

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

ГЕО-СИБИРЬ-2009

Т. 5

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ,
ТЕПЛОФИЗИКА, МИКРОТЕХНИКА

ч.1

Сборник материалов
V Международного научного конгресса

Новосибирск
СГГА
2009

УДК 681.2:006:
С 26

Ответственные за выпуск:

Кандидат технических наук, профессор,
директор Института оптики и оптических технологий СГГА, Новосибирск
О.К. Ушаков

Доктор технических наук, профессор,
зав. лабораторией лазерных информационных систем СО РАН, Новосибирск
Б.В. Поллер

Доктор технических наук, профессор,
директор Конструкторско-технологического института
научного приборостроения СО РАН, Новосибирск
Ю.В. Чугуй

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой метрологии,
стандартизации и сертификации СГГА, Новосибирск
В.Я. Черепанов

Доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой физики СГГА, Новосибирск
В.В. Чесноков

С 26 ГЕО-Сибирь-2009. Т. 5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника. Ч. 1: сб. матер. V Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2009», 20–24 апреля 2009 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2009. – 263 с.

ISBN 978-5-87693-327-0 (т. 5, ч. 1)

ISBN 978-5-87693-320-1

В сборнике опубликованы материалы V Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2009» направления «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника».

Печатается по решению Редакционно-издательского совета СГГА
Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 681.2:006:

ISBN 978-5-87693-327-0 (т. 5, ч. 1)
ISBN 978-5-87693-320-1

© ГОУ ВПО «Сибирская государственная
геодезическая академия», 2009

СОДЕРЖАНИЕ

Анурьев Е., Хансёстен Э., Шугулла У., Бранднер Ю. Металлические микротеплообменники: свойства, применения и долговременная стабильность.....	9
Попов Г.Н., Топорков А.А., Бутримов И.С. Малогабаритный лазерный дальномер с функциями баллистического вычислителя ЛДМ-2В.....	26
Бутримов И.С., Журавлев А.В., Попов Г.Н., Топорков А.А., Голицын А.В. Новые отечественные разработки автоматизированных прицелов для снайперских винтовок и результаты их полигонных испытаний.....	29
Бутримов И.С., Журавлев А.В., Алантьев Д.В. Опытный образец двухспектральной обзорно-прицельной системы и результаты его полигонных испытаний	34
Марчишин И.В., Алдохин П.А., Косолапов Г.И., Чурилов С.М., Шатунов К.П. О возможности работы матричного CDXHG1-хте приемника в режиме многоимпульсного накопления сигнала, синхронизованного с лазерным излучением	39
Куриленко Г.А., Устюгов М.Б. Разработка пневмодемпфера для защиты приборов от вибрации.....	45
Терешин Е.А., Хацевич Т.Н. Оптические системы тепловизоров	50
Поликанин А.Н. Исследование оптической передаточной функции глаза .	53
Тымкул В.М., Фесько Ю.А. Математическое моделирование работы пирометра двойного отношения в условиях реальных сигналов.....	59
Лебедев Н.С., Моисеев А.В. Устройство сопряжения спектральной установки с ПК.....	62
Тымкул В.М., Шелковой Д.С. Оптический трехспектральный пирометр. Методика и результаты исследований.....	64
Каликин В.Э. Автоматизированная скоростная оптико-электронная система измерения износа контактного провода в движении.....	69
Тымкул Л.В. Функциональное компьютерное моделирование работы приборов ночного видения пассивного типа.....	76
Звягинцева П.А., Грицкевич Е.В. Компьютерная модель оптико-электронного измерителя координат точек на местности.....	81
Егоренко М.П., Ефремов В.С. Исследование хроматизма многоспектрального зеркально-линзового объектива.....	85
Ведерников В.М., Дутов П.М., Кокарев А.И., Кирьянов В.П., Никитин В.Г., Пальчикова И.Г., Саметов А.Р., Ступак М.Ф., Чугуй Ю.В., Чуканов В.В. Разработка технологии создания специализированных дифракционных элементов, предназначенных для работы в режиме пропускания высокоинтенсивного терагерцового излучения	90
Грицкевич Е.В. О возможности применения матричных фотоприемников для решения геодезических задач	96
Григорьева Г.В., Родионов А.И., Юрьев Г.С., Ким В.Ф. Улучшение метрологических характеристик вибрационных стендов специализированного приборостроения.....	99

Канушина Л.А., Соснов А.Н., Соснова Н.К. Влияние термических характеристик стекла на механизм разрушения	102
Ларина Т. В. Износостойкость твердых сплавов.....	104
Шлишевский Б.Э., Бобылева Е.Г. Техническая подготовка освоения новой техники в автоматизированном производстве.....	109
Сырецкий Г.А. Цифровая организация как ключевая тенденция развития современной промышленной индустрии и технического образования	114
Ушаков О.К., Рахимов Н.Р., Ларина Т.В., Плиско В.А. Оптоэлектронный метод определения качественных параметров металлических поверхностей	119
Шлишевский Б.Э., Кутенкова Е.Ю. Авангардные технологии в механической обработке оптического приборостроения.....	125
Соснов А.Н., Соснова Н.К., Критинина С.В. Возможные пути нейтрализации токсичных отходов от обработки ик-материалов ИКС-25 и КО-4	130
Маневич М.Л., Варшал И.М., Абель О.Я., Айзенберг Н.П., Резников Ю.А., Курьёз Ю.И., Соснов А. Н. Матрицы адаптивных микролинз, содержащие фоторезист и жидкие кристаллы	135
Рахимов Н.Р., Ушаков О.К., Кутенкова Е.Ю., Исаев М.П. Оптоэлектронный анализатор цвета полупрозрачных жидкостей.....	138
Кузнецов М.М., Петров П.И. Контроль клиновидности пластин фотоэлектрическим способом.....	144
Кузнецов М.М. Монтаж ответственных узлов гироскопических приборов	147
Кузнецов М.М., Кузнецова Д.А. Классификация видов испытаний изделий в серийном производстве.....	152
Кузнецов М.М. Инфракрасное излучение. Способ визуализации	155
Перминов В.П. Магниты и Г.В. Самсонов	156
Марач А.А. Модели оперативно-календарного планирования в оптическом производстве	158
Кузнецов М.М., Комбаров М.С. Система комплексной автоматизации производства SPRINT	163
Поллер Б.В., Косинов В.А., Косинов О.В., Трушенко Д.Е. Определение параметров покрытия диоксидом титана стекла и полимерных пленок	167
Чесноков В.В., Чесноков Д.В. Тепловое воздействие лазерного излучения на слоистые тонкоплёночные структуры.....	173
Кузнецов В.В. Теплофизические основы микроэлектронномеханических устройств на основе управляемого распада метастабильной жидкости	183
Багдурев Р.И. Электронно-оптический преобразователь третьего поколения без ионно-барьерной плёнки.....	189
Витовский О.В., Кузнецов В.В. Микрокаталитические конверторы углеводородов для питания автономных электрохимических	

генераторов	191
Шамирзаев А.С. Теплообмен при фазовых переходах в микроканальных парогенераторах / конденсаторах	197
Козлов С.П., Сафонов С.А. Численное моделирование химических превращений в микроконверторах природного газа.....	202
Козулин И.А., Кузнецов В.В. Структура газо-жидкостного течения в вертикальном микроканале	208
Айрапетян В.С., Фесенко К.А. Расчетные спектры поглощения и их анализ для наиболее известных взрывчатых веществ	215
Никулин Д.М., Чесноков В.В., Чесноков Д.В. Четырёхзеркальный микромеханический перестраиваемый интерферометр Фабри-Перо	220
Шергин С.Л., Чесноков Д.В. Испытательный стенд и методика проведения экспериментальных исследований динамических характеристик оптических пассивных затворов.....	224
Наливайко В.И. Наноструктурированные слои халькогенидных полупроводников – структура, оптические свойства, применение....	229
Костюченко В.Я., Протасов Д.Ю. Фотомагнитный эффект в эпитаксиальных пленках CDXHG1-XTE ($x = 0,22$) с приграничными варизонными слоями.....	235
Савелькаев С.В. Эффект смещения центра масс	239
Уткин Д.Е., Латышев А.В. Формирование массива наноструктур методами электронной литографии	245
Бутенко В.Д., Гольденберг Б.Г. Разработка системы автоматизации процессов экспонирования на станции рентгенолитографии	250
Пляскин С.В., Гольденберг Б.Г. Исследование технологических основ адгезионной прочности тонких пленок в LIGA-процессах.....	255
Кошелев А.В. Методические аспекты определения скорости распространения волн в современных разделах физики	259
Кошелев А.В., Карпик А.П., Ушаков О.К., Кошелев В.А., Синякин А.К., Савченко М.П. Определение показателя преломления земной атмосферы при выполнении геодезических измерений.....	268
Сырецкий Г.А. Многоагентные системы в промышленности и техническом образовании	273

CONTENTS

Anurjew A., Hansjosten E., Schygulla U., Brandner J.J. Metallic micro heat exchangers: properties, applications and long term stability	9
Popov G.N., Toporkov A.A., Butrimov I.S. Small-sized laser rangefinder with functions of ballistic calculator LDM-2V	26
Butrimov I.S., Zhuravlyov A.V., Popov G.N., Toporkov A.A., Golitsyn A.V. The new russian automatized sights for sniper rifles and firing ground test results	29
Butrimov I.S., Zhuravlyov A.V., Alantsev D.V. The experimental sample of two-spectral band sight system and its firing ground test results.....	34
Marchishin I.V., Aldokhin P.A., Kosolapov G.I., Churilov S.M., Shatunov K.P. On the operation of CDXHG1-xte focal plane arrays fotodetector in the multy-pulse accumulation mode signal, synchronized with laser pulse train	39
Kurilenko G.A., Ustyugov M.B. Development of pneumodamper for instruments vibration protection	45
Tereshin E.A., Hatsevich T.N. Optical systems of infrared thermal devices.....	50
Polikanin A.N. Research of eye optical transfer function.....	53
Tymkul V.M., Fesko Yu.A. Mathematical simulation of work of the double ratio pyrometer in the conditions of real signals	59
Lebedev N.S., Moiseev A.V. Intercoupler of the spectral installation with PC..	62
Tymkul V.M., Shelkovoy D.S. Optical three-spectral pyrometer. The technique and results of research.....	64
Kalikin V.E. Automated fast optical electronic system for wire ware measurement on the go.....	69
Tymkul L.V. Functional computer simulation of work of night viewing devices passive type	76
Zvyagintseva P.A., Gritskevich Ye.V. Computer model of opto-electronic measurer of the area coordinate points	81
Yegorenko M.P., Yefremov V.S. Research of multispectral mirror-lens chromatism.....	85
Vedernikov V.M., Dutov P.M., Kokarev A.I., Kiryanov V. P., Nikitin V.G., Palchikova I.G., Sametov A.R., Stupak M.F., Chugui U.V., Chukanov V.V. Research and development of technologies for creating specialized terahertz band diffraction optical elements applicable for high-intensive terahertz radiation.....	90
Gritskevich Ye.V. Possibility of using area imagers for geodetic problems solution	96
Grigorjeva G.V., Rodionov A.I., Yurjev G.S., Kim V.F. Improvement of metrological performance of vibration stands in specialized instrument-making.....	99
Kanushina L.A., Sosnov A.N., Sosnova N.K. Glass thermal characteristics effect on fracture mechanism	102
Larina T.V. Durability of hard metals.....	104

Shlishevsky B.E., Bobyleva Ye.G. Technical support of the new equipment development in automated production.....	109
Syretsky G.A. The digital organization is key tendency of development the modern industrial business and technical education.....	114
Ushakov O.K., Rakhimov N.R., Larina T.V., Plisko V.A. Optoelectronic technique for determination of metal surfaces qualitative parameters	119
Shlishevsky B.E., Kutenkova Ye.Yu. Vanguard technologies in mechanical operations of instrument-making	125
Sosnov A.N., Sosnova N.K., Kritinina S.V. Possible ways of infrared materials (ИКС-25 and КО-4) toxic waste neutralization.....	130
Manevich M.N., Varshal I.M., Abel O.Ya., Eisenber N.P., Reznikov Yu.A., Kurioz Yu.I., Sosnov A.N. Arrays of adaptive micro-lenses containing a photoresist and liquid crystals.....	135
Rakhimov N.R., Ushakov O.K., Kutenkova Ye. Yu., Isayev M.P. Optoelectronic analyzer of semitransparent liquids colour	138
Kuznetsov M.M., Petrov P.I. Photoelectric way of plates wedging control	144
Kuznetsov M.M. Assembly of main units for gyroscope instruments.....	147
Kuznetsov M.M., Kuznetsova D.A. Classification of products tests types in serial production.....	152
Kuznetsov M.M. Infrared radiation. Vizualization	155
Perminov V.P. Magnesium diborides and G.V. Samsonov	156
Maratch A.A. Models of current calendar planning dans la production optique	158
Kuznetsov M.M., Kombarov M.S. System of complex automation of production (SPRINT)	163
Poller B.V., Kosinov V.A., Kosinov O.V., Trushenko D.E. Definition of parameters covering titanium dioxide on glass and polymeric films	167
Chesnokov V.V., Chesnokov D.V. Laser irradiation heat force on multilayer thin-film structures.....	173
Kuznetsov V.V. Thermal fundamentals of microelectromechanical devices based on controlled decay of metastable liquid	183
Bagduev R.I. Third generation electron-optical image intensifier without ion-barrier film.....	189
Vitovsky O.V., Kuznetsov V.V. Microcatalytic convertors of hydrocarbons for feeding autonomous electrochemical generators	191
Shamirzaev A.S. Heat transfer with the phase transitions in the microchannel steam generators / condensers.....	197
Kozlov S.P., Safonov S.A. Numerical simulation of chemical conversions in microchannel processors of methane	202
Kozulin I.A., Kuznetsov V.V. Structure of gas-liquid flow in vertical microchannel	208
Hayrapetyan V.S., Fesenko K.A. Estimated spectrums of absorption and their analysis for most known explosive materials	215
Nikulin D.M., Chesnokov V.V., Chesnokov D.V. 4-mirrors micromechanical tunable Fabry-Perot interferometer.....	220

