, что карта устарела и четкие контуры не соответствуют современной обстановке, отображенной на снимках. В малообжитых или залесённых районах четких контуров недостаточно для определения необходимого числа опорных точек или они отсутствуют.

Предлагается использовать для внешнего ориентирования геометрической модели ЦМР. Для этого строятся две ЦМР, по измеренным координатам X, Y, Z точек свободной геометрической модели и координатам точек, полученным с карты на один и тот же локальный участок местности с использованием полинома вида:

$$P(X, Y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} \hat{T}_i(X) \hat{T}_j(Y) \quad , \quad (1)$$

где a_{ij} - коэффициенты полинома; $\hat{T}_i(X), \hat{T}_j(Y)$ - ортонормированные полиномы Чебышева, i и j указывают на степень полинома. Далее, путем ориентирования одной модели относительно другой в пространстве, добьёмся их совмещения. В результате можем определить семь элементов ориентирования. Суть решения задачи заключается в следующем.

Предположим, что некоторая функция рельефа $f(X, Y)$ в области Ω представлена скалярным полем высот Z в двух системах координат $X_1 Y_1 Z_1$ и $X_2 Y_2 Z_2$ (см. рис.).

Аппроксимируем оба скалярных поля полиномом вида (1). Таким образом, получим два полинома $P_1(a_{00}, \dots, a_{ij}, \dots, a_{33})$ и $P_2(\bar{a}_{00}, \dots, \bar{a}_{ij}, \dots, \bar{a}_{33})$ N - мерного евклидова пространства E_N . Элементы $\{\hat{T}_i(X) \hat{T}_j(Y)\}$ образуют базис ортонормированного пространства E_N . Тогда P_1 и P_2 являются его векторами. Мерой близости этих векторов служит значение косинуса угла α между ними:

$$\max \cos \alpha = \frac{(\bar{P}_1, \bar{P}_2)}{\|\bar{P}_1\| \|\bar{P}_2\|} \quad , \quad (2)$$

где $(\bar{P}_1, \bar{P}_2)$ - скалярное произведение векторов; $\|\cdot\|$ - евклидова норма.

Обозначим $K = \cos \alpha$ и запишем (2) в координатной форме

$$K = \frac{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} \bar{a}_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij}^2} \sqrt{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \bar{a}_{ij}^2}}. \quad (3)$$

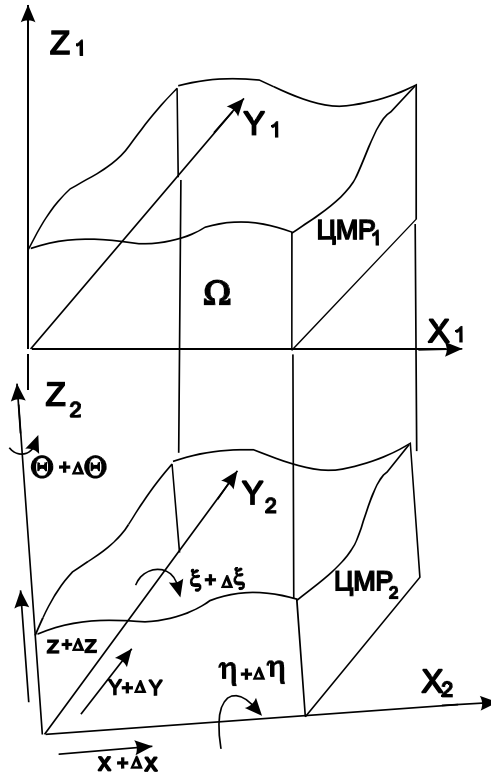


Рис. ЦМР в двух системах координат

Таким образом, обе модели $ЦМР_1$ и $ЦМР_2$ совместятся при достижении максимального значения K .

Положение двух моделей, построенных в пространственных системах координат $X_1Y_1Z_1$ и $X_2Y_2Z_2$, определяется элементами ориентирования: $X_0, Y_0, Z_0, \xi, \varsigma, \theta, t$. Здесь X_0, Y_0, Z_0 - координаты начала системы координат $X_2Y_2Z_2$ в системе $X_1Y_1Z_1$; ξ, ς, θ - углы разворота одной системы относительно другой; t - масштабный коэффициент.

Из семи элементов ориентирования наибольшее влияние на точность совмещения будет оказывать смещение по осям X и Y , а также разворот на угол θ в плоскости XY и масштабный коэффициент t . Углы ξ и ς окажут незначительное влияние из-за их малости. Смещение по оси Z можно исключить, нормируя коэффициенты полиномов.

С целью наиболее точного нахождения элементов внешнего ориентирования геометрической модели в области её построения целесообразно выбрать несколько участков моделирования поверхностей, расположив их по краям этой области. Далее, используя найденные элементы, можно определить в каждом участке необходимое количество опорных точек для внешнего ориентирования геометрической модели.

Для проверки правильности теории проведёны экспериментальные исследования. В качестве основы для построения ЦМР использовалась топографическая карта масштаба 1: 25 000 с сечением рельефа 2.5м. Размер участка моделирования рельефа составил 675 x 675м. Отметки рельефа определялись путём интерполирования между горизонталями в узлах регулярной сетки с шагом 3мм, которая разбивалась дважды, для первой и второй модели. Сетка для второй модели была смещена на 1мм. По полученным исходным данным были построены $ЦМР_1$ и $ЦМР_2$ с элементами ориентирования $X_0 = 475\text{м}$, $Y_0 = 375\text{м}$ и $t = 1$. Остальные элемента принимали нулевые значения. Далее, по составленной программе на компьютере выполнялось совмещение моделей путем линейного перемещения второй модели относительно первой по оси X и Y с шагом 1м. После каждого смещения вычислялся коэффициент взаимной корреляции моделей по формуле (3). Точность определения элементов составила для X_0 - 2м, для Y_0 - 4м.

© В.С. Коркин, 2006

УДК 006: 528.5

В.Д. Лизунов, Г.А. Уставич, В.А. Середович, Л.Г. Куликова, В.Т. Новоевский
СГГА, Новосибирск

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ БОЛЬШИХ ДЛИН

По определению [1,2] стандартов Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ) область измерений длин и систему эталонов метрологического обеспечения разделяют на 3 диапазона: малые длины $1 \cdot 10^{-6} \div 1 \text{ мм}$; средние $1 \cdot 10^{-6} \div 24 \text{ м}$; большие $24 \div 75000 \text{ м}$. При этом существует множество методов и средств воспроизведения и передачи значений единиц длины. Например, в прикладной геодезии широкое применение находят методы высокоточного измерения длин с помощью: геодезических жезлов, мерных проволок и лент, оптико-электронных приборов [3]. Авторы в работе [4] утверждают, что система метрологического обеспечения измерений больших длин обеспечивает надёжную поверку всех средств измерений (СИ) больших длин. В этом следует усомниться особенно при измерении диапазона до 24 м. Наши исследования результатов аттестации базисного прибора на протяжении нескольких лет [5] показывают, что погрешность аттестации используемыми

методами и СИ должна быть приблизительно удвоена. Следует заметить, что аттестация геодезических жезлов производится абсолютными интерференционными методами и имеет высокую точность за счет использования хорошо исследованных источников когерентного излучения. Как указывают авторы [4] предельная погрешность воспроизведения единицы длины на установке высшей точности в диапазоне $24 \div 1000$ м составляет 0,2 мм что для сегодняшнего уровня точности дальномерных измерений (светодальномеров, спутниковых систем, лазерных сканеров) становится недостаточной. Метрологические эталонные СИ и методы передачи значений единицы длины, разработанные в прошлом, XX веке требуют модернизации.

В настоящее время для повышения точности, воспроизводимости, производительности измерений широко используются светодальноммеры, спутниковые системы, лазерные сканеры, в связи с этим в СГГА для проведения научно-исследовательских работ, а также для современного учебного процесса остро встал вопрос метрологического обеспечения таких работ и создания в метрологической службе соответствующих эталонов. В работе [6] приведена поверочная схема для СИ больших длин учитывающая современный уровень и требования оценки погрешности измерений. Одно из наиболее сложных звеньев этой схемы являются СИ и методы передачи при измерениях длины и связи эталонов длины, частоты и времени.

В [7] предложена принципиальная схема и конструкция интерференционного компаратора для исследования и поверки СИ геодезического назначения с диапазоном измерений до 24 м. На компараторе предусматривается возможность исследования и аттестации штриховых мер длины, калибровка и исследование светодальномеров и лазерных сканеров. Как показывают исследования подобных конструкций основные погрешности измерений возникают [8] от нестабильности длины волны лазера, дискретности отсчёта, показателя преломления воздуха, дрейфа нуля интерферометра, погрешности Аббе и выставления меры или прибора, температурные деформации деталей компаратора и измеряемых мер и СИ. Если принять предельную погрешность измерений на компараторе не превышающую на всем диапазоне ± 5 мкм, то анализ погрешности показывает, что основное внимание должно быть уделено минимизации погрешности измерений от несоблюдения принципа Аббе и выставления исследуемого СИ или меры. Наиболее значимая составляющая погрешности измерений может быть вызвана тепловыми деформациями направляющих и корпуса прибора, нагревом лазера, изменением температурного режима измеряемого СИ, изменением показателя преломления на трассе измерения. В наиболее доступных для анализа ситуациях, например при измерении однородных протяженных объектов (измерительные линейки, ленты, проволоки, жезлы) суммарная погрешность от температурных изменений размера L будет равна

$$\delta_s = \{[\Delta\alpha(T-20)]^2 + [\alpha \delta T]^2\}^{1/2} \cdot L, \quad (1)$$

где $\Delta\alpha$ - неопределенность коэффициента линейного расширения объекта; T и δT - температура объекта и погрешность его измерения.

Одной из основных причин влияющих на стабильность результатов измерений при лазерных интерференционных измерениях является неоднородность показателя преломления воздуха на больших трассах измерений вызывающая турбулентность из-за дисперсии показателя преломления воздуха (Δn^2). Для оценки дисперсии в [8] предложено использовать формулу для порядка интерференции:

$$(\Delta N^2) = (\Delta L^2) / \lambda^2 = 4\pi (\Delta n^2) \cdot L \sqrt{\pi R_n^L} / \lambda^2, \quad (2)$$

где R_n^L – размер турбулентного слоя.

Уменьшение этого фактора обычно производится ограничением измерительного плеча интерферометра и созданием в помещении медленно меняющегося градиента показателя преломления. Для исследования показателя преломления на трассе может быть использован рефрактометр, приведенный в [9].

В настоящее время ведется интенсивная работа по настройке специализированного интерференционного компаратора с учетом требований приведенных в [7]. В специальной галлерее, расположенной на значительном удалении от автомобильной трассы подготовлено помещение класса чистоты 2 (максимальное число частиц 0,5 мкм/л – 350, минимальное число частиц 5 мкм/л). Пол помещения выполнен из массивных деревянных плах и покрыт линолеумом, стены и потолок покрыты специальными материалами, которые можно протирать влажной тряпкой. В стены помещения вмонтированы канальные нагреватели и семисторные регуляторы температуры с удобным щитом управления Санкт-Петербургской фирмы ЛИССАНТ и кондиционеры воздуха фирмы PANASONIC. По мере монтажа компаратора будет отрабатываться режим регулирования и достижения требуемых характеристик поддержания постоянной температуры и влажности.

Для монтажа конструкции особое внимание уделено фундаменту. Общая глубина заложения фундамента составляет 1,5 м. в основании фундамента залита бетонная подушка общей длиной 26,4 м, затем последовательно укладывались: 3 слоя песка разделённых рубероидом, пенопласт, железобетон, пенопласт и верхний железобетонный слой выравненный и выставленный по уровню. По контуру фундамента установлены пакеты из шифера изолированные от основного грунта песчаной подушкой.

Одним из условий нормальной эксплуатации компаратора является обеспечение устойчивости его опор на фундаменте. Это условие достигается применением специальных подпятников, которые располагаются под каждым регулировочным винтом опоры. Поэтому перед началом установки опор в тело фундамента с помощью анкерных болтов было установлено 81 подпятника. Соосность их расположения обеспечивалась с помощью натянутой струны с погрешностью не более 2,0 мм. Поверхность подпятника обеспечивает возможность перемещения опор в пределах ± 10 мм.

Высотное положение подпятников в момент их установки контролировалось нивелиром; погрешность установки опор не превышала 1,0 мм. Для нивелирования использовался нивелир Ni 005, способ нивелирования - из середины. Из результатов нивелирования было установлено, что

погрешность после окончательного закрепления подпятников не превышала 0,8 мм.

В настоящее время в изготовлении находятся остальные детали подвижной измерительной каретки. Сделана заявка на остальные покупные изделия. Изготовление и исследование компаратора позволит решить ряд задач научных исследований и повышению точности метрологических работ в СГГА и обслуживаемом регионе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. МИ 2060-90. ГСИ Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне $1.10^{-6} \div 50$ м длин волн в диапазоне $0,2 \div 50$ мкм.- М.: Изд-во стандартов, 1990.
2. ГОСТ 8.503-84. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне $24 \div 75000$ м.- М.: Изд-во стандартов, 1990.
3. Методы и приборы высокоточных геодезических измерений в строительстве / В.Д. Большаков и др.- М.: Недра, 1976.-325с.
4. Методы и средства лазерной прецизионной дальнометрии / А.М. Андрусенко и др.-М.: Изд-во Стандартов, 1987.-224 с.
5. А.В.Куликов Исследование результатов поверки эталонного базисного прибора СГГА / А.В.Куликов, В.Д Лизунов // ГЕО -Сибирь – 2005. Т.6: Сб. материалов науч. конгр., г. Новосибирск, 25-29 апр., 2005г.-Новосибирск: СГГА, 2005.-С.227-231.
6. Поверочная схема СГГА для СИ геодезического назначения.-Новосибирск: Утв. Госстандартом (СНИИМ), 1999.
7. Л.Г. Куликова Особенности построения интерференционного компаратора для исследования и поверки геодезических СИ / Л.Г. Куликова, В.Д. Лизунов, В.А. Середович, В.Т.Новоевский, А.В. Куликов // ГЕО -Сибирь – 2005. Т.6: Сб. материалов науч. конгр., г. Новосибирск, 25-29 апр., 2005г.-Новосибирск: СГГА, 2005.-С.217-222.
8. Ханов В.А., Анализ погрешностей измерительных систем с лазерными интерферометрами // Лазерные интерферометры: Сб. науч. материалов.- г.Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1978.- С.42-54.
9. В.Д. Лизунов, Рефрактометр для измерения преломления прозрачных сред // ГЕО -Сибирь – 2005. Т.6: Сб. материалов науч. конгр., г. Новосибирск, 25-29 апр., 2005г.-Новосибирск: СГГА, 2005.-С.231-236.

© В.Д. Лизунов, Г.А. Уставич, В.А. Середович, Л.Г. Куликова, В.Т. Новоевский, 2006

УДК 006:378

Л.Г. Куликова, В.А. Середович, В.Д. Лизунов, Ю.В. Сурнин, К.М. Антонович,
В.А. Калюжин, О.П. Сучков, О.К. Ушаков
СГГА, Новосибирск

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА СИБИРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ АКАДЕМИИ

Метрологическая служба создана приказом ректора в 1980 г. В 1995 г. аккредитована Госстандартом России на право поверки геодезических средств

измерений Аттестат аккредитации № 008. В 1996 г. создан научно-производственный Центр по метрологии, стандартизации, сертификации и сервисному обслуживанию средств измерений. Имеется лицензия Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

г. Москва № 000744-Р на ремонт средств измерений

Назначение, область применения, эффективность:

- Метрологическое обеспечение научно-исследовательских работ;
- Разработка и изготовление эталонов;
- Разработка нормативной документации по метрологии, стандартизации и систем качества;
- Исследование и поверка средств измерений;
- Ремонт средств измерений топографо-геодезического, картографического и оптического назначения;
- Прокат приборов и оборудования.

Основные научные направления в метрологии:

- Теоретические и экспериментальные исследования по созданию эталонов и поверке геодезических средств измерений;
- Разработка технологии аттестации эталонных пространственных геодезических полигонов, базисов;
- Разработка теоретических основ и методов создания эталонных компараторов для метрологической аттестации специальных геодезических мер длины

В результате созданы:

- Государственные нормативные документы на методы поверки геодезических средств измерений- рекомендации по метрологии государственной системы обеспечения единства измерений (Р 50.2.023. Методы поверки нивелиров, Р 50.2.024. Методы поверки теодолитов и тахеометров);
- Построена и реализована региональная поверочная схема для средств измерений геодезического назначения;
- *Эталонный универсальный компаратор для поверки теодолитов (тахеометров) – рабочий эталон первого разряда.*

Эталонный универсальный компаратор (УКТ), далее по тексту компаратор, предназначен для поверки и калибровки теодолитов по ГОСТ 10529 -96 , а также других типов, соответствующих указанному стандарту, в том числе зарубежных аналогов включая тахеометры.

Получен патент на изобретение 2116626 RU МКИ 6G 01 D18/00. Устройство для аттестации системы измерения вертикальных углов теодолита. Патентообладатель СГГА.

Технические характеристики

Компаратор включает в себя автоколлиматоры и призматические угловые меры - рабочие эталоны (РЭ) 1 разряда.

Диапазон измерений - в горизонтальной плоскости $0^{\circ} - 360^{\circ}$; в вертикальной плоскости $7^{\circ} - 52,5^{\circ}$.

Основная погрешность аттестации углов в горизонтальной плоскости не превышает $0,4''$, в вертикальной - $0,5''$;

Эталонный универсальный компаратор для поверки нивелиров - рабочий эталон первого разряда.

Эталонный универсальный компаратор (далее, компаратор) предназначен для поверки и калибровки нивелиров типа Н-05, Н-1, Н-2, Н-3, Н-10 по ГОСТ10528-90 и равноценных им типов зарубежного изготовления, используемых в геодезии, строительстве и других отраслях. Получен патент на изобретение 2093794 RU МКИ 6G 01 D18/00. Устройство для поверки нивелира / Россия. - №95108630/28; Заявл. 26.05.95; Оpubл. 20.10.97. Бюл. №29. - 3 с. Патентообладатель СГГА.

Условия эксплуатации:

Температура воздуха в рабочем пространстве, $^{\circ}\text{C}$ 20 ± 3

Влажность воздуха, не более, % 70

Атмосферное давление, кПа 101 ± 4

(мм.рт.ст.) 760 ± 30

Изменение температуры в рабочем пространстве не должно превышать 1°C за 1 час работы. Время установления рабочего режима аппаратуры не более 30 мин.

Технические характеристики

Предел измерения $10'$.

Средняя квадратическая погрешность измерения угла i нивелира $0,15''$.

Базис пространственный эталонный им. О.П. Сучкова - рабочий эталон второго разряда.

Базис является единичным средством измерений и предназначен - в условиях, приближающихся к эксплуатационным для поверки средств измерений длины и плоского угла (светодальномеров, тахеометров, нивелиров, измерительных лент, буссолей, навигационной и геодезической спутниковой аппаратуры).

Принцип действия Базиса заключается в определении его метрологических параметров (длин линий, высот, угловых размеров и приращений координат) рабочими средствами измерения (СИ) и сравнения полученных значений с эталонными значениями соответствующих параметров Базиса.

По линии Базиса заложено двадцать два сваеанкерных центра (восемнадцать центров заложены в одном створе и по два центра на первом и восемнадцатом центрах перпендикулярно створу, с двух сторон от створа, на расстоянии 24 м от створа) по типу фундаментальных реперов на глубину 6,8 м. На верхней поверхности каждого центра смонтированы (накручены) центрировочные столики с установочными винтами.

Построен в 1976 году, усовершенствован в 1994 г. Контрольные измерения выполнялись ежегодно до 1992 года, после 1992 – один раз в 2 года.

Основные технические характеристики

Диапазон измерений длин линий D, м.....от [12, 24,48] до 1104
 Абсолютная погрешность Базиса при доверительной вероятности 0,95 при температуре от минус 10 до плюс 30 °С, δD , мм, на длине (интервале):

0-192 м $\pm 0,5$

192-1104 м..... $\pm 1,0$

Базис эксплуатируется на открытом воздухе по гр. Д1 ГОСТ 12997, со следующими уточнениями:

Температура окружающей среды, °С (20^{+20}_{-40}) ;

Верхнее значение относительной влажности

Без конденсации влаги, %.....98;

Атмосферное давление, кПа (100^{+5}_{-15}) ;

Средний срок службы, лет, не менее 60.

Номинальные значения длин линий Базиса (bi 01÷bi18), м ...12, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168, 192, 408, 420, 648, 660, 888, 900, 1091, 1104.

Допускаемая «невязка» при нивелировании, мм..... $0,3\sqrt{n}$,

где n – количество штативов в ходе.

Допуск створности пунктов Базиса, мм, в диапазоне:

От 24 до 500 м ± 50

От 500 до 1104 м ± 100

Высота центра над уровнем земли, м.....1,2

Общий уклон трассы, не более.....1/20

Полигон геодезический эталонный – рабочий эталон второго разряда.

Полигон является единичным средством измерений и предназначен - в условиях, приближающихся к эксплуатационным, для хранения и передачи рабочим средствам измерений (СИ) размера единиц длины, плоского угла и напряженности гравитационного и магнитного полей Земли посредством следующих метрологических параметров: геоцентрических координат, разностей геоцентрических координат, плоских прямоугольных координат и их разностей в проекции Гаусса-Крюгера, длин линий, горизонтальных и вертикальных углов, астрономических широт, долгот и азимутов, составляющих отклонения отвеса в плоскостях меридиана и первого вертикала, высот квазигеоида, нормальных высот, разностей нормальных высот, ускорений силы тяжести и магнитных азимутов.

Полигон представляет собой специальную спутниковую геодезическую сеть (ССГС) рис. 1, и базу данных в виде модели локального гравитационного поля Земли (ГПЗ). Геодезическая сеть Полигона ССГС создана спутниковым методом.

Модель локального ГПЗ получена путём совместной математической обработки традиционных геодезических данных и результатов спутниковых измерений, выполненных на Полигоне. Геодезические данные для вывода ГПЗ в основном заимствованы из высокоточных геодезических измерений прежних лет (нивелирных, астрономических и гравиметрических), произведенных на

территории г. Новосибирска и области при создании государственной координатной (плановой и высотной) и гравиметрической основы страны.

Сеть состоит из 20 пунктов. Четырнадцать пунктов сети заложены и координированы СГГА. Остальные 6 пунктов, являясь пунктами государственной координатной основы, выполняют вспомогательную роль промежуточных геометрических точек, через которые передаются координаты на удаленные пункты Полигона. Данные этих шести пунктов участвуют в выводе модели локального ГПЗ.

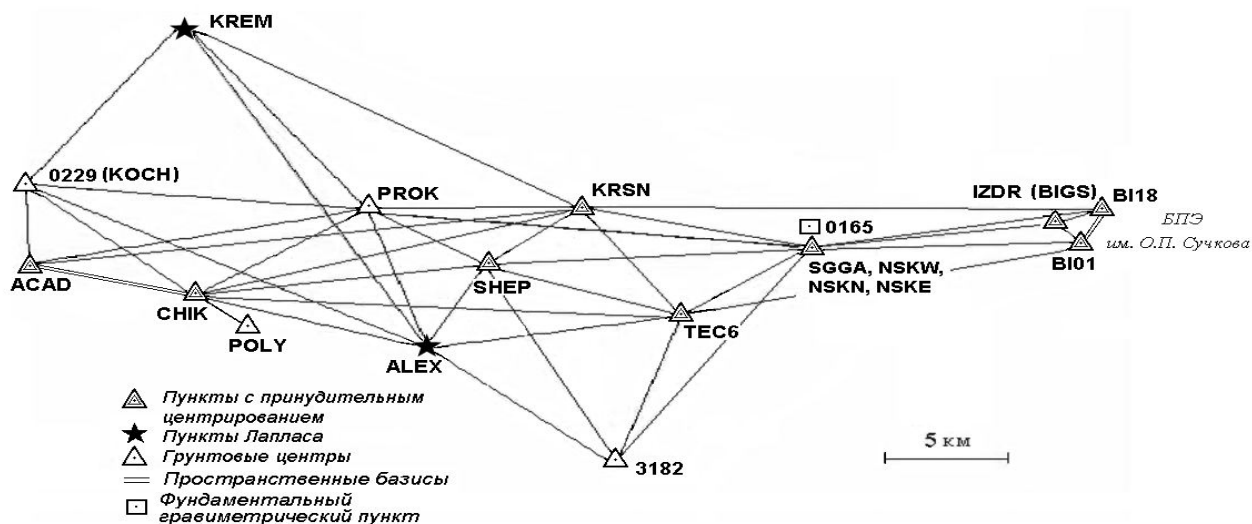


Рис. 1. Специальная спутниковая геодезическая сеть Полигона

Полигон построен в 1995-2002 годах.

Полигон эксплуатируется на открытом воздухе по гр. Д1 ГОСТ 12997, со следующими уточнениями:

Температура окружающей среды, °С	от минус 10 до плюс 30,
Верхнее значение относительной влажности без конденсации влаги, %	98;
Атмосферное давление, кПа	от 85 до 105,
Средний срок службы не менее	60 лет.

Основные технические характеристики Полигона приведены в табл. 1.

В настоящее время проводятся работы по созданию:

- Интерференционного компаратора-эталоны первого разряда для поверки и испытаний высокоточных геодезических средств измерений (трехмерных лазерных сканеров, лазерных светодальномеров, кодовых нивелиров и реек, инварных проволок и лент и др.), научные основы которого были разработаны по ГРАНТУ Минобразования России;
- Лаборатории с постоянно-действующей станцией для приёма сигналов и обработки GPS – измерений.

Таблица 1

Наименование параметра	Диапазон измерений параметра	Абсолютная погрешность параметра при доверительной вероятности 0,95
Основные параметры		
1. Геоцентрические координаты X, Y, Z	по X : от 4,3 до 4,9 Мм, по Y : от 3,6 до 3,7 Мм, по Z : от 5,1 до 5,2 Мм	$\delta_X=0,1$ м, $\delta_Y=0,1$ м, $\delta_Z=0,2$ м
2. Разности геоцентрических координат $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$	по ΔX : от 1 до 6×10^4 м, по ΔY : от 1 до 3×10^4 м, по ΔZ : от 1 до 2×10^4 м	$\delta_{\Delta X} = 4$ мм, $\delta_{\Delta Y} = 6$ мм, $\delta_{\Delta Z} = 12$ мм,
3. Параметры модели локального ГПЗ	район Полигона	$\delta_v = 80$ мм
4. Ускорения силы тяжести на опорных пунктах g	от 9,81 до 9,82 м/с ²	$\delta_g = 1 \cdot 10^{-7}$ м/с ²
5. Магнитные азимуты A_m	от 0 до 360°	$\delta_{A_m} = 8'$
Производные параметры		
6. Геодезические координаты B, L, H	по B : от 54°50' до 55°08' по L : от 82°15' до 83°15' по H : от 76 до 126 м	$\delta_B = 0,0004''$, $\delta_L = 0,0003''$, $\delta_H = 0,03$ м
7. Плоские прямоугольные координаты x, y в проекции Гаусса-Крюгера	по x : от 1 до 3×10^4 м, по y : от 1 до 6×10^4 м	$\delta_x = 14$ мм, $\delta_y = 10$ мм,
8. Разности плоских прямоугольных координат $\Delta x, \Delta y$ в проекции Гаусса-Крюгера	по x : от 1 до 3×10^4 м, по y : от 1 до 6×10^4 м	$\delta_x = 12$ мм, $\delta_y = 8$ мм
9. Длины линий D	от 1 до 6×10^4 м	$\delta_D = 14$ мм
10. Горизонтальные углы Q	от 0 до 180°	$\delta_Q = 1'' \cdot (D(\text{км})/3)$
11. Вертикальные углы h	от -0°01' до 2°20'	$\delta_h = 2'' \cdot (D(\text{км})/3)$
12. Астрономические долготы λ	от 82°10' до 83°15'	$\delta_\lambda = 1''$
13. Астрономические широты φ	от 54°40' до 55°10'	$\delta_\varphi = 1''$
14. Астрономические азимуты α	от 0 до 360°	$\delta_\alpha = 2''$
15. Дирекционные углы a	от 0 до 360°	$\delta_a = 2''$
16. Отклонения отвеса в плоскостях меридиана ξ и первого вертикала η	от -5'' до +5''	$\delta_\xi = 1''$, $\delta_\eta = 1''$
17. Высоты квазигеоида ζ	от -37 до -34 м	$\delta_\zeta = 10$ см
18. Нормальные высоты N^γ	от 110 до 160 м	$\delta_{N^\gamma} = 10$ см
19. Разности нормальных высот ΔN^γ	от -30 до +40 м	$\delta_{\Delta N^\gamma} = 4$ см
20. Ускорения силы тяжести g в	от 9,81 до 9,82 м/с ²	$\delta_g = 3 \cdot 10^{-5}$ м/с ²

промежуточных точках, не совпадающих с опорными гравиметрическими пунктами		

© Л.Г. Куликова, В.А. Середович, В.Д. Лизунов, Ю.В. Сурнин, К.М. Антонович,
В.А. Калюжин, О.П. Сучков, О.К. Ушаков, 2006

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В КАНАЛАХ ЗОНДИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА

Современные лазерные дальномерные системы уже оснащаются дальномерами 4-го поколения в которых локация ИСЗ производится на 2-х длинах волн. Так уже экспериментально опробирован излучатель с лазером на александрите, работающий на длинах волн 0.75 и 0.375 мкм [1]. Широко используемый YAG:Nd-лазер весьма перспективен для метода двухволновой локации. Его работа достаточно легко реализуется на длинах волн основной с $\lambda=1.06$ и второй с $\lambda=0.53$ мкм гармониками. Представляет интерес сравнительная оценка потерь энергии зондирующего импульса на указанных каналах локации. Сравнительная оценка проводится по четырем параметрам: пропусканию атмосферы, величине энергии принимаемого эхо-сигнала, влиянию обратного рассеяния, отношению сигнал/шум приемников сигналов.