Shergin S.L., Chesnokov D.V. The test bench and principles of an experimental research of dynamic properties of passive optical shutters	224
Nalivaiko V.I. Nanostructured layers of halcogenide semiconductors – structure, optical properties, application	229
Kostyuchenko V.Ya., Protasov D.Yu. The photoelectromagnetic effect in epitaxy films p-hg1-xcdxte ($x = 0,22$) with graded-gap near-border layers.....	235
Savel'kayev S.V. Effect of shift of the mass center	239
Utkin D.E., Latyshev A.V. The forming of nanostructure array by ebl methods	245
Butenko V.D., Goldenberg B.G. Development of the system of automation of processes of exhibition at the station of rentgenolytografyy	250
Plyaskin S.V., Goldenberg B.G. Research of technological bases of adhesivety of thin films in LIGA-processes.....	255
Koshelev A.V. Methodical aspects of definition of propagation velocity of waves in modern physics	259
Koshelev A.V., Karpik A.P., Ushakov O.K., Koshelev V.A., Sinyakin A.K., Sawchenko M.P. Determination of refractive index of earth atmosphere in geodesic measurements.....	268
Syretsky G.A. The multiagent systems in industry and technical education....	273

УДК 681.7

A. Anurjew, E. Hansjosten, U. Schygulla and J.J. Brandner¹⁾

Forschungszentrum Karlsruhe, Institute for Micro Process Engineering (IMVT),
P.O. Box 3640, DE-76021 Karlsruhe, Germany

¹⁾ corresponding author: Phone +49 7247 82 3963, Fax +49 7247 82 3186

E-mail: juergen.brandner@imvt.fzk.de

METALLIC MICRO HEAT EXCHANGERS: PROPERTIES, APPLICATIONS AND LONG TERM STABILITY

Е. Анурьев, Э. Хансёстен, У. Шугулла, Ю. Бранднер¹⁾

Научно-исследовательский институт микропроцессоров, г. Карлсруэ

P.O. Box 3640, DE-76021 Karlsruhe, Germany

¹⁾ corresponding author: Phone +49 7247 82 3963, Fax +49 7247 82 3186

E-mail: juergen.brandner@imvt.fzk.de

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МИКРОТЕПЛООБМЕННИКИ: СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЯ И ДОЛГОВРЕМЕННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ

ABSTRACT

Micro heat exchangers, which until recently have been implemented only at laboratory scale, are now being available for industrial applications. They are well known for their superior heat transfer properties due to the large surface-to-volume ratio. But there are little data available on the long term stability of these devices.

In this publication several application examples for micro heat exchangers made of stainless steel are presented. The devices consist of stainless steel foils providing numerous micro channels generated by mechanical micromachining or wet chemical etching. A number of the foils are arranged in a specific way and bonded together by diffusion bonding.

Device property descriptions as well as some possible application examples show the potential of metallic microstructure devices.

Results on two crossflow microstructure heat exchangers running in long term tests are presented. Both devices have been tested for more than 8000 hours each, using water as test fluid. Experimental data on the heat transfer properties and the pressure drop are given and compared. It was found that the heat transfer capabilities were significantly decreased within the first few hundred hours of testing and then run into a saturation state. Performance degradation may be due to a fouling layer deposited on the heat exchange surface. Some other experimental applications in which fouling were expected to cause problems are described briefly.

1. INTRODUCTION

Since the early 90s, microstructure heat exchangers have been widely acknowledged as excellent tools for laboratory research, but only as a niche product

for industrial applications. More recently, microstructure heat exchangers have been designed, manufactured and tested that provide the potential for industrial use.

To design those devices, conventional pre-calculation techniques like simple fluidmechanical equations based on the Nusselt theory can be used, as it was shown by Halbritter et al. (2004). Beside this, Wenka et al. (2000) showed that CFD calculations may be advantageous to use for the primary design and to obtain a first idea of the heat transfer performance of such microstructure devices. Nevertheless, the manufacturing process is determined by the possibilities to obtain micro channels or microstructures, the bonding methods and of course by the needs of the processes the devices are meant for, which determines also the material to be used. Moreover, the process itself is limited by the long term stability of the microstructure devices against corrosion, blocking and fouling.

Design and manufacturing technique of microstructure heat exchangers is described here. Examples of microstructure heat exchangers and their potential are given by experimental results. Experimental results for the long term stability of two crossflow type microstructure heat exchangers are given in detail. Some more experimental results with regard to fouling and long term stability obtained with the same or other designs of microstructure heat exchangers are presented. A summary and short outlook complete the paper.

2. MANUFACTURING

Most processes running outside of a laboratory will need considerably high pressure resistance as well as resistance against corrosion. This means that the use of silicon as base material is not longer a suitable choice. Metallic microstructure heat exchangers are necessary to provide the demanded resistivity against pressure, temperature and corrosion. Therefore, it is necessary to choose a metal which can be microstructured quite easily and can also be bonded together to form stable and more or less complex structures. Due to the higher corrosion resistance, stainless steel is the first choice. Micro channels or other designs of microstructures in stainless steel foils may be obtained either by mechanical precision micromachining (e.g. milling, turning or drilling), as it is described by Schaller et al. (1999) and Brandner (2008) or by wet chemical etching as described by Madou (2002) and Brandner (2008). The cross section of the channels differs by the manufacturing method. While mechanically cut channels will take on the shape of the tool used to cut, wet chemically etched micro channels have a semi-elliptic cross section due to the isotropic etching effect. In Figure 1, a SEM photo of a mechanically cut microchannel foil with rectangular micro channels is shown, while Figure 2 shows a SEM picture of an etched microchannel stainless steel foil.

Depending on the manufacturing method, the surface quality differs. While mechanically cut microchannels in stainless steel provide an overall roughness of about 3 μm , wet chemically etched stainless steel microchannels show about three times this value – around 10 μm is common. This, of cause, is to be taken in account when fouling takes place.

To form the core of a microstructure heat exchanger, a number of microstructured foils is stacked together in the desired order and arrangement. The complete stack is then brought into a furnace and bonded by a diffusion bonding

process. Depending on the material and the connecting face area, a strictly defined temperature and force program is applied to run the diffusion bonding process. The forces used for diffusion bonding are in the range from a few kN up to around 100 kN, depending on the connection area, while the applicable temperature range is from 500°C to more than 1,000°C.

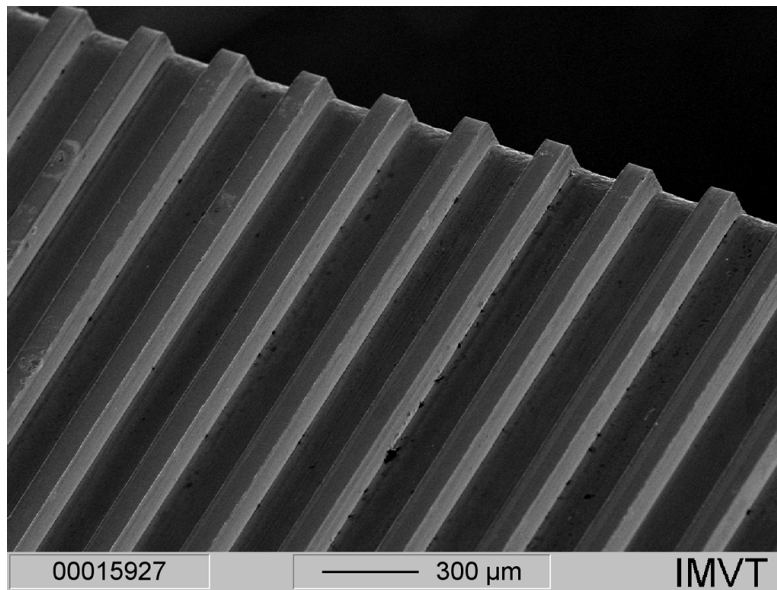


Fig. 1. SEM picture of a mechanically cut microstructure foil. The rectangular micro channels are 200 μm wide and around 100 μm deep

For microstructure foils, two possibilities for stacking exist: either the simple stacking (called “face-to-back”), or to stack them “face-to-face”. Those two possibilities are of special interest for wet chemically etched micro channels, where the “face-to-back” version will form semi-elliptically shaped micro channels with small hydraulic diameters, while the “face-to-face” option can be used to generate full-elliptically shaped micro channels, as shown in Figure 3 (see: Brandner (2008)). The displacement of the micro channels can be reduced by aligning the single foils on one or more pins made to fit in holes in the corners of each foil.

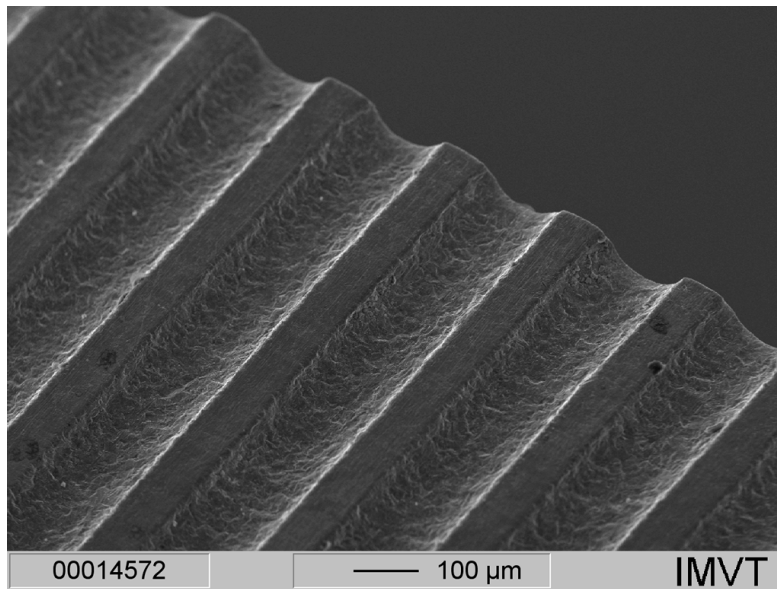


Fig. 2. SEM picture of a wet chemically etched microstructure foil. The semi-elliptic micro channels are about 130 μm wide and around 50 μm deep

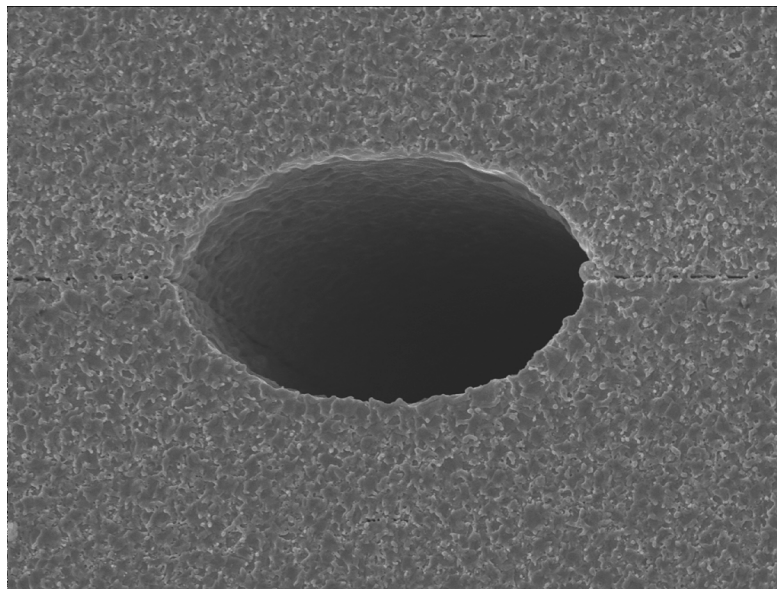


Fig. 3. SEM picture of a full-elliptically shaped micro channel of a crossflow micro heat exchanger. The good alignment is clearly to see

After the diffusion bonding step, the microstructure device is similar to a monolithic structure, as shown in Figure 4, where the micro channel system of a crossflow heat exchanger is shown. The second passage is laying across the visible face areas of the channels.

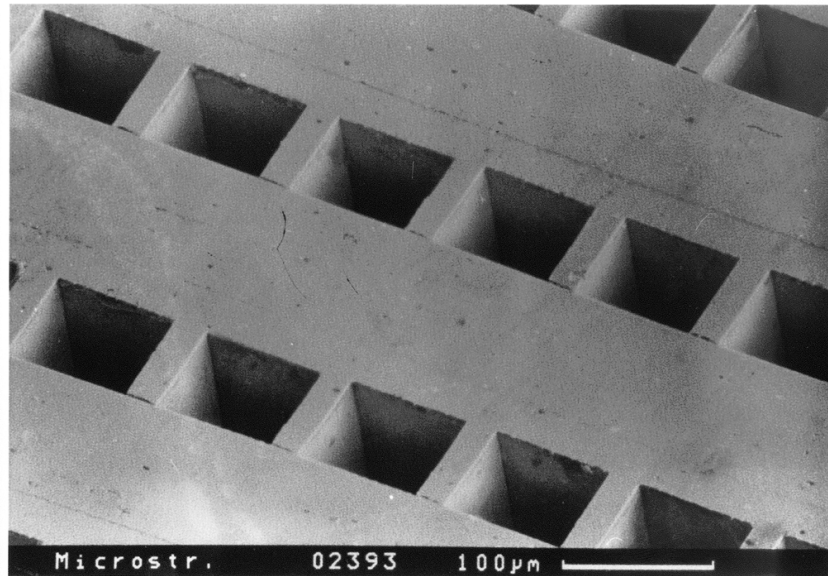


Fig. 4. Crossflow microstructure heat exchanger made of stainless steel after diffusion bonding. Hints of the single layer structure are visible

The core bodies of the microstructure devices are cleaned and welded into housings by electron beam welding or laser welding, respectively. The housing may be equipped either with conventional tube fittings or any other fitting system suitable for the desired application. In Figure 5, an example photo of a crossflow heat exchanger core with an active volume of 1 cm^3 and another device welded to standard fittings is shown.