При распространении в земной атмосфере оптический сигнал претерпевает следующие изменения:

- Энергетическое ослабление, обусловленное поглощением атмосферными газами, молекулярным и аэрозольным рассеянием;
- Флуктуациями амплитуды и фазы волны, вызванные случайными неоднородностями показателя преломления воздуха;
- Рефракцией, вызванной вертикальной и горизонтальной неоднородностями атмосферы.

Энергетические потери оптического сигнала из-за аэрозольного и молекулярного рассеяния – один из главных факторов, определяющих искажение и ослабление эхо-сигнала.

Полное ослабление эхо-сигнала в атмосфере

Под незамутненной атмосферой понимают атмосферу, свободную от частиц аэрозолей. В природе такой атмосферы не существует. При наличии облаков и туманов доминирует аэрозольное рассеяние, молекулярным рассеянием можно пренебречь. В пределах спектра излучения лазера коэффициенты молекулярного и аэрозольного рассеяния слабо зависят от длины волны излучения лазера.

Под коэффициентом ослабления среды $\alpha(\lambda)$ понимают коэффициент пропорциональности в законе Бугера-Ламберта

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda) \cdot L],$$

где $\alpha(\lambda) = \alpha_n + \alpha_p + \alpha_R$, а I_0 – начальная интенсивность сигнала, $I(\lambda)$ – интенсивность ослабленного атмосферой сигнала, $\alpha(\lambda)$ – коэффициент полного

ослабления сигнала, $\alpha_{\text{п}}$ - коэффициент молекулярного поглощения, $\alpha_{\text{р}}$ - коэффициент аэрозольного рассеяния, α_{R} - коэффициент молекулярного рассеяния, L - толщина слоя атмосферы.

Молекулярное поглощение в реальной атмосфере пренебрежимо мало по сравнению с молекулярным и аэрозольным рассеянием. Оценку его величины можно провести, используя детальные расчеты для разных длин волн [2]. Здесь лишь отметим, что величина α_{R} в среднем примерно на два порядка меньше величины аэрозольного рассеяния $\alpha_{\text{р}}$. Таким образом, основной вклад в полное ослабление оптического сигнала вносит аэрозольное рассеяние.

Таблица 1

Длина волны, мкм	Полное ослабление $\alpha(\lambda)$, км ⁻¹
0.53	0.38
1.06	0.18

Полное ослабление для дымок с наиболее вероятными значениями параметров микроструктуры $a=(0.05-5)$ мкм, $\Lambda=4$, $L=10$ км [3].

Турбулентность атмосферы

Турбулентное движение воздуха вызывает мелкомасштабные колебания температуры, влажности и давления, которые, в свою очередь, приводят к случайным флуктуациям показателя преломления воздуха. Это приводит к уменьшению когерентности излучения, изменению пространственно-временных параметров пучка и состоянию его поляризации. Изменяется фаза волны, что является причиной изменения траектории луча - углового отклонения от первоначального направления. Происходит расширение пучка и искажение гауссового контура интенсивности. Непосредственное энергетическое ослабление турбулентностью пренебрежимо мало и только при определенных условиях может оказать заметный вклад: при малой апертуре приемной системы, необеспечивающей полного перехвата оптического луча.

Расчет энергии лазерного эхо-сигнала

Энергия сигнала, отраженного уголковыми отражателями, определяется из формулы дальности [5]. Для ее оценки удобно пользоваться выражением потока излучения, поступающего на фотоприемник

$$\Phi_{\text{пр}} = \frac{32 \Phi S_{\text{об}} S_{\text{вх.зр}} \rho_{\text{об}} \tau_{\text{пер}} \tau_{\text{с}}^2 \tau_{\text{пр}} \cos^2(\beta)}{L^4 \pi^2 \theta_{\text{пер}}^2 (\lambda/d \cos \beta + 5 \cdot 10^{-6} \eta)^2} \exp[-2(r/\theta_{\text{пер}} \cdot L)^2],$$

где Φ - поток источника излучения (1ГВт)¹, $S_{\text{об}}$ - площадь объекта (0.75м²), $S_{\text{вх.зр}}$ - площадь входного зрачка телескопической системы (0.28м²), $\rho_{\text{об}}$ - коэффициент диффузного отражения объекта (0.5), $\tau_{\text{пер}}$ - коэффициент пропускания передающей оптической системы (0.7), $\tau_{\text{с}}^2$ - коэффициент пропускания среды оценивается по модели эквивалентной среды, в которой вся

¹ В скобках указаны численные значения параметров, использованных при расчете.

толща атмосферы считается однородной по объему и равна 10км [6] ($\lambda=1.06\text{мкм}$: 0.0196, $\lambda=0.53\text{мкм}$: 0.0016), $\tau_{\text{пр}}$ - коэффициент пропускания приемной оптической системы (0.2), $\cos\beta$ - косинус угла между направлением падающего луча и нормалью к облучаемой поверхности(0°), L - расстояние до ИСЗ($6\cdot 10^3\text{км}$), $\theta_{\text{пер}}$ - расходямость лазерного пучка ($\lambda=1.06\text{мкм}$:0.0582, $\lambda=0.53\text{мкм}$:0.0289), d - линейный размер входной грани блока углового отражателя(10см), η - значение расходямости из-за неточного изготовления призм катафота в угловых сек (1.8) [4], r - расстояние от центра объекта до оси пучка (0.5м).

Исходные и вычисленные значения мощности и энергии световых потоков на двух длинах волн генерации представлены в табл. 2.

Таблица 2

Длина волны излучения, мкм	МОЩНОСТЬ		ЭНЕРГИЯ	
	Нач.поток, Вт	Поток на ФП Вт	Нач.поток Дж	Поток на ФП Дж
1.06	10^9	$5.9\cdot 10^{-4}$	1	$5.8\cdot 10^{-14}$
0.53	$0.5\cdot 10^9$	$1.79\cdot 10^{-4}$	0.5	$1.79\cdot 10^{-14}$

Из приведенных данных видно, что величина эхо-сигнала при прохождении в атмосфере двойного пути до ИСЗ испытывает сильное ослабление около 14 порядков (140дБ).

Расчет величин потоков обратного рассеяния

Расчет величин обратного рассеяния зондирующего излучения весьма трудоемкая и объемная задача [7]. Наша оценка степени влияния обратного рассеяния на величину эхо-сигнала показывает, что помехи, обусловленные обратным сигналом на $\lambda=1.06\text{ мкм}$ в 14 раз меньше чем на $\lambda=0.53\text{мкм}$. В целом величина потока обратного рассеяния на 4-5 порядков меньше величины эхо-сигнала.

Расчет отношения сигнал/шум фотоприемников

Для сравнительного анализа выбран тип фотоприемника оптимальный для указанных длин волн. Для приема импульсных световых потоков малой интенсивности более всего подходят ФЭУ типа ЭЛУ. К ФЭУ предъявлялись требования минимального значения темнового тока при максимуме спектральной чувствительности. Этим требованиям удовлетворяет ФЭУ типа 31 ЭЛУ-ФК. Расчет и сравнение отношений сигнал/шум фотоприемников $\mu=I_c/I_m$ на каналах локации дает значительное преимущество на $\lambda=0.53\text{мкм}$, где $\mu_{0.53}=770000$, по сравнению с $\mu_{1.06}=2300$ на $\lambda=1.06\text{ мкм}$. Здесь I_c - ток на выходе ФЭУ, I_m - величина темнового тока. В целом μ на указанных длинах волн достаточно велико и обеспечивает уверенную регистрацию эхо-сигнала.

Результаты сравнения двух каналов локации представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметр сравнения	Оценка сравнения $\lambda_{1.06}/\lambda_{0.53}$
Затухание в атмосфере	меньше в 2 раза
Величина эхо-сигнала	лучше в 3 раза
Фон обратного рассеяния	меньше в 14 раз
Сравнение по 3-ом параметрам	канал с $\lambda_{1.06}$ лучше в 500 раз с $\lambda_{0.53}$
Отношение сигнал/шум ФП	хуже в 300 раз

Сравнение по четырем параметрам показывает, что канал с $\lambda_{1.06}$ примерно в 1.5 раза более прозрачен чем канал с $\lambda_{0.53}$. Необходимо учитывать некую условность нашей оценки при задании начальных потоков излучения по каналам локации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кравченко Н.И. и др. Зарубежная радиоэлектроника- 1985, №12, с.59
2. Rendorff R.I. et al. Opt.Soc.Am.-1987, v.47, p.176
3. Хинкли Э.Д. Лазерный контроль атмосферы.-1979
4. Кокурин Ю.Л. Лазерная локация Луны. Труды ФИАН- 1977, т.91
5. Климов Ю.М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами.-1978
6. Гуди Р.М. Атмосферная радиация. Ч1.Основные теории.- 1966
7. Донченко В.А.и др. Рассеяние оптических волн дисперсными средами.-1983.

© Б.С. Могильницкий, 2006

УДК 006:681.783.

В.Д. Лизунов, А.В. Куликов

СГГА, Новосибирск

ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ

Дифракционные решётки давно используются в интерферометрии, при спектральных исследованиях, при измерении малых разностей фаз излучения, при измерениях перемещений методом муаровых полос [1,2]. Для таких устройств перемещений дифракционная изготовленная методом голографии или штриховая решётка-шкала изготовленная методом фотолитографии находят широкое применение в линейных и угловых измерениях и серийно выпускаются промышленностью (например, преобразователей типа ПЛФ Новосибирского приборостроительного завода НПЗ). Недостатком таких устройств является наличие индикаторной решётки (решётка-индекс), которая с постоянным зазором перемещается относительно дифракционной решётки.

Широкое распространение источников света с большой длиной когерентности, стабилизацией длины волны и мощности излучения, позволяет использовать амплитудно-фазовые характеристики дифракционных решёток с

синусоидальным профилем в качестве основного элемента для построения интерферометра измерений перемещений. Изготовление решёток производится голографическим методом путём регистрации интерференционной картины, создаваемой двумя когерентными пучками монохроматического излучения (ОКГ) на светочувствительном материале. После соответствующей химической обработки фотоматериала на подложках получают решётки с равностоящими параллельными штрихами синусоидального профиля. На рис. 1 показана схема получения голографических дифракционных решёток.

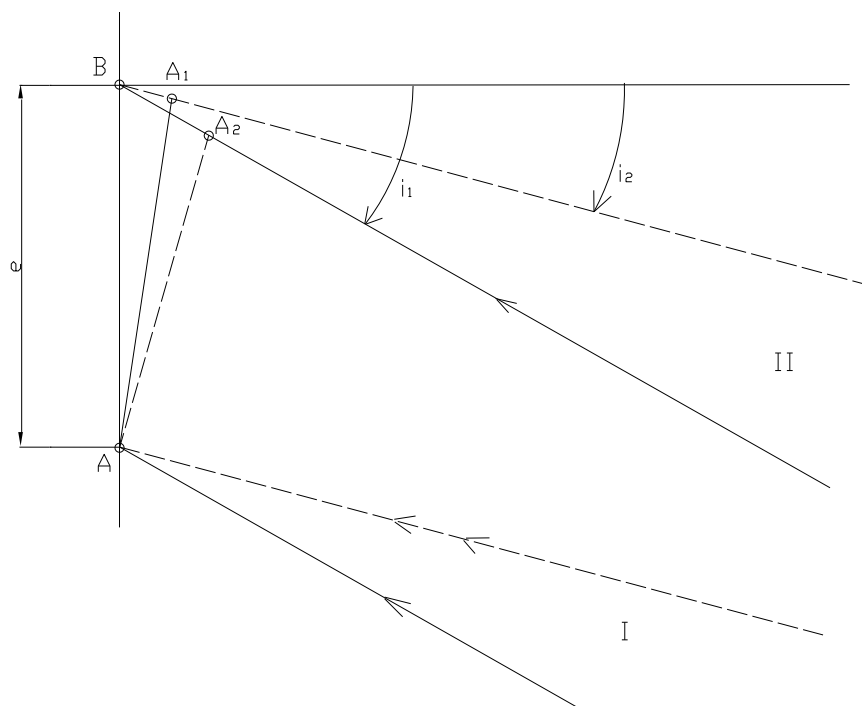


Рис. 1. Получение дифракционной решётки

В результате интерференции двух параллельных пучков I и II, падающих на заготовку под углами i_1 и i_2 , получают равностоящие параллельные полосы. Расстояние $AB = e$ определяется из условия, что разность хода пучков

$A_1B - A_2B$ равна длине волны λ_0 используемого излучения ОКГ, т.е.

$$e (\sin i_1 - \sin i_2) = \lambda_0.$$

Таким методом с использованием вакуумного напыления металла можно получить отражательные решётки- копии (реплики).

Как показал опыт изготовления и исследования дифракционных решёток несмотря на кажущуюся простоту изготовления, качество, разрешающая способность и дифракционная эффективность голографических решёток зависят от ряда факторов, которые не всегда могут быть учтены и исключены в технологии (усыхание фотоэмульсионного слоя, неплоскостность зеркал установки, искажение волновых фронтов в коллиматорах (расширителях), засветки и др.

В результате решётки имеют некоторые отклонения от периодичности и синусоидальной формы штрихов, поэтому инструментальный контур и распределение энергии в спектре не совсем точно совпадает с расчётным.

Качество изготовления штрихов обычно определяют с помощью интерферометров типа МИИ – 4 и микроскопов большого увеличения. Однако такими методами и приборами трудно с высокой точностью определить отклонения от периодичности, а также искажение инструментального контура, особенно для синусоидальных решёток.

Для определения искажения инструментального контура, отклонения от периодичности формы профиля дифракционной синусоидальной решётки выгодно исследовать фронт дифрагировавшей плоской волны прошедшего или отражённого лазерного излучения в области френгоферовой дифракции. Во-первых потому, что решётки в большинстве используются именно в этой области, во вторых с удалением от плоскости решётки фронт волны имеет увеличенные размеры искажений за счёт увеличения пространственной частоты спектра с увеличением расстояния до плоскости регистрации.

Реализация метода была осуществлена на эталонной фотоэлектрической лазерной установке, использующей интерференционную картину дифракции на измеряемом объекте [2,3], где измерялось точное угловое положение экстремумов дифракции используя соотношение

$$l_i = \frac{m_i \cdot L}{\sqrt{d_{cp}^2 \cdot m_i^2 \cdot \lambda^2}},$$

где m_i – порядок экстремумов;

λ – длина волны используемого излучения;

α_{cp} – расстояние от центра дифракционной картины до $i^{го}$ экстремума;

L – расстояние до плоскости регистрации.

При нарушении синусоидального профиля решётки, в спектре изображения появляются кроме $0^{го} +1$ и -1 порядка, $2^{й}$, $3^{й}$ и более порядков. Таким образом измерение интенсивности и расположения порядков спектра позволяют определять дифракционную эффективность, отклонения периода и профиля решётки. Исследования решёток изготовленных в НИИПГ на фотопластинках ВРЛ и измеренных на установках СНИИМ показали, что отклонения формы и периода штрихов ≈ 2 мкм не превышает $0,01 \div 0,05$ мкм в центральной зоне 100 мм. Учитывая относительную простоту изготовления таких решёток и доступность в настоящее время лазерных источников с большой длиной когерентности и монохроматичности, выгодно реализовать преимущества построения двухлучевого интерферометра с амплитудным делением на основе дифракционной решётки для специфического применения, например, для измерения перемещений объектов в плоскости перпендикулярной направлению излучения лазера в частности измерений прямолинейности.

Принципиальная схема измерителя перемещений с дифракционной решёткой представлена на рис. 2.

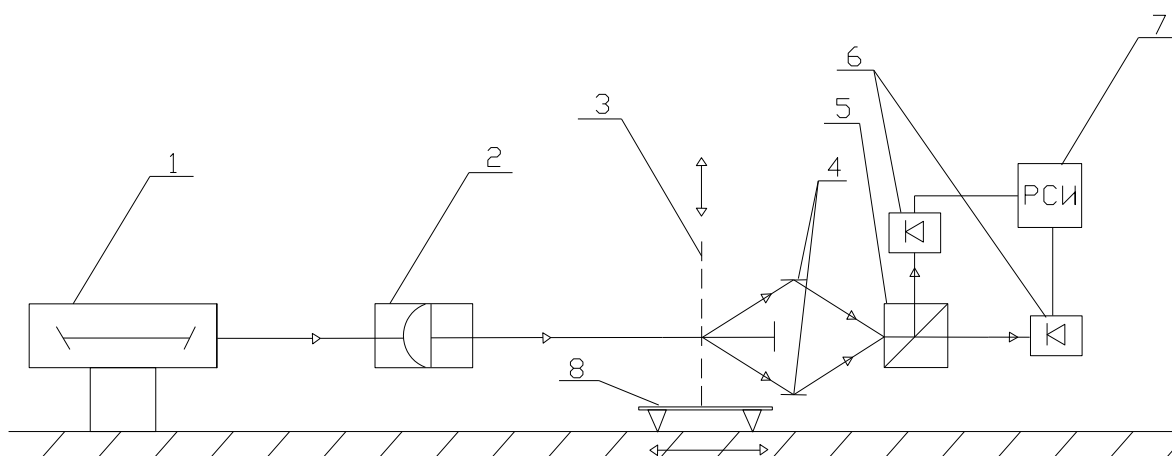


Рис. 2. Принципиальная схема

Источник света He-Ne лазер работающий в одномодовом режиме (1), через коллимирующую систему (2) освещает синусоидальную голографическую решётку (3) с горизонтальными штрихами и расположенную перпендикулярно пучку излучения. +1 и -1 порядки дифракционного спектра полученные после решётки сводятся зеркалами (4) в плоскость полупрозрачного делителя (5), где происходит интерференция пучков. Перемещение решётки в направлении перпендикулярном направлению штрихов решётки и луча источника света вызывает периодическое изменение интенсивности полос интерференционной картины, то есть перемещение полос в плоскости регистрации фотоприёмников (6), реверсивный счётчик полос (7) регистрирует величину перемещения решётки связанной с объектом (8). Смещение синусоидальной решётки на один период соответствует в плоскости регистрации прохождения двух интерференционных полос. Устройства для счёта целых и дробных частей интерференционной полосы в лазерных интерферометрах достаточно хорошо известные и могут быть использованы с некоторой доработкой.

Результаты работы могут быть использованы для контроля решёток используемых в растровых методах измерения перемещений для проведения высокоточного нивелирования, створных измерений, угловых измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Островский Ю.Н., Голографическая интерферометрия / Ю.Н.Островский. -М.: Наука, 1977.
2. Применение отражательных дифракционных решёток в интерференционных схемах для измерения линейных перемещений / Г.П. Рассурова, Ф.И. Герасимов // Оптика и спектроскопия.- Т.XIV, вып.3.- М.: 1963
3. А.С. СССР №508667 Устройство для бесконтактного контроля малых поперечных размеров / В.Д. Лизунов, В.М. Весельев.- Оpubл. 30.06.77.- Заявл. 25.06.73

© В.Д. Лизунов, А.В. Куликов, 2006

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВСПЫШКИ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

Температура вспышки является важным показателем, который определяет теплофизические свойства нефтепродуктов и характеризует их способность к воспламенению при нагреве, а также, способность к распространению пламени при местном зажигании топлив в дизельных двигателях.

На практике этот параметр подлежит обязательному определению согласно ГОСТ 4333-87 и ГОСТ 6356-75 «Методы определения температуры вспышки». Однако рекомендуемые стандартные приборы по своему конструктивному и аппаратному исполнению устарели, так как громоздки и определение температуры осуществляется в течение длительного времени (до 1,5 часов). При этом измерения надо проводить несколько раз (от 2 до 5) для получения результата с требуемой точностью. Таким образом, существующие методики и приборы не дают возможности оперативного определения вспышки на местах эксплуатации масел и топлив. Поэтому актуальной является задача разработки методов оперативного определения температуры вспышки нефтепродуктов. Решение этой задачи может быть связано с уменьшением объема испытуемого нефтепродукта.

Кроме того, уменьшение объемов топлива, смазочных и моторных масел при проведении экспресс-диагностики судовых энергетических установок по определению температуры вспышки обеспечит существенную экономию нефтепродуктов.

В этой связи были проведены экспериментальные исследования температуры вспышки нефтепродуктов с целью разработки экспресс-метода анализа.

Сущность исследований заключается в нагревании пробы нефтепродукта в открытом тигле с установленной скоростью до тех пор, пока не произойдет вспышка паров нефтепродукта над его поверхностью от зажигательного устройства.

Для экспериментов применялся стандартный тигель с возможностью изменения объема испытуемого масла, для чего использовались алюминиевые пластины-шайбы. Объемы, полученные с их помощью составляли: 75; 50; 25; 10; 5 мл.

По результатам экспериментов была построена зависимость температуры вспышки моторного масла от его объема $T = f(V)$ в диапазоне определяемых объемов от 10 до 100 мл., приведенная на рис. 1. Для выявления влияния на температуру вспышки испытания проводились при различных значениях площади испарения масла.

Расхождения температур вспышек при различных объемах, составляли не более $\pm 5^{\circ}\text{C}$, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 4333-87 в части точности результатов испытаний.

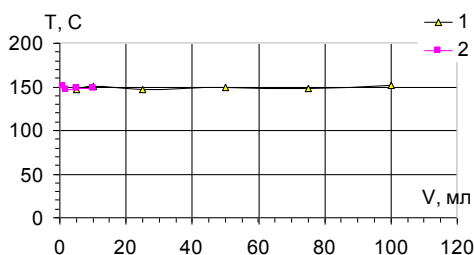


Рис. 1. Зависимость температуры вспышки от площади поверхности тигля:

1 – при $S = 19,6 \text{ см}^2$; 2 – при $S = 4,2 \text{ см}^2$

Из данных рис. 1 видно, что уменьшение объема моторного масла не повлияло на значения температуры вспышки.

Кроме этого, была исследована закономерность изменения температуры вспышки от скорости нагрева масла. Результаты экспериментов приведены на рис. 2.

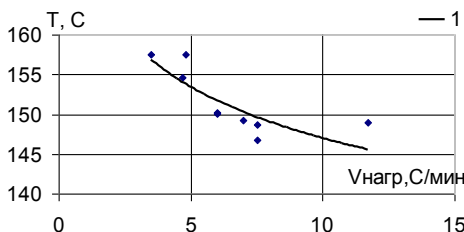


Рис. 2. Зависимость температуры вспышки от скорости нагрева нефтепродукта

Видно, что скорость нагрева масла влияет на значение его температуры вспышки. Было сделано предположение, что на результат определения температуры вспышки влияют конвективные процессы теплообмена в жидкости. Так, увеличение скорости нагрева нефтепродукта может приводить к возрастанию интенсивности тепловой конвекции, что приводит к уменьшению температуры вспышки масла.

Для подтверждения этого было изучено распределение температуры вспышки в зависимости от точки расположения датчика температуры – термопары в тигле с маслом.

Исследования проводились при двух интенсивностях нагрева. Пример распределения температур вспышек в зависимости от точки расположения измерительной термопары приведен на рис. 3.

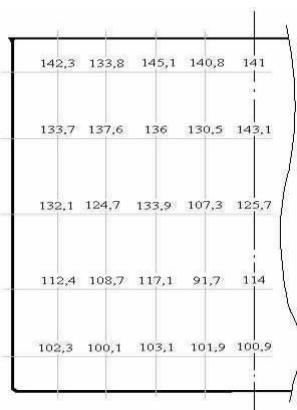


Рис. 3. Распределение температур вспышек $T_{всп}$ в тигле при различном расположении термопары

Из рисунка видно, что разница температур вспышек может достигать до 50°C при разных положениях термопары и интенсивностях нагрева.

Для подтверждения указанных предположений проводилось визуальное наблюдение конвекции в стеклянном тигле. В смазочное масло помещаются мелкодисперсные частицы для наблюдения движения жидкости.

Процесс переноса частиц в масле проходил по следующей схеме: от дна стакана вдоль боковых стенок к верху, затем вдоль поверхности и по оси тигля вниз ко дну. Процесс повторялся по той схеме, пока не происходило вскипание смазочного масла.

При малых скоростях нагрева и в малых объемах конвекция не играет существенной роли, поэтому зависимости температуры вспышки от скорости нагрева практически нет. На рис. 4 приведены эти данные.

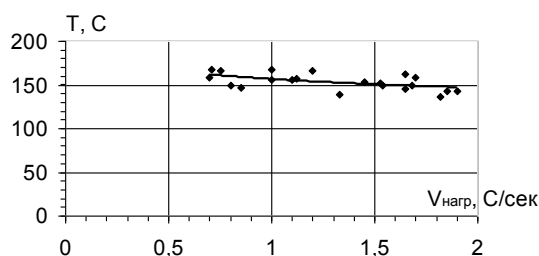


Рис. 4. Зависимость температур вспышек масла от скорости нагрева

Кроме этого осуществлялось экспериментальное исследование температур, при которых происходит вспышка отдельной капли масла, помещенной на алюминиевую пластину.

Измерения производились при разной скорости нагрева пластины с образцом. Это достигалось за счет регулировки напряжения, подводимого к печи.

Среднеарифметическое значение температуры вспышки испытуемого нефтепродукта при испытаниях в отдельной капле составило $T_{всп} = 150 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, показано, что температура вспышки, определенная в разных объемах смазочного масла, в том числе и одиночной капле не меняется и составляет 150 °С.

Основные выводы по исследованиям:

1. Изменение объема масла в диапазоне от 1 до 100 мл не оказывает влияния на результат измерения температуры. Температуры вспышки не изменяются в пределах погрешности измерения $\pm 5^\circ\text{C}$ и остаются равными 150°C, что соответствует стандарту.

2. Установлена зависимость значений вспышки от изменения скорости нагрева тигля. При увеличении скорости нагрева смазочного масла с 4 до 12°C/мин температура вспышки уменьшается в 1,2 раза.

3. Изучено распределение температуры вспышки в тигле стандартного объема. Установлено, что при разных положениях термопары разница температуры вспышки может достигать от 20 до 50°C при разных интенсивностях нагрева.

4. Результаты экспериментов с минимальным количеством масла (капля) подтвердили основные закономерности вспышки с объемами от 1 до 100 мл. Так при расстоянии 8 мм от поверхности смазочного масла температура вспышки остается равной 150°C в пределах ошибки измерения $\pm 5^\circ\text{C}$.

С учетом результатов проведенных исследований разработана конструкция прибора для определения температуры вспышки нефтепродуктов. Он предназначен для экспресс-определения температуры вспышки дизельного топлива, моторных и автотракторных масел и может применяться при оперативном контроле их качества.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шувалов Г.В. Разработка приборов для определения физико-химических параметров трансформаторного масла [Текст]/ А.В. Бондарев, // Материалы междун. науч.-техн. конф. «Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы», посв. 100-летию электротехнического образования Сибири, Новосибирск, 2003. – Новосибирск, 2003. – С. 211-214.

2. Шувалов Г.В. Экономия горючесмазочных материалов при работе двигателей внутреннего сгорания [Текст]/ А.В. Бондарев, И.С. Новиков, [и др.]// Сибирский научный вестник./ Вып. VI. – Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2003. – С. 49-52.

3. Г.В. Шувалов Приборы экспресс-анализа диэлектрических жидкостей [Текст]/ В.П. Горелов, А.В. Бондарев, [и др.]// Физика. – 2004. – Т.47. - № 11. – С. 200-202.

4. Г.В. Шувалов Анализатор температуры вспышки нефтепродуктов/ М.А. Мишагин, А.В. Бондарев [и др.]// 2-я междун. науч.-техн. конф., 8-11 сентября 2004 «Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт» [Текст]: Часть 2/ Под ред. В.П. Горелова, Н.Н. Лизалека, В.В. Охотниковой. – Тобольск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2004. – С. 153-155.

© Г.В. Шувалов, 2006

РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ «КЛАН-1» ДЛЯ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА НЕФТЕПРОДУКТОВ

В докладе рассмотрены вопросы создания и эксплуатации передвижной лаборатории для анализа горюче-смазочных материалов, приведены технические характеристики приборов, входящих в состав лаборатории, приведены результаты практической эксплуатации лаборатории.

С развитием транспортной техники повышаются требования к ассортименту и свойствам нефтепродуктов, их качество обязательно контролируется. Комплекс требований, предъявляемых к параметрам горюче-смазочных материалов (ГСМ) изложен в ряде государственных стандартов, в частности, ГОСТ 2084-77, ГОСТ 305-82, ГОСТ Р 51105-97, ГОСТ 8226-82. В них нормируются эксплуатационные и физико-химические характеристики автомобильных бензинов, дизельного топлива и автотракторных масел.

Однако, качество ГСМ, поступающих к потребителю, часто отличается от стандартного, в основном из-за нарушения условий транспортировки и хранения. Поэтому возникает необходимость постоянного контроля качества ГСМ в местах их хранения и продажи. В этой связи растет значение анализа физико-химических параметров нефтепродуктов «на месте» (on site). На практике же на сегодняшний день контроль качества ГСМ осуществляется только на крупных предприятиях нефтеперерабатывающего комплекса, оснащенных аккредитованными стационарными лабораториями. В остальных структурах этого комплекса, особенно на топливно-заправочных пунктах и АЗС, контроль качества ГСМ отсутствует, несмотря на очевидность подобного контроля. Основная причина – недостаток необходимой измерительной техники, с помощью которой можно было бы оперативно определить параметры ГСМ.

Добиться обеспечения массового контроля нефтепродуктов, возможно, несколькими путями. Среди них можно назвать упрощение процедур анализа и соответствующих технических средств, не снижающих качество анализа, а также осуществление контроля непосредственно в тех местах, где находится контролируемый объект. Последнее дает возможность исключить операции с пробами, связанные с их транспортировкой и хранением, а также разгрузить специализированные лаборатории от проведения массовых анализов.

Кроме того, в большинстве случаев решение по результатам анализов должно приниматься на месте и быстро (пример – проверка качества нефтепродуктов на АЗС).

Наиболее эффективным способом массового контроля качества ГСМ в местах хранения и продажи является применение специализированных передвижных лабораторий, оснащенных необходимыми средствами измерений. Применение передвижных лабораторий дает возможность на базе маршрутных

схем создать четкую систему контроля качества ГСМ при приемке, хранении и отпуске топлива.

Для осуществления оперативного контроля качества нефтепродуктов в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии были разработаны комплектные лаборатории анализа нефтепродуктов типа «КЛАН – 1».

Лаборатории выпускаются двух модификаций: стационарные и передвижные, размещенные в специально оборудованном автомобиле. В состав лаборатории входит комплект измерительных приборов (анализаторов), измерительное и вспомогательное оборудование.

Средства измерений, измерительное и вспомогательное оборудование позволяют измерять параметры нефтепродуктов, условно разделенных на три группы:

- Автомобильные бензины;
- Дизельное топливо;
- Моторные и автотракторные масла.

Количество измеряемых параметров нефтепродуктов определяется объемом проводимого анализа (приемо-сдаточный, контрольный или полный).

Комплектные лаборатории для измерения параметров нефтепродуктов оснащаются средствами измерений, которые изготавливаются в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии. Перечень этих приборов приведен в таблице.

Все приборы, входящие в состав передвижной лаборатории, прошли государственные испытания и утверждены Госстандартом как типы средств измерений. Большинство из указанных приборов реализуют стандартные методы испытаний нефтепродуктов, изложенные в соответствующих государственных стандартах (за исключением экспресс-анализатора октанового числа и определение механических примесей). Все приборы относятся к группе автоматизированных анализаторов по ГОСТ 16851-71, когда отбор проб производится оператором вручную, а измерение параметров осуществляется автоматически и выдается на индикаторе прибора в цифровом виде.

В комплект передвижной лаборатории входит персональная ЭВМ «NOTE BOOK» для ведения базы данных результатов анализа и их вывода в виде протокола стандартной формы. Кроме того, имеется база нормативных данных параметров автомобильных бензинов и масел, что позволяет оперативно контролировать отклонение измеряемых параметров от их номинальных значений.

Таблица

Наименование измеряемого параметра	Диапазон измерения	Пределы допускаемой погрешности	Наименование средства измерений
1 Октановое число автомобильных бензинов, октановая единица	72-89 (моторный метод) 72-98 (исследовательский метод)	$\pm 0,5$ октановой единицы	Анализатор СИМ-3Б Сертификат №
2 Измерение содержания воды в нефти и нефтепродуктах, %	0,01-2,0	± 10 %	Анализатор СИМ-4 Сертификат №
3 Измерение температуры вспышки, °С (дизтопливо и масла)	20-200 100-300	± 5 °С	Анализатор СИМ-5Д Анализатор СИМ-5М Сертификат №
4 Измерение содержания серы в нефтепродуктах, г/дм ³	0,08-4,00	0,005-5,00	Анализатор СИМ-6 Сертификат №
5 Измерение плотности нефти и нефтепродуктов, г/см ³	0,7736-0,8879	$\pm 0,0005$ г/см ³	Анализатор СИМ-7 Сертификат №
6 Диапазон измерения кинематической вязкости нефтепродуктов, мм ² /с	3,69-9,78	$\pm 1,2$ %	Анализатор СИМ-8 Сертификат №
7 Разгонка нефтепродуктов, °С	35-370	-	Анализатор СИМ-10 Сертификат №
8 Температура застывания нефтепродуктов, °С	Минус 57, не более	± 2 °С	Анализатор СИМ-11 Сертификат №
9 Измерение содержания массовой доли механических примесей в нефти и нефтепродуктах, %	$0,1-1 \cdot 10^{-4}$	± 10 %	Анализатор СИМ-12 Сертификат №

Передвижная лаборатория представляет собой комплекс перечисленных средств измерений, смонтированных на базе автомобиля «Газель». Для их размещения салон кузова автомобиля специально дооборудован. Кузов автомобиля изготовлен высотой 1,9 м, что позволяет операторам, не наклоняясь, перемещаться внутри салона и работать с приборами. Для создания микроклимата внутри салона, особенно в зимний период, кузов утеплен слоем

негорючей теплоизоляции. Поверх изоляции кузов покрыт слоем пластика с поверхностью, не впитывающей пары ГСМ. Для размещения приборов салон автомобиля снабжается необходимой лабораторной мебелью, которая состоит из стола, вытяжного зонда с вентилятором, шкафа для рабочей одежды и умывальника. По левому борту автомобиля размещается лабораторный стол. На верхней поверхности стола размещается ряд приборов (СИМ–5, 6, 7, 8, 10). Часть малогабаритных приборов СИМ–3, 4, 12, 14) для компактности и удобства работы сгруппирована в приборную стойку.

В нижней части лабораторного стола вмонтированы выдвижные ящики, в которых хранится лабораторная посуда, вспомогательные материалы и химические реактивы. Под столешницей имеется отсек для размещения сосуда Дьюара и малогабаритного холодильника, который необходим для хранения проб нефтепродуктов и охлаждения термостатирующей жидкости при определении вязкости и фракционного состава нефтепродуктов. С этой же стороны закреплена герметичная емкость для утилизации нефтепродуктов после проведения испытаний. С правой стороны салона автомобиля располагаются шкаф для рабочей одежды, умывальник со сливной раковиной и ящик для хранения вспомогательных приспособлений. Рабочее пространство в салоне спланировано таким образом, что позволяет организовать два полноценных рабочих места операторов для проведения анализов нефтепродуктов.

Электропитание приборов осуществляется с помощью сети напряжением 220 В. Для подключения к сети в автомобиле предусмотрен выносной кабель с заземляющей жилой длиной 50 м. Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала подключение приборов производится через устройство защитного отключения (УЗО). Дополнительно по периметру салона автомобиля выполнено защитное заземление. Освещение салона «Газели» осуществляется стандартными автомобильными плафонами с электропитанием 12 В. В случае необходимости, для организации автономного питания приборов и оборудования может быть использована бензиновая переносная электростанция мощностью не менее 3 КВт.

Рассмотренная передвижная лаборатория прошла, государственные испытания и внесена в Государственный реестр средств измерений (сертификат № 26145-03 от 19.01.2004 г).

Особенностью лаборатории является то, что в ускоренные сроки на ней провести анализ бензинов, дизельного топлива и автотракторных масел по основным параметрам в местах их хранения и продажи с выдачей протокола испытаний. Время, необходимое для проведения анализов, как показывает практика, составляет не более 2,5 часов.

В 2002 -2006 годах такие лаборатории была изготовлены и поставлены ФГУП «Госэнергонадзор по Курганской области» и ФГУП «Госэнергонадзор по республике Марий-Эл», а также в Республику Казахстан «Казмунай газ».

За указанный период времени в процессе проведения инспекционных проверок качества нефтепродуктов был сформулирован ряд дополнительных

требований по оснащению и эксплуатации передвижной лаборатории, которые предполагается выполнить в ближайшее время.

Таким образом, передвижная лаборатория «КЛАН-1» позволяет решать задачу осуществления оперативного инструментального контроля качества реализуемых ГСМ в целях недопущения реализации потребителям не соответствующих по качеству нефтепродуктов, что особенно это актуально в связи с введением обязательного лицензирования нефтебаз и АЗС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шувалов Г.В. Разработка приборов для определения качества судовых нефтепродуктов // - Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2003. - №2. – С.146-149.

© Г.В. Шувалов, 2006

MICROSTRUCTURE DEVICES FOR APPLICATIONS IN THERMAL AND CHEMICAL PROCESS ENGINEERING (ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРНЫХ УСТРОЙСТВ В ТЕПЛОВЫХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ)

Abstract

In this publication, an overview of the work dealing with thermal and chemical micro process engineering performed at the Institute for Micro Process Engineering (IMVT) of Forschungszentrum Karlsruhe will be given. The focus will be set on manufacturing of metallic microstructure devices and on microstructure heat exchangers. A brief outlook will describe possible future application fields.

Keywords

Microstructure, Micro Reaction Engineering, Heat exchanger, Multi-scale, Lab-scale, Application

Introduction

For a couple of years microstructure devices have been well-known as excellent tools for laboratory research in many application fields. The advantages of microstructure devices are well known and can be found in many references, we will not go into details here [1 - 5].

For lab scale type devices, mainly single microchannel systems either manufactured from silicon by semiconductor technologies or made from metals by mechanical micromachining or wet chemical etching (see [5]) are used for intense research activities in flow characterisation, heat transfer and experimental investigation of chemical reactions. By the use of single channels the mass flux is naturally limited to small values. To achieve higher mass fluxes several possibilities have been discussed, namely parallelization of single microchannel devices, scaling-up of the microchannel dimensions or generation of internally parallelized multi-channel systems, the so-called equaling-up [5]. All of these are possible and more or less feasible for lab-scale devices as well as for application devices. This led to a variety of microstructure devices suitable for lots of applications, namely heat exchange, evaporation, mixing, generation of emulsions, and running chemical reactions in the lab scale range. Unfortunately, the transfer to industrial applications is still underrepresented, since not many applications in industry have been published yet. This is not only a result of the lack of knowledge of the precise working mechanism of heat transfer and fluid flow in micro-scale (see, e.g., the discussion about the transition between laminar and turbulent flow in micro-scale) but also due to the difficulties in exact modelling and pre-calculation. Moreover, fouling and blocking problems have been widely discussed but are not yet solved. Also, prediction rules for the corrosion behaviour of microstructured materials are still under investigation. Thus, data on the long term stability of microstructure devices are not available yet.

Nomenclature

<i>Latin symbols</i>		
A	<i>effective heat transfer area</i>	m^2
C	<i>microchannel circumference</i>	m
F	<i>microchannel face area</i>	m^2
Nu	<i>Nusselt number</i>	
P	<i>pressure</i>	Pa
Pr	<i>Prandtl number</i>	
$\dot{Q}$	<i>thermal power</i>	W
Re	<i>Reynolds number</i>	
T	<i>temperature</i>	$K, ^\circ C$
c_{mean}	<i>mean specific heat capacity</i>	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
c_p	<i>specific heat capacity</i>	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
d_h	<i>hydraulic diameter</i>	$m, \mu m$
k	<i>overall heat transfer coefficient</i>	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
l	<i>microchannel length</i>	m
$\dot{m}$	<i>mass flow</i>	$kg \cdot h^{-1}$
n_{Ch}	<i>number of microchannels per foil</i>	
n_f	<i>number of microstructured foils per passage</i>	
<i>o.r.</i>	<i>of the range</i>	
<i>o.v.</i>	<i>of shown value</i>	
s	<i>path length, foil thickness</i>	m
<i>Greek symbols</i>		
α	<i>heat transfer coefficient</i>	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
λ	<i>thermal conductivity</i>	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
ε	<i>efficiency of the heat transfer</i>	$\%$
$\Delta \vartheta_m$	<i>mean logarithmic temperature difference</i>	K
ξ	<i>form factor</i>	
<i>Subscripts</i>		
<i>cold</i>	<i>cold water passage</i>	
<i>hot</i>	<i>hot water passage</i>	
<i>in</i>	<i>inlet position</i>	
<i>lam</i>	<i>laminar</i>	
<i>out</i>	<i>outlet position</i>	
<i>turb</i>	<i>turbulent</i>	

Basics

Basic calculations for heat transfer as well as pressure drop in microstructure devices can be performed using standard Nusselt theory equations [4, 5]. Some geometrical considerations have to be done, like, e.g., how to define the characteristic length for non-channel designs. We will consider microchannel designs here, therefore the characteristic length is set to be the hydraulic diameter of each microchannel. It can be calculated using the simple equation

$$d_h = \frac{4 \cdot F}{C} \quad (1)$$

where d_h is the hydraulic diameter, F is the face area of the channel and C is the circumference of the microchannels.

For further calculations with non-circular channels, a correction factor has to be applied to approximate a circular cross section. Those factors may be found, e.g., in VDI Wärmeatlas [6]. For the pressure drop, equations like the Hagen-Poiseulle equation for laminar flow with a Reynolds number lower than approx. 2 300 or an equation developed by Petukhov and Gnielinski for turbulent flow with a Reynolds number Re between 3 000 and 10^5 may be applied (see VDI-Wärmeatlas [6]).

For a microstructure heat exchanger having a defined geometry and known mass flows as well as inlet and outlet temperatures, the heat transfer therefore can be calculated by the energy balance equation (2).

$$\dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = k \cdot A \cdot \Delta \vartheta_m \quad (2)$$

To calculate the effective heat transfer area A equation (3) may be used:

$$A = n_f \cdot n_{Ch} \cdot C \cdot l \quad (3)$$

The mean logarithmic temperature difference $\Delta \vartheta_m$ can be obtained from the formula given in VDI-Wärmeatlas [6].

Assuming the same heat transfer area in each passage, the heat transfer coefficient is defined for both a cold and a hot passage in equation (4). Then, the overall heat transfer coefficient may be calculated using equation (5).

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{Fluid}}{d_h} \quad (4)$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_{hot}} + \frac{1}{\alpha_{cold}} + \frac{s}{\lambda_{solid}} \quad (5)$$

For laminar flow ($Re < 2\,300$), the Nusselt number is obtained using equations (6) to (9) [6].

$$Nu_{lam} = \sqrt[3]{\left(Nu_1^3 + 0.7^3 + (Nu_2 - 0.7)^3 + Nu_3^3 \right)} \quad (6)$$

$$Nu_1 = 3.66 \quad (7)$$

$$Nu_2 = 1.615 \cdot \sqrt[3]{Re \cdot Pr \frac{d_h}{l}} \quad (8)$$

$$Nu_3 = \left(\frac{2}{1 + 22 \cdot Pr} \right)^{1/6} \cdot \sqrt[3]{Re \cdot Pr \frac{d_h}{l}} \quad (9)$$

For turbulent flow ($Re > 2\,300$), the Nusselt number is defined by equations (10) to (11).

$$Nu_{tur} = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \cdot \left(1 + \left(\frac{d_h}{l} \right)^{2/3} \right) \quad (10)$$

$$\xi = (1.82 \cdot \log(Re) - 1.64)^{-2} \quad (11)$$

When fluids with similar specific heat capacity are applied to both passages, the heat transfer efficiency ε can be used easily for comparison of differently designed (microstructure) devices. A definition is given in equation (12) [6 - 7].

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \cdot c_{mean} \cdot (T_{hot,in} - T_{cold,in})} \quad (12)$$

In the specific case of symmetric fluid flow and using the same fluid for both passages, the capacity flow of both fluids is almost the same. Then, equation (12) can be rearranged to calculate the heat transfer efficiency ε with equation (13) [6].

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_{cold} \cdot c_{p,cold} \cdot (T_{cold,out} - T_{cold,in})}{\dot{m}_{hot} \cdot c_{p,hot} \cdot (T_{hot,in} - T_{cold,in})} \quad (13)$$

More details to the easy pre-calculation methods and other, more complex possibilities to calculate microstructure behaviour can be found in [5 - 9]

Beside these rather simple pre-calculations, CFD software like FLUENT or CFX can be used to simulate the flow behaviour, the pressure drop and the thermal behaviour of microstructure devices. In most cases a simulation of a complete microstructure device will result in the plenum outlet temperature at a certain mass flow. It is possible to perform calculations for complete microstructure devices to obtain temperature distributions, but the computational power needed is quite high due to the relatively high number of simulation cells needed to obtain a precise description. Examples for simulation results and more related references can be found in [8 - 11].

Manufacturing

Manufacturing of single microchannel or multi-channel devices out of polymers, metals, glass or ceramics is in many cases done with silicon technology methods, i.e. dry etching or wet etching. Sometimes more complex methods like LIGA are used. For a lot of applications, wet chemical etching, mechanical micro-machining or laser

machining is the method of choice due to the low machining costs. Detailed description of manufacturing methods for microstructures can be found in [5, 12].

Process Parameter Restrictions

The material of the devices as well as the design are mainly influenced by the process including the used fluids. This is specially true for industrial applications, where a certain lifetime has to be guaranteed. Laboratory equipment like single microchannel devices or single microstructure foil lab devices can easily and without major cost restrictions be designed in that way that the microstructures themselves are exchangeable. Here, thermal stress or corrosion may damage the microstructures, which will then be replaced.

For chemical reactions, the amount of heat needed by endothermic or generated by exothermic chemical reactions can be pre-calculated easily. For “simple” heat exchangers, the mass flux per passage as well as the fluid suitable to transfer the desired amount of heat can be pre-calculated using the equations given above, or using CFD methods, as it was mentioned before. In the following, we will focus on microstructure heat exchanger devices and their applications.

Material choice

Several factors influence the choice of materials for microstructure devices. The most important are temperature resistance, corrosion resistance and thermal properties. There are norms for temperature and pressure devices such as the European Pressure Equipment Directive (PED) 97/23/EG [13]. Microstructure devices are often exempted from these rules, since the active volume (the hold-up, respectively) is small. However, if technical relevant throughputs are to be obtained the active volume is in an order that the rules apply.

Another extremely important factor for the choice of materials for devices is the question of corrosion. This topic needs special attention. Standard literature on corrosion, e.g. the corrosion handbook by DECHEMA [14] takes a corrosion rate of $0.1 \text{ mm} \cdot \text{y}^{-1}$ as resistant, a corrosion rate of $1 \text{ mm} \cdot \text{y}^{-1}$ is taken as fairly resistant. These values are chosen with respect to standard, macroscopic reaction vessels, tubes and fittings, which normally provide wall thicknesses in the range of several mm or higher. When talking about microstructure devices, we often have wall thickness in the order of 0.1 mm ($= 100 \mu\text{m}$) or even below. Consequently, the corrosion rate limitations given in the cited literature can not be applied to microstructure devices. Sadly enough corrosion has not been a topic in most publications dealing with microstructure devices, but it has normally been assumed that the material of choice is more or less completely resistant against corrosion by the given reaction system. In opposite, a material deemed resistant according to the corrosion handbook can prove unsuitable for the process running in the microstructure device.

Presently, no common design rules or regulations from any federal or private organization dealing with corrosion rates for microstructure devices are existing. Thus, for each process that should be handled with microstructure devices, the corrosivity of the fluids and the resistivity of the material has to be checked carefully to prevent damages and losses within short time. But measuring extremely small

corrosion rates (by, e.g., gravimetric measurements) is time consuming and prone to errors, due to the small losses in weight. For some very corrosive fluids and processes, ceramic or glass microstructure devices are mandatory – or extremely corrosion resistant metals like tantalum.

To assess the suitability of a construction material for a given process, careful experiments under the expected conditions have to be undertaken. The choice of material in relation to corrosion should in first approximation be limited to ones which are expected to be completely resistant. However, if the use of the device is limited to comparatively short times, e.g. in a production or measurement campaign, the above mentioned limitation need not be strict. One should be sure that the complete destruction of the functionality is not to be feared during the time of the campaign. This is especially of importance in the industrial application.

Fluid Dynamics Restrictions

Aside of thermal stress and corrosion, fluid dynamics restrictions have a large influence on the design and the use of microstructure devices. Normally laminar flow is assumed to take place within microchannel devices. This may be correct for most lab scale and industrial applications, especially if the surface quality is very high, like it is the case for glass devices. Specially treated metallic microstructures like the one shown in Figure 1, where the roughness is in the range of some ten nanometers, can also be considered to act in laminar flow regime. This might not be the case anymore for wet chemically etched microstructures with very small dimensions, like the ones shown in Figure 2. The surface roughness of wet chemically etched microstructures is, depending on the material, in the range of some μm . Assuming very small characteristic dimensions, the surface roughness might be in the same order of magnitude, which gives a certain probability of a distorted non-laminar flow. Anyway, in all cases laminar flow may not be expected anymore when fouling starts to occur.

Fouling is a general problem, not only for microstructure but also for conventional process equipment. Nevertheless, due to the small characteristic dimensions, the impact of fouling in microstructures is much higher than in macroscale devices. While the reduction of the hydraulic diameter caused by a $10\ \mu\text{m}$ thick fouling layer is beyond measurement possibilities in a multi-millimeter channel, a microchannel hydraulic diameter of $133\ \mu\text{m}$, assuming a typical rectangular channel of $200\ \mu\text{m}$ width and $100\ \mu\text{m}$ depth, is decreased by roughly 8%. This may lead to distortions of the flow, and a non-laminar behaviour may occur. Higher pressure drop and a decrease in heat transfer capacities are to expect.

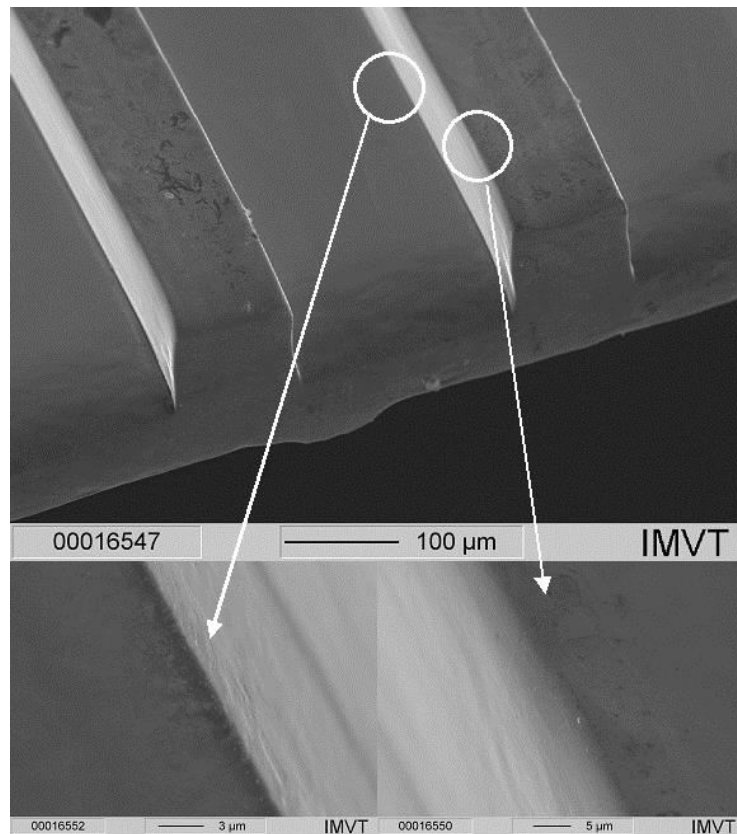


Fig. 1: Mechanically Cut Microchannel Copper Foil

Clockwise: Microchannel overview, sidewall upper edge and top of microchannel wall, sidewall lower edge and bottom of channel. The microchannels have been manufactured mechanically, followed by an electro-polishing process. The mean value of surface roughness was measured to about 30 nm.

Thus, strategies for the prevention of fouling and/or cleaning of microstructure devices have to be developed. One possibility is the application of protective layers, another might be the application of mechanical forces, e.g. ultrasound [15]. Like for the corrosion problem, the investigations on fouling in microstructure devices are just about to begin.

Laboratory Scale devices

Laboratory Scale Devices are normally either single microchannel devices or devices where a limited number of microstructures is integrated in a way that they are more or less easily exchangeable. The objective is either to perform initial tests on basic operations, to obtain data on fundamental process steps performed in microstructure devices or to obtain basic data sets to run, e.g., a chemical reaction in an application-scale microstructure device. There are lots of descriptions about such lab-scale devices [1-5].

An example for a single microchannel device is given in [16]. Here, within a single rectangular microchannel machined in stainless steel, the local heat transfer was measured for a regime up to a Reynolds number Re of roughly 4 000. Not only PT100 sensors but also optical methods using the induced fluorescence of Rhodamin

B was used to measure the local heat transfer. Another example is given in [17], where the critical heat flux in single microchannel tubes was measured using refrigerants as test fluids.

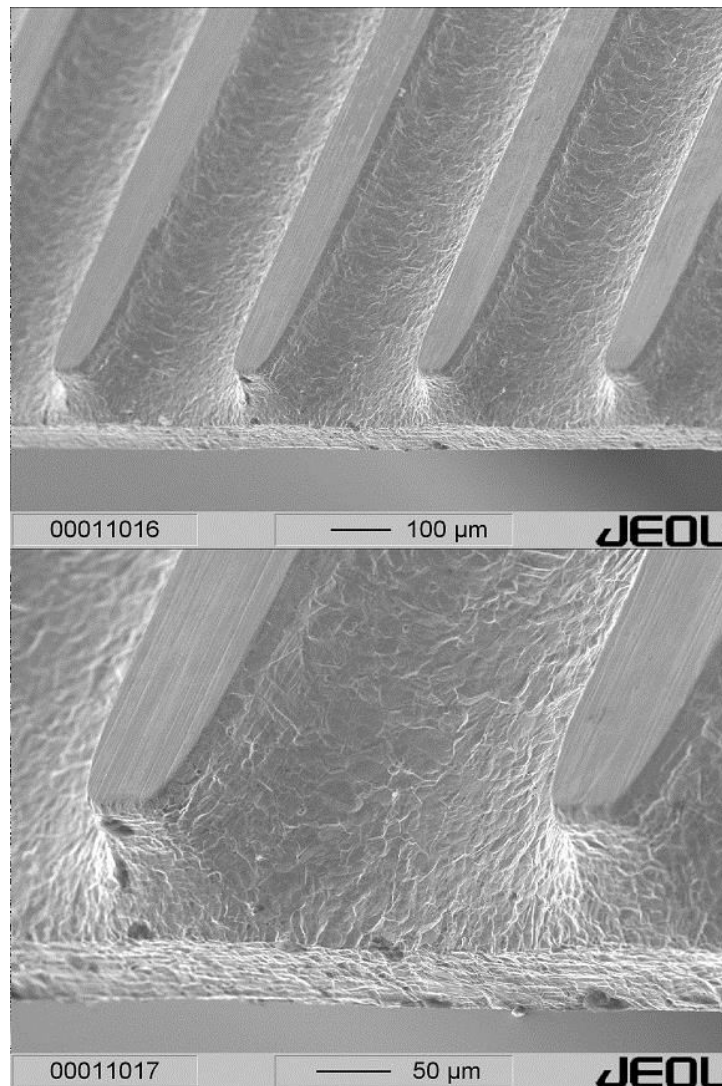


Fig. 2: Wet Chemically Etched Microchannel Stainless Steel Foil

Top to bottom: Microchannel overview, sidewall top surface and bottom of channel quality. The microchannels have been wet chemically etched. The mean value of surface roughness is about some μm .