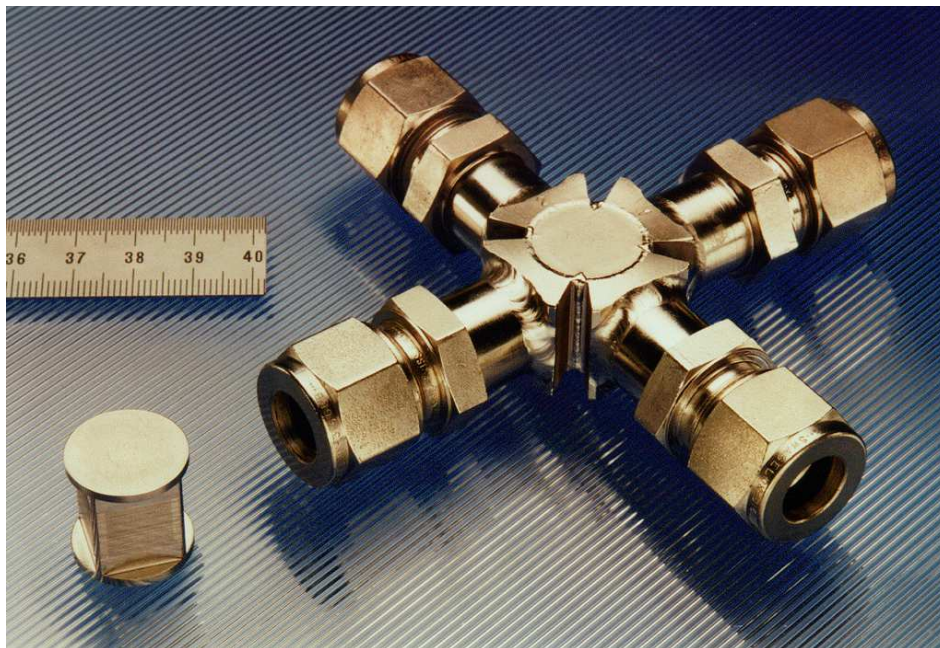


Fig. 5. Core of a stainless steel crossflow microstructure heat exchanger (left) and a similar core welded to conventional tube fittings. The active heat transfer volume of both devices is 1 cm^3

Throughout the complete manufacturing process a quality control is stringent, e.g. measurements are made of the leak tightness, the overpressure resistance and other

parameters. A more extensive description of manufacturing of microstructures and microstructure devices can be found in Brandner et al. (2006a) and Brandner (2008).

3. PRECALCULATION AND MODELING

As mentioned above, for most devices the pre-calculation using standard Nusselt theory equations is suitable in many cases. Therefore, the hydraulic diameter of each microchannel 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 cross section area of the channel and C is the circumference of the micro channels.

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 (1994). For the pressure drop, equations like the Darcy equation for laminar flow with a Reynolds number Re lower than approx. 2300 or an equation developed by Petukhov and Gnielinski for turbulent flow with a Reynolds number Re between 3000 and 10^5 may be applied (see VDI-Wärmeatlas (1994)).

For a microstructure heat exchanger having a defined geometry and known mass flows as well as inlet and outlet temperatures, the heat transfer therefore was calculated by the power balance equation (2).

$$\dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = k \cdot A \cdot \Delta \vartheta_m \quad (2)$$

Here, $\dot{m}$ is the mass flow, c_p the specific heat capacity, ΔT the temperature difference, k the overall heat transfer coefficient, A the heat transfer area and $\Delta \vartheta_m$ the mean logarithmic temperature difference.

The effective heat transfer area A was calculated by

$$A = n_f \cdot n_{Ch} \cdot C \cdot l, \quad (3)$$

where n_f is the number of microstructured foils, n_{Ch} is the number of microchannels per foil, C is the circumference of each microchannel and l is the length of the microchannels. $\Delta \vartheta_m$ was calculated from the formula given in VDI-Wärmeatlas (1994).

The heat transfer coefficient was defined for both a cold and a hot passage providing the same heat transfer area like it is shown in equation (4), in which α is the heat transfer coefficient, Nu is the Nusselt number and λ_{Fluid} is the thermal conductivity of the fluid. Then, the overall heat transfer coefficient k was calculated using equation (5) with s being the foil thickness and λ_{Solid} the thermal conductivity of the heat transfer material.

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{Fluid}}{d_h}; \quad (4)$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_{hot}} + \frac{1}{\alpha_{cold}} + \frac{s}{\lambda_{solid}}. \quad (5)$$

For laminar flow ($Re < 2300$), the Nusselt number was calculated using equations (6) to (9), where Pr is the Prandtl number.

$$Nu_{lam} = \sqrt[3]{(Nu_1^3 + 0.7^3 + (Nu_2 - 0.7)^3 + Nu_3^3)}; \quad (6)$$

$$Nu_1 = 3.66; \quad (7)$$

$$Nu_2 = 1.615 \cdot \sqrt[3]{Re \cdot Pr \frac{d_h}{l}}; \quad (8)$$

$$Nu_3 = \left(\frac{2}{1 + 22 \cdot Pr} \right)^{1/6} \cdot \sqrt{Re \cdot Pr \frac{d_h}{l}}. \quad (9)$$

For turbulent flow ($Re > 2300$), the Nusselt number was defined by equations (10) to (11). Here, ξ is a form factor (see VDI Wärmeatlas (1994)).

$$Nu_{turb} = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8} \cdot (Pr^{2/3} - 1)}} \cdot \left(1 + \left(\frac{d_h}{l} \right)^{2/3} \right); \quad (10)$$

$$\xi = (1.82 \cdot \log(Re) - 1.64)^{-2}. \quad (11)$$

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) or can

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \cdot c_{mean} \cdot (T_{hot,in} - T_{cold,in})}. \quad (12)$$

In equation (12), $\dot{Q}$ is the thermal power, $\dot{m}$ the mass flow, T the temperature defined by the subscripts and c_{mean} the mean specific heat capacity.

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), which is given in VDI Wärmeatlas (1994).

$$\varepsilon = \frac{T_{cold,out} - T_{cold,in}}{T_{hot,in} - T_{cold,in}}. \quad (13)$$

For modeling of the microstructure devices, either the commercially available CFD software FLUENT or the simple Nusselt theory equations have been used. With these equations, a complete microstructure device, which means the plenum outlet temperature at a certain mass flow, was precalculated. Using FLUENT, a temperature distribution for a system consisting of two microchannel foils only was performed and therefore the temperature distribution across the complete area of the foils was calculated, as it is described by Halbritter et al. (2004) and Schubert et al. (2001).

In Figure 6 an example for the temperature distribution obtained for an arrangement of two crossflow microstructure heat exchanger foils is shown. Here, a symmetric mass flow of $400 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ for both the cold water passage and the hot water passage was assumed. The temperature distribution was calculated and plotted as function of the distance from the inlet and the channel number.

4. DEVICE PROPERTIES AND APPLICATIONS

Microstructure devices manufactured in the described way provide unique properties. After the diffusion bonding, a monolithic device core is generated out of single metallic foils. Thus, the devices are stable against high pressures due to the

plane connection between the single foil layers. Pressure resistance up to 100 MPa at room temperature is possible, as it is described by Schubert et al. (2001). The devices can be scaled to the desired mass flow range, reaching from some grams up to several tons liquid per hour and passage of the device. The pressure drop resulting on the microstructure passages is in the range of up to 1 MPa, depending on the density and viscosity of the fluid.

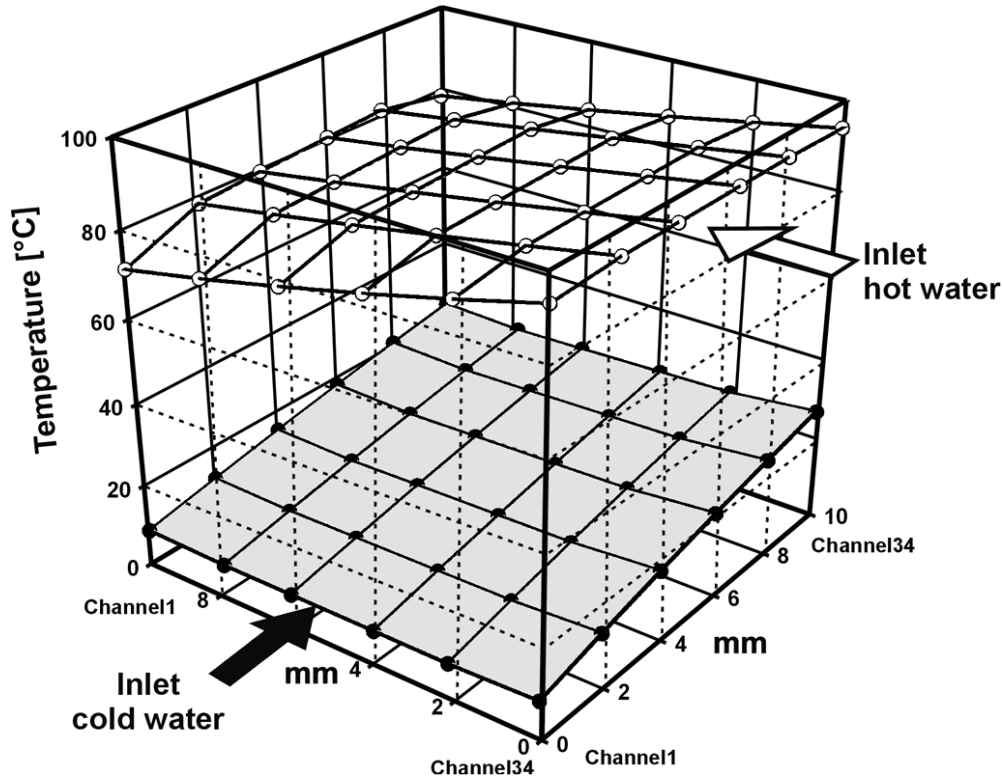


Fig. 6. Temperature distribution inside a two foil crossflow arrangement at a symmetrical water mass flow of $400 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ water in both passages, calculated using FLUENT

By parallelization of the devices, mass flow ranges of some tons per hour and per passage can be reached. In Fig. 7, a stack of five crossflow heat exchanger devices is shown. With this stack, a maximum mass flow of 35 tons of water per passage and per hour is possible. Thus, a maximum thermal power of up to 1 MW can be transferred.

Devices providing an active volume of 1 cm^3 can transfer a thermal power of up to 20 kW, measured with water of 95°C in one passage and water of 8°C in the other, at a mass flow of about 700 kg/h each, as it is reported by Brandner et al. (2006b). The overall heat transfer coefficient k of the devices with linear microchannels is in the range of $20 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ and can be increased to values about $56 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ and more by changing the design of the microchannels. A surface-to-volume ratio of up to $30000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ can be provided, corresponding to Brandner et al. (2006b).

With an electrically powered stainless steel heat exchanger device, a biodiesel flow is continuously heated from 80°C to 105°C at a mass flow of 1000 kg/h, as it is presented in Rinke et al. (2006). The manufacturing and working principle of the device is given by Henning et al. (2004). In Fig. 8, an electrically powered

microchannel device used for this application is shown, providing a maximum electrical power of 20 kW.



Fig. 7. Stack of five crossflow microchannel heat exchangers. 1 MW thermal power can be transferred at a water mass flow of 35 tons per hour and per passage

Although one of those devices is running continuously within a production facility for more than one year, we could not observe any fouling inside the microstructure system yet.

Fig. 9 shows a specially designed chemical modular microstructure reactor for the production of fine chemicals. This device was developed in cooperation with the DSM company and was used in several campaigns in commercial production. At a maximum reactant mass flow of 1700 kg/h, a thermal power of several hundred kW could be transferred within a number of crossflow microchannel heat exchanger modules. They have been combined with a number of specially designed micro mixers to provide fast and sufficient mixing and temperature control for the reaction. More details can be found in Kraut et al. (2006).

More examples for applications are given in literature, e.g. in Hessel et al. (2006).

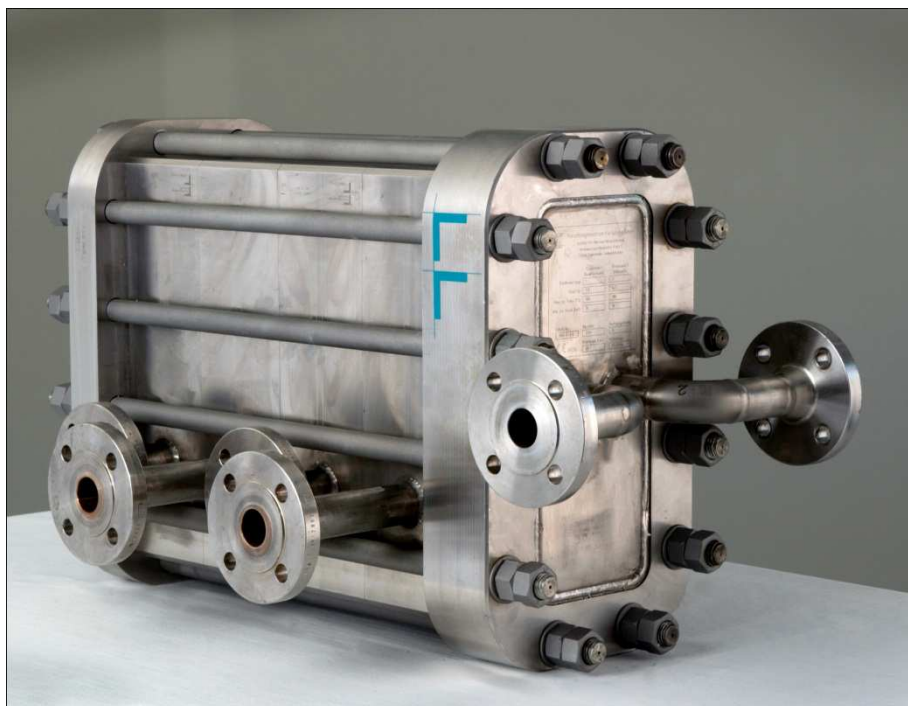


Fig. 9. Microstructure reactor for chemical production. In cooperation with the company of DSM, this device was developed and manufactured. It is about 650 mm long and weighs 290 kg. Several thousand microstructures are integrated to provide excellent mixing and heat transfer

5. EXPERIMENTAL SETUP

For experimental tests of microstructure heat exchangers a test system with hot and cold water as fluids, ducted in closed loops, was used. Metal frit filters were used to clean the water from particles. Results of a water analysis are given in Table 1.

The system was made from conventional components as far as it was possible. The pumps were conventional centrifugal pumps generating a maximum pressure of up to 1.6 MPa and covering a throughput range from $5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ up to $1000 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$. Throughputs in the range from $0.4 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ to $6 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ can be realized by the use of HPLC pumps.

For the hot water loop, an electrical heater with a heating power of 30 kW was used. For low throughputs, an electrically powered microstructure flowthrough heater was applied directly in front of the microstructure heat exchanger to be tested. This was necessary to provide a constant inlet temperature.

For the cold water loop, a plate heat exchanger with a maximum power of 30 kW was used. The temperatures of the loops are set to 10°C and 95°C , measured at the inlet of the micro heat exchanger, at a pressure of 0.9 MPa.

The mass flow through the microstructure heat exchangers are coarsely set by a bypass valve adjustment. A fine trimming is done by mass flow controllers.

Table 1. Chemical analysis results of water used in the experimental setup

total electrical conductivity	30.55	$\mu\text{S/cm}$
Ca	2.400	mg/l
Mg	1.610	mg/l
Al	0.040	mg/l
Mn	0.031	mg/l
Cu	0.029	mg/l
Zn	0.085	mg/l

The sensors used in the test rig are membrane pressure transducers with an accuracy of 0.25% of the end value (range: 0 – 1.6 MPa), PT100 resistance sensors with a resolution of 0.7 K, Type K thermocouples with a resolution of 1 K and mass flow meters based on the Coriolis principle. The accuracy of the mass flow meters is 1% o.r. for the flow range up to $10 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ and decreasing to about 0.03% o.r. for $100 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ and above.

With this setup, microstructure heat exchangers are tested in a symmetrical way, which means the mass flow through the hot and cold water passage is kept at an almost constant value for a certain time. Plenum temperatures and pressures at the inlet and the outlet of each passage are measured. The data are saved in a computerized data archiving system using LABView software. For each microstructure heat exchanger, the mass flow is increased as high as possible, e.g. up to a level where the pressure drop measured over one passage has reached a value around 0.8 MPa. The experiments have been done at least twice (one time with increasing mass flow, one time with decreasing mass flow) to obtain consistent data and to exclude hysteresis effects.

6. EXPERIMENTAL RESULTS

Results for different experiments with crossflow microchannel devices as well as electrically heated devices are given in the following section.

Comparison of Crossflow Microstructure Heat Exchangers

In this section the focus is set to the comparison of two crossflow microstructure devices with an active volume of 1 cm^3 . The design data for those devices are given in Table 2. Both devices have been used for several thousand hours in long term run within the experimental setup shown above.

For both devices, integral measurements have been taken. The maximum mass flow per passage as well as the pressure drop over the hot and cold water passage at different mass flow values have been taken as function of the time. From this, the transferred thermal power and the overall heat transfer coefficient at the same mass flow values have been calculated as function of time.

Table 2. Technical data of the crossflow microstructure heat exchangers compared in this publication

	66082	1246
channel cross section	rectangular	fully elliptic
channel dimensions	200 μm	160 μm
(width, height, length)	100 μm	100 μm
	14 mm	14 mm
hydraulic diameter	133 μm	121 μm
number of channels per passage	850	1118
number of channels per passage	850	1118
effective heat transfer area	0.0051 m^2	0.00868 m^2
material: W316L, heat conductivity: 15 W / m· K		

Unfortunately, it was not possible to look inside the microstructure heat exchangers without destroying them. Thus, although it can be seen from the measurement values that some performance degradation occurred probably due to fouling inside the microchannel system, it was not possible to confirm this.

Experimental Results for the Comparison of Crossflow Heat Exchanger Devices. Fig. 10 presents the maximum mass flow plotted over the time for both the hot and the cold water passage of the rectangular channel device. It is clearly to see from Fig. 10 that within the first 1000 hours a significant decrease of the maximum applicable mass flow is shown, which takes place in both passages simultaneously. After about 1600 hours of operation, the maximum mass flow is almost constant.

Fig. 11 presents the same data for the fully elliptic channel device. Here, the maximum mass flow in the cold water passage is almost constant, while the maximum mass flow through the hot water passage decreases significantly within the first 600 hours of operation, and is then slowly increasing again. This gives a clear hint that there has to be some fouling inside the hot water passage, since the experimental setup was not changed and worked perfectly within the normal uncertainty ranges.

In Fig. 12, the pressure drop measured over the hot water passage and the cold water passage of the elliptic channel device is given for a mass flow of 200 kg/h and 100 kg/h, plotted versus the total operation time. The steep increase of the hot waters pressure drop indicates some kind of fouling taking place inside the hot water passage, while only a small increase along the time is seen for the cold water passage.

The processes happening inside the hot water passage seems to be reversible, since the maximum water mass flow as well as the pressure drop starts to recover slowly with increasing operation time. This can be seen in Fig. 11 and Fig. 12. It is not clear yet whether the original values will be reached anymore, but the experiment is still running, and measurements are taken every 1000 hours of operation time. Nevertheless, it is very unlikely that the values will recover to the starting point values.

In Fig. 13, the overall heat transfer coefficients for the rectangular and the elliptic device are shown, plotted versus the total operation time. The values for two mass flows are presented, 100 kg/h and 200 kg/h of the warm water passage. It is

clearly to see that the overall heat transfer coefficient is reduced drastically within the first few hundred hours of operation and then remains almost constant for the complete operation time. Thus, the heat transfer capabilities of the devices are first reduced by about 5% to 10%, but then kept at this level. No further decrease is shown.

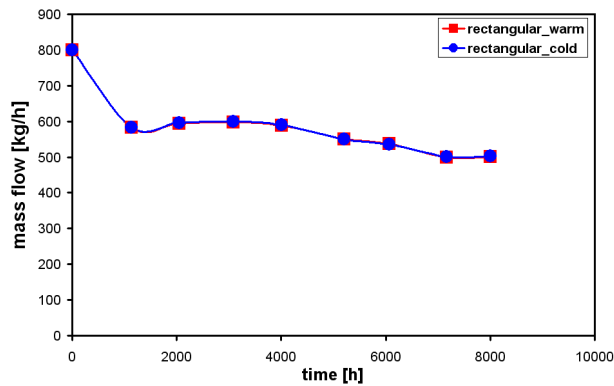


Fig. 10. Maximum mass flow in both passages of the rectangular channels device, plotted versus the total operation time. The plots are laying above each other

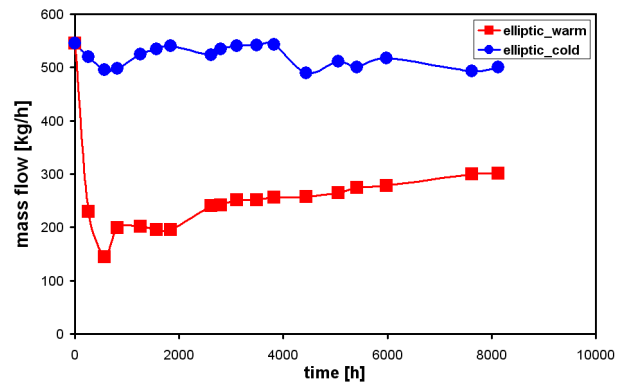


Fig. 11. Maximum mass flow in both passages of the elliptic channels device, plotted versus the total operation time

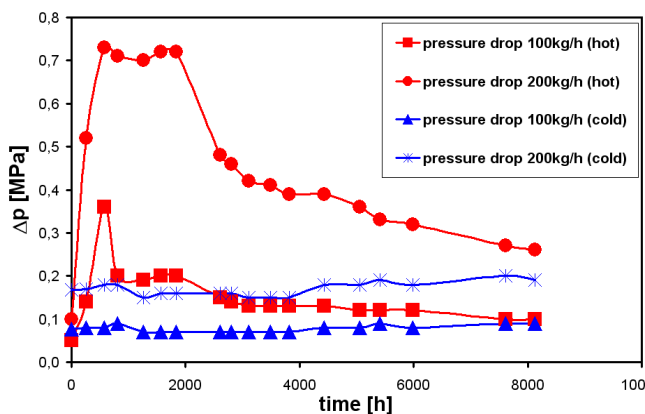


Fig. 12. Pressure drop plot versus the total operation time for the hot and cold water passage of the elliptic channel device

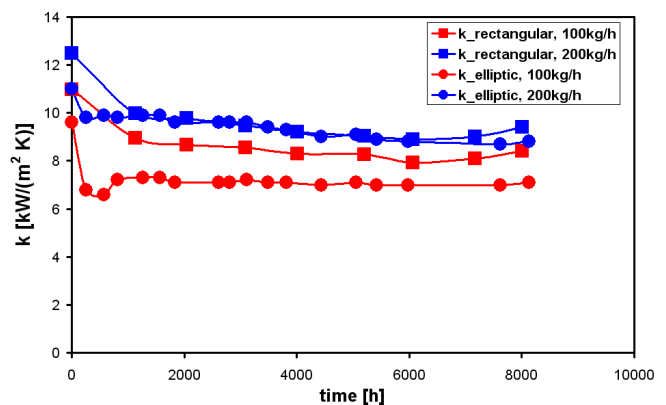


Fig. 13. Overall heat transfer coefficient k for the rectangular and the elliptical channels device, plotted versus the operation time, for two different mass flow values

Crossflow Heat Exchangers for Bio-Technology

Within a first study, a stainless steel crossflow heat exchanger was tested for its suitability to instantaneously cool down a sample flow of a mammalian cell culture suspension from 37°C to 0°C by the use of a mixture of ethylene glycol and water as cooling fluid. This was necessary to almost stop the cell metabolism and to analyse the metabolites inside the cells. With increasing sample temperature the molar mass of metabolites is decreasing in the most cases. Thus, to observe the intracellular density, a snapshot-like sampling and analysis procedure is necessary.

It was not clear whether a large number of the cells will be damaged by the heat exchanger or fouling of the microchannels will take place due to the agglomeration of the cells within the suspension. Moreover, it was not clear whether the heat exchanger could be cleaned well enough to run the device for more than only one cell sample or different cell culture types.

Experimental Results with a Crossflow Heat Exchanger for Bio-Technology.

Within the study, Wiendahl et al. (2007) showed that the number of disrupted cells is negligible small and, thus, the heat exchanger is suitable for cell culture sampling. No relevant fouling or blocking was observed while the samples have been taken, and no cell agglomeration was found. Moreover, cleaning and fumigation was easy to perform with conventional methods like, for example, an autoclave. It was shown that the sampling method is suitable for gathering relevant intracellular concentration data with a precision not known yet. Thus, micro heat exchangers provide great advantages compared to the standardized sampling methods.

Other Experiments

Other experiments with microstructure devices have been performed. A crossflow heat exchanger was used in a side-arm of the wastewater cleaning facilities of the Karlsruhe Research Center. For a couple of months, a small part of the waste water running from the facilities to the environment after cleaning was ducted through a metal mesh filter and then through the micro heat exchanger. No significant fouling was observed.

A special type of electrically powered device was tested with a defined solution of CaCO_3 . The device was running in a test loop, heating it up to a temperature of 80°C for two minutes and cooling it down again then. This was repeated several tens of thousand times. After about 60 kg of the CaCO_3 solution was pumped through the device, the pressure drop increased significantly and the heat transfer opportunities was decreased significantly by a deposited calcination fouling layer. Thus, a cleaning step was arranged, using conventional citric acid to clean the device. After this step, the experiment could be continued and the device was regenerated completely.

Some more experiments are still running. More results about fouling in microstructure devices, prevention of fouling and possible cleaning methods are expected in near future.

CONCLUSION

Fouling and blocking in microstructure devices is definitely a point to keep in mind. The microstructures may be in the same size range as blocking particles are. Generation of fouling films inside of microstructure systems may lead not only to less performance with respect to heat transfer but also to complete blocking and, thus, the possibility of a non-working device as can happen in conventionally sized heat exchangers.

Unlike those, most microstructure devices can not be disassembled and cleaned as single parts. Thus, on-stream cleaning procedures have to be developed.

There are certain countermeasures for conventional devices dealing with fouling and blocking, such as filters, protective layers, etc. Some of those may also be useful for microstructure devices, some are not applicable. Due to the huge variety of different sizes, types, manufacturing methods and applications of microstructure

systems, there are lots of different more or less important points to deal with when talking about long term stability.

Like with the corrosion resistance, it has to be taken in account that the restraints and limitations are different from those existing for conventional sized devices, and, thus, new regulatories have to be generated. Moreover, special designs have to be developed and applied to prevent fouling inside microstructure devices.

OUTLOOK

For fouling and blocking in microstructure devices as well as for their long term stability, new design concepts and manufacturing methods as well as integrated countermeasures could lead to a significant better acknowledgement of this technology in the industry. In many cases, not only a lack of experimental data but also the fear to run into difficulties generated by fouling in microstructures often prevents the use of these high-performance devices. Overcoming this restraints will be one of the most important tasks in the development of microstructure devices for the next few years.