Multichannel systems in lab-scale have been tested in many varieties. One example is a polymer device providing an enhanced, extremely high area-specific heat transfer combined with very low pressure drop [18 - 19]. In Figure 3, such a polymer microstructure heat exchanger is shown. Here, the microstructures are integrated into the polymer parts. These parts are manufactured by micro-stereolithography, which allows a wide variety of microstructures to be integrated [18] The metal (in the particular case: aluminum) foil is sealed between the two polymer parts with O-rings. The heat transfer between two fluids takes place on the

contact area of the fluids to this metal foil, which is not microstructured. As microstructures, a very large number of short microchannels have been combined with a smaller number of relatively large connection channels. This led to heat transfer capabilities combined with a low pressure drop. More details about this device can be found in [19]. Figure 4 shows the pressure drop of a reference microchannel device (blue line) compared to the new polymer microstructure heat exchanger (red line). In Figure 5, the specific thermal power transferred with a reference polymer device having straight microchannels (blue line) is compared to the specific thermal power transferred with the new polymer device (red line). With this device, a maximum of about $1\,000\text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ specific thermal power is possible.

In Figure 6, a lab-scale electrically powered microstructure evaporator is shown. This device consists out of a stainless steel baseplate having holes to insert commercially available heater cartridges and a stainless steel cover frame. The microstructure foil is made exchangeable by clamping it, sealed with O-rings, between the baseplate and a (plexi-)glass cover pressed to the baseplate with the frame. The foil inserted while the photo for Fig. 6 was taken was made of brass, which results in a coloured surface by the use of deionized water as test fluid. A detailed description of the device, the test rig and first results obtained for the evaporation of water can be found in [20].

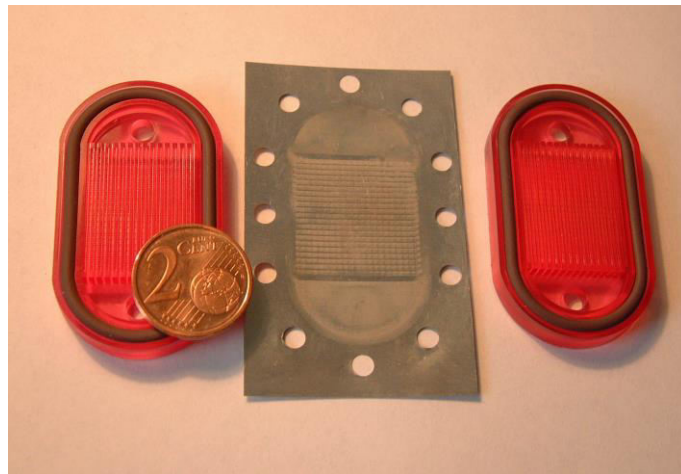


Fig. 3: Polymer Microchannel Heat Exchanger with Aluminum Separation Foil

Both half-shells of the polymer heat exchanger are made by microstereolithography. Heat transfer takes place on the non-contacted surface of the aluminum foil clamped between the polymer shells.

Aside of the lab-scale devices shown here, numerous manufacturers of microstructure devices provide different types of microstructure heat exchangers and modules for heat transfer experiments and lab-scale applications. Examples for a devices useful for lab or semi-industrial applications can be found in [21]. Here, within the framework of a public-funded project, a standardization of different microstructure devices from different manufacturers have been performed.

Beside this, numerous publications on lab-scale microstructure devices can be found. Resources for information on this topic are the topical conference proceedings

[22, 23] as well as the meanwhile well-established books on microstructure technology and micro process / micro reaction engineering [5, 9, 11, 24].

For experiments and applications with certain corrosive fluids or at high temperatures, metallic devices may not be the first choice. Thus, devices made of glass or ceramics provide useful characteristics. As an example, a first test sample of an ceramic microstructure heat exchangers are shown in Figure 7. This counterflow device was tested and compared to metallic microstructure heat exchangers and showed promising results. More details can be found in [25].

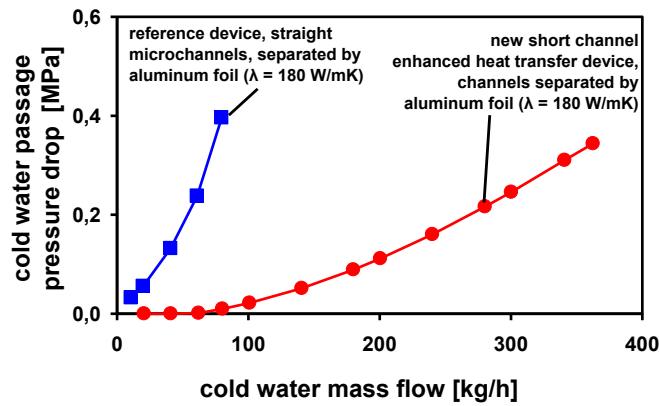


Fig. 4: Comparison of Pressure Drop Measurements

The pressure drop of a straight microchannel reference design was measured and compared to the new micro heat exchanger.

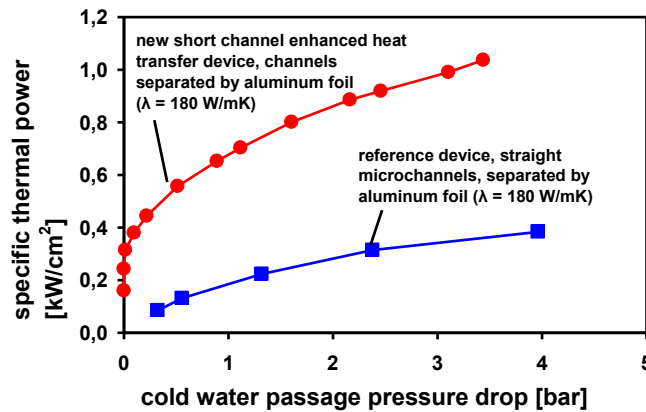


Fig. 5: Specific Thermal Power

In the plots, the specific thermal power transferred with a straight microchannel reference design (blue plot) and the new microstructure design (red plot) are compared.

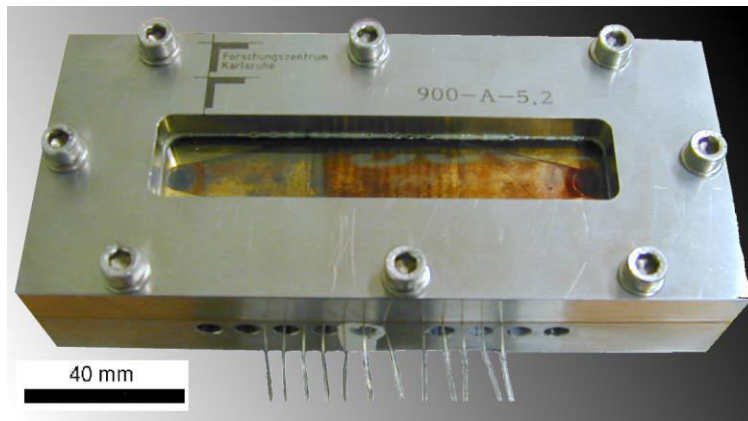


Fig. 6: Electrically Powered Lab-scale Microchannel Evaporator

The microchannel foil is exchangeable and clamped to the baseplate by use of O-rings as sealings, a (plexi-)glass lid and a stainless steel frame.

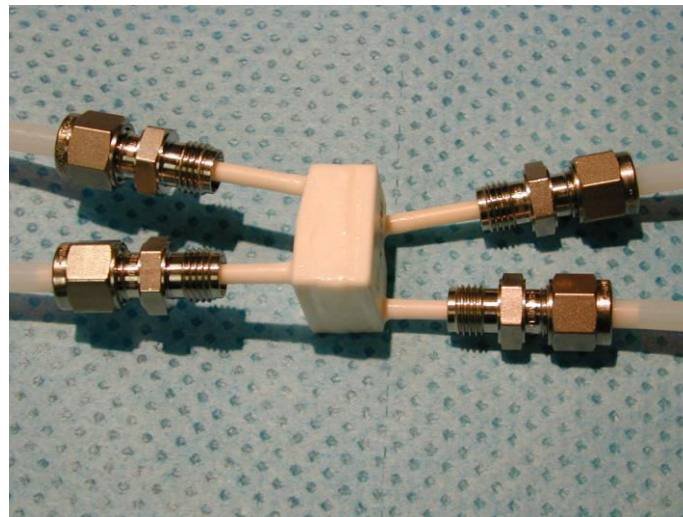


Fig. 7: Ceramic Counterflow Microstructure Heat Exchanger

4 microstructured ceramic heat exchanger plates have been connected, sealed and tested.

Applications

In micro process engineering, the transition between lab-scale application and semi-industrial or industrial application is not strictly defined. A multi-channel lab-scale module may also be used for the production of fine chemicals in the industrial range – if this range is, e.g., some hundred kilograms per year only. On the other hand, the production of several thousand tons of any product might be difficult with a single microstructure foil device. Therefore, considerations on industrial scale devices have been done, resulting in the possibilities of scale-up, numbering-up and equaling-up, as it was mentioned before. Nevertheless, the advantages of microstructure devices allow to run processes in a way not accessible with conventional techniques [1, 2, 24]

In most cases, scale-up of the microstructure dimensions is only possible to a certain limit. If this limit is not respected, the specific advantages of the microstructures will be lost. Numbering-up might be an option if the overall throughput for the process is not too high, and therefore the expenditure on measurement and control hardware and software is not too high. A combination of both scale-up and numbering-up is named equaling-up (or, in other references, internal numbering-up). Here, a large number of microstructures with optimum dimensions is integrated into one more or less large device which then allows higher throughput. This multi-scale approach is described, e.g., in [26].

Moreover, there are two different types of microstructure devices available: Multi-objective microstructure modules (or devices) and devices which have been built to meet specific demands of one process (single objective devices). In the following, some examples for both types of devices / modules will be described briefly.

Micro heat exchangers used for semi-industrial or industrial applications are available from different providers. They are very good examples for multi-objective devices. In many cases, they are manufactured out of single microstructure foils which are stacked and bonded by, e.g., diffusion bonding, laser or electron beam welding, brazing or soldering. As materials, different metal alloys, glass, polymers and ceramics are used. The manufacturing for stainless steel crossflow microstructure heat exchanger devices is described in details in [4]. In Figure 8, a system of microchannel stainless steel foils made by mechanical micro-machining is shown. The foils are stacked in crossflow arrangement. Figure 9 shows wet chemically etched microchannel stainless steel foils used to build a counterflow microstructure heat exchanger. A crossflow microstructure device is shown in Figure 10, while Figure 11 shows a counterflow design.

With the microstructure devices shown in Fig. 10 and 11, mass fluxes of up to $2\,000\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ can be obtained, measured with water as test fluid at a pressure drop of about 0.5 MPa per passage. Larger devices than the crossflow design shown in Fig. 10 are able to handle a mass flux of up to $20\,000\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, as it is pointed out in [1, 4].

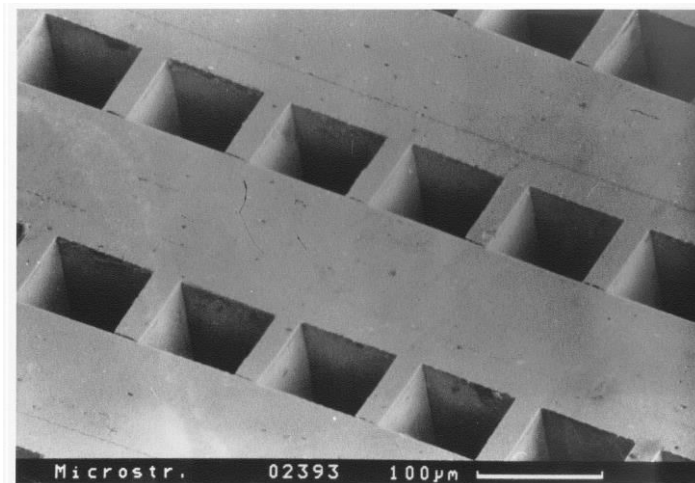


Fig. 8: Crossflow-arrangement of Mechanically Machined Microchannel Foils

The foils are made of stainless steel and connected by diffusion bonding to form a very stable stack.

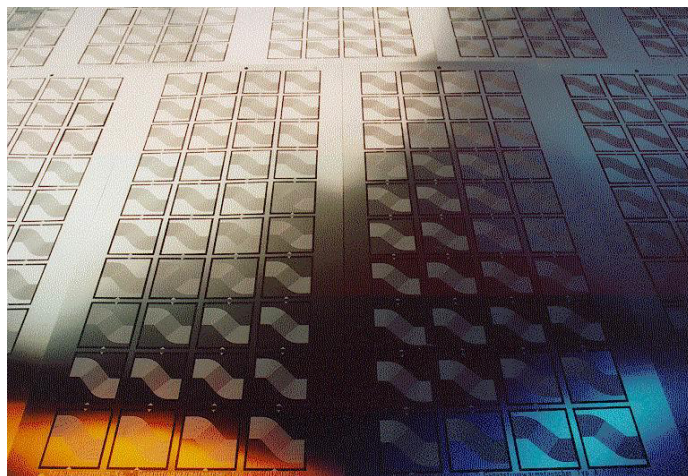


Fig. 9: Microchannel Heat Exchanger Foils

The wet chemically etched microchannel design is used to build counterflow microstructure heat exchangers.

To increase the mass flux even further, either a parallelization of a small number of those devices can be used, or multi-scale systems can be manufactured. An example for a numbering – up with a limited number of devices is shown in Figure 12, where five stainless steel crossflow microstructure heat exchangers are taken in parallel. With this stack of devices, a mass flux of about $100\,000\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ at a pressure drop of about 0.5 MPa is possible. A maximum thermal power of 1 MW is transferable. More details can be found in [1, 3, 4].

For some applications, even the extremely high overall heat transfer coefficients of about $30\,000\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ named in, e.g., [3], may be not sufficient. For these cases, a heat transfer enhancement is possible by changing the integrated microstructures of heat exchanger devices. Details on this topic are described in [27].

Heat exchanger devices like the above mentioned can easily be combined with other devices like micro mixers and microreactors to run reactions in lab-scale, pilot-scale or production scale plants.



Fig. 10: Stainless Steel Crossflow Microstructure Heat Exchanger

Within an active volume of 1 cm³, hundreds to thousands of microchannels have been integrated. At a mass flux of about 2 000 kg · m⁻² s⁻¹, a thermal power of up to 20 kW can be transferred using water as test fluid (95°C / 8°C). The pressure drop is in the range of 0.5 MPa.

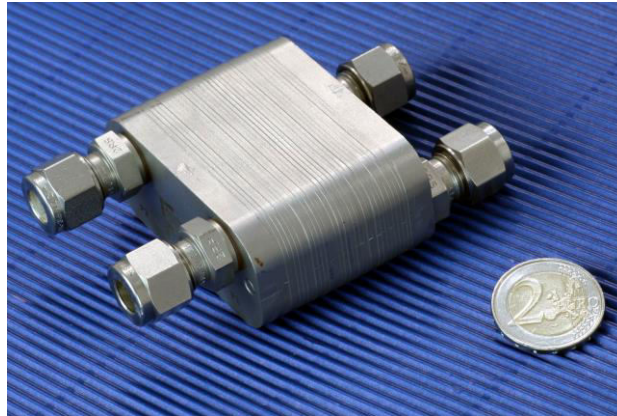


Fig. 11: Stainless Steel Counterflow Microstructure Heat Exchanger

This device provides similar characteristic values than the crossflow design shown in Fig. 11.

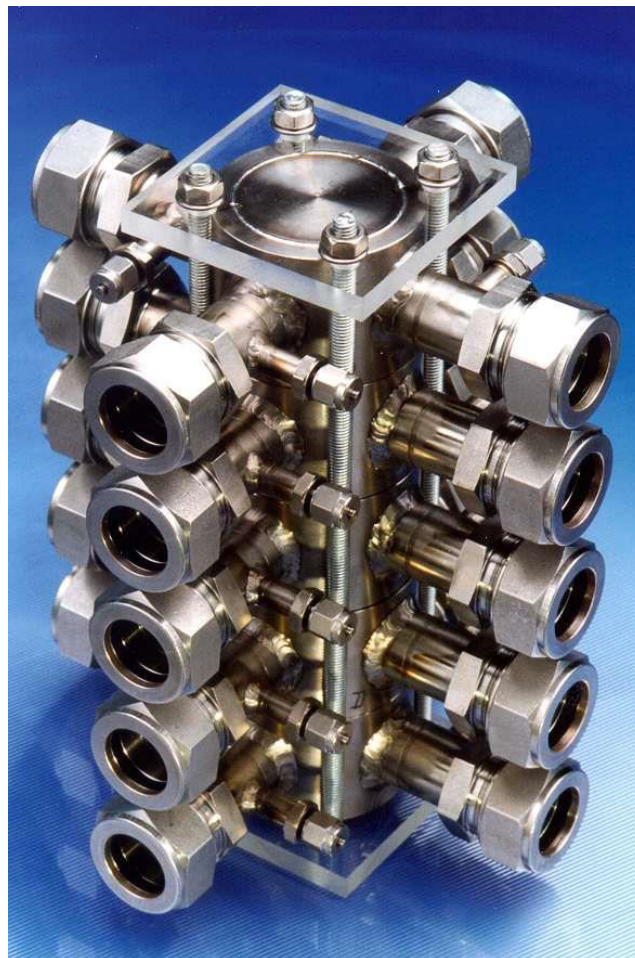


Fig. 12: Microstructure Heat Exchanger Stack.

Five stainless steel crossflow microstructure heat exchangers in parallel. Each of the devices has an active volume of 27 cm^3 . With this stack, a maximum mass flux of about $100\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ is possible at a pressure drop of around 0.5 MPa (test fluid: water). A thermal power of 1 MW can be transferred.

An example for a pilot scale plant for a chemical reaction is described in [28]. Here, the weight distribution of the macromolecules generated in a polymerization process could be improved significantly by the use of microstructure devices.

Another example for an industrial pilot-plant approach to run microstructure devices is described in [29]. Results from lab-scale devices [30] have been successfully transferred to a pilot-plant industrial application.

Nevertheless, publications on devices specially designed for industrial production applications are quite rare yet. This might be due to the previously mentioned problems with design rules and the lack of knowledge on the long term stability of microstructure devices.

One example for an industrial application is the heating of bio-diesel in a production facility. Here, an electrically powered microstructure device (see Figure 13) is used to heat up a mass flow of $1\,000 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ bio-diesel from 80°C to 105°C . The maximum electrical power of the device is 20 kW [31]. A description of the principal function and the design of the device can be found in [32]. Figure 14 shows an example for the temperature raise of the bio-diesel obtained by using the microstructure heat exchanger. Other microstructure devices may also be used with bio-fuels, as it is pointed out in [33].



Fig. 13: Electrically Powered Micro Heat Exchanger

With this device, the complete production mass flow of a bio-diesel production facility is heated.

An example for an objective-specific multi-scale microstructure reactor device is shown in Figure 15. This device results from a cooperative work between the Institute for Micro Process Engineering of Forschungszentrum Karlsruhe and DSM Fine Chemicals, Austria [34]. The device is 650 mm long and weights about 290 kg. A number of micro-mixers and several tenthousand microchannels for heat transfer have been integrated to perform a highly exothermic chemical reaction for the production of fine chemicals. The applied mass flow was about $1\,700 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ of

liquid reactants. the device was pre-calculated to handle a maximum thermal power of around 800 kW. With this microstructure device, the production costs of the fine chemical product per kg could be reduced significantly. At the same time, the purity of the product was increased. Thus, the reaction yield was increased, and less waste and by-products have been produced. In a first production campaign, about 300 tons were successfully produced.

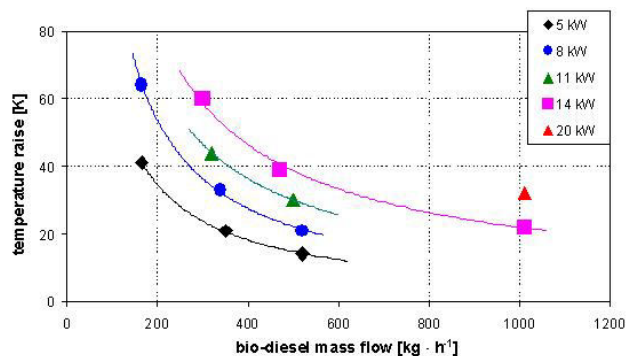


Fig. 14: Temperature Raise of Bio-Diesel

By use of the device shown in Fig. 13, the temperature of the complete production mass flow of the facility (1 000 kg · h⁻¹) could be raised to the desired values.



Fig. 15: Multi-scale Production Reactor for Fine Chemicals

Within a cooperative work, a production reactor with integrated microstructures has been designed and manufactured. A highly exothermic chemical reaction was performed successfully.

Summary

Microstructure devices are clearly a valuable tool for laboratory research as well as for industrial applications. The heat transfer in microstructure devices is taken as

one example to describe some aspects of the way of the devices from lab-scale up to industrial production range. Basic principles of heat transfer in Microscale have been described briefly. Examples for laboratory microstructure devices, microstructure devices suitable for all the range from lab to production and microstructure devices designed and manufactured for specific production problems have been presented. It was pointed out, that in the case of microstructure devices the transition between laboratory and production range is floating – there is no strictly defined border, where lab-scale ends and production scale starts due to the fact, that the advantages of microstructure devices may allow process parameters to be run which are not accessible with other techniques. Thus, production may take place with mass fluxes in the range of some kg per day up to some tons per day – depending on the product and the process.

Outlook

Micro reaction engineering is now in discussion for about a decade roughly. Since the first enthusiasm for a new and fascinating technology has faded, a more realistic view has been established in research and applications, supported by the experiences and research results of the last years. Now, the use of microstructure devices for process engineering is on the bedplate to become a well-known and evaluated technology not only for research labs but also for real production in chemical, pharmaceutical and biotech industry. Other applications in electronics, consumer goods, biomedicine, automotive, aircraft and space technology may follow up. The potential of microstructure devices has become quite clear in many cases, as well as the risks and limitations, in other cases researchers and industry are just starting to explore the potential benefits of microstructure devices. First lectures and courses dealing with microstructure technology only have been established at several universities worldwide, which will lead to a new generation of scientists and engineers being familiar with this technique. Thus, the technology has clearly achieved a promotion from a lab-style technique to an accessible and reasonable technology for industrial applications. This way will continue in near future.

Acknowledgments

Special thanks to mikrogas and IMM for providing photos and information of their devices.

References

- 1 Schubert, K., Brandner, J.J., Fichtner, M., Linder, G., Schygulla, U., Wenka, A., “Microstructure devices for applications in thermal and chemical process engineering”, *Microscale Thermophysical Engineering*, 5, 2001, 17-39
- 2 Hessel, V., Löwe, H., „Mikroverfahrenstechnik: Komponenten – Anlagenkonzeptionen – Anwenderakzeptanz“, *Chemie Ingenieur Technik* (74) 2002, Vol. 1-2, 17-30, Vol. 3, 185-207, Vol. 4, 381-400
- 3 Brandner, J.J., Bohn, L., Schygulla, U., Wenka, A., Schubert, K., “Microstructure devices for thermal and chemical process engineering”, *Yoshida, J.I. [Ed.], Microreactors: Epoch-Making Technology for Synthesis; MCPT, 2001, Tokyo, J, CMC Publ. Co., 2003, 75-87, 213-223*
- 4 Brandner, J.J., Schubert, K., “Fabrication and Testing of Microstructure Heat Exchangers

- for Thermal Applications“, *Proc., 3rd Int. Conf. on Microchannels and Minichannels*, S.G. Kandlikar et al., eds., ASME, New York, N.Y. 10016, USA, paper ICMM2005-75071
- 4 Brandner, J.J., Schubert, K., “Fabrication and Testing of Microstructure Heat Exchangers for Thermal Applications“, *Proc., 3rd Int. Conf. on Microchannels and Minichannels*, S.G. Kandlikar et al., eds., ASME, New York, N.Y. 10016, USA, paper ICMM2005-75071
 - 5 Brandner, J.J., Gietzelt, T., Henning, T., Kraut, M., Moritz, H., Pfleging, W., “Microfabrication in Metals and Polymers“, in: *Brand, Fedder, Hierold, Korvink, Tabata (Eds.): Advanced Micro- and Nano Systems AMN Vol 5, 2006, Wiley-VCH, Ch. 10, p. 267-319*
 - 6 VDI Wärmeatlas, 7.ed., VDI-Verlag, Düsseldorf, Germany, 1994
 - 7 Wagner, W., “Wärmeaustauscher“, 2nd ed., Vogel-Verlag, Würzburg, Germany, 1999
 - 8 Herwig, H., “Fluid Dynamics in Channels Below 1mm Hydraulic Diameters“, in: *Brand, Fedder, Hierold, Korvink, Tabata (Eds.): Advanced Micro- and Nano Systems AMN Vol 5, 2006, Wiley-VCH, Ch. 2, p.47-70*
 - 9 Kockmann, N., “Transport Processes, Thermodynamics, Heat Exchange“, in: *Brand, Fedder, Hierold, Korvink, Tabata (Eds.): Advanced Micro- and Nano Systems AMN Vol 5, 2006, Wiley-VCH, Ch. 3, p. 71-114*
 - 10 Hardt, S. Baier, T., “A Computational Model for Heat Transfer in Multichannel Microreactors“, *Proc., 3rd Int. Conf. on Microchannels and Minichannels*, S.G. Kandlikar et al., eds., ASME, New York, N.Y. 10016, USA, paper ICMM2005-75079
 - 11 Tonomura, O., “Simulation and Analytical Modelling“, in: *Brand, Fedder, Hierold, Korvink, Tabata (Eds.): Advanced Micro- and Nano Systems AMN Vol 5, 2006, Wiley-VCH, Ch. 8, p. 235-248*
 - 12 Madou, M., “Fundamentals of Microfabrication“, CRC Press, 1997
 - 13 AD 2000-Regelwerk (Ed.: Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e.V., Essen) Carl Heymanns Verlag KG, Köln, Germany, 2003
 - 14 Dechema Corrosion Handbook (Ed.: D. Behrens) VCH, Weinheim, Germany, 1987
 - 15 Benzinger, W., Schygulla, U., Schubert, K., Jaeger, M., "Anti-Fouling Investigations with Ultrasound in a Microstructured Heat Exchanger", *Proceedings, Heat Exchanger Fouling and Cleaning - Challenges and Opportunities*, Kloster Irsee, Germany, June 5-10, 2005
 - 16 Klein, C., Ehrhard, P., “Development of a Measuring Technique for the Local Heat Transfer“, *Proc. of the ECI Conference Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale HTFFM 2005, Sep 25-30, 2005, Castelvechio Pascoli, Italy, paper No. 56*
 - 17 Wojtan, L., Revellin, R., Thome, J.R., “Investigation of the Critical Heat Flux in single, uniformly heated Microchannels“, *Proc. of the ECI Conference Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale HTFFM 2005, Sep 25-30, 2005, Castelvechio Pascoli, Italy, paper No. 6*
 - 18 Anurjew, E., Brandner, J.J., Hansjosten, E., Schygulla, U., Schubert, K., „Mikroverfahrenstechnik und stereolithographisch hergestellte Mikrostrukturapparate“, *Proc. of the Int. Conf. Geo-Sibiria-2005, April 25-29, 2005, Novosibirsk, Russia*
 - 19 Brandner, J.J., Anurjew, E., Hansjosten, E., Henning, T., Schygulla, U., Schubert, K., “A new Microstructure Heat Exchanger with Reduced Pressure Drop“, *Proc. of the 4th Int. Workshop on Micro Chemical Process Technology, Jan. 26+27, 2006, Kyoto, Japan*
 - 20 Henning, T., Brandner, J.J., Schubert, K., “Comparison of Microchannel Array Water Evaporator Designs by High-Speed Videography“, *ASME, Proc. of the 3rd Int. Conf. on Micro- and Minichannels ICMM2005, June 13-15, 2005, Toronto, Canada, paper ICMM2005-75097*
 - 21 Industrieplattform Mikroverfahrenstechnik, www.microchemtec.de
 - 22 ASME Proceedings of the International Conferences on Micro and Minichannels ICMM
 - 23 AIChE Proceedings on the International Conferences on Micro Reaction Engineering IMRET
 - 24 Hessel, V., Hardt, St., Löwe, H., „Chemical Micro Process Engineering Vol. 1+2“, Wiley-VCH, 2005
 - 25 Alm, B., “Keramische Massen für den Niederdruckspritzguss zur Herstellung von Komponenten für die Mikroverfahrenstechnik“, *Tech. Rep. FZKA 7061, Forschungszentrum*

Karlsruhe, PhD thesis, Universität Karlsruhe, 2004, <http://bibliothek.fzk.de/zb/abstracts/7061.htm>

26 EU Project “IMPULSE”: Integrated Multiscale Process Units with locally Structured Elements”, <http://www.impulse-project.net/>

27 Brandner, J.J., Anurjew, A., Bohn, L., Hansjosten, E., Henning, T., Schygulla, U., Wenka, A., Schubert, K., “Concepts and Realization of Microstructure Heat Exchangers for Enhanced Heat Transfer”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, *acc. for publication*.