NOMENCLATURE

Latin symbols

A	effective heat transfer area	m^2
C	microchannel circumference	m
F	microchannel face area	m^2
Nu	Nusselt number	
Pr	Prandtl number	
$\dot{Q}$	thermal power	W
Re	Reynolds number	
T	temperature	$K, ^\circ C$
c_{mean}	mean specific heat capacity	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
c_p	specific heat capacity	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
d_h	hydraulic diameter	$m, \mu m$
$k_{overall}$	heat transfer coeff.	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
l	microchannel length	m
$\dot{m}$	mass flow	$kg \cdot h^{-1}$
n_{Ch}	number of microchannels per foil	
n_f	number of microstructured foils per passage	
s	path length, foil thickness	m

Greek symbols

α	heat transfer coefficient	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
λ	thermal conductivity	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
ϵ	heat transfer efficiency	$\%$
$\Delta \vartheta_m$	mean logarithmic temperature difference	K

ξ form factor

Subscripts

<i>cold</i>	cold water passage
<i>fluid</i>	specified fluid
<i>hot</i>	hot water passage

<i>in</i>	inlet position
<i>lam</i>	laminar
<i>out</i>	outlet position
<i>solid</i>	solid material
<i>turb</i>	turbulent

REFERENCES

Brandner, J.J., Microfabrication in Metals and Polymers, in: *Advanced Micro- and Nanosystems Vol.5*, eds. Korvink et al., Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2006, pp. 267-320.

Brandner, J.J., Anurjew, E., Bohn, L., Hansjosten, E., Henning, T., Schygulla, U., Wenka, A., Schubert, K., 2006, Concepts and Realization of microstructure heat exchangers for enhanced heat transfer, *Experimental Thermal and Fluid Science* 30, 801-809 (2006).

Brandner, J.J., 2008, Micro Process Engineering: Aspects of Miniaturization for a new Technology, *Habilitation Thesis*, Technical University of Dresden, Germany.

Halbritter, A., Schygulla, U., Wenka, A. and Schubert, K., 2004, Comparison of Numerical Simulation and Experimental Results for Crossflow and Counterflow Microchannel Heat Exchangers, *Proc., 2nd Int. Conf. On Microchannels and Minichannels*, S.G. Kandlikar et al., eds., ASME, New York, N.Y. 10016, USA, pp.967-975, 2004.

Henning, T., Brandner, J.J., Schubert, K., 2004, Characterisation of electrically powered micro heat exchangers, *Chem. Eng. J.* 101/1-3, 339-345 (2004).

Hessel, V., Hardt, S., Löwe, H., 2005, Chemical Micro Process Engineering 1+2, Fundamentals, Modelling and Reactions / Processes and Plants, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2005.

Kraut, M., Bohn, L., Wenka, A., Schubert, K., Successful Upscale of laboratory micro reactor into industrial scale, 2006, *Proc. 6th ANQUE Int. Congress of Chemistry "Chemistry and Sustainable development"* 2006, Gráficas DEVA, Spain, T2-L-9, 315-316.

Madou, M., 2002, *Fundamentals of Microfabrication*, 2nd ed, CRC Press LLC, Boca Raton, FL, USA, 2002.

Rinke, G., Kerschbaum, S., Wenka, A., Holpe, H., Micro process engineering for industrial production of biodiesel, 2006, *Proc. 9th Int. Conf. on Micro Reaction Eng. (IMRET 9) 2006*, 257-258.

Schaller, Th., Bohn, L., Mayer, J., Schubert, K., 1999, Microstructure grooves with a width of less than 50µm cut with ground hard metal micro end mills, *Precision Eng.* 23, 1999, 229-235

Schubert, K., Brandner, J.J., Fichtner, M., Linder, G., Schygulla, U., Wenka, A., 2001, Microstructure devices for applications in thermal and chemical process engineering, *Microscale Thermophysical Engineering*, 5, 2001, 17-39.

VDI Wärmeatlas, 7.ed., VDI-Verlag, Düsseldorf, Germany, 1994.

Wagner, W., 1999, Wärmeaustauscher, 2nd ed., Vogel-Verlag, Würzburg, Germany, 1999.

Wenka, A., Fichtner, M. and Schubert, K., 2000, Investigations of the Thermal Properties of a Micro Heat Exchanger by 3D Fluid Dynamics Simulation, *Proc., 4th Int. Conf. on Microreaction Technology*, I. Rinard et al., eds., AIChE, 2000, 256-263.

Wiendahl, C., Brandner, J.J., Küppers, C., Luo, B., Schygulla, U., Noll, T., Oldiges, M., 2007, A Microstructure Heat Exchanger for Quenching the Metabolism of Mammalian Cells, *Chem. Eng. Technol.* 2007, 30, No. 3, 1-8.

© Е. Анурьев, Э. Хансёстен, У. Шугулла, Ю. Бранднер, 2009

УДК 535.3.

Г.Н. Попов, А.А. Топорков

ФГУП «ЦКБ "Точприбор"», Новосибирск

И.С. Бутримов

СФ ГУ НПО «СТиС» МВД России, Новосибирск

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ДАЛЬНОМЕР С ФУНКЦИЯМИ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЯ ЛДМ-2В

G.N. Popov, A.A. Toporkov

Federal State Unitary Enterprise "Central Design Bureau" "Tochpribor", Novosibirsk

I.S. Butrimov

Siberian Division of the State Institution, Scientific Production Association "Special Equipment and Connection", Ministry of Internal Affairs, Russia, Novosibirsk

SMALL-SIZED LASER RANGEFINDER WITH FUNCTIONS OF BALLISTIC CALCULATOR LDM-2V

The description and technical characteristics of small-sized laser rangefinder with functions of ballistic calculator are displayed in this report.

Малогабаритный лазерный дальномер с функциями баллистического вычислителя ЛДМ-2В в настоящее время готов заменить изготавливаемый серийно и поставляемый в ряд стран мира малогабаритный лазерный дальномер ЛДМ-2. Вновь созданный дальномер является итогом глубокой модернизации конструкции и программного обеспечения существующей модели. ЛДМ-2В предназначен для измерения дальности и расчета поправок дальности для стрелкового оружия. Дальномер разработан ФГУП «ЦКБ "Точприбор"», и защищен патентом Российской Федерации на полезную модель № 77452.

Дальномер обеспечивает выполнение следующих функций:

измерение дальности до цели;

измерение температуры и атмосферного давления;

вычисление поправки дальности до цели с учетом данных о типе оружия, температуре окружающей среды и атмосферного давления (возможно вычисление поправок на основании введенных вручную исходных данных).

Дальномер эксплуатируется при температуре окружающей среды от минус 10 до плюс 50 °С и относительной влажности не более 98 % при температуре 25 °С. Внешний вид дальномера представлен на рисунке.

Принцип работы дальномера состоит в определении времени прохождения лазерного излучения от дальномера до объекта (цели) и обратно.

Дистанция до цели определяется по следующей формуле:

$$L = (c \cdot t) / (2n),$$

где c – скорость распространения лазерного излучения (скорость света) в вакууме ($c = 3 \times 10^8$ м/с);

n – показатель преломления среды, в которой распространяется лазерное излучение;

t – время прохождения удвоенного расстояния L .



Рис. Внешний вид дальномера ЛДМ-2В

Основным элементом конструкции дальномера является корпус, внутри которого размещены:

- Оптический блок, представляющий собой телескопическую систему, позволяющую наблюдать объект (цель);

- Плата с устройством управления, которое задает режимы работы электронных узлов дальномера, осуществляет ввод данных, вычисление и измерение дальности до объекта (цели) и отображение результатов на цифровом индикаторе;

- Излучатель, предназначенный для формирования импульса лазерного излучения, облучающего объект (цель);

- Фотоприемное устройство, предназначенное для приема отраженного от объекта (цели) импульса;

- Пятиразрядный цифровой индикатор и оптическая система, проецирующая изображение индикатора в поле зрения;

- Датчики измерения температуры и атмосферного давления.

Технические характеристики дальномера приведены в таблице:

Таблица. Технические характеристики дальномера ЛДМ-2В

Наименование параметра	Значение
Видимое увеличение, крат	6,0
Угловое поле зрения, ...°	6,5
Диаметр выходного зрачка, мм	4
Диапазон подвижки окуляра, дптр	±3
Диапазон измерения дальности, м	от 60 до 4 000
Абсолютная погрешность измерения дальности, м	5
Средний темп работы дальномера с возможностью повторного измерения через 3 с, изм/мин, не менее	6
Габаритные размеры дальномера, мм	174 x 131 x 60
Масса дальномера, кг	1,4
Источник питания	Четыре элемента типа АА (А-316)
Число измерений без замены элементов питания	200

С дальномером ЛДМ-2В были проведены оценочные проверки, в ходе которых подтверждены основные показатели его назначения.

© Г.Н. Попов, А.А. Топорков, И.С. Бутримов, 2009

УДК 623.4.

И.С. Бутримов, А.В. Журавлев

СФ ГУ НПО «СТиС» МВД России, Новосибирск

Г.Н. Попов, А.А. Топорков

ФГУП «ЦКБ "Точприбор"», Новосибирск

А.В. Голицын

НФ ИФП СО РАН «КТИПМ», Новосибирск

НОВЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРИЦЕЛОВ ДЛЯ СНАЙПЕРСКИХ ВИНТОВОК И РЕЗУЛЬТАТЫ ИХ ПОЛИГОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

I.S. Butrimov, A.V. Zhuravlyov

Siberian Division of the State Institution, Scientific Production Association “Special Equipment and Connection”, Ministry of Internal Affairs, Russia, Novosibirsk

G.N. Popov, A.A. Toporkov

Federal State Unitary Enterprise “Central Design Bureau” “Tochpribor”, Novosibirsk

A.V. Golitsyn

Novosibirsk Department of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Division of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

THE NEW RUSSIAN AUTOMATIZED SIGHTS FOR SNIPER RIFLES AND FIRING GROUND TEST RESULTS

This report describes two automatized sights, which are designed on the base of different principles. Also, it contains the information about the real-life environment tests and the shooting range tests.

Специфика боевой работы снайпера обоснованно предъявляет повышенные требования по точности стрельбы, что связано с необходимостью нейтрализации противника с первого выстрела. Успех выполнения основной задачи снайпера во многом определяется не только тактико-техническими характеристиками стрелкового оружия, но и типом и техническими характеристиками используемого прицельного устройства. К настоящему времени сформировалось два основных типа прицелов для снайперского оружия: автоматизированные прицелы, содержащие в своем составе, как правило, лазерный дальномер, баллистический вычислитель, устройство автоматического ввода углов прицеливания, датчики температуры, атмосферного давления и др. и неавтоматизированные прицелы, в которых указанные элементы отсутствуют, а установка углов прицеливания осуществляется вручную.

К основным достоинствам автоматизированных прицелов можно отнести следующее:

- Оперативное и достаточно точное для снайперской стрельбы определение расстояний до целей, обеспечиваемое встроенным лазерным дальномером;
- Вычисление значений углов прицеливания и боковых поправок в соответствии с данными Основной таблицы стрельбы посредством электронного баллистического вычислителя, входящего в состав прицела;
- Учет поправок на изменение метеорологических и баллистических условий стрельбы в точном соответствии с данными Таблиц стрельбы, используя встроенные в прицел датчики температуры, атмосферного давления, угла места цели, угла наклона оружия в горизонтальной плоскости (сваливания оружия).

В последние годы отечественными разработчиками представлены для практической оценки автоматизированные прицелы «Рысь-ЛД» и «Нагель».

Рассмотрим основные особенности данных прицелов и результаты их полигонных испытаний.

Автоматизированный прицел-дальномер «Нагель» предназначен для наблюдения за местностью и прицеливания при стрельбе из специальных снайперских винтовок ВСК-94, ВСС. Прицел «Нагель» разработан Новосибирским филиалом Института физики полупроводников СО РАН «КТИПМ». Внешний вид прицела представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Внешний вид прицела «Нагель»

В основе прицела лежит высокочувствительная телевизионная камера на матрице SONY ICX 259, позволяющая вести наблюдение и прицеливание, как в дневное время суток, так и при пониженной освещенности (до $\sim 10^{-2}$ лк). Видимое увеличение визирного канала прицела составляет 5 крат. Для

измерения дальности в прицеле используется лазерный дальномер полупроводникового типа фирмы «Bushnell», интегрированный в конструкцию прицела практически без существенных изменений его конструкции. Ввод углов прицеливания осуществляется автоматически по измеренной дальности или вручную, при помощи соответствующих кнопок. Установка углов прицеливания производится путем электронного смещения прицельного знака, отображаемого на OLED-дисплее в поле зрения прицела.

В центральной части поля зрения расположен визирный знак дальномера в виде перекрестия, а ниже – прицельный знак в виде угольника и вертикальной и двух горизонтальных линий. В нижней части поля зрения размещены информационная строка для отображения служебной информации и индикатор заряженности аккумуляторов. В прицеле присутствует датчик температуры и датчик контроля сваливания оружия.

Автоматизированный прицел-дальномер «Рысь-ЛД» предназначен для наблюдения за местностью и прицеливания при стрельбе из специальных снайперских винтовок ВСК-94, ВСС в дневных и сумеречных условиях. Прицел-дальномер «Рысь-ЛД» разработан ФГУП «ЦКБ «Точприбор», г. Новосибирск.

Внешний вид прицела представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Внешний вид прицела «Рысь-ЛД»

В основе прицела лежит оптическая система телескопического типа с постоянным увеличением 4 крат. Определение дальности до целей осуществляется при помощи полупроводникового лазерного дальномера, интегрированного в конструкцию прицела. Ввод углов прицеливания производится автоматически по измеренной дальности или вручную. Установка углов прицеливания реализована при помощи шагового электродвигателя, перемещающего оправу с сеткой в вертикальном направлении. В прицеле отсутствует механизм ввода боковых поправок. Учет боковых поправок

осуществляется «выносом» точки прицеливания, используя соответствующую шкалу в поле зрения прицела. В прицеле «Рысь-ЛД» из всех возможных датчиков имеется только датчик температуры.

С обоими прицелами были проведены полигонные испытания, в ходе которых ставилась задача определить сравнительные значения показателей точности, кучности и эффективности стрельбы, а также механическую прочность и устойчивость конструкции прицелов к воздействию ударов реального выстрела. В качестве образца сравнения был использован штатный оптический прицел ПСО-1М2-1, используемый совместно с самостоятельным малогабаритным дальномером полупроводникового типа фирмы Nikon.

По результатам испытаний были сделаны следующие выводы:

1. Показатели кучности стрельбы с автоматизированными прицелами: «Нагель» и «Рысь-ЛД» не уступают данным, полученным для образца сравнения, что свидетельствует о приемлемой точности визирования, используя прицелы и о стабильности положения линии визирования в ходе стрельбы.

2. Автоматизированные прицелы, обеспечивают эффективное поражение типовых целей, расположенных на произвольных («некруглых» значениях) дальностях. При этом время, требуемое на подготовку исходных данных для выстрела, более чем в два раза меньше, чем для образца сравнения, используемого совместно с самостоятельным лазерным дальномером.

3. Точность вычисления и установки углов прицеливания, а также поправок на метеоусловия для большинства значений дальности соответствует данным Таблицы стрельбы.

4. Прицел «Рысь-ЛД» обладает, в целом, высокими оптическими характеристиками, в частности достаточно высоким качеством изображения пространства предметов и прицельного знака, что способствует повышению точности визирования и стрельбы. В то же время оптическая система прицела «Рысь-ЛД» обладает относительно невысоким значением светопропускания, что может ухудшать способность стрелка к обнаружению замаскированных целей и точность визирования в условиях с низким уровнем освещенности.

5. Прицел «Нагель», в основе которого лежит высокочувствительная телевизионная камера, обеспечивает поиск и распознавание типовых целей не только в дневных условиях, но и в сумерки и ночью (до $\sim 10^{-2}$ лк). В прицеле «Нагель», в силу способа формирования изображения цели и прицельного знака, принципиально отсутствует параллакс, что также способствует повышению точности визирования и стрельбы.

6. В дневных условиях и в сумерках прицел «Рысь-ЛД» обеспечивает уверенное определение расстояний до типовых целей во всем диапазоне ввода углов прицеливания. При работе в направлении ярких источников света возникает некоторое снижение диапазона измеряемых расстояний. Прицел «Нагель» в тех же условиях обеспечивает определение дальности до типовых целей лишь до ~ 100 м, что, очевидно, вызвано неоптимальными характеристиками используемой модели встроенного дальномера.

7. Помехозащищенность телевизионного прицела «Нагель» от воздействия пламени собственного выстрела в целом удовлетворительная, однако в ночных условиях попадание в поле зрения прицела ярких источников света приводит к кратковременной засветке изображения.

Таким образом, результаты полигонных испытаний показали, что по совокупности тактико-технических возможностей автоматизированные прицелы «Нагель» и «Рысь-ЛД» в целом обладают преимуществом перед известными неавтоматизированными прицелами по точности и оперативности определения расстояний до целей, по точности вычисления и ввода углов прицеливания с учетом поправок на метеорологические и баллистические условия стрельбы.

© И.С. Бутримов, А.В. Журавлев, Г.Н. Попов,
А.А. Топорков, А.В. Голицын, 2009

УДК 623.4.

И.С. Бутримов, А.В. Журавлев, Д.В. Алантьев

СФ ГУ НПО «СТиС» МВД России, НФ ИФП СО РАН «КТИПМ», Новосибирск

ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ ДВУХСПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЗОРНО-ПРИЦЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ПОЛИГОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

I.S. Butrimov, A.V. Zhuravlyov, D.V. Alantsev

Siberian Division of the State Institution, Scientific Production Association "Special Equipment and Connection", Ministry of Internal Affairs, Russia; Novosibirsk Department of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Division of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

THE EXPERIMENTAL SAMPLE OF TWO-SPECTRAL BAND SIGHT SYSTEM AND ITS FIRING GROUND TEST RESULTS

This report contains the description and the results of comparative real-life environment tests and the shooting range tests of two-spectral band sight system with the use of the divided channels.

Опытный образец двухспектральной обзорно-прицельной системы с разнесенными модулями прицеливания и визирования «Веко-2» (далее – прицел) предназначен для наблюдения за полем боя и ведения прицельной стрельбы из автоматического стрелкового оружия типа АК-74Н в дневных условиях, в сумерках и ночью, используя естественную освещенность, а также в условиях тумана, дождя, задымленности и т. п. по тепловому излучению наблюдаемых объектов. Прицел разработан Новосибирским филиалом Института физики полупроводников СО РАН «КТИПМ».

Главной отличительной особенностью прицела является разделение его на две части: модуль прицеливания, устанавливаемый на посадочном месте оружия, и модуль визирования, закрепляемый на шлем-маске стрелка. Такое конструктивное исполнение прицела придает ему свойство переменной перископичности и способствует более независимой прикладке оружия при стрельбе из неустойчивых положений, позволяет осуществлять стрельбу и разведку местности из укрытий.

Модуль прицеливания (рис. 1) функционально состоит из двух каналов: низкоуровневой телевизионной системы с ЭОП и тепловизионной системы. В прицеле использован комбинированный зеркально-линзовый объектив. Краевая кольцевая зона объектива используется для формирования изображения для телевизионного канала, а центральная зона – для тепловизионного канала. Яркость изображения, сформированного объективом телевизионного канала, усиливается ЭОП и при помощи линзовой проекционной системы переносится с экрана ЭОП в плоскость светочувствительного слоя ПЗС-матрицы. Далее

оптическое изображение, преобразуется в цифровой видеосигнал, что предоставляет техническую возможность для формирования «электронного» прицельного знака и другой служебной информации путем «подмешивания» к основному сигналу дополнительных импульсов. Изображение цели и прицельного знака в «электронном» виде поступает на вход системы визуализации.

В тепловизионном канале изображение цели и пространства предметов при помощи объектива формируется в плоскости термочувствительного слоя микроболометрической матрицы (размерность 160 x 120 элементов) и далее, также как и в телевизионном канале, преобразуется в последовательность электрических импульсов, поступающих на вход системы визуализации изображения. Преобразование промежуточного оптического и теплового изображений в электронное позволяет не только обеспечить формирование изображения прицельного знака, но и производить электронную обработку наблюдаемого изображения, изменяя его масштаб, яркость, контраст, что и реализовано в прицеле «Веко-2». Выверка и ввод углов прицеливания осуществляются смещением прицельного знака «электронным» способом, т.е. без механического перемещения каких-либо элементов прицела, что способствует повышению стабильности положения линии прицеливания при ударных нагрузках, возникающих при стрельбе.



Рис. 1. Внешний вид двухспектральной обзорно-прицельной системы с разнесенными модулями прицеливания (слева) и визирования (справа)

Модуль визирования в прицеле реализован с использованием дисплея на основе органических светодиодов (OLED), что позволяет обеспечить высокое и равномерное качество изображения по всему полю зрения. Модуль визирования в рабочем положении закреплен на шлем-маске стрелка (рис. 1).

В качестве источника питания в прицеле используется аккумуляторная батарея напряжением 12 В. Связь модуля прицеливания и визирования осуществляется при помощи гибкого электрического кабеля.

Прицел имеет следующие режимы работы:

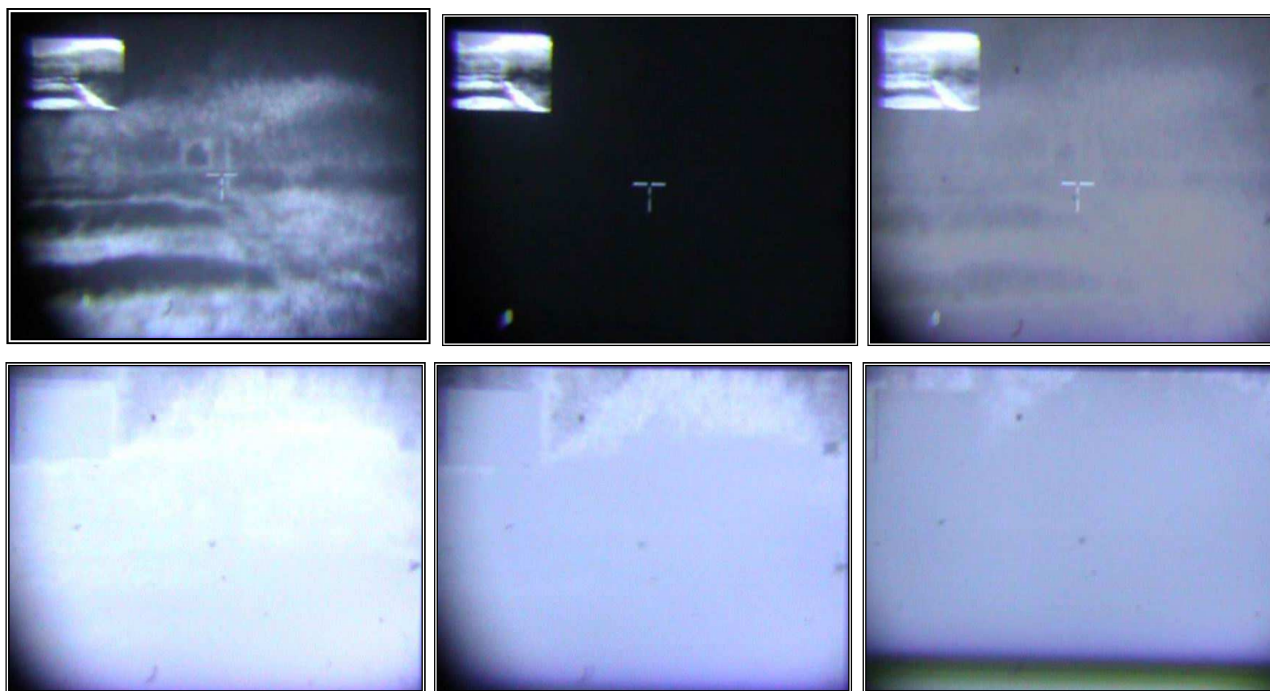
«0» – «совмещенный», включен телевизионный и тепловизионный каналы, при этом тепловизионное изображение располагается в левом верхнем углу экрана в уменьшенном масштабе и накладывается на телевизионное изображение, представляемое с видимым увеличением $2,5\times$;

«1» – «тепловизионный», включен только тепловизионный канал с видимым увеличением $3,5\times$;

«2» – «увеличенный телевизионный», включен только телевизионный канал с видимым увеличением $5\times$.

С прицелом «Веко-2» были проведены полигонные испытания, в ходе которых ставилась задача определить сравнительные значения показателей кучности и эффективности стрельбы, дальность распознавания, помехоустойчивость, а также механическую прочность конструкции прицела к воздействию ударов реального выстрела. В качестве образца сравнения использовался прицел ночного видения 1ПН93-2.

Проверка по определению помехозащищенности проводилась при освещенности $3\cdot 10^{-3}$ лк, температуре воздуха $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ и заключалась в осуществлении засветок прицела пламенем собственного выстрела. В качестве цели использовалась грудная мишень с двумя тепловыми метками. На рис. 2, 3 приведена последовательность видеок кадров при съемке процесса выстрела из АК-74Н.



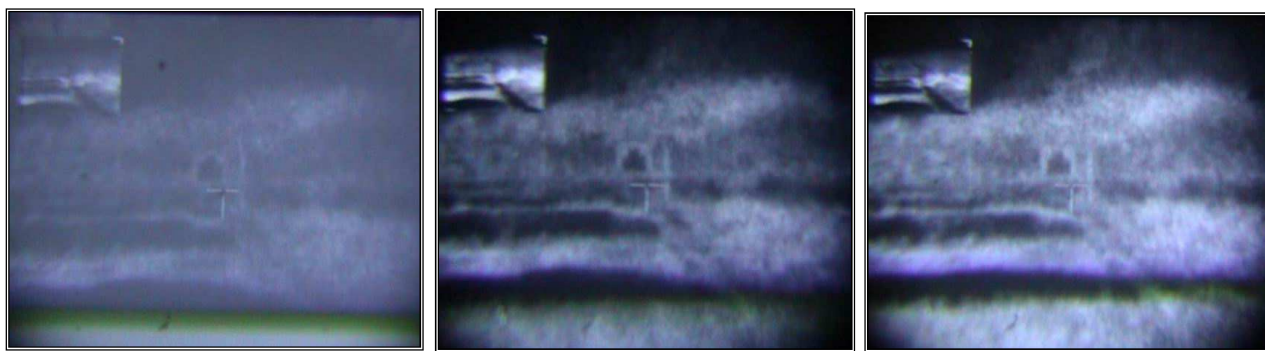


Рис. 2. Кадры видеозаписи процесса выстрела из АК-74Н при включенном в прицеле телевизионном режиме «0»