28 Iwasaki, T., Yoshida, J.-I., “Free Radicals Polymerization in Microreactors. Significant Improvement in Molecular Weight Distribution Control”, *Macromolecules*, 2005, 38, pp. 1159-1163

29 Schirrmeister, St., et al., „DEMIS®: results from the development and operation of a pilot-scale micro-reactor on the basis of laboratory measurements”, *Proc. of 8th Int. conf. on Micro reaction Eng. IMRET8*, April 10-14, 2005, Atlanta, GA, USA

30 Klemm, E.J., Markowz, G., Mathivanan, G., Albrecht, J., Schirrmeister, St., „Evaporation of Hydrogen Peroxide in a Microstructured Falling Film”, *Proc. of 8th Int. conf. on Micro reaction Eng. IMRET8*, April 10-14, 2005, Atlanta, GA, USA

31 Rinke, G., Holpe, H., Wenka, A., „Einsatz eines elektrisch heizbaren Mikrowärmeübertragers an einer Biodieselproduktionsanlage“, *Tech. Rep. FZKA 6990*, 2004, pp.215-216, <http://bibliothek.fzk.de/zb/abstracts/6990.htm>

32 Henning, T., Brandner, J.J., Schubert, K., “Characterisation of electrically powered micro heat exchangers”, *Chem. Eng. J. Vol. 101/1-3* pp. 339-345

33 Kerschbaum, S., Rinke, G., „Measurement of the temperature dependent viscosity of biodiesel fuels”, *Fuel* 83 (3), 2004, pp.287-291

34 Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, “Mikro in Chemie ganz groß”, *Press Release* 13/2005, <http://www.fzk.de/fzk/idcplg?IdcService=FZK&node=1298&lang=en>

© Juergen J. Brandner, E. Anurjew, T. Henning, U. Schygulla, K. Schubert, 2006

УДК 536.4

P. Pfeifer, K. Haas-Santo, O. Görke, J. Thormann, K. Schubert

Германия

SMALL EFFICIENT MICROCHANNEL SYSTEMS FOR MOBILE AND DECENTRALISED HYDROGEN PRODUCTION

INTRODUCTION

Fuel cells are of great interest for mobile and decentralised generation of electricity to fulfil exhaust gas regulations and to save resources. Higher efficiencies and lower noise emission can be realised and pollution can be reduced. Hydrogen supply and storage are difficult due to low energy density of hydrogen leading to heavy tank systems. The production of hydrogen on site is an alternative to the hydrogen transport. However, a high efficiency and highly dynamic behaviour for system components like chemical converters and heat exchangers is necessary. Microstructure technology can be a solution since high heat and mass transport coefficients allow fabrication of smaller, light weight and very efficient devices.

As different sources are available and different types of processes – i.e. (steam) reforming, autothermal reforming and partial oxidation of hydrocarbons – are useful

for different applications, the Institute for Micro Process Engineering at Forschungszentrum Karlsruhe is investigating a variety of processes for hydrogen generation:

- H₂ by reforming of methane
- H₂ by partial oxidation or autothermal reforming of propane / butane
- H₂ by reforming of methanol
- Heat production from fuel cell off-gas
- H₂ by reforming of bio-ethanol
- H₂ by reforming of gasoline
- H₂ by reforming of diesel
- H₂ clean up by catalytic processes
- mass production of devices for H₂-generation

EXAMPLES FOR HYDROGEN PRODUCTION

Oxidative reforming of methane [1]

As oxidative reforming was known to possess fast kinetics a microstructured honeycomb out of pure active metal was used for the oxidative steam reforming of methane. Rhodium was chosen as the substrate material, having high activity for reforming and high heat conductivity, so that heat from total oxidation at the reactor inlet can be distributed to regions of CO-shift at the reactor end. A method based on micro wire EDM (electro discharge machining) was developed to fabricate the microchannels with a minimum channel width of 60 µm and depth of up to 140 µm into the Rhodium. A microstructured cross section of 5.5 x 5.6 mm² with up to 1152 channels and a channel length of up to 20 mm was formed by a stack of 200 µm thick foils bonded by electron beam welding (EB) or diffusion bonding (Fig. 1). As supposed, even at operating pressures of up to 1.2 MPa with oxygen and up to 2.0 MPa with air, the catalyst was not found to be adversely affected by the reaction heat caused by the total oxidation taking place at the catalyst inlet. The high thermal conductivity of rhodium contributed to a good heat distribution in the flow direction (ΔT measured with a pyrometer at reactor inlet versus outlet was 50 – 120 K), which was reflected by significantly increased conversions (CO and H₂ selectivities were compared to those obtained by using a stack of commercial Pt/Rh gauzes). At 1100°C a hydrogen selectivity of up to 88 % was reached at a GHSV of 0.195*10⁶ h⁻¹ STP and a fuel to oxygen ratio of CH₄/O₂ = 1.75 (Fig. 1). The weight of the microstructured body was 11.5 g and the pressure drop was in the range of only 0.025 MPa.

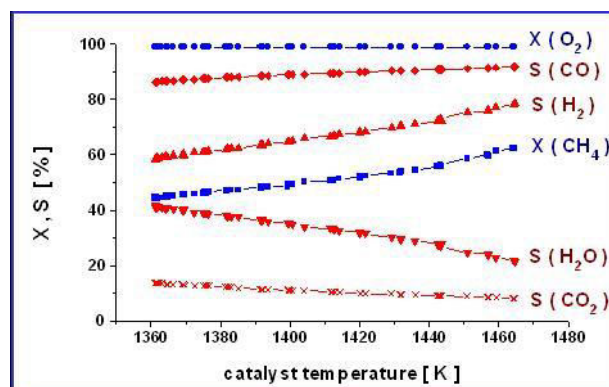
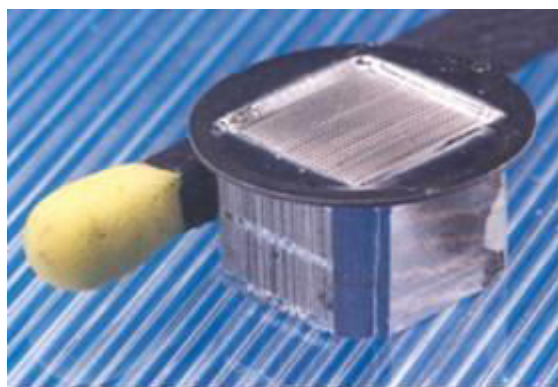


Fig. 1: Microstructured Rhodium honeycombs fabricated by EDM (left) and obtained conversion and selectivity versus temperature (right)

Steam reforming of methanol

The steam reforming of methanol was done together with Mannesmann AG to build up a complete hydrogen system suitable for dynamic hydrogen generation for automotive fuel cells. Main parts of the system, reformer, catalytic burner and selective oxidation reactor were developed at IMVT. The intermediate state of the reformer demonstrator has been published recently [2]. The PdZn alloy catalyst used was developed on the basis of a washcoating procedure with nanoparticles (Fig. 2) described in more detail elsewhere [3]. This coating applicable to already bonded microreactors was used for two different reformer foil materials, an aluminum alloy (ALMg3) and copper. To a total number of e.g. 48 microstructured copper foils with channels of $100 \times 150 \mu\text{m}^2$, the empty channels yielding a reaction volume of 19.3 cm^3 , 13.2 g of catalyst was applied (20 μm thick layer). The necessary heat for reaction was delivered by heat cartridges within the reformer body. The demonstrators (Fig. 2) were tested under steady state and dynamic operation. At 310°C a maximum conversion of methanol of 90% was reached when feeding 70 g/h methanol with a molar water/methanol ratio of 1:2. This is enough for a 200 W fuel cell system assuming a total efficiency of 42%. Scale up effects, which reduce body to foil weight ratio to approximately 20%, result in a value of 0.7 kg/kW for the reformer. Dynamic experiments with the demonstrators highlighted that the hydrogen demand during load changes and temperature changes was met as fast as in other already well optimised systems although the weight of was not optimised in the microsystems.

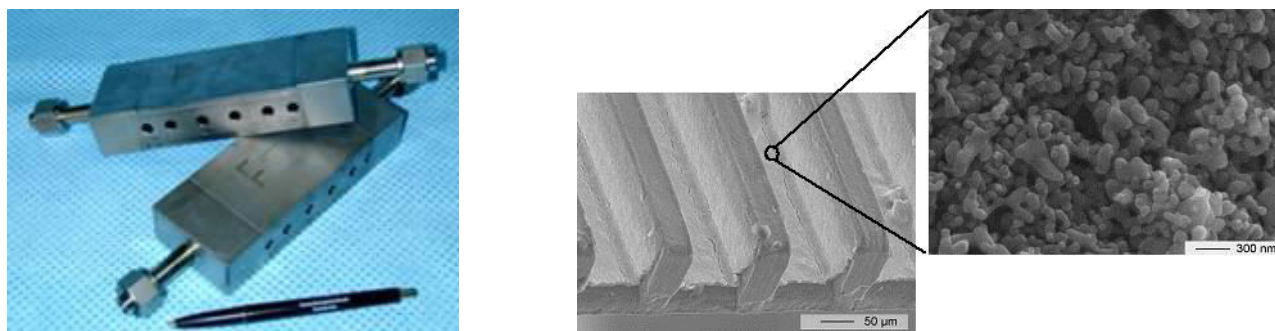


Fig.2: Demonstrators for methanol reforming (left) and PdZn catalyst coating (right)

Steam reforming of methane

For the steam reforming of methane a demonstrator (Fig. 3) for a 500 W fuel cell system was fabricated and tested together with the project partner Technical University of Munich (TUM) in steady state and dynamic operation. For heat supply methane was burned catalytically in a second passage in counter current flow. The reactor weighs 1.2 kg, has a complete length of 95 mm, a width of 22 mm and a height of 60 mm. The reformer passage was coated with a NiAl_2O_4 catalyst, the burner passage was impregnated with Pt-solution. The use of the microstructured reformer enables the production of up to 2 l/min hydrogen (STP). The reactor has been operated autonomously without external heating and achieved quite high methane conversions in excess of 70% at high loads. Methane conversions of 90 %

were achieved at lower loads. The temperature could be well controlled combusting a mixture of methane and hydrogen in co-flow with the reforming reaction. Start-up tests showed that a constant product composition is achieved at less than 20 s (Fig. 3) after admittance of methane [4].

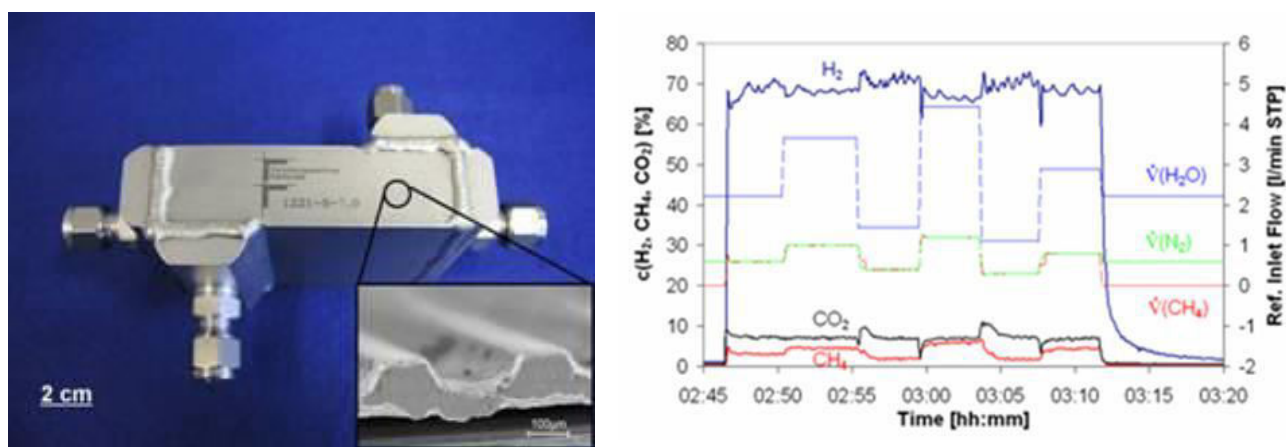


Fig. 3: Demonstrator and catalyst coating for methane reforming (left) and product composition during load changes (right)

Oxidative and autothermal reforming of propane/butane

The oxidative as well as autothermal reforming of propane / butane, i.e. energy supply by oxidation in equilibrium with heat loss and heat demand of reforming, was started together with SINTEF and the Norwegian University for Science and Technology (NTNU) in Norway by applying the rhodium honeycombs to propane experiments. Due to progress in fabrication of high temperature alloys and catalyst coating technology it was possible to switch to rhodium impregnated microstructured honeycombs out of FeCrAlloy© (Fig. 2). The substrate material having high aluminum content segregates aluminum oxide at elevated temperatures (annealing) under air conditions. From the reaction experiments it is clear that this oxide layer provides enough surface area for the desired reaction. Still using the same channel geometries as in rhodium honeycombs it was possible to increase conversion and selectivity considerably by applying the high temperature material. Rhodium and nickel impregnation were compared and rhodium was found to be superior in conversion [7]. Temperature measurements were performed within the honeycomb and compared with foam systems at SINTEF (Fig. 4). Results showed that the reduced temperature gradients within the honeycombs were the reason for superior long term stability of the catalyst [8]. The weight of the honeycombs can be reduced by use of the high temperature alloy by 36%. The hydrogen selectivity for oxidative reforming is already as high as 60% at 1000°C with a C/O ratio of 0.8 and a residence time of 12.6 ms (STP conditions).

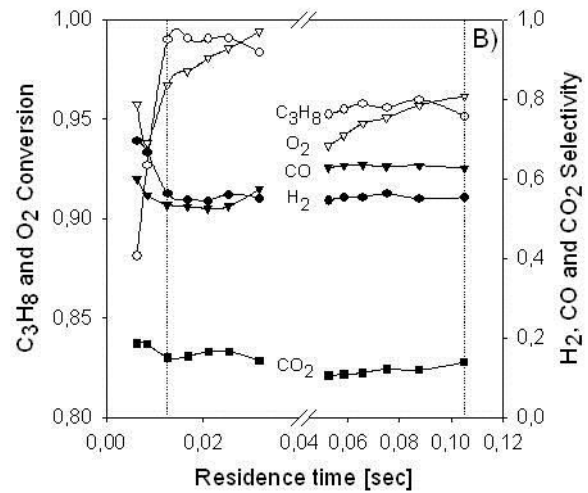
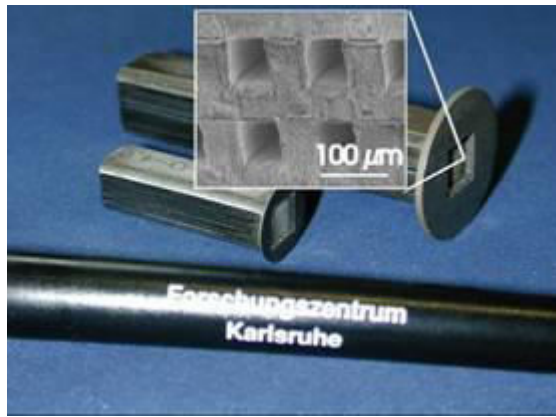


Fig. 4: Microstructured FeCrAlloy[®] honeycomb (left) and comparison of conversion and selectivities (right) during autothermal reforming on honeycomb (0 – 0.04 s) and foam (0.02 – 0.12 s); dotted lines represent an inlet flow of 1000 ml/min STP.

Steam reforming of gasoline

Most of the work done on gasoline reforming systems has been done in the BMBF project called “Micromotive” together with DaimlerChrysler and is described in more detail elsewhere [9]. The main objective of this work is to evaluate the mass fabrication possibilities of microstructured components for a hydrogen generation system with a fuel cell power of 5 kW. Different microstructured heat exchangers for evaporation, heat recovery and condensation as well as a reactor for the system (Fig. 5) have been built. Mass production is feasible with today’s knowledge, integrating microembossing (Fig. 5), microetching and soldering.

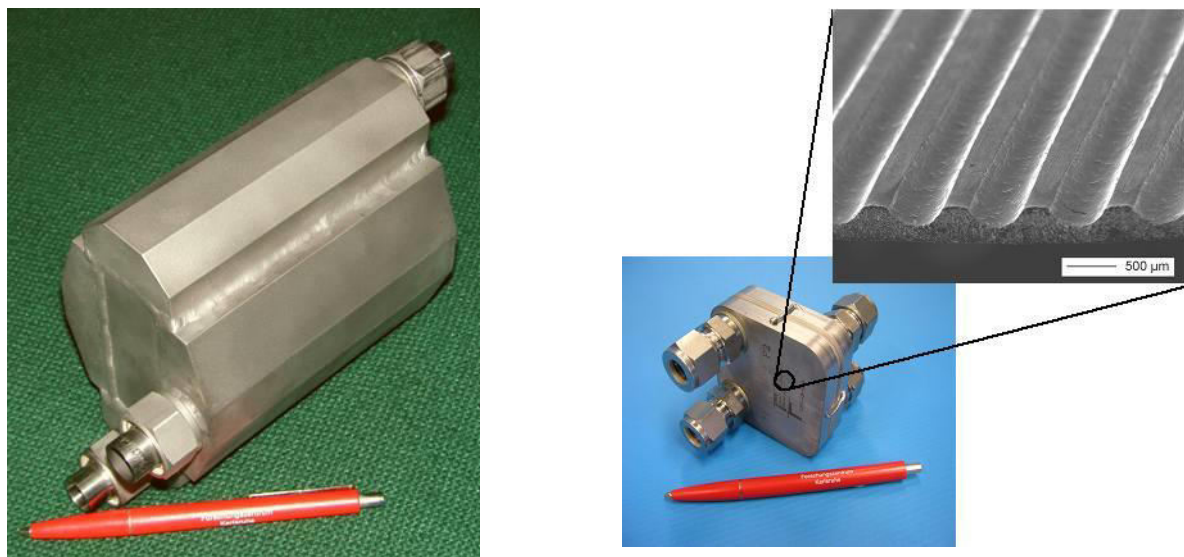


Fig. 5: Microstructured reactor for a 5 kW fuel cell system (left) and heat exchanger design for microembossing and a SEM picture of the embossed structure

Steam reforming of diesel fuel

Steam reforming on gasoline is performed in PhD work at IMVT in collaboration with the University of Clausthal. Due to the complexity of diesel fuel, its conversion by steam reforming causes problems of e.g. coke formation and dependence on fuel origin. Therefore reforming of different diesel components and conversion intermediates is investigated in a lab micro reactor (Fig. 6) systematically. Experiments so far were conducted over a rhodium catalyst on a support layer of Al_2O_3 . The reaction conditions in the test reactor varied between 400-700°C, steam to carbon ratios from 3 to 6 and residence times from 40-160 ms. The catalyst regeneration to remove carbonaceous residues was performed when necessary at 750°C in air and subsequently in 2 vol% hydrogen. For the evaporation of higher boiling hydrocarbons such as hexadecane a new injection nozzle has been fabricated to create a fine hydrocarbon spray which evaporates in water vapour. Furthermore a complex gas chromatographic method to analyse hydrocarbons up to C_{16} and permanent gases (hydrogen, nitrogen, oxygen, carbon monoxide and dioxide) in one analysis run has been developed.

Turnover frequency of the fuel molecules decreases linearly with increasing number of carbon atoms in the feed for linear hydrocarbons. Branched molecules as e.g. isooctane seem to be converted easier and therefore show higher turnover frequencies (Fig. 6). Calculations show that the observed conversions and product gas compositions are close to the thermodynamic equilibrium.

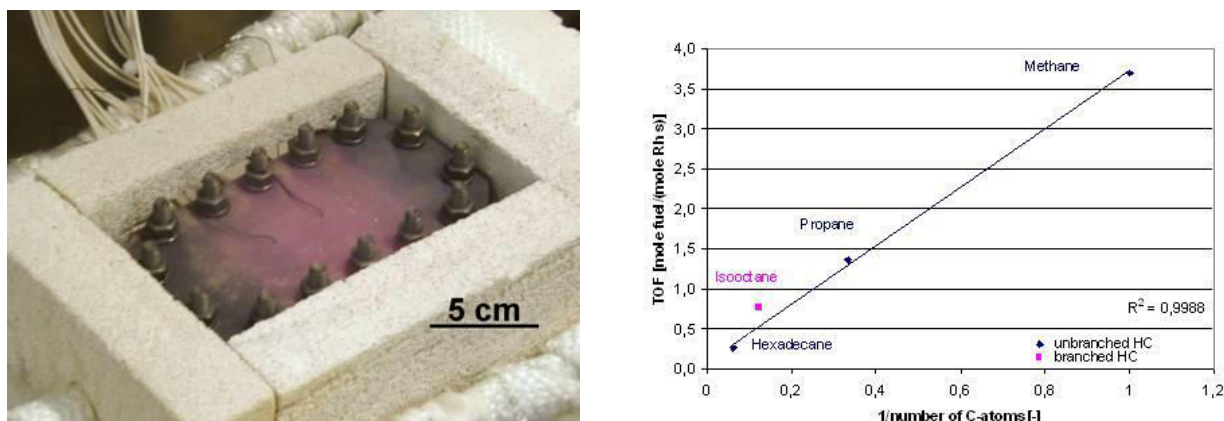


Fig. 6: Micro structured test reactor (right) at operation temperature 700°C containing 14 replaceable foils with 100 micro channels each (Channel length 80 mm, width 200µm, depth 200µm) and TOF for steam reforming of different hydrocarbons

CO removal by catalytic processes

Necessary components for gas cleaning and heat generation have been developed and are still objective of further work. The gas cleaning includes selective methanation, selective oxidation and water gas shift.

Methanation in microreactors is a good possibility to reduce the CO content in a reforming gas mixture in presence of CO_2 [10]. The reactor used (Fig. 7) at IMVT consists of 27 foils (length = 78 mm, width = 20 mm, thickness = 230 µm) with 17 channels (width = 600 µm, height = 150 µm). The experiments were performed with

a gas mixture of 1 vol.% CO, 1 vol.% O₂, 25 vol.% H₂ (N₂: balance). At a temperature of 250 °C a CH₄ space time yield of 9 mol l⁻¹·h⁻¹ was reached. At temperatures up to 250 °C the CH₄ space time yield by CO methanation is higher than by CO₂ methanation. If CO (in a mixture of CO and CO₂) has to be converted over a Ru/SiO₂-catalyst by methanation a sufficient amount of O₂ has to be added and temperature has to be controlled precisely. Because of the dimension and the heat transfer coefficients of the microchannel reactor the latter demand can be met very easily. Temperature ranges can be controlled exactly, which is important to maximize the ratio of CO to CO₂ methanation rate. A microchannel reactor is an excellent tool for studying the reaction network of methanation of CO in presence of oxygen, CO₂ and hydrogen without heat transfer limitation.

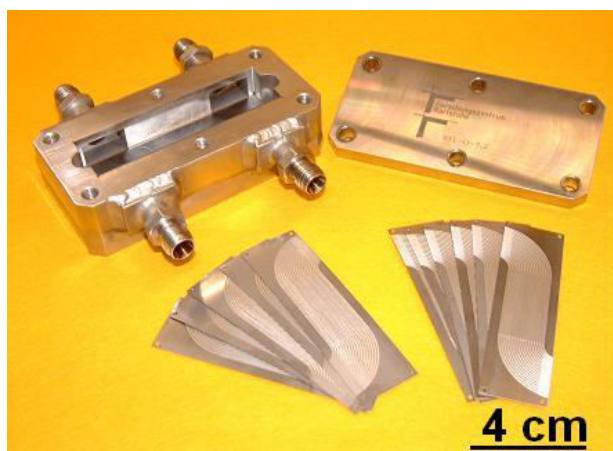


Fig. 7: Microstructured reactor for lab experiments on selective methanation

Also the *water gas shift reaction* (WGS) and the *selective oxidation of CO* (Selox) are good possibilities to reduce the CO content in reforming gas mixtures [11]. At small average residence times of less than 30 ms in a relatively small microreactor (structured body: length 20 mm, width = 20 mm, height = 2.5 mm), the water gas shift reaction at 250°C – 300°C using a Ru/ZrO₂ catalyst allowed to reduce the CO content by more than 95%. So it is possible to reach a very high H₂ space time yield of 720 mol·l⁻¹·h⁻¹.

By means of the selox reaction, which was performed in a microreactor with same geometrical dimensions like the WGS reaction, a residual CO content of 1 vol.% could be oxidized to CO₂ with a conversion of more than 99% when using a CuO/CeO₂ catalyst at less than 150°C and an average residence time of 14 ms (Fig. 8). However, CO-selectivity amounted to 20% for the selox reaction only. That corresponds to a CO₂ space time yield of 75 mol·l⁻¹·h⁻¹. The selox catalysts prepared by the IMVT, allow the temperature range of selective CO oxidation to be extended considerably. The usable temperature range is increased from 60°C – 120°C (conventional reactors) to 60°C – 180°C. Because of the small dimension and the high heat transfer coefficients of a microreactor system, temperatures can be reached very fast. Additional temperature ranges can be controlled exactly, which is important to maximize the CO-selectivity.

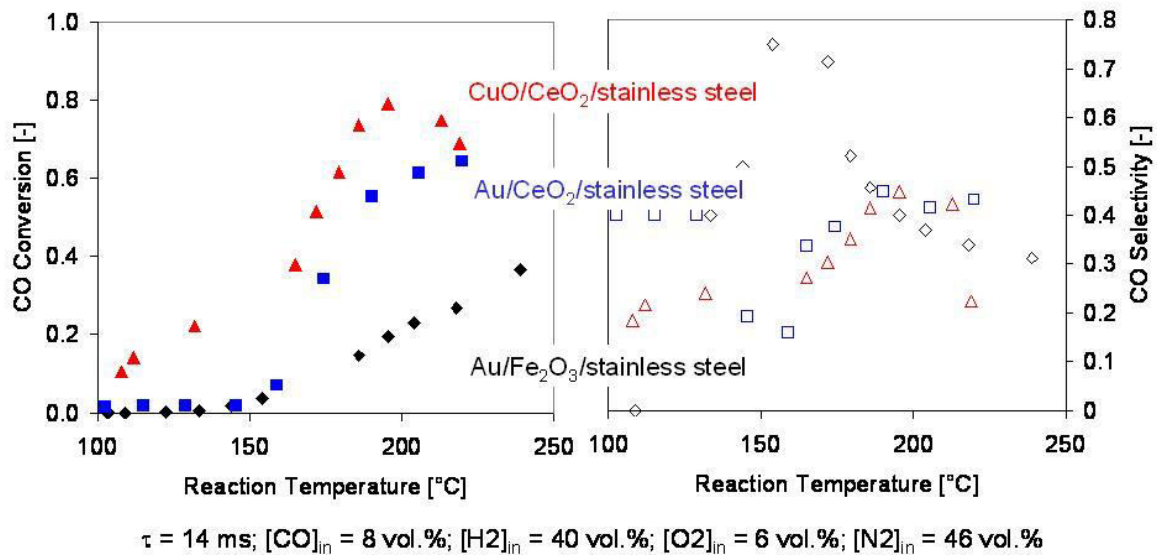


Fig. 8: Conversion and selectivities for selective oxidation experiments on different catalysts still exhibiting high selectivities at temperatures up to 200°C due to increased heat transfer in the microstructured reactor

Heat generation for endothermal processes in fuel cell technology

First results in collaboration with the Max Planck Institut für Kohlenforschung Mülheim about heat generation from hydrogen combustion on platinum impregnated aluminum oxide layers prepared by a CVD technique in cross flow devices have been published early in 2000 [12]. A different approach concerning the catalyst preparation based on platinum impregnated aluminum oxide obtained by anodic oxidation of aluminum was presented on the 4th IMRET [13]. At the 5th IMRET further experiments have been presented for hydrogen combustion on sol-gel supported platinum catalysts highlighting the modularity of IMVT's microstructured heat exchangers, mixers and cross flow reactors. The reaction product water was condensed in a subsequent heat exchanger and prior to the reactor a mixer was connected for security reason [14] (for space applications). In all three cases about 1 kW of heat was generated in approximately 1 cm³ of structured body.

To reduce the thermal stress in the microstructured cross flow devices (Fig. 9) further development was done and a new design (Fig. 9) was found which is capable to prevent hot spots [15]. The hydrogen mixing with air/oxygen is distributed along the reaction channels by small foil interconnecting holes so that reaction rate is lowered (Fig. 10). The overall maximum heat transfer is reduced in the new design of the so called catalytic burner by a factor of about 10 but temperature distribution is excellent and cold start properties (Fig. 10) remained nearly constant.