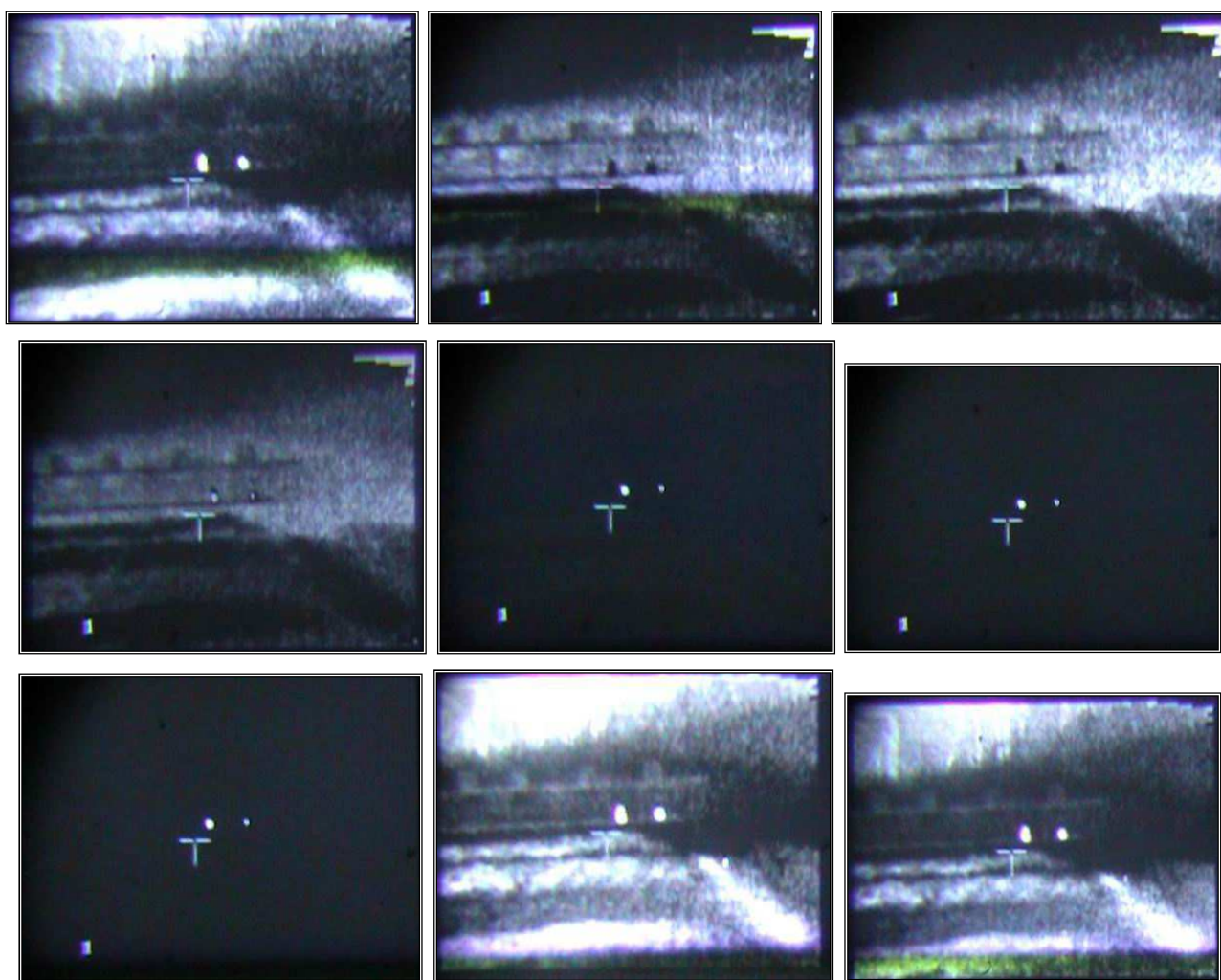


Рис. 3. Кадры видеозаписи процесса выстрела из АК-74Н при включенном в прицеле тепловизионном режиме «1»

По результатам полигонных испытаний были сделаны следующие выводы:

1. Характеристики кучности и эффективности стрельбы из АК-74Н с прицелом «Веко-2» в целом не уступают аналогичным характеристикам при стрельбе с соответствующим образцом сравнения, а в условиях низкой прозрачности атмосферы (туман, дождь, задымленность и т.п.) прицел,

включенный в тепловизионном режиме, обладает существенными тактическими преимуществами перед ПНВ пассивного типа.

2. Значения дальности распознавания прицела в условиях нормальной прозрачности атмосферы при работе с телевизионным каналом меньше на 25–100 м, а с тепловизионным каналом превышают на 50–150 м значения, полученные при работе с образцом сравнения.

3. Разделение каналов прицеливания и визирования обеспечивает возможность стрельбы из неустойчивых положений, в том числе стрельбу и разведку местности из-за укрытий.

4. Использование модуля визирования на основе «OLED–дисплея» отвечает и соответствует современному техническому уровню, однако при дальнейшем конструировании требуется решить вопросы, связанные с «защитой» выходного изображения от влияния паразитных засветок.

5. Помехозащищенность прицела от пламени собственного выстрела и осветительных патронов в целом удовлетворительна. При воздействии пламени собственного выстрела в прицеле, включенном в телевизионном режиме, в ночных условиях зафиксировано кратковременное ($\sim 0,25$ с) «сворачивание» изображения с последующим его восстановлением. При стрельбе с прицелом, включенным в тепловизионном режиме, отмечалось инвертирование тона изображения цели длительностью $\sim 0,1$ с, а также затенение пространства предметов сопровождаемое «замораживанием» изображения длительностью $\sim 0,15$ с.

Вместе с тем, в ходе испытаний при совместном использовании прицела с автоматом АК-74Н отмечены значительный вес модуля прицеливания (3 кг) и затрудненное ориентирование стрелка при его движении (вследствие разделения каналов), что в ряде ситуаций может снижать маневренность стрелка и оперативность его действий. При использовании прицела совместно с пулеметом ПКМН недостатки, связанные со значительными массогабаритными параметрами прицела и разделением каналов, менее существенны и поэтому прицел «Веко-2» при данном конструктивном исполнении целесообразно использовать совместно со стрелковым оружием, имеющим в своей конструкции устойчивое основание: сошки, станок.

Таким образом, опытный образец двухспектральной обзорно-прицельной системы с разнесенными модулями прицеливания и визирования «Веко-2» выдержал предварительные стрельбовые и натурные испытания в составе автомата АК-74Н, в ходе которых, в большинстве условий подтвердил свое преимущество по отношению к образцу сравнения.

© И.С. Бутримов, А.В. Журавлев, Д.В. Алантьев, 2009

УДК 535.317

И.В. Марчишин

ИФП СО РАН, Новосибирск

П.А. Алдохин, Г.И. Косолапов, С.М. Чурилов, К.П. Шатунов

НФ ИФП СО РАН «КТИПМ», Новосибирск

О ВОЗМОЖНОСТИ РАБОТЫ МАТРИЧНОГО CDXHG1-XTE ПРИЕМНИКА В РЕЖИМЕ МНОГОИМПУЛЬСНОГО НАКОПЛЕНИЯ СИГНАЛА, СИНХРОНИЗОВАННОГО С ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

I.V. Marchishin

Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISP SB RAS), 13, Prosp., Akademika Lavrentieva, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

P.A. Aldokhin, G.I. Kosolapov, S.M. Churilov, K.P. Shatunov

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, "Technological Design Institute of Applied Microelectronics" (NB ISP SB RAS "TDI AM") 8, Nikolaev Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

ON THE OPERATION OF CDXHG1-XTE FOCAL PLANE ARRAYS FOTODETECTOR IN THE MULTY-PULSE ACCUMULATION MODE SIGNAL, SYNCHRONIZED WITH LASER PULSE TRAIN

Opportunities and features operations $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ focal plane arrays fotodetector provided single-pulse and multy-pulse acquisition interval signal, jointly with source of laser emission on CO_2 are considered.

Тепловизоры (ТПВ) находят широкое применение в различных областях науки и техники. Одной из актуальных задач является расширение возможностей ТПВ, а именно разработка и создание ТПВ, работающих в активно-импульсном режиме. Данный режим работы позволяет реализовать ряд известных преимуществ по сравнению с пассивным режимом работы ТПВ, что очень важно для изделий как специального, так и гражданского назначения [1].

В данной работе рассмотрим возможность работы охлаждаемого матричного фотоприемного устройства (ФПУ) на основе КРТ в режиме многоимпульсного времени накопления $T_{\text{нак}}$.

Предварительно исследования были проведены с помощью макета ТПВ на основе охлаждаемого матричного ФПУ фирмы «Sofradir», работающего в одноимпульсном режиме накопления при возможности изменения времени накопления $T_{\text{нак}}$ в диапазоне от 0,1 до 200 мкс при частоте кадров 50 Гц. В результате проведенных экспериментов были получены следующие результаты:

– Изменение времени накопления в диапазоне $T_{\text{нак}}$ от 1 до 200 мкс приводило к увеличению амплитуды сигналов с ФПУ и позволяло регистрировать в лабораторных условиях объекты с различной температурой;

– В режиме, когда длительность времени накопления $T_{\text{нак}} \leq 0,1$ мкс, отсутствует амплитуда видеосигнала на выходе ТПВ (регистрация видеосигнала велась с помощью телевизионного осциллографа GOS – 6200) причем, тестовый тепловой источник излучал в спектральном диапазоне от 8 до 11 мкм с мощностью не менее 2×10^3 Вт/м² и помещался в непосредственной близости входной оптической системы ТПВ (примерное расстояние 1–1,5 м);

– Мощный источник теплового излучения позволил макету ТПВ работать при временах накопления $T_{\text{нак}}$ лежащих в диапазоне от 9 до 0,1 мкс, но для естественного фонового излучения необходимо выбрать время накопления $T_{\text{нак}} > 1$ мкс.

Результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Длительность, мкс	9	5	2	1	0,5	0,2	0,1
Амплитуда видео сигнала, В	0,7	0,6	0,5	0,4	0,2	0,08	0,07

Из результатов измерений приведенных в таблице 1 можно заключить, что в диапазоне длительности времени накопления $T_{\text{нак}}$ от 9 до 1 мкс происходит изменение амплитуды видеосигнала, при значении $T_{\text{нак}} \leq 1$ мкс, резкое уменьшение амплитуды, а при длительности времени накопления $T_{\text{нак}} \leq 0,1$ мкс полностью отсутствует возможность регистрации мощных тепловых потоков излучения.

Поскольку в работе макета ТПВ предусмотрена автоматическая регулировка усиления сигнала (АРУ), отключить которую было невозможно, работа АРУ не позволила на данном этапе определить зависимость выходного сигнала от времени накопления ТПВ.

Следующим этапом эксперимента являлась оценка визуального качества изображения тестового объекта, который наблюдался на экране телевизионного монитора при изменении временного положения импульса $T_{\text{нак}}$, равного 200 мкс в диапазоне длительности $T_{\text{кадр}}$ от 0 до 15 мс. Установлено, что изображение тест объекта не изменяется при смещении во времени положения импульса накопления $T_{\text{нак}}$ в диапазоне от 0 до 15 мс.

Полученные результаты экспериментов дают основание полагать, что матричный ФПУ на основе КРТ может работать в режиме многоимпульсного накопления.

В настоящее время считаем актуальным рассмотрение возможности работы в режиме многоимпульсного накопления отечественного ТПВ на основе охлаждаемого матричного ФПУ размерностью 320×256 элементов, работающего в спектральном диапазоне от 8 до 11 мкм, разработанного в ИФП СО РАН. Основными электрическими параметрами работы ФПУ (не вдаваясь в

сущность формирования управляющих сигналов) являются: частота следования кадров видеосигнала 50 Гц (период $T_{\text{кадр полн}} = 20$ мс), суммарное время накопления $\Sigma T_{\text{нак}}$ в течение которого происходит регистрация инфракрасного излучения (ИК) лежит в пределах от 140 до 300 мкс. Указанная величина $\Sigma T_{\text{нак}}$, существенно меньше периода кадра (приблизительно на два порядка), поэтому работа матричного ФПУ осуществляется в импульсном режиме.

В настоящее время известны источники лазерного излучения на CO_2 с длиной волны 10,6 мкм, которые работают на частотах следования импульсов от 25 Гц до 10 кГц [3]. Известно также, что импульсная мощность лазеров на CO_2 с большой частотой повторения может составлять от десятков до сотен Вт, поэтому при рассмотрении возможности работы ТПВ с лазерной импульсной подсветкой необходимо реализовывать режим многоимпульсного накопления синхронного с лазером.

Сущность этого режима заключается в следующем. В течение времени кадра $T_{\text{кадр полн}} = 20$ мс существует временной интервал $T_{\text{кадр}}$, примерно равный 15 мс, в течение которого можно производить включение последовательности импульсов накопления. Например, при частоте следования 1 кГц получается 15 импульсов, а при частоте следования 10 кГц соответственно 150 импульсов. Время накопления $T_{\text{нак}}$ каждого импульса может меняться в пределах, например от 1 до 5 мкс, при этом суммарное время накопления $\Sigma T_{\text{нак}}$ не должно превышать паспортную величину на данное матричное ФПУ, например от 140 до 300 мкс т. е.

$$n \times T_{\text{нак}} \leq \Sigma T_{\text{НАК}};$$

где n – количество импульсов накопления;

$T_{\text{нак}}$ – время накопления мкс;

$\Sigma T_{\text{нак}}$ – суммарное время накопления, мкс.

Количество импульсов накопления n определяется по формуле:

$$n = \frac{T_{\text{кадр}}}{T_{\text{пер}}};$$

где $T_{\text{кадр}}$ – время, в течение которого можно производить включение последовательности импульсов накопления, мс;

$T_{\text{пер}}$ – период следования импульсов накопления, мс.

На рисунке 1 приведен график работы ТПВ при частоте повторения импульсов накопления 1 кГц режима многоимпульсного накопления.

В таблице 2 приведены величины $\Sigma T_{\text{нак}}$ и n для частот следования 1 кГц и 10 кГц, а так же для различных значений времени накопления $T_{\text{нак}}$.

Таблица 2

Длительность одиночного импульса накопления $T_{\text{нак}}$, мкс	Частота следования 1 кГц		Частота следования 10 кГц	
	Суммарное время накопления, $\Sigma T_{\text{нак}}$, мкс	Количество импульсов накопления, n	Суммарное время накопления, $\Sigma T_{\text{нак}}$, мкс	Количество импульсов накопления, n
1	15	15	150	150
2	30	15	300	150
5	75	15	300	60*

*Примечание: при длительности $T_{\text{нак}} = 5$ мкс в течении кадра возможно использование только 60 импульсов.