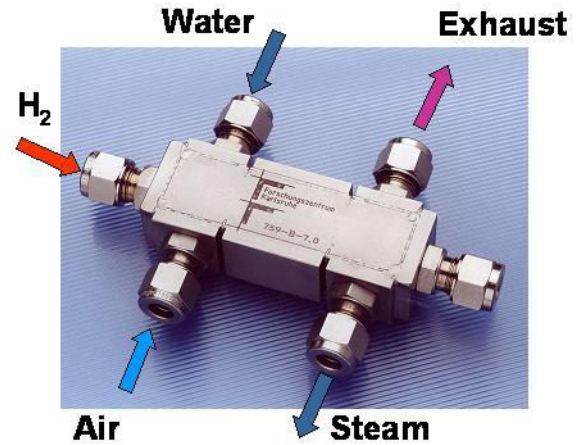
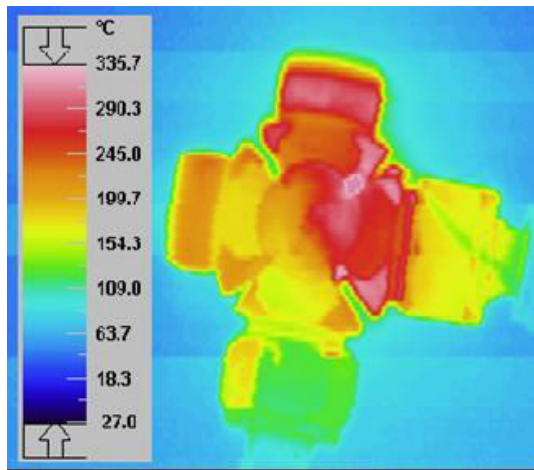


Fig. 9: Hot spots demonstrated by IR-photography in a cross flow device (left) and new design for e.g. evaporation of water by oxidation of hydrogen without hot-spot (right)

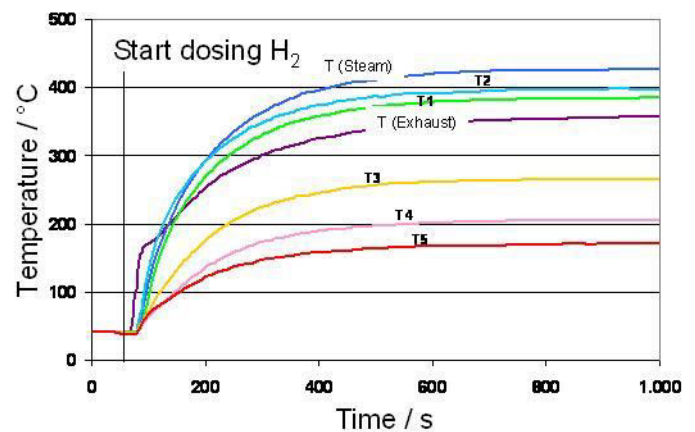
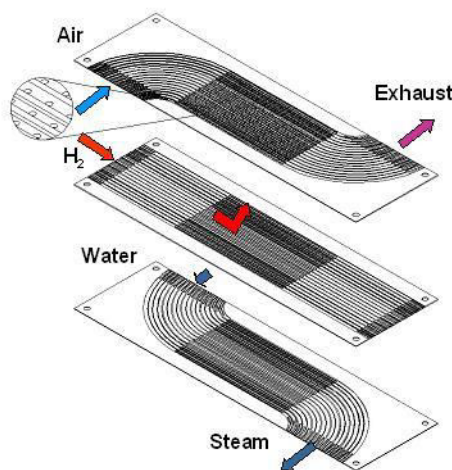


Fig. 10: Schematic of the flow distribution in the new design of a catalytic burner (left) and gas/body temperatures in the burner during cold start (T1 – T6 located along the reaction channels in equal distances)

CONCLUSION

The results obtained for hydrogen generation by the use of micro technology are promising in terms of temperature control, catalytic conversion and mass fabrication. However, challenges like quality control of catalytic coatings and improved dynamic operation and strategies therefore have to be faced when a new fuel has to be evaluated for hydrogen generation.

Literature

- 1 Mayer et al., Ind. Eng. Chem. Res. 2001, 40, 3475-3483
- 2 Pfeifer et al., Chem. Eng. Res. Des. 2003, 81, A7, 709-720
- 3 Pfeifer et al., Appl. Cat. 2004, 270, 165-175
- 4 Cremers et al., Proc 7th IMRET 2003, 202

- 5 Reuse et al., Chem. Eng. J. 2004, 101, 133-141
- 6 Cremers et al., Proc 7th IMRET 2003, 167
- 7 Aartun et al., Chem. Eng. J. 2004, 101, 93-99
- 8 Aartun et al., 2005, IMRET 8, Proc. on CD-ROM
- 9 Pfeifer et al., 2005, IMRET 8, Proc. on CD-ROM
- 10 Görke et al., 2005, IMRET 8, Proc. on CD-ROM
- 11 Görke et al., Appl. Cat. 2004, 263, 11-18
- 12 Janicke et al., J. Cat. 2000, 191, 282-293
- 13 Wunsch et al., Proc. 4th IMRET 2000, 481-487
- 14 Haas-Santo et al., Proc. 5th IMRET 2001, 313-321
- 15 Pfeifer et al., Chemie Ingenieur Technik 2004, 76, 607-613
- 16 Pfeifer et al., AIChE J. 2004, 50, 418-425

© P. Pfeifer, K. Haas-Santo, O. Görke, J. Thormann, K. Schubert, 2006

УДК 536.42

В.В. Кузнецов, О.В. Витовский, С.А. Сафонов, А.С. Шамирзаев
ИТ СО РАН, Новосибирск

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ КОМПАКТНЫХ ИСПАРИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КАНАЛОВ МАЛОГО РАЗМЕРА

Введение

Исследование гидродинамики и тепломассообмена при течении многофазных сред в мини- и микроканалах относится к важным современным задачам прикладной и фундаментальной теплофизики. Хотя теплообмен при движении парожидкостного потока в трубах кожухотрубных теплообменников широко исследовался во второй половине прошлого века, в настоящее время наблюдается большой интерес к исследованию режимов течения и теплообмена в каналах малого размера. Это связано с перспективой применения результатов фундаментальных исследований в прикладных задачах, таких как создание компактных двухфазных теплообменников и химических реакторов, систем охлаждения микропроцессоров компьютеров.

Если в качестве определяющих параметров выбрать гидравлический диаметр и общий массовый расход, то у различных типов теплообменников область этих параметров различная. Несмотря на большое число работ, описывающих теплообмен при кипении и испарении, а так же режимы двухфазного течения в трубах большого диаметра, их результаты не могут быть прямо использованы при анализе теплообмена в каналах с малым проходным сечением в связи с важностью влияния капиллярных сил.

В компактных двухфазных теплообменниках может быть достигнуто десятикратное и выше превышение теплового потока по сравнению с двухфазным потоком в обычной круглой трубе. Это обеспечивается как за счет высокой плотности поверхности теплообмена, так и увеличения коэффициента теплоотдачи в некруглых каналах малого размера.

Основным конструкционным решением, используемым в компактных теплообменниках, является расширение поверхности теплоотдачи рекуператора за счет оребрения с одной или больше сторон, и уменьшения гидравлического диаметра поверхности регенератора. Наиболее используемый тип компактных теплообменников это пластинчато-ребристые теплообменники. Необходимо отметить, что при увеличении поверхности теплообмена возникает увеличение сопротивления и затраты механической энергии на преодоление силы трения легко могут достигнуть величины, близкой к количеству энергии передаваемой в виде тепла. В большинстве тепловых систем механическая энергия стоит гораздо больше, чем эквивалентное ей количество тепла. Поэтому с механической точки зрения наиболее выгодными являются плёночный дисперсный и ячеистый режимы течения, поскольку в них газовая фаза является односвязной, что обеспечивает меньшие потери давления.

Для компактного испарителя эффективность теплообмена определяется распределением жидкости в канале. Использование некруглых каналов в компактных теплообменниках дает принципиальную возможность влиять на распределение жидкости по каналу за счёт влияния капиллярных сил и напряжения трения. Напряжение трения которое не оказывает сильного влияния на теплообмен в кожухотрубных теплообменниках может давать сильный эффект в некруглых каналах компактных теплообменников. Так при течении жидкости в канале некруглой формы с острыми углами под воздействием сил гравитации сил поверхностного натяжения и напряжения трения образуются две зоны: плёночное течение и течение жидкости в мениске с постоянным радиусом кривизны в угле канала.

Существуют ещё целый ряд факторов влияющих на теплоотдачу в компактных теплообменниках из-за перераспределения плёнки жидкости по поверхности теплообмена, а именно влияние формы и размеров канала, перфорации и т.д. Новые модификации компактных теплообменников создаются до сих пор, и влияние этих параметров широко исследуется в настоящий момент.

В настоящей работе приводятся и анализируются экспериментальные данные по коэффициентам теплоотдачи при кипении хладона 21 в прямоугольном канале 1.6×6.3 мм для массового расхода $G = 200$ кг/м²с в широком диапазоне тепловых потоков и паросодержания. Проводится сравнение полученных данных с моделью теплообмена Клименко 1990 и приводится пример численного расчёта распределения коэффициентов теплообмена и плёнки жидкости по периметру канала.

Теплообмен при кипении хладонов в прямоугольных миниканалах

Экспериментальная установка состоит из следующих основных частей: насос; теплообменник, для сохранения жидкости переохлаждённой при входе в испаритель; датчики измерения расхода; парогенератор; экспериментальный участок; доиспаритель, для устранения пульсаций давления; конденсатор. Рабочая жидкость хладон 21 из конденсатора насосом подаётся на датчик измерения расхода, после чего поступает в испаритель, для приготовления

двухфазного потока с желаемым паросодержанием. Двухфазный поток из испарителя, через экспериментальный участок поступает в доиспаритель и полностью испаряется. После чего пар поступает в конденсатор и полностью конденсируется. Экспериментальный участок представленный на рис 1а выполнен из нержавеющей трубы с толщиной стенки 0.1 мм длиной 350 мм. На каждом конце трубы расположен фланец с токоподводом, отборником давления и термопарой. Обогреваемая длина канала 290 мм. Прямоугольная рабочая секция канала выполнена прессованием и имеет длину 250 мм. Характерный размер шероховатости полученной в канале составлял 5-10 мкм. Внутренний поперечный размер канала равен 1.6×6.3 мм. На входе и выходе из канала реализован плавный переход от круглого сечения к прямоугольному сечению. Обогрев канала производился переменным электрическим током. По длине канала на внешней стороне в 4-х сечениях наклеены термопары. Термопары размещены в центре короткой стороны, в углу канала и по длинной стороне канала. Все термопары имели индивидуальную калибровку. Точность измерения температуры составляла 0.1К. Канал и фланцы тепло и электроизолированы.

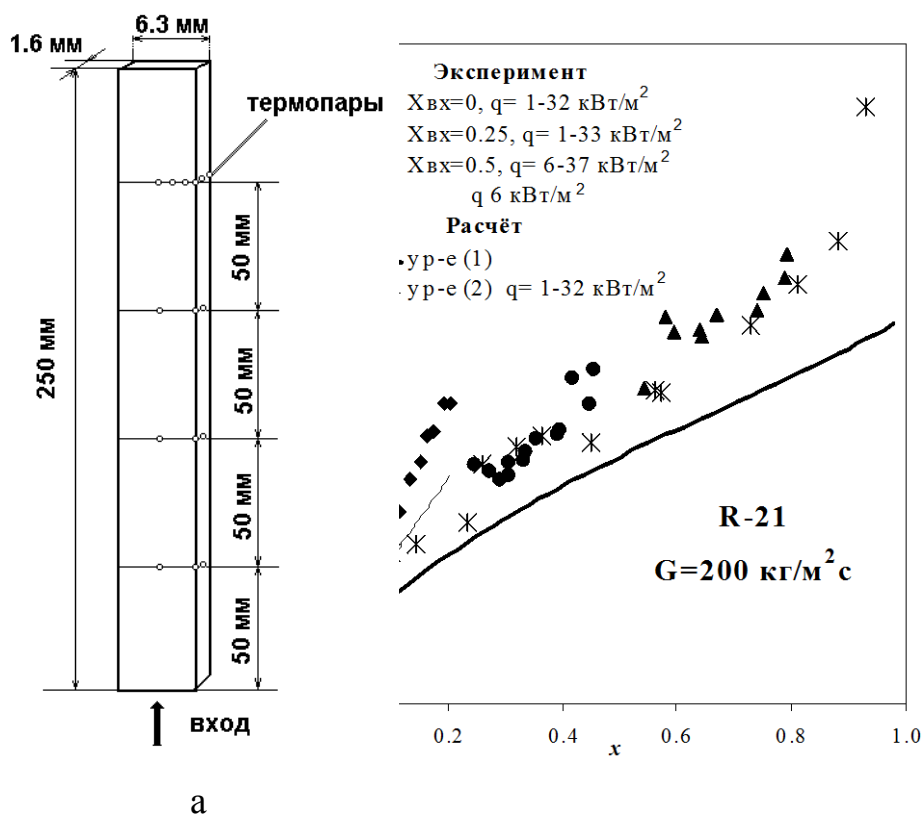


Рис. 1. Экспериментальный участок – (а). Сравнение экспериментальных данных по коэффициентам теплоотдачи при $G \sim 200 \text{ кг/м}^2\text{с}$ с расчетом по корреляции Клименко 1990 – (б)

На рис. 1б представлены экспериментальные данные по локальным коэффициентам теплоотдачи, усреднённым по периметру канала, для восходящего кипения в зависимости от массового паросодержания.

В проведенных опытах варьировались: тепловой поток при фиксированном начальном паросодержании от 1 до 40 кВт/м², или начальное паросодержание при постоянном тепловом потоке $q = 6$ кВт/м². При изменении локального массового паросодержания от нуля до единицы коэффициент теплообмена при кипении непрерывно возрастает даже при постоянном тепловом потоке. Это показывает существенную роль конвективного испарения даже при малых массовых паросодержаниях. На рис.1б так же приведен расчет по модели теплообмена Клименко 1990,

$$\alpha_{\text{еиä}} = 0.087 \text{Re}_{\text{äö}}^{0.6} \text{Pr}_{\text{ä}}^{1/6} (\rho_{\text{г}} / \rho_{\text{ä}})^{0.2} K_{\lambda}^{0.09} \lambda_{\text{ä}} / b \quad (1)$$

в случае, когда теплоотдача определяется конвективным испарением и

$$\alpha_{\text{еëи}} = 7.6 \times 10^{-3} Pe_*^{0.6} K_P^{0.54} \text{Pr}_{\text{ä}}^{-0.33} K_{\lambda}^{0.12} \lambda_{\text{ä}} / b \quad (2)$$

когда определяющим механизмом теплоотдачи является кипение. При расчете теплоотдачи используется максимальное значение. На рис. 1б для данных полученных при входном паросодержании 0 (темные ромбы) основным механизмом теплоотдачи является кипение, во всех остальных случаях, согласно модели Клименко, теплообмен должен определяться конвективным испарением.

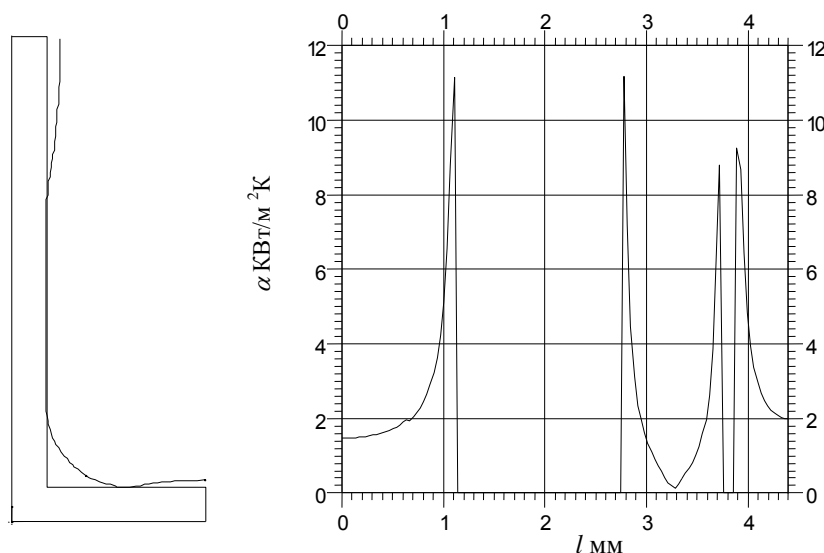


Рис. 2. Расчёт распределения толщины пленки и коэффициентов теплоотдачи по периметру прямоугольного микканала

Экспериментальные точки лежат выше, чем дает расчет для всех серий опытов. Расслоение данных при различных тепловых потоках существенно превышает точность эксперимента. Это показывает существование режимов, в которых существует совместное влияние конвекции и кипения на коэффициенты теплоотдачи, что не учитывается в системе уравнений (1 – 2).

При $x > 0.6$ расслоение данных при разных тепловых потоках не наблюдается, и кипение практически полностью подавляется.

На рис. 2 представлены расчётные данные по распределению коэффициентов теплоотдачи по периметру прямоугольного миниканала для нисходящего течения при числе Рейнольдса жидкости $Re = 100$ и тепловом потоке 1 кВт/м^2 . Слева представлено распределение плёнки по периметру канала. Капиллярные силы стягивают жидкость в углы канала, и рядом с углом реализуется область очень тонких плёнок с высокими коэффициентами теплообмена. Одним из факторов могущих сильно влиять на теплоотдачу является характеристика поверхности. Предположено, что сухое пятно образуется в момент, когда толщина пленки становится равна высоте шероховатости.

В миниканалах коэффициенты теплообмена определяются течением плёнки неравномерной толщины. Для различных форм миниканалов реализуются различные формы поверхности жидкости из-за взаимодействия капиллярных сил и сил межфазного трения. В пластинчатых теплообменниках, используемых в качестве испарителей, форма каналов близкая к прямоугольной и характеристика поверхности оказывают существенное влияние на теплоотдачу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. V.V. Klimenko, 1990, A generalized correlation for two-phase forced flow heat transfer – second assessment, Int. J. of Heat and Mass Transfer, vol.33 pp. 2073-2088.

© В.В. Кузнецов, О.В. Витовский, С.А. Сафонов, А.С. Шамирзаев, 2006

УДК 621.1.016:536.25

В.В. Кузнецов, О.В. Витовский, С.В. Димов, С.П. Козлов

Институт теплофизики им. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

ТЕПЛОМАСООБМЕН В МИКРОХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРАХ

1. ВВЕДЕНИЕ

Течение реагирующей смеси газов в каналах малого размера используется в теплообменниках-реакторах для интенсификации тепло и массообмена при химических превращениях [1-5]. Применение топливных элементов, использующих водород как топливо и реализующих принцип электрохимической генерации электрической энергии, диктует создание локальных микрохимических источников водорода, основанных на использовании микроканальных реакторов и наноструктурных покрытий, развивающих внутреннюю поверхность реактора. Высокая производительность микроканальных реакторов достигается за счёт интенсификации тепло и массопереноса в каналах субмиллиметрового и микронного размера при

параллельной реакции в большом числе каналов и высокой степени использования катализатора. Уменьшение эффективной длины переноса в микроканальном реакторе в значительной степени устраняет диффузионные ограничения и ускоряет скорость химических превращений. Одним из решений данной проблемы является использование дискового щелевого теплообменника-реактора, в котором реализуется радиальное течение реагирующих газов в узком щелевом канале. При этом дисковые пластины реактора могут быть выполнены из пористого композитного каталитически активного материала с высокой теплопроводностью [6]. Компактный реактор такого типа может быть использован для различных химических превращений, таких как одностадийная паровая конверсия оксида углерода, синтез Фишера-Тропша и др. Актуальность создания компактного аппарата паровой конверсии СО определяется развитием работ в области водородной энергетики и насущностью разработки компактного устройства получения чистого водорода, как топлива для топливных элементов, для использования его в автономных системах энергоснабжения, в том числе на борту автомобиля. Для решения задачи интенсификации тепло- и массообмена при химических превращениях в многокомпонентных реагирующих смесях в последнее время используют также микроканальную технологию. Микрохимические реакторы-теплообменники используются для конверсии углеводородов и спиртов в синтез газ и водород, а также целого ряда других высоконапряженных энергетических и химических процессов.

Целью данной работы является экспериментальное и численное исследование тепловых, диффузионных и физико-химических процессов при течении высокотемпературной реагирующей смеси в сборке мили- и микроканалов с активированием реакции на стенках каналов, организации тепловых потоков при сильно эндотермических и экзотермических реакциях с выделением и поглощением тепла в различных зонах реактора.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ЩЕЛЕВОМ РЕАКТОРЕ

Щелевой дисковый теплообменник, схема которого показана на рис. 1, представляет собой набор круглых пластин, расположенных с зазором для течения газа. При этом течение газа в каждом следующем зазоре чередуется по направлению от центра к периферии и от периферии к центру. Для такого типа теплообменника и двух зазоров между пластинами были измерены коэффициенты теплоотдачи от нагреваемой трубы к протекающему внутри его газу. Коэффициент теплоотдачи определялся как [7]: $\alpha = Q/(S_{\text{tot}}\Delta T_m)$; здесь: Q – тепловая мощность, передаваемая от нагреваемых поверхностей воздуху, S_{tot} – площадь поверхности пластин, омываемая проходящим воздушным потоком, ΔT_m – среднелогарифмическая разность температур, определяемая как: $\Delta T_m = (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) * (\ln(\frac{T_{\text{out}} - T_w}{T_{\text{in}} - T_w}))^{-1}$, где T_{in} – температура воздуха на входе в теплообменник, T_{out} – температура воздуха на выходе из щелевого, T_w – среднее значение температуры на цилиндрической стенке. Тепловая мощность Q

определена как: $Q = GC_p\Delta T$, где G – массовый расход воздуха; C_p – удельная теплоемкость воздуха; ΔT – перепад температур воздуха на входе и выходе.

На рис. 2 приведены зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса для двух размеров зазора между пластинами теплообменника. Здесь число Рейнольдса и число Нуссельта определены как: $Re = V(2h)/\nu$, $Nu = \alpha(2h)/\lambda$, где: V – приведенная скорость газа в срединном сечении пластин, $2h = D_h$ – гидравлический диаметр, λ – коэффициент теплопроводности. Увеличение числа Нуссельта с ростом числа Рейнольдса характерно для ламинарного течения в каналах малого размера (микроканалах) [8] и для турбулентного течения [7]. Диапазон чисел Рейнольдса, представленный на рис. 2 не отражает в полной мере характер течения в рассматриваемой системе пластин. При радиальном течении на входе воздуха в центральное отверстие числа Рейнольдса достигают значений 2000 и течение является турбулентным. При выходе воздуха через отверстия на периферии течение является суживающимся и также турбулентным. Возмущения, генерируемые турбулентным течением на входе, распространяются в срединную область, возмущая ламинарное течение, что и приводит к зависимости коэффициента теплоотдачи с ростом расхода газа.

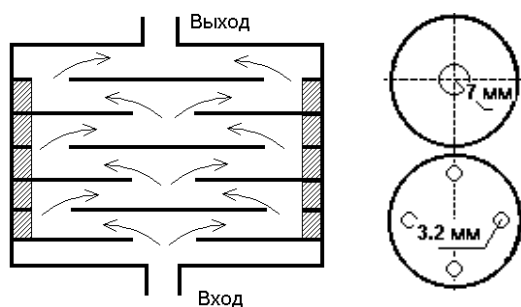


Рис. 1. Схема течения газа в дисковом щелевом теплообменнике и вид составляющих его дисков с одним центральным и четырьмя периферийными отверстиями. Диаметр пластин 41 мм

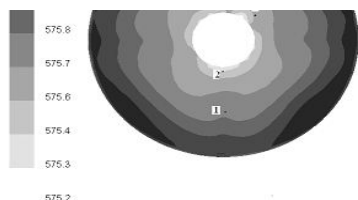


Рис. 3. Расчетное поле температуры поверхности каталитической пластины. $h = 2$ мм, $G = 0.85$ г/с, $\lambda = 10$ W/mK, $\delta = 2$ мм, $q = 500$ kW/m³. Точки – места измерения температуры поверхности в эксперименте

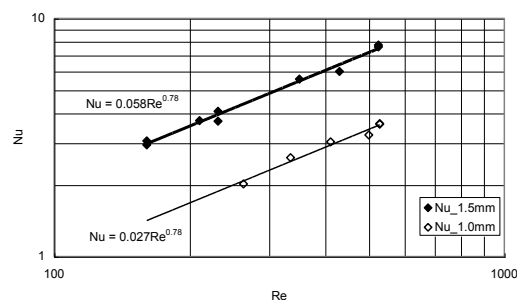


Рис. 2. Зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса при течении газа в щелевом дисковом теплообменнике для $h = 1.5$ и 1.0 мм. Точки – эксперимент, линии – аппроксимации

Для дискового теплообменника исследовано поле температур отдельной пластины при наличии тепловыделения на ней. Труба реактора заполнялась набором пластин из композитного материала с высокой теплопроводностью [6], разделенных кольцами, которые определяли расстояние между пластинами. Течение газа в реакторе формировалась от периферии к центру, с последующим

изменением от центра к периферии. В отличие от остальных предпоследняя пластина с центральным отверстием имела каталитическое покрытие. Для измерения температур поверхности каталитической пластины размещены четыре хромель-алюмелевые термопары. Схема расположения термопар приведена на рис. 3. На начальном этапе через реактор прокачивался воздух, который предварительно нагревался до температуры 583К. После достижения равномерного распределения температуры пластины в реактор подавалась рабочая смесь газа. Рабочая смесь представляла собой 2% смесь водорода в воздухе. При прохождении рабочего газа через реактор на каталитической пластине происходит горение водорода. На рис. 4 приведено изменение температуры поверхности катализатора с течением времени. Здесь же приведено изменение входной и выходной температуры газа. Температура пластины быстро увеличивается, в то время как выходная температура смеси достигает равновесного значения за большое время. Наблюдается повышенная температура (T4) в застойной зоне реактора.

Для элемента пластинчатого реактора было рассчитано течение и теплообмен газовой смеси. Область решения включала пространство между двумя пластинами и области, занимаемые отверстиями. На пластине задавалось равномерное поверхностное или объёмное тепловыделение. Задавались параметры рабочей смеси и теплофизические параметры стенки. На нижней пластине задавались адиабатические граничные условия. В результате расчета получено распределение температур каталитической поверхности, которая приведена на рис. 3. Наблюдается слабое изменение температуры поверхности по радиусу каталитической пластины. На рис. 5 приведено сравнение измеренных и рассчитанных температур поверхности. Здесь же приведены расчеты распределения температуры поверхности при поверхностном выделении тепла для нетеплопроводной пластины. В этом случае изменение температуры поверхности существенно больше, что может неблагоприятно повлиять на степень конверсии и селективность продуктов реакции

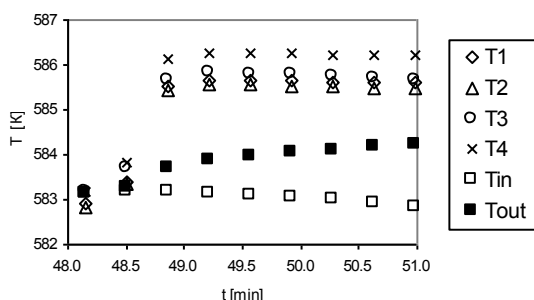


Рис. 4. Изменение температуры поверхности каталитической пластины (T1-T4), входной и выходной температуры рабочей смеси газов при начале реакции от времени при $G = 0.85$ г/с $h = 2$ мм

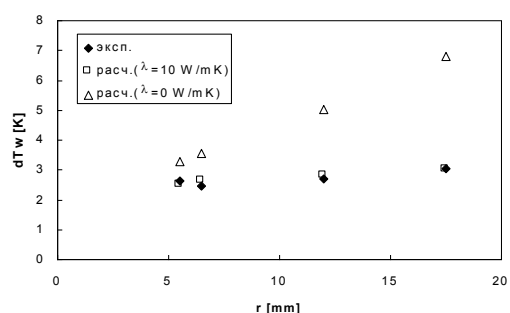


Рис. 5. Изменение температуры поверхности в эксперименте и в расчете для одинаковой мощности тепловыделения с учетом теплопроводности стенок и без нее

3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ НЕПОЛНОГО ОКИСЛЕНИЯ МЕТАНА

Исследование реакции неполного окисления метана проведено на экспериментальном стенде, который включает в себя газовые магистрали для доставки метана и кислорода из баллонов в микрохимический реактор, газовые контроллеры для поддержания требуемых расходов газов, блок предварительного подогрева газовой смеси и рабочий участок. После химического превращения в рабочем участке образовавшаяся смесь газов направляется в газовый хроматограф для определения компонентного состава и в газовый счетчик для измерения объемного расхода. Рабочий участок стенда представляет собой микроканальную пластину с нанесенным катализатором, размещенную между толстостенными обкладками, оснащенными нагревательными элементами. В качестве активирующего покрытия использован платинородиевый катализатор на основе γ – Al_2O_3 и модифицирующих добавок. Для контроля температуры поверхности реактора хромель-алюмелевые термопары приварены к микроканальной пластине точечной сваркой. Микроканальная пластина имела 11 каналов длиной 40 мм и глубиной 1 мм. Опыты проведены при начальной температуре реактора около 800°C . Мольное соотношение реагирующих газов на входе в реактор составляло $\text{CH}_4/\text{O}_2 = 2$. Диапазон времен пребывания 16 – 110 мсек.

Измерения распределения температуры реагирующей смеси газов по длине микроканала показали, что при малых временах пребывания смеси в реакторе (< 40 мсек) происходит его значительный разогрев вблизи входа, обусловленный протеканием экзотермической реакции полного окисления метана. На наличие этой реакции указывает также значительное увеличение концентрации двуокиси углерода и воды на выходе для времен пребывания меньше 40 мсек. Данные по составу смеси и распределению её температуры по

длине микроканалов показывают двухстадийность реакции неполного окисления метана, в особенности для малых времен пребывания. На начальном этапе происходит сжигание части метана с образованием паров воды и двуокиси углерода, и затем химическое превращение образовавшейся смеси с образованием водорода и окиси углерода. В рамках одномерной модели химических превращений при кинетике положительной реакции первого порядка и кинетики реакции Лангмюра-Хеншелвуда получено аналитическое соотношение для степени химического превращения компонент смеси, учитывающее внешнее диффузионное торможение. Обработка экспериментальных данных по степени химического превращения метана для кинетики положительной реакции первого порядка показала, что величина константы скорости реакции плавно возрастает при уменьшении времени пребывания до 40 мсек, что связано с ростом температуры в зоне реакции, и

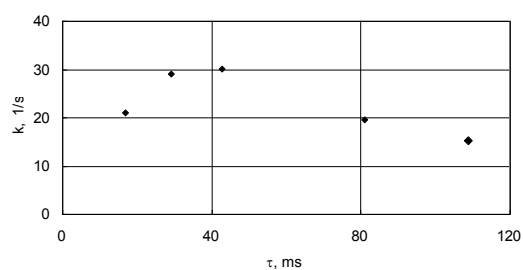


Рис. 6. Изменение величины константы скорости реакции в зависимости от времени пребывания

затем уменьшается при изменении характера химического превращения – рис. 6.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование теплообмена при радиальном течении газа в дисковом щелевом теплообменнике-реакторе показало, что течение в зазоре между пластинами является сильно возмущенным, и коэффициенты теплоотдачи существенно зависят от расхода газа. Численные расчеты и эксперименты показали, что при наличии химических превращений с тепловыделением на стенках щелевого реактора, поле температур пластин может быть сильно неоднородным. При использовании пластин из композитного каталитически активного материала с теплопроводностью до 10 W/mK, температурные неоднородности существенно сглаживаются, и такие реакторы могут быть использованы для проведения химических превращений с высокой селективностью и степенью конверсии исходных продуктов.

Исследование неполного окисления метана в среде кислорода в сборке микроканалов показало, что химическое превращение смеси газов протекает в две стадии. На первой стадии происходит реакция полного окисления метана и значительный разогрев реактора вблизи входа в микроканалы. На второй стадии происходят химические превращения образовавшейся смеси с образованием водорода и окиси углерода.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-08-65526), интеграционного проекта СО РАН №144 и программы Президиума РАН (проект 7.2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Peng X.F., Wang B.X., Peterson G.P., Ma H.B. // Int. J. Heat Mass Transfer. 1995. – V. 38, N 1. P. 127-137.
2. Adams M.T., Abdel-Khalik S.I., Jeter S.M., Qureshi Z.H. // Int. J. Heat Mass Transfer, 1998. V. 41, N 6-7. P. 851-857.
3. Rostami A., Saniei N., Mujumdar A.S. // Heat and Technology. 2000. V. 18. N 2. P. 59-68.
4. Новиков П.А., Любин Л.Я. Гидромеханика щелевых систем. – Минск: Наука и техника, 1988. – 344 с
5. Savage S.B. // Trans. ASME. Ser. E. 1964. Vol.86 (J. Appl. Mech. Vol. 31, N 4). P.594-596.
6. D. Myers. T. Krause, J.-M. Bae and Pereira. Extending Abstracts.2000 Fuel Cell Seminar. P. 280-283.
7. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1970.
8. Bontemps A., Belghazi M. // Microscale Heat Transfer-Fundamentals and Applications in Biological and Micromechanical systems, Turkey, July 18-30, 2004, P. 3-4.

© В.В. Кузнецов, О.В. Витовский, С.В. Димов, С.П. Козлов, 2006

МАССООБМЕН ПРИ РАСТВОРЕНИИ ГАЗА В КАНАЛАХ МОНОЛИТНЫХ РЕАКТОРОВ

ВВЕДЕНИЕ

Двухфазные течения в каналах малого размера широко встречаются в компактных теплообменниках. В последнее время интерес к этим течениям обусловлен применением микроканальных технологий для охлаждения высоконапряженных энергетических устройств. Процессы межфазного тепло- и массообмена в каналах малого размера широко используются также в различных аппаратах химической и биотехнологии. К ним можно отнести разного типа пленочные и трубчатые абсорбции, ректификационные колонны, трубчатые реакторы для выращивания микроводорослей и т. д. Широкое применение в химической технологии находят так же монолитные реакторы с квадратными каналами различного сечения, размер которых сравним и меньше капиллярной постоянной. Одним из основных режимов восходящего течения в каналах с размером меньше капиллярной постоянной является снарядный режим течения. Гидродинамика течения и форма снарядов существенно определяются соотношением сил гравитации и капиллярных сил, особенно в прямоугольных каналах с острыми углами. В таких каналах капиллярные силы перераспределяют потоки жидкости, что изменяет гидродинамику течения, скорость движения снарядов и тепломассообмен по сравнению с каналами большого размера. Целью данной работы являлось исследование межфазного массообмена в прямоугольных каналах различного сечения.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве рабочего участка использовались – прямоугольные каналы различного сечения, склеенные из стекол, на входе и выходе из которых приклеены переходные фланцы из оргстекла, и стеклянная трубка диаметром 8.5 мм; фланцы и концы трубки были связаны с баками верхнего и нижнего уровня гибкими шлангами. Дистиллированная вода протекала по рабочему участку из верхнего бака в нижний, при этом расход регулировался вентилем внизу. Через инжектор внизу впрыскивался углекислый газ, который формировал снаряд. Газовый снаряд взвешивался опускаемым потоком жидкости в месте расположения измерительной линейки. Далее процесс растворения фиксировался на цифровую камеру, данные с которой сразу отправлялись на ПК. В записи фиксировалось время отсчета кадра, длина снаряда определялась по линейке. Во время опытов проводилось измерение температуры. Далее строилась зависимость объема от времени – объем снаряда рассчитывался по экспериментальным кривым для каналов некруглого сечения и по расчетам для трубки диаметром 8.5 мм. Скорость растворения определялась по начальному этапу (интервал длительностью порядка пяти секунд). Полная погрешность измерения коэффициента массоотдачи равна 10%.

Для измерения коэффициентов массоотдачи в прямоугольных каналах использовался слабый раствор щелочи КОН, для лучшего смачивания тонкой пленкой стеклянной поверхности, концентрация составляла $C = 0.33$ г/л. Были измерены μ и σ этого раствора, отличий от значения для дистиллированной воды не было. Для учета влияния щелочи в растворе на массообмен были проведены опыты со стеклянной трубкой большого диаметра (8.5 мм), где смачивание не оказывало влияния на скорость всплытия снарядов, измерялись коэффициенты массоотдачи для раствора КОН и в чистой воде. Использование КОН для улучшения смачивания поверхности стекла приводит к возникновению химической реакции в жидкой фазе:

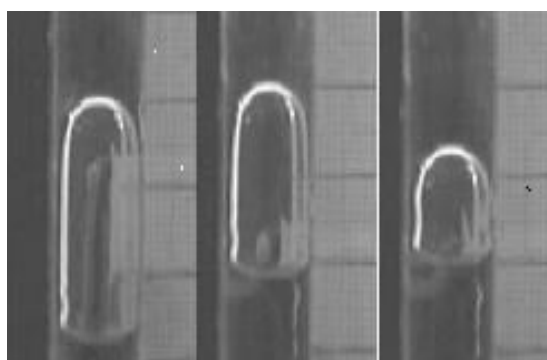


Рис. 1. Последовательные фотографии процесса абсорбции CO_2 в воде со щелочью в трубке диаметром 8.5 мм. Слева направо – 0.8 с, 3.8 с, 12.2 с с момента начала съемки

Химическая реакция приводит к увеличению коэффициента массоотдачи в жидкой фазе. Реакция необратима – следовательно, можно ввести коэффициент, учитывающий увеличение массопереноса из-за реакции, зависящий от условий проведения. Такой коэффициент был найден из измерений коэффициентов массоотдачи снаряда в круглой трубке для раствора щелочи в воде и в чистой воде при одной температуре (23°).

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 приведено изменение формы снаряда CO_2 в воде в зависимости от времени. Опыты были проведены в вертикальной стеклянной трубке диаметром 8.5 мм.

Форма головки остается постоянной, пока снаряд имеет длину порядка и больше диаметра трубки. При дальнейшем уменьшении длины снаряд превращается в эллипсоидальный (в профиле) пузырек.

На рис. 2 представлены коэффициенты массоотдачи для взвешенного потоком жидкости газового снаряда, рассчитанные как модифицированные числа Шервуда $\text{Sh}^* = \beta S/dD$, где β – коэффициент массоотдачи, S – площадь поверхности снаряда, d – диаметр снаряда, D – коэффициент диффузии. Ранее

модифицированное число Шервуда было использовано в [1] для обработки экспериментальных данных по массоотдаче при всплывании газовых снарядов в круглой трубке. На рис. 2 сплошной линией показаны данные работы [1].

Для измерения увеличения коэффициента массоотдачи вследствие химической реакции были проведены опыты с растворением углекислого газа в воде и воде с щелочью при одной температуре ($23^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$). Сравнение опытных данных показывает, что гомогенная химическая реакция в жидкой фазе интенсифицирует массообмен в $1.18 \pm 4\%$ раз и степень интенсификации практически не зависит от длины снаряда в диапазоне l/d от 1,5 до 3.

Для учета влияния температуры были проведены измерения для воды в круглой трубке при разных температурах (31°C и 23°C). Получилось, что из-за повышения на один градус температуры коэффициент массоотдачи уменьшается на 3%.

Все полученные экспериментальные данные на рис. 2 представлены в виде зависимостей $Sh^*/Pe^{1/2}$ от l/d для каналов сечением 3.5×4.9 мм, 3.9×3.8 мм, 3.9×7.5 мм, 4.5×13 мм и 9.6×9.7 мм и трубок диаметром 8.5 и 8.6 мм [2]. Все данные приведены к одной температуре $T = 20^{\circ}\text{C}$, учтено влияние щелочи (для каналов прямоугольного и квадратного сечений). Как видно из этого графика, зависимости коэффициентов массоотдачи для прямоугольных каналов и каналов квадратного сечения и имеют существенно различный вид. Были получены степенные аппроксимации для безразмерного коэффициента массообмена в каналах прямоугольного сечения:

$$Sh^* = 3.06 \cdot (l/d)^{0.55},$$

в каналах круглого и квадратного сечений:

$$Sh^* = 5.99 \cdot (l/d)^{0.06}.$$

Для всех каналов в качестве значения d из двух характерных размеров берется d_{max} .

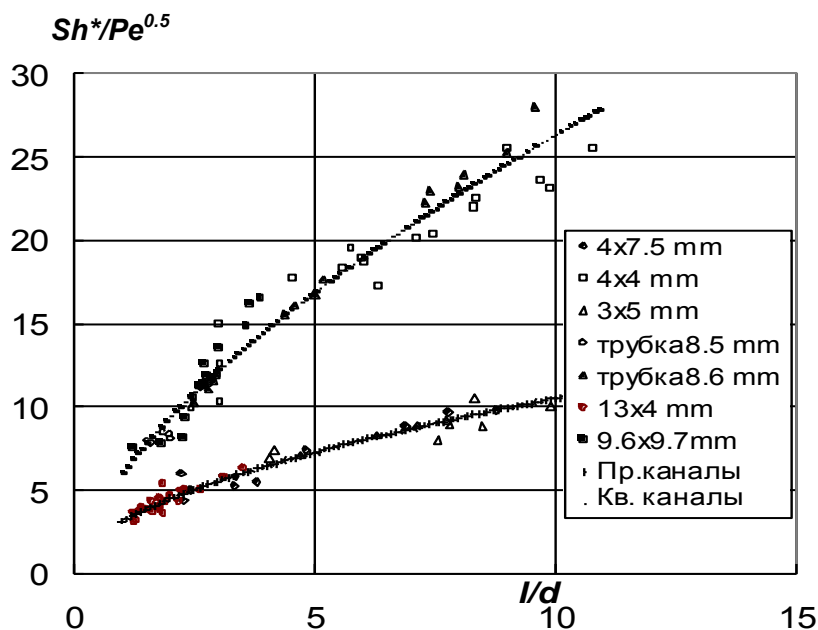


Рис. 2. Экспериментально полученные коэффициенты массоотдачи для всех каналов и трубок

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые проведено экспериментальное исследование межфазного массообмена от одиночного снаряда в миниканалах прямоугольного сечения. Получены формулы для расчета коэффициентов массоотдачи для снарядов в таких каналах. Выяснено, что коэффициенты массоотдачи в каналах прямоугольного и квадратного сечений зависят существенно различно от l/d_{max} . Определено влияние химической реакции и изменения температуры на протекание процесса массообмена.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке программы «Развитие научного потенциала высшей школы» на 2005 г, проект № 8158.

Список обозначений

U – скорость всплытия снаряда, м/сек;

d – диаметр канала, м;

d_h – гидравлический диаметр канала, м;

d_{min} – длина короткой стороны канала, м;

d_{max} – длина длинной стороны канала, м;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

D – коэффициент молекулярной диффузии, м²/с;

C – концентрация растворенного газа, кг/м³;

T – температура, К;

K – коэффициент массопередачи, м/с;

l – длина снаряда, м;

V – объем снаряда, м³;

S – площадь поверхности снаряда, м²;

$Sh = \beta d/D$ – число Шервуда;

$Sh^* = \beta S/dD$ – модифицированное число Шервуда;

$\beta = (-dV/dt \cdot \rho)/Co$ – коэффициент массоотдачи, м/с;

Co – равновесная концентрация углекислоты на межфазной границе, кг/м³;

$Pe = Ud/D$ – число Пекле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Filla M., Davidson J. F., Bates J. F., Eccles M. A. Gas phase controlled mass transfer from a bubble // Chem. Eng. Sci.-1976.-V. 31.- P. 359 - 367.
2. Петухов А. В., Гидродинамика и межфазный массообмен при снарядном газожидкостном движении в трубах, Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Новосибирск, Институт Теплофизики, 1988.

© И.Н. Ершов, В.В. Кузнецов, 2006

УДК 621.396.966.019.3

М.Я. Воронин, А.Н. Поспелов, М.Б. Устюгов

СГГА, Новосибирск

ОБ ИНВАРИАНТНОСТИ ЗАКОНОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ НЕОДНОРОДНЫХ СВЧ – РЕЗОНАТОРОВ (АНАЛОГ ПСЕВДОСФЕРЫ ЛОБАЧЕВСКОГО) И АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА НАГРЕТОГО ВЕЩЕСТВА ПО ПЛАНКУ

Обратимся к истории вопроса, чтобы далее развить проблему для конкретных случаев.

Процесс превращения тепловой энергии принято называть тепловыми или температурными излучением [1, 2]. При этом в составе тел не происходит никаких изменений за исключением их теплового состояния, а количество излучаемой энергии изменяется в полном соответствии с количеством подводимого тепла. При нагревании вещества его молекулы приходят в непрерывное колебательное, вращательное и поступательное движение, в результате чего возникает излучение со сплошным спектром.

Излучаемая энергия поглощается другими телами, которые под ее воздействием нагреваются и в свою очередь начинают излучать. Таким образом, всякое тело излучает энергию и поглощает ее. Тела, полностью поглощающие падающий на них поток излучения и обладающие максимальной энергетической светимостью, называются абсолютно черными телами (АЧТ). Для таких тел интегральная $\alpha(T)$ и спектральная $\alpha(\lambda, T)$ поглощаемые способности равны единице.

Поглощаемой способностью тела называют коэффициент, показывающий, какая часть упавшего на тело монохроматического или сложного потока излучения поглощается при температуре тела T .

Тела, которые полностью поглощали бы падающие на них излучение, в природе не существует. Их создают искусственно. Весьма близко по своим характеристикам к АЧТ приближаются такие излучатели, как отверстие полого шара, плотно уложенный пакет лезвий со стороны заточенных сторон, пучок цветных игл со стороны острых заточенных сторон и некоторые другие искусственные излучатели. Все законы теплового излучения справедливы для АЧТ. При введении некоторых поправочных коэффициентов эти законы становятся справедливыми и для многих реальных излучателей.

Известно [1], что вначале Планк записал так называемую интерполяционную формулу для закона распределения энергии в спектре равновесного электромагнитного излучения вещества при определенной температуре:

$$E = \frac{C_1 \cdot \lambda}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (1)$$

где C_1 и C_2 – некоторые постоянные, λ – длина волны, T – абсолютная температура.

Но как распределяется энергия излучения по длинам волн ни с помощью термодинамических методов, ни с помощью волновой теории излучения не удавалось установить.

Согласно волновой теории, энергия излучения нагретого тела, соответствующая различным частотам, должна возрастать с увеличением

частоты. Однако опыты показали, что энергия излучения вначале действительно растет с увеличением частоты, но пройдя через максимум, начинает уменьшаться, стремясь к нулю на высоких частотах.

Планку удалось устранить это противоречие, введя квантовое представление о природе излучения, записав формулу (1) в виде:

$$E = \frac{8c\pi h}{\lambda^5} (e^{ch/(kT\lambda)} - 1), \quad (2)$$

где $c = 299850$ км/сек – скорость света в пустоте; $k = 1,3827 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $h = 0,662 \cdot 10^{-33}$ Дж·с – квант действия Планка.

На рис. 1 приведено семейство кривых зависимости распределения энергии излучения абсолютно черного тела по длинам волн λ для ряда температур.

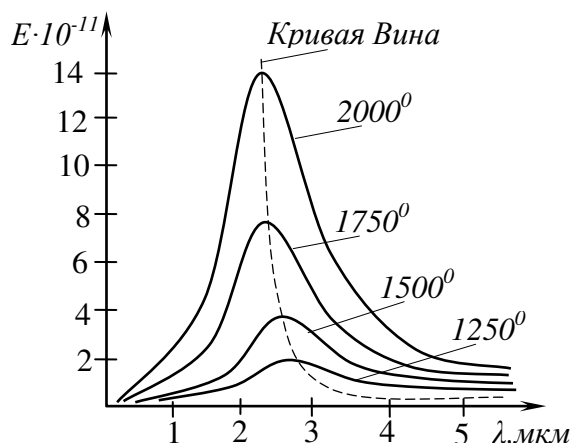


Рис. 1. Функции спектральной плотности энергетической светимости АЧТ при различных значениях температуры

Из рис. 1 видно, что максимумы кривых при росте температуры и уменьшении длины волны λ , смещаются влево. Эта связь была установлена Вином и носит название закона смещения Вина (на рис. 1 штрихом показана кривая Вина). При этом им было установлено, что

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2896 \text{ мкм} \cdot \text{К},$$

где $\lambda_{\max}$ соответствует максимуму кривой E .

Известно, что функция $E(\lambda, T)$, описываемая выше приведенным уравнением Планка, достигает своего максимального значения при определенной длине волны $\lambda_{\max}$.

Чтобы найти $\lambda_{\max}$, соответствующую максимальному значению функции $E_{\max}$, необходимо продифференцировать $E(\lambda, T)$ и приравнять производную к нулю:

$$\frac{dE(\lambda, T)}{d\lambda} = 0. \quad (3)$$

Нужно иметь ввиду, что производная (3) будет равна нулю, если ее числитель будет равен нулю, или знаменатель равен бесконечности. Однако взятие производной по λ недопустимо, так как последняя – величина размерная. Это объясняется тем, что на предельных длинах волн касательные к функции $E(\lambda, T)$ параллельны оси абсцисс; с этих позиций и исходил Вин.

Поэтому целесообразно ввести некие функции x и y . Тогда выражение (2) запишется в виде $x^5 \cdot y \cdot (e^{x-1} - 1) - 1 = 0$ для постоянной температуры.

Отсюда и получим константу Вина:

$$\lambda_{\max} \cdot T = b = \text{const}. \quad (4)$$

Теперь обратимся к электронике больших мощностей СВЧ, хорошо изученной Капицей П.Л. [3]. Речь идет об энергетических показателях резонаторов СВЧ на основе плавно – нерегулярных линий передачи.

Первый резонатор широкополосной колебательной системы (ШКС) по рис. 2 является аналогом псевдосферы Лобачевского [4], т. е. от начала к концу геометрическая конфигурация имеет вид рупора с постепенным увеличивающимся диаметром к концу (рис. 3).

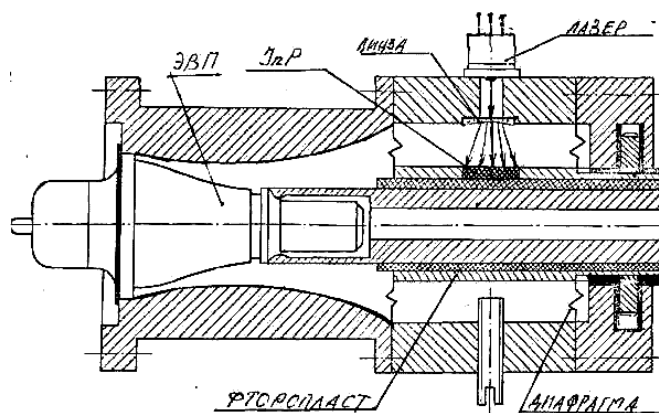


Рис. 2. Конструкция ШКС с щелевой связью между регулярно-нерегулярными резонаторами

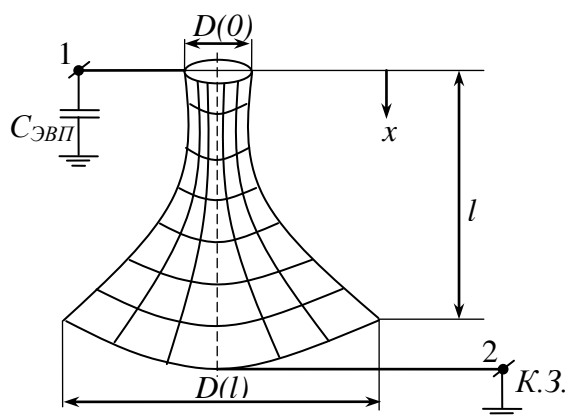


Рис. 3. Псевдосфера Лобачевского, где $D(l)$ и $D(0)$ соответственно диаметры в конце и начале псевдосферы

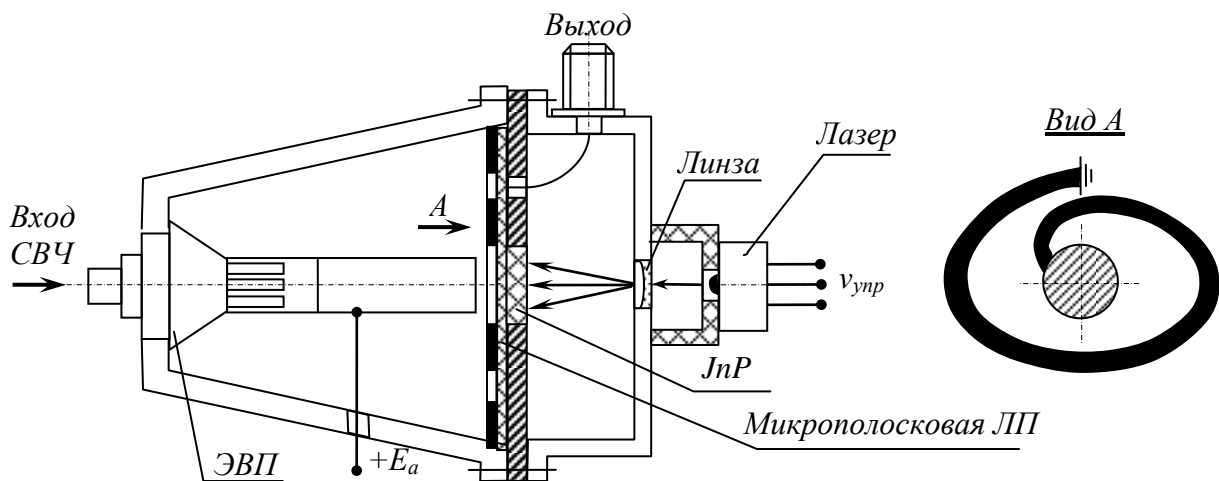


Рис. 4. Конструкция ШКС с торцевой связью между полосковой и микрополосковой спиральной ЛП

Первый резонатор ШКС по рис. 4 представляет собой усеченную пирамиду (рис. 5).

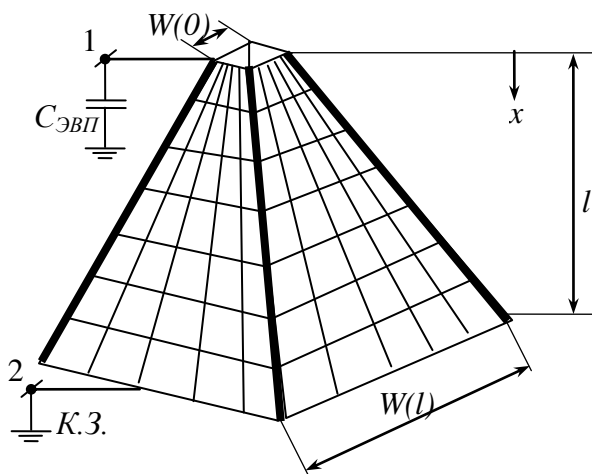


Рис. 5. Усеченная пирамида

Если $p = 1$ (РЛП), то $\mu l = 0$.

В табл. 1 приведено соответствие между μl и p .

Но вернемся к энергетике СВЧ – резонаторов по рис. 3 с учетом рис. 4 и рис. 5. Пусть имеет место плавно-нерегулярная расширяющаяся НРЛП с гиперболическим законом волнового сопротивления:

$$Z(x) = Z(0) \cdot (1 - \mu l \frac{x}{l})^{-1}. \quad (5)$$

Вместо параметра крутизны μl введем параметр p – перепад волновых сопротивлений:

$$p = \frac{Z(l)}{Z(0)}.$$

$$\text{Тогда } \mu l = 1 - \frac{1}{\sqrt{p}}. \quad (6)$$

Таблица 1

μl	0	0,5	0,7	0,8	0,9
p	1	1,41	1,82	2,93	3,16

Мощность развиваемая СВЧ – генератором в резонаторе может быть определена по следующей формуле [5, 6]:

$$P = \frac{1}{2} J_{a1}^2 \cdot R_1, \quad (7)$$

где J_{a1} – ток первой гармоники, протекающий через резонатор; R_1 – резонаторное сопротивление первого резонатора ШКС.

Но известно [2], что

$$R_1 = Z(0) \cdot Q_H \cdot \frac{\varphi(\theta, \mu l)}{\gamma(\theta, \mu l)} = Z(0) \cdot Q_H \cdot \psi(\theta, \mu l), \quad (8)$$

где $\psi(\theta, \mu l)$ – энергетическая функция.

Для К.З. ГНРЛП иммитансная функция равна [7]:

$$\psi(\theta, \mu l) = (\operatorname{ctg} \theta - \frac{\mu l}{\theta})^{-1}. \quad (9)$$

Из того же источника известно, что параметр распределенности [6, 8] имеет вид

$$\gamma(\theta, \mu l) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\theta \cdot d\varphi(\theta, \mu l)}{\varphi(\theta, \mu l) d\theta} \right). \quad (10)$$

Тогда энергетическую функцию $\psi(\theta, \mu l)$ с учетом (9) и (10) можно записать как

$$\psi(\theta, \mu l) = \frac{1}{\frac{\operatorname{ctg} \theta}{2} + \frac{1}{\sin^2 \theta} - \frac{\mu l}{\theta}}. \quad (11)$$

На рис. 6 приведено семейство кривых, построенных по (11).