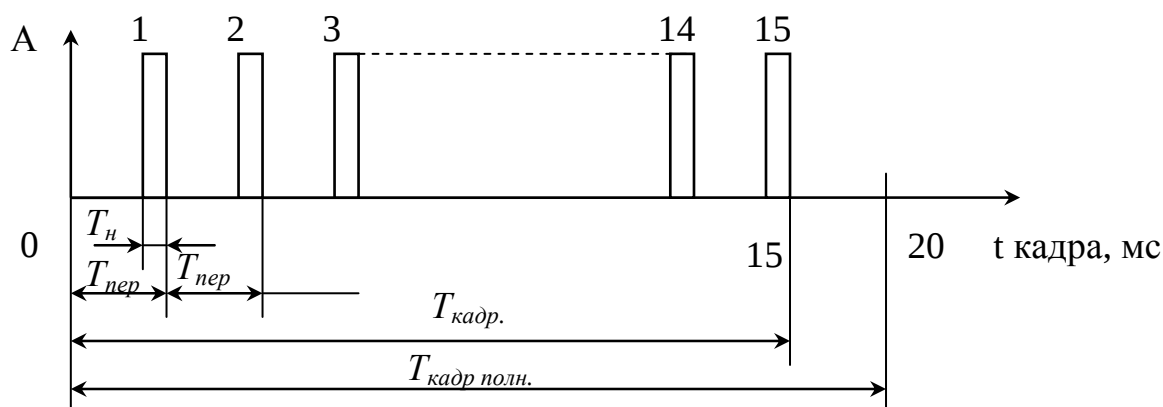


Рис. 1 Диаграмма работы ТПВ в режиме многоимпульсного накопления, частота 1 кГц, $T_{\text{нак}} = 1$ мкс или 5 мкс

Далее остановимся на особенностях работы ТПВ в режиме многоимпульсного накопления синхронного с лазерной подсветкой. Регистрация теплового поля естественных фоновых образований и искусственных объектов происходит по их тепловому излучению, например в спектральном диапазоне ИК излучения от 8 до 11 мкм. Поскольку регистрация теплового излучения, происходит в интервале времени накопления от 140 до 300 мкс то, в этом интервале будет проходить накопление сигнала от естественного фона с добавкой доли подсвета лазерного излучения. Для увеличения вклада лазерного подсвета в формируемое суммарное изображение предполагается использовать оптическую фильтрацию на центральную часть поля зрения матрицы, которая определяется угловым полем подсвета. Эта часть поля зрения освещается лазером, при этом остальная область матрицы работает в своем стандартном, спектральном режиме.

Пропускание оптического фильтра в области лазерного излучения должно иметь максимальное значение и значительное ослабление в области длин волн от 8 до 10 мкм. Ориентировочный вид спектральной характеристики фильтра представлен на рисунке 3.

По предварительным оценкам ослабление фильтром фонового излучения должно составлять приблизительно ≥ 10 раз. [4]. При этом формируется общее информационное поле, в центре которого размещается фрагмент изображения с лазерным подсветом. Однако, интенсивность фоновой составляющей не должна быть значительно ослабленной, для лучшей ориентации при наблюдении теплового изображения, формируемого ТПВ.

Полученное изображение, в режиме с подсветкой, будет отличаться от пассивного в его средней части (область поля подсвета лазером), которое характеризуется наличием увеличенного контраста в различных фрагментах изображения, искусственных объектов (например, автотранспорт, сооружения и т. д.), где имеются выпуклые или иные неровности, способные отразить в область поля зрения ТПВ лазерное излучение. Интенсивность теплового потока в плоскости фоточувствительных элементов ФПУ определяется энергетическими характеристиками источника и обратно пропорционально четвертой степени дальности до наблюдаемых объектов, т.е. при увеличении дальности до объекта в два раза потребуется увеличить мощность подсветки в 16 раз.[5]

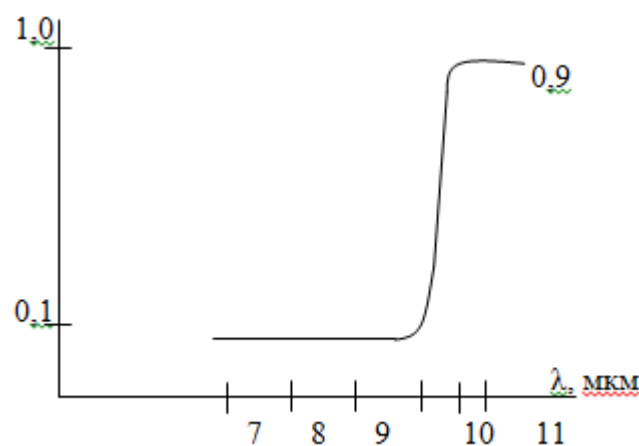


Рис. 3. Спектральная характеристика фильтра

Одновременно с подавлением спектра реализуется возможность импульсного стробирования, просмотра глубины пространства зоной, определяемой длительностью лазерного импульса и временем накопления. Ожидается, что предложенный многоимпульсный метод регистрации позволит улучшить видимость объектов в тумане, дымках, искусственных постановках защитных помех и других естественных природных явлениях, что дополнительно улучшает качество видения при использовании ТПВ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карельский В.Г. Анализ возможности применения лазерной подсветки с $\lambda \approx 4$ мкм в системах ИК- наблюдения и оптической локации // Прикладная физика. – 2001. – № 1. – С. 5–12.
2. Паспорт по эксплуатации на охлаждаемый приемник «Sofradir».
3. www.plasmalabs.ru

4. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. – М.: Советское радио, 1980. – 389 с.

5. Сухарь И.М. и д.р. Средства и системы оптико-электронного подавления. – Издание ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2008. – 147 с.

© П.А. Алдохин, Г.И. Косолапов, И.В. Марчишин, С.М.,
Чурилов, К.П. Шатунов, 2009

УДК 620.178.5

Г.А. Куриленко, М.Б. Устюгов

СГГА, Новосибирск

РАЗРАБОТКА ПНЕВМОДЕМПФЕРА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПРИБОРОВ ОТ ВИБРАЦИИ

G.A. Kurilenko, M.B. Ustyugov

SSGA, Novosibirsk

DEVELOPMENT OF PNEUMODAMPER FOR INSTRUMENTS VIBRATION PROTECTION

The techniques for adjusted computer-aided calculation of a damper are offered, which permit quick analysis and optimization of its different constructions.

Создание универсального и малогабаритного виброгасительного устройства для защиты приборов от вибрационных и ударных воздействий остается достаточно актуальной задачей. Нами разработан пневмодемпфер, удовлетворяющий упомянутым требованиям. Для оптимизации характеристик и минимизации его габаритов составлена программа компьютерного расчета.

Предполагается, что рассматриваемый демпфер устанавливается в системе виброзащиты прибора параллельно упругой подвеске и выполняет роль диссипативного элемента.

На рис.1 показана расчетная схема пневмодемпфера. Допустим, что шток с поршнем демпфера связаны с защищаемым прибором, а корпус – с фундаментом, и их относительное смещение происходит таким образом, что объем V_1 верхней полости уменьшается, а объем V_2 нижней полости увеличивается. Обе полости заполнены воздухом. В этом случае давление воздуха в верхней полости будет повышаться, а в нижней – уменьшаться: $P_1 > P_2$.

На шток действует сила сопротивления

$$F = P_1 \frac{\pi D^2}{4} - P_2 \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2). \quad (1)$$

Сила F при перемещении штока совершает соответствующую работу. В поршне выполнено отверстие диаметром d_1 , для перетекания воздуха из одной полости в другую, без которого демпфер работал бы как пружина без гашения колебаний. Наличие отверстия для перетекания воздуха создает гистерезисный эффект, т.е. в течение цикла работы T демпфера энергия, затраченная на торможение штока W_1 превышает возвращенную энергию W_2 (рис.2).

Условие виброизоляции защищаемого прибора имеет вид

$$W = W_1 - W_2 \geq W_0, \quad (2)$$

Здесь W – фактическая энергия, поглощенная демпфером за цикл колебаний; W_0 – энергия, которую необходимо рассеять в демпфере за цикл колебаний, чтобы амплитуда колебаний не превышала некоторой допускаемой величины.

Определим W_0 . Колебания прибора описываются уравнением вынужденных колебаний системы с одной степенью свободы [1]

$$m \ddot{y} + R(\dot{y}, \dot{y}) + c y = P_0 \cos(\omega t + \alpha), \quad (3)$$

где m – масса прибора, P_0 – амплитуда возмущающей нагрузки, $R(\dot{y}, \dot{y})$ – сила сопротивления движению, c – жесткость упругой подвески прибора. Остальные обозначения – общепринятые.

Амплитуда вынужденных колебаний A в резонансе (а условия резонанса нас и интересуют) определяется выражением [1]

$$A = \frac{2\pi A_0}{\psi}, \quad (4)$$

где $A = P_0/c$, $\psi = \frac{W_0}{U}$ – коэффициент поглощения энергии системы,

$U = \frac{A^2 C}{2}$ – максимальная потенциальная энергия упругой подвески прибора.

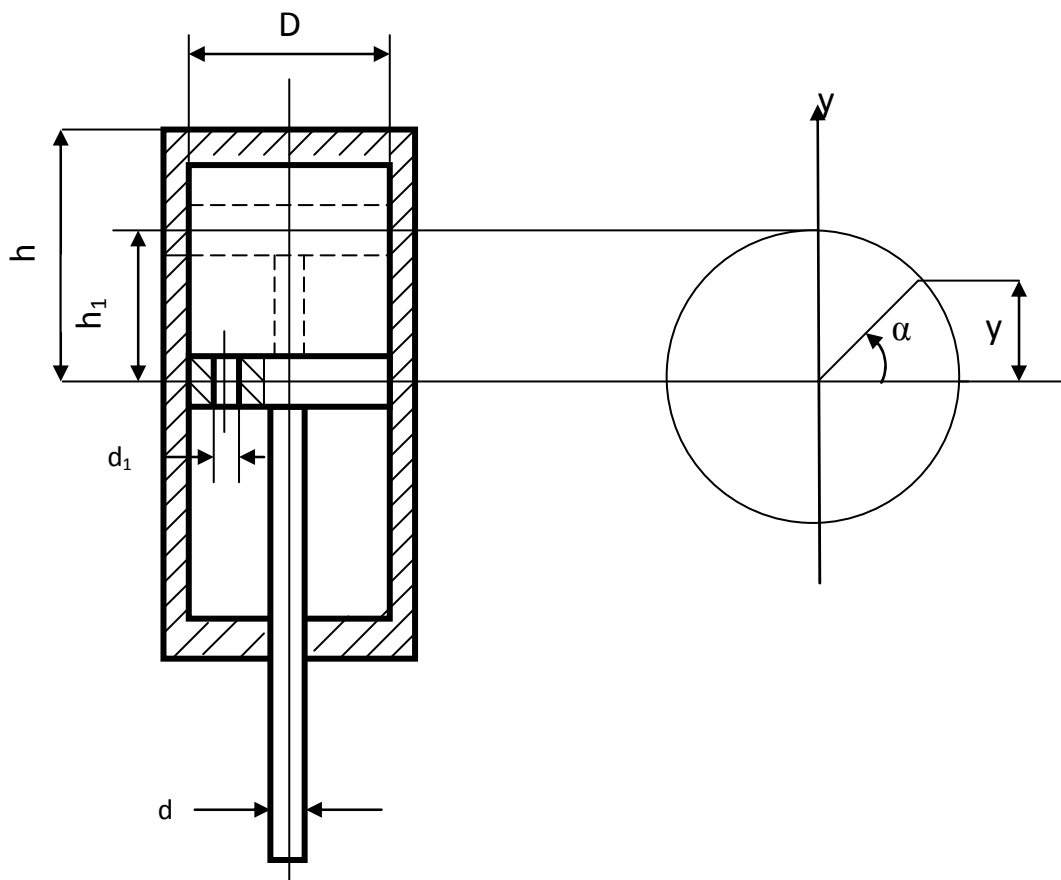


Рис.1. Схема демпфера

С учетом этих обозначений из (4) получаем

$$W_0 = \pi P_0 A. \quad (5)$$

Представим движение поршня пневмодемпфера относительно его корпуса при циклических колебаниях как вращение радиуса-вектора с угловой скоростью ω (рис.1). За начальное положение поршня принято его среднее положение ($\alpha = 0, y = 0$). Текущее положение поршня характеризуется координатой $y = h_1 \sin \alpha$, где h_1 – максимальное смещение поршня в одну сторону. При повороте радиуса-вектора из какого-то текущего положения на угол $d\alpha$ объем верхней полости уменьшается на величину $S h_1 \cos \alpha * d\alpha$, где $S = \frac{\pi D^2}{4}$, а нижней полости увеличивается на величину $S_1 h_1 \cos \alpha * d\alpha$, где $S_1 = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$. Первоначальное давление и объем P_1 и V_1 верхней полости связаны с новым давлением и объемом $P_1^\bullet$ и $V_1^\bullet$ (пока без учета перетекания воздуха) соотношением [2]

$$P_1 V_1^n = P_1^\bullet (V_1^\bullet)^n. \quad (6)$$

Здесь n – показатель политропы.

С учетом того, что $V_1^\bullet = V_1 - S h_1 \cos \alpha * d\alpha$, из (6) следует

$$P_1^\bullet = \frac{P_1}{\left(1 - \frac{S h_1 \cos \alpha d\alpha}{V_1}\right)^n}. \quad (7)$$

Записав соотношение (6) для новых $P_2^\bullet$ и $V_2^\bullet$ и первоначальных P_2 и V_2 давлений и объемов нижней полости и, учитывая, что $V_2^\bullet = V_2 + S_1 h_1 \cos \alpha d\alpha$, получаем

$$P_2^\bullet = \frac{P_2}{\left(1 + \frac{S_1 h_1 \cos \alpha d\alpha}{V_2}\right)^n}. \quad (8)$$

Время dt , в течение которого радиус-вектор повернется на угол $d\alpha$, определяется выражением

$$dt = \frac{d\alpha}{2\pi f}. \quad (9)$$

Здесь f – частота колебаний прибора.

За время dt из верхней полости в нижнюю перетечет количество воздуха [2]

$$Q = S_0 \sqrt{\frac{2ng}{n-1}} \gamma_1^\bullet P_1^\bullet \left[\left(\frac{P_2^\bullet}{P_1^\bullet} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{P_2^\bullet}{P_1^\bullet} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] dt. \quad (10)$$

Здесь $S_0 = \frac{\pi d_1^2}{4}$ (