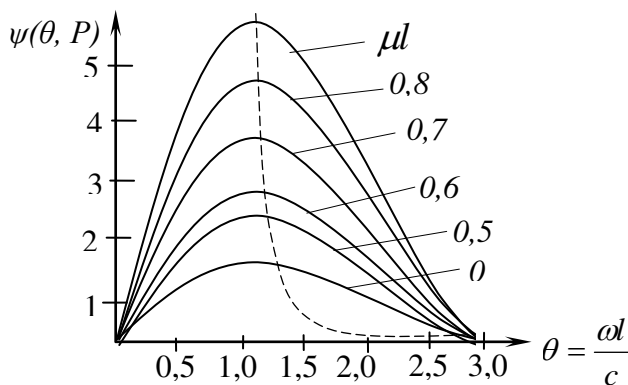


Рис. 6. Кривые зависимости энергетической функции нерегулярного СВЧ – резонатора от электрической длины θ при различных перепадах p

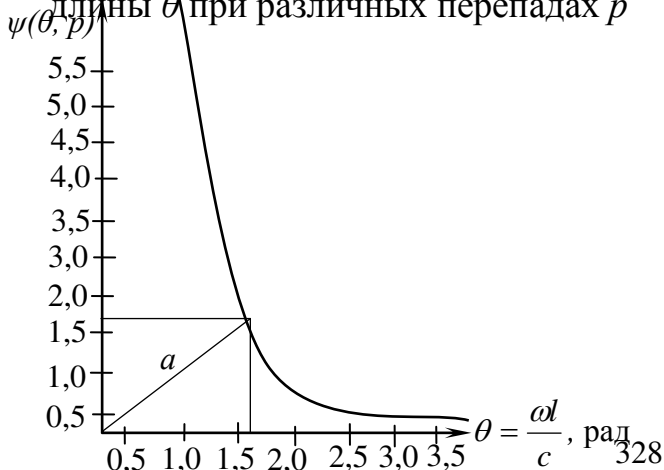


Рис. 7. Кривая зависимости $\psi_{\max}(\theta, p)$ от θ

Сравнивая кривые на рис. 1 и рис. 6 видим, что по форме они очень схожи – также происходит смещение энергетической функции резонатора СВЧ $\psi_{\max}(\theta, P)$ влево. Существенным отличием является то, что минимумы функций Планка на рис. 1 смещаются влево при увеличении частоты, а на рис. 6 они так же смещаются влево, но при уменьшении частоты.

На рис. 7 приведена кривая смещения $\psi_{\max}(\theta, p)$, которая идентична кривой Вина на рис. 1.

Существенное различие состоит в том, что на рис. 1 для АЧТ кривые построены для различных температур, а на рис. 6 кривые построены для различных перепадов волновых сопротивлений. Если на рис. 1 возрастание $E_{\max}$ происходит при росте температуры, то на рис. 6 рост происходит при нарастании p .

Объясняется это тем, что при увеличении разрыва НРЛП увеличивается величина запасаемой энергии во внешней части резонаторов СВЧ (т.е. добротность распределенной СВЧ структуры). Если сравнивать это с резонатором – СВЧ на основе РПЛ, то в предлагаемом на основе К.З. НРЛП эффективность в выигрыше по мощности более чем в 5 раз.

С физической точки зрения Планк объединяет квантовые эффекты в АЧТ за счет неких внутренних осцилляторов (что-то подобие диаполей Герца). В нерегулярных резонаторах СВЧ (в регулярных этого не может быть) существуют некие погонные осцилляторы, если, резонатор разбит на n – частей из Δl – микро-диаполей, состоящих из погонных $L_1(x)$, $C_1(x)$ реактивных контуров [9]. Это так называемая составная лехеровская система (рис. 8).

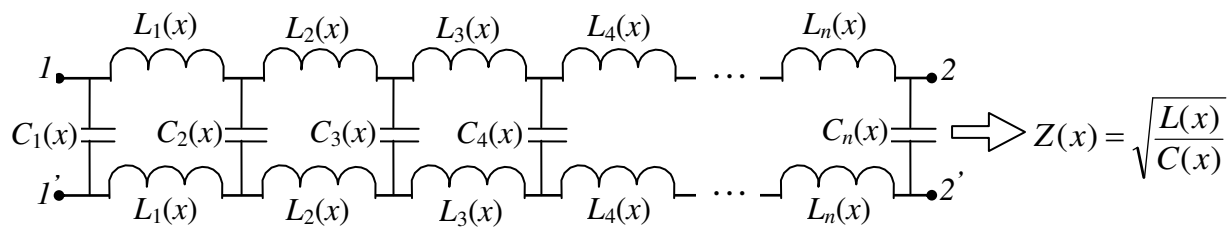


Рис. 8. Лехеровская составная распределенная система отрезка НРЛП

Чтобы найти полную энергетическую мощность резонатора СВЧ по аналогии с [2], функцию $\psi(\theta, p)$ необходимо проинтегрировать в диапазоне $\Delta\theta$ от 0 до π :

$$R(p) = \int_0^{\pi} \psi(\theta, p) \cdot d\theta = \int_0^{\pi} \frac{d\theta}{\frac{\operatorname{ctg} \theta}{2} + \frac{1}{\sin^2 \theta} - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{p}}\right) \frac{1}{\theta}}. \quad (12)$$

По аналогии с уравнением (3) Планка, чтобы найти $\theta_{\max}$, соответствующую максимальному значению функции $\psi_{\max}$, продифференцируем функцию ψ по переменной θ и исследуем производную на экстремум для ряда p :

$$\frac{d\psi(\theta, p)}{d\theta} = \frac{d \left[\frac{1}{\frac{\operatorname{ctg} \theta}{2} + \frac{1}{\sin^2 \theta} - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{p}}\right) \frac{1}{\theta}} \right]}{d\theta} = \frac{\frac{1}{\sin^2 \theta} + 2 \sin^{-3} \theta \cdot \cos \theta + K \cdot \theta^{-2}}{\left(\frac{\operatorname{ctg} \theta}{2} + \frac{1}{\sin^2 \theta} - \frac{K}{\theta} \right)} = 0. \quad (13)$$

Тогда $K = -2\theta^2 \cdot \sin^{-2}\theta (1 + \sin^{-1}\theta + \operatorname{ctg}\theta)$; отсюда можно получить константу $\theta_{\max} \cdot \mu l = a$; либо $\theta_{\max} \cdot p = b$ и сравнить с константой Вина. Результаты интегрирования по [7] можно сравнить с интегрированием по Планку [1]; кстати, интегрирование по Планку осуществляется в интервале от 0 до ∞

Теперь что касается размерностей.

У Планка (рис. 1) по оси абсцисс размерность в мкм, от которой через скорость света можно перейти к частоте; по оси ординат размерность E имеет вид Вт/см²·мкм; каждая кривая строится для температуры АЧТ в градусах либо по Кельвину, либо по Цельсию.

На рис. 6 по оси абсцисс безразмерные величины; по оси ординат вещественные целые числа. Каждая кривая строится для μl , либо для p , которые также числа; все это сделано для целей анализа по инвариантности.

На самом деле размерность по оси абсцисс в Гц, м, м/с; по оси ординат (см. формулу (7)) размерность в Вт, А, Ом, Гц; μl и p – безразмерны.

Теперь что касается пирамидального резонатора в конструкции генератора СВЧ по схеме двухконтурной анодной системы (см. рис. 4). Как показали опытные исследования этого СВЧ-резонатора, практически, в диапазоне частот от 100 МГц до 10 000 МГц он имеет несравненно большую запасаемую энергию по сравнению с резонаторами из отрезков РЛП; практически выигрыш достигает увеличения где-то в 10 раз. Откуда это? Вообще пирамидальные физические модели обладают, по нашему убеждению, какой-то неслыханной энергией. В этом смысле много сейчас пишется о египетских пирамидах, способных по своей природе накапливать большую энергию, которая поступает, по-видимому, откуда-то из космоса. В нашем случае СВЧ пирамидальные резонаторы накапливают энергию от задающих подводимых к ним извне СВЧ-генераторов; если измерить размеры СВЧ пирамидального резонатора, то он будет весьма эффективно запастись энергией в СВЧ-диапазоне.

А теперь возьмем геометрические размеры египетской пирамиды: сторона основания – 230,3 м; периметр – $230,3 \times 4 = 921,2$ м; высота пирамиды 146, 6 м, удвоенная – 293,2 м. Делим первую величину на вторую и получаем: $921,2/293,2 = \pi$, что поразительно впечатляет, так как при расчете интегральной полной энергетической мощности СВЧ-резонатора интеграл нами брался в интервале от 0 до π (выражение (12)). Введя соответствующий масштаб с учетом нашей физической модели СВЧ пирамидального резонатора, нетрудно найти резонансную частоту египетской пирамиды, т. е. ту самую излучаемую космосом частоту генератора.

Таков наш вариант решения проблемы, поставленной в заглавие статьи. Кстати, великий Леонардо до Винчи изучал «область свето-воздушной перспективы и гармонической пирамидальной композиции [10]».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Планк М. Теория теплового излучения, Л.-М.: 1935.
2. Павлов А.В. Оптико-электронные приборы (основы теории и расчета). – М.: Энергия, 1974. – 360 с.
3. Капица П.Л. Электроника больших мощностей. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 195 с.
4. Лобачевский Н.Н. Сочинения по геометрии. – М.-Л.: 1946 – 49 (Полн. собр. соч., Т. 1-3; Обоснования геометрии Лобачевского и развитие ее идей. – М.: 1956.)

5. Воронин М.Я. Нерегулярные линии передачи на СВЧ: теория и применение: в 2-х частях; под ред. В.П. Петрова / Новосиб. гос. техн. университет – Новосибирск, 1994. – 291 с.
6. Нейман М.С. Триодные и тетродные генераторы сверхвысоких частот. – М.: Сов. радио, 1950. – 283 с.
7. Воронин М.Я., Голиков В.К., Денисов А.Н., Чепурной С.М., Шлее В.Р. Элементы теории несоразмерных цепей в точном методе синтеза: учебн. пособие / Новосиб. гос. техн. университет – Новосибирск, 1994. – 49 с.
8. Сифоров В.Н. Радиоприемники СВЧ. Военное изд. Мин. обороны СССР, – М.: 1957. – 435 с.
9. Wenzel R.J. The modern network theory approach for microwave filter design II Ibid – 1968. – Vol. EMC – 10. №2 – p.196-209.
10. Лазарев В.Н. Леонардо да Винчи. – Л.–М.: 1952.

© М.Я. Воронин, А.Н. Поспелов, М.Б. Устюгов, 2006

«ЭНТРОПИЙНЫЙ» ПОДХОД К ОЦЕНКЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ

В последние десятилетия во всем мире отмечается растущий интерес к исследованию механической повреждаемости приборных устройств по кинетике температурного поля деталей, возникающего при их деформировании.

При деформировании материала внутри него происходит необратимое рассеяние энергии, сопровождающееся выделением тепла, которое может быть значительным даже при макроупругом нагружении (номинально в пределах закона Гука). Если при этом амплитудные напряжения превышают предел выносливости, то происходит микропластическое деформирование отдельных неблагоприятно ориентированных зерен металла, которые становятся своего рода источниками тепла. А если к тому же в детали развивается трещина, то в ее вершине образуется более или менее развитая пластическая зона. А как известно, при пластическом деформировании металла большая часть механической энергии преобразуется в тепловую, поэтому в вершине развивающейся трещины как бы функционирует источник тепла, мощность которого практически равна мощности, расходуемой на продвижение трещины. Вследствие высокой теплопроводности металлов все эти тепловые процессы “проявляются” на поверхности детали в виде пассивного теплового поля, которое содержит в себе информацию о развитии повреждаемости. Остается эту информацию только извлечь.

Ключевым вопросом при применении термографического метода исследования является корректный выбор параметра повреждаемости. Сама природа дает нам параметр, который наиболее полным и естественным образом отражает необратимые процессы, происходящие при зарождении и развитии трещины. Этот параметр – температура. Но здесь есть существенный момент. Нужно учитывать не саму температуру очага повреждаемости, а ее изменение за достаточно малый промежуток времени, скажем, за один цикл колебаний. При этом удастся практически исключить влияние фоновой температуры и тем самым повысить точность результата.

В качестве непосредственных параметров повреждаемости наряду с приращением температуры ΔT мы использовали, причем предпочтительно, параметр ΔS^{1u} – приращение удельной энтропии в очаге за цикл колебаний. В ряде случаев использовался также параметр Δq^{1u} – изменение за цикл колебаний мощности теплового источника в очаге повреждаемости. Оба этих термодинамических параметра прямым образом связаны с ΔT , но они позволяют полнее и точнее прогнозировать процесс развития повреждаемости. Поскольку информацию об объекте при этом предоставляет сам объект, то

рассчитываемые параметры являются его истинными характеристиками. Именно поэтому при таком подходе удастся повысить точность прогнозирования усталостных процессов.

Разложение потока энтропии, производимого в очаге повреждаемости

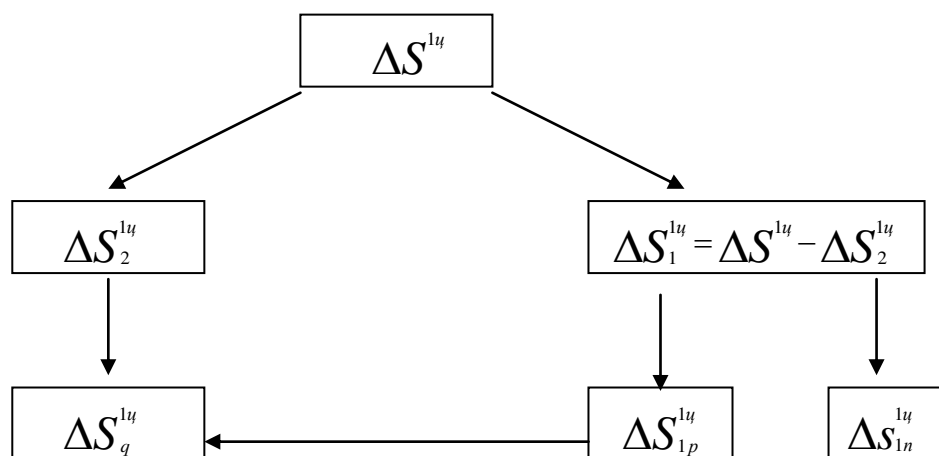


Рис. 1. Разложение потока энтропии на функциональные части

Рассмотрим колебательный процесс, связанный с реализацией одноосного напряженного состояния. Считая, что при многоцикловых колебаниях температура T изменяется незначительно за цикл колебаний, производимый за цикл поток удельной энтропии можно выразить формулой [1]

$$\Delta S^{lu} = \frac{\pi \psi E \varepsilon_a^2}{4T k_\phi},$$

где k_ϕ – коэффициент формы петли гистерезиса (для эллиптической петли $k_\phi = \pi/2$);

ψ – коэффициент поглощения энергии; остальные обозначения – общепринятые.

Разложим ΔS^{lu} на функциональные части [1] в соответствии со схемой, изображенной на рис. 1. Здесь ΔS_2^{lu} – приращение за цикл колебаний той части производимой энтропии, которая обусловлена непосредственным нагревом очага; ΔS_{1n}^{lu} – поток энтропии, идущий на накопление повреждаемости, т. е. на зарождение и развитие микротрещины; ΔS_{1p}^{lu} – часть производимой энтропии, связанной с неопасными деформациями в очаге; ΔS_q^{lu} – поток энтропии, рассеиваемый в окружающую среду в виде тепла.

Формула для расчета ΔS_2^{lu} известна в литературе [1,2]:

$$\Delta S_2^{lu} = C_v \ln(T_2/T_1) \approx \frac{C_v(T_2 - T_1)}{T_1}.$$

Здесь C_v – удельная теплоемкость; T_1 и T_2 – температуры очага повреждаемости соответственно в начале и конце рассматриваемого цикла колебаний.

Оставшаяся часть приращения энтропии: $\Delta S_1^{lu} = \Delta S^{lu} - \Delta S_2^{lu} = \Delta S_{1p}^{lu} + \Delta S_{1n}^{lu}$.

При разложении потока энтропии ΔS_1^{lu} на ΔS_{1p}^{lu} и ΔS_{1n}^{lu} мы опирались на идеи, заложенные в деформационных критериях усталостного разрушения, т. е. исходили из того, что при работе до предела выносливости производится только «неопасная энтропия», а при работе за пределом выносливости σ_R производится и опасный и неопасный потоки энтропии:

$$\left. \begin{aligned} \Delta S_{1p}^{lu} &= \frac{\psi \pi E \varepsilon_a^2}{(4 \kappa \phi T)}; \\ \Delta S_{1n}^{lu} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{при } \sigma_a < \sigma_R)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta S_{1p}^{lu} &= \frac{\psi_R \pi E \varepsilon_a^2}{(4 \kappa \phi T)} - \frac{\psi_R C_v \ln(T_2/T_1)}{\psi}; \\ \Delta S_{1n}^{lu} &= \frac{(\psi - \psi_R) \pi E \varepsilon_a^2}{(4 \kappa \phi T)} - \frac{(\psi - \psi_R) C_v \ln(T_2/T_1)}{\psi}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{при } \sigma_a > \sigma_R)$$

В этих формулах $T = (T_1 + T_2)/2$, ψ_R – коэффициент поглощения энергии, соответствующий работе при амплитудных напряжениях $\sigma_a = \sigma_R$.

Заключение

Разложение диссипативной функции ΔS^{lu} на составные части, которые довольно легко рассчитываются, позволило нам при решении конкретных задач прогнозирования усталостной прочности использовать те части этого разложения, которые адекватны данной задаче. Так при прогнозировании индивидуальных пределов выносливости, трещиностойкости (как статической, так и динамической) оказалось целесообразным использовать ΔS_2^{lu} – тепловую часть производимой в очаге повреждаемости потока удельной энтропии [2, 3], а при прогнозировании циклической прочности деталей без начальных дефектов [4] – ΔS_{1n}^{lu} – повреждающую часть ΔS^{lu} .

Метод всесторонне апробирован в лабораторных условиях и внедрен на ряде крупных заводов страны: завод «Сибтекстильмаш» (г. Новосибирск), ММЗ «Опыт» (г. Москва).

Предложенный термографический подход является неразрушающим методом контроля качества деталей и может быть эффективно использован в условиях оптикомеханического производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kurilenko G.A. Advanced infrared examing of the metals fatigue//Proceedings of the Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications. – Firenze. – 1995. P. 253-262.
2. А.с. 1499167 СССР. Способ определения предела выносливости / Г.А. Куриленко // Открытия. Изобретения. – 1989. – № 29. – С. 6.
3. Kurilenko G.A., Pshenichny A.B. The investigation of metal's damage through thermal fields kinetics // Proceedings of Quantitative Infrared Thermography Conference. QIRT 92. – Paris. – 1992. – P. 145 – 149.
4. Куриленко Г.А. Оценка циклической долговечности бездефектных деталей // Вопросы динамики механических систем: Межвузовский сб. научных трудов / Новосибирский электротехнический институт. – Новосибирск, 1991 – С. 98 – 107.

СОДЕРЖАНИЕ

Chugui Yu.V., Plotnikov S.V., Potashnikov A.K., Verkhogliad A.G. Novel optical measuring systems and laser technologies for science and industry	3
Дубнищев Ю.Н., Арбузов В.А., Белоусов П.П., Белоусов П.Я. Оптическая диагностика динамических структур движущихся сред.....	15
Кузнецов В.В., Витовский О.В. Микро и нанотехнологии при производстве водорода для перспективных энергетических устройств	20
Прудников Н.В., Итигин А.М.–Ш., Хацевич Т.Н., Шлишевский В.Б. Исследование возможности создания пассивной двухспектральной оптико-электронной системы автоматического определения координат	26
Михайлов И.О., Олейник С.В., Уставич Г.А., Хацевич Т.Н., Шлишевский В.Б., Гусаченко А.В., Кравченко Ю.Л., Новго-родов Б.Н., Арутюнов В.А., Богатыренко Н.Г., Кучеров А.М., Платонова Е.А., Прокофьев А.Е., Рахметулов А.Ю. Предварительные результаты экспериментального исследования макета пассивной оптико-электронной системы определения координат кратковременных световых вспышек.....	28
Рафаилович А.С., Шлишевский В.Б. Краткие итоги разработки элементной базы и оптико-электронных модулей специального назначения для ультрафиолетового диапазона спектра.....	31
Марков А.В., Рафаилович А.С., Шлишевский В.Б., Чиков К.Н., Гулидов С.С. Некоторые предварительные результаты натурных испытаний оптико-электронной аппаратуры специального назначения для ультрафиолетового диапазона спектра.....	34
Максимов В.Г., Симонова Г.В., Тартаковский В.А. Перспективы интерференционного контроля	37
Обидин Ю.В., Петухов К.В., Поташников А.К., Сартаков В.Ю. Высокопроизводительный промышленный томограф для контроля ТВЭЛ.....	41
Стусь Ю.Ф., Калиш Е.Н., Охалкин М.В., Скворцов М.Н. Применение ND:YAG/I2 – лазера в качестве оптического стандарта длины в баллистическом гравиметре	48
Шойдин С.А. Информационная емкость голограмм в практических применениях	52
Олейник С.В., Хацевич Т.Н. Объективы со сменой поля зрения, предназначенные для работы с матричными фотоприемниками в диапазоне 8 – 12 мкм	54
Олейник С.В. Высокосветосильный объектив для ПНВ.....	57
Котельников А.А. Разработка оптико-волоконного интерферометра.....	60
Алдохин П.А. Особенности ЭОП для ультрафиолетовой области спектра	62
Морозов П.Г. Разработка и исследование микромеханических волноводов	67

Бабенко Е.А. Исследование и расчет основных характеристик оптико-электронного фазового безотражательного дальномера	68
Агеев А.С., Парко И.В. Зеркально-линзовый объектив астрономического прибора.....	69
Новиков А.В. Принцип работы волоконно-оптического гироскопа	72
Батомункуев Ю.Ц. Расчет схемы записи планарного объемного голограммного оптического элемента.....	76
Шлишевский Б.Э., Соснов А.Н. Гибкая автоматизация. цели и методы реализации. терминология	78
Шлишевский Б.Э., Соснова Н.К. Экстенсивные ресурсы повышения эффективности многоцелевых станков с ЧПУ	86
Шлишевский Б.Э., Соснов А.Н. Комплексная автоматизация механического производства на базе многоцелевых станков с цифровым управлением. Системный подход	93
Рахимов Н.Р. Многофункциональные оптоэлектронные системы мониторинга нефтесодержащих сред	99
Серьезнов А.Н., Рахимов Н.Р. Оптоэлектронная система мониторинга строительных конструкций на основе волоконных световодов	104
Корнеев В.С. Коэффициент пропускания микромеханического модулятора	109
Белоус И.Х., Комбаров М.С., Кузнецов М.М., Носков М.Ф. Выделение малоконтрастных элементов на фотографических снимках.....	114
Протасов Д.Ю., Костюченко В.Я. Фотомагнитный эффект и фотопроводимость в магнитном поле в геометрии Фойгта, исследованные на эпитаксиальных слоях МЛЭ HgCdTe p-типа при доминирующей рекомбинации Шокли-Рида.....	117
Перминов В.П. Систематизация диаграмм состояния металлических систем на основе магния	122
Equation Chapter 1 Section 1Чесноков Д.В. Микромеханический дефлектор световых потоков.....	126
Крылов В.С., Костюченко В.Я. Исследование зависимости подвижности электронов от молярного содержания x в эпитаксиальных слоях МЛЭ $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$	134
Чесноков В.В., Чесноков Д.В. Возбуждение крутильных волн в микромеханическом упругом волноводе	136
Перминов В.П., Неронов В.А., Мали В.И., Тесленко Т.С., Корчагин М.А., Черняк Н.С., Панькова А.А. Взрывной синтез соединений в системах «бор – кремний» и «бор – магний»	144
Тымкул В.М., Тымкул Л.В., Шелковой Д.С., Лебедев Н.С. Математическая модель температурной чувствительности пирометра истинной температуры	148
Тымкул В.М., Тымкул Л.В., Кудряшов К.В. Отражение оптического излучения поверхностью объемных тел с направленно-рассеивающим покрытием.....	152

Попов Г.Н., Цепиногова З.М., Егорова С.А., Малинин В.В. Моделирование приборов ночного видения в среде MATLAB	156
Мустаева Е.С., Гареев А.И., Малинин В.В. Разработка кабинета для проведения видеосеминаров	159
Скляр Д.Ф. Моделирование атмосферных трасс для линий оптической связи без прямой видимости для обеспечения геодезических и геологических работ	161
Егоренко М.П. Хроматизм увеличения многоспектрального зеркально-линзового объектива	165
Рахманова Ю.Г. Автоматизированный расчет двухкомпонентных панкратических систем, содержащих зеркальные компоненты	171
Поллер Б.В., Коломников Ю.Д., Трушенко Д.Е. Исследование планарных полимерных антенн с люминофорами для лазерных информационных систем	176
Коняев С.И., Поллер Б.В., Удальцов Е.В. Обзор некоторых характеристик ультрафиолетовых светодиодов для оптических информационных систем	181
Лужных В.С., Хацевич Т.Н. Компьютерные системы тестирования	183
Сырецкий Г.А., Радионов А.И. Искусственный интеллект и интеллектуальные информационные системы: современное состояние	185
Михайлова Д.С., Сырнева А.С. Оптические исследования наноструктурирования частиц гидрозоля	192
Шергин С.Л., Михайлов П.Г. Разработка лазерного гравировального устройства	194
Михайлова Д.С. Разработка экспериментальной установки по исследованию параметров светофильтров	195
Сырнева А.С. Разработка светофильтров использующих эффект полного внутреннего отражения	197
Черепанов В.Я. Адиабатический метод формирования и измерения тепловых потоков в эталонах физических величин	201
Могильницкий Б.С. Метрологические проблемы лазерной дальнометрии	205
Могильницкий Б.С. Наносекундный лазер для современных измерительных технологий	209
Макаров И.Е., Толстиков А.С. Методы синхронизации пространственно-разнесённых часов, основанные на применении спутниковых навигационных технологий	212
Березовский А.В. Универсальный компаратор УК10-05	216
Зверев Л.А. Методология определения проектных радиусов в существующих кривых и закруглениях	221
Коллер А.А., Цибин И.Г., Черепанов В.Я. К вопросу о проведении испытаний большегрузных весов в диапазоне рабочих температур	226
Щербаков В.В., Васёха В.Н. Геодезические методы определения микропрофиля рельса	230

Дульянинов А.С. Метрологическое обеспечение клининговых технологий. Состояние и выбор направления развития	234
Дульянинов А.С. Методы контроля чистоты поверхностей в чистых помещениях	239
Прихода А.Г., Новоселова Т.И., Толстиков А.С. Стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение геофизических и сопровождающих их геодезических работ.....	241
Коркин В.С. Определение элементов внешнего ориентирования геометрической модели с использованием ЦМР	246
Лизунов В.Д., Уставич Г.А., Середович В.А., Куликова Л.Г., Новоевский В.Т. Методы повышения точности геодезических средств измерений больших длин	249
Куликова Л.Г., Середович В.А., Лизунов В.Д., Сурнин Ю.В., Антонович К.М., Калюжин В.А., Сучков О.П., Ушаков О.К. Метрологическая служба Сибирской государственной геодезической академии.....	252
Могильницкий Б.С. Оценка энергетических потерь в каналах зондирования лазерного дальномера	258
Лизунов В.Д., Куликов А.В. Лазерный измеритель перемещений на основе дифракционной решётки	261
Шувалов Г.В. Экспериментальное исследование метода определения температуры вспышки моторных масел	265
Шувалов Г.В. Разработка мобильной лаборатории «КЛАН-1» для анализа качества нефтепродуктов.....	269
Juergen J. Brandner, Anurjew E., Henning T., Schygulla U., Schu-bert K. Microstructure Devices for Applications in Thermal and Chemical Process Engineering (Использование микроструктурных устройств в тепловых и химических процессах)	274
Pfeifer P., Haas-Santo K., Görke O., Thormann J., Schubert K. Small efficient microchannel systems for mobile and decentralised hydrogen production	292
Кузнецов В.В., Витовский О.В., Сафонов С.А., Шамирзаев А.С. Теплофизические проблемы создания компактных испарителей на основе каналов малого размера	301
Кузнецов В.В., Витовский О.В., Димов С.В., Козлов С.П. Тепломассообмен в микрохимических реакторах.....	305
Ершов И.Н., Кузнецов В.В. Массообмен при растворении газа в каналах монолитных реакторов	310
Воронин М.Я., Поспелов А.Н., Устюгов М.Б. Об инвариантности законов излучения энергии неоднородных СВЧ – резонаторов (аналог псевдосферы Лобачевского) и абсолютно черного тела нагретого вещества по Планку	314
Куриленко Г.А., Устюгов М.Б. «Энтропийный» подход к оценке механической повреждаемости деталей приборов.....	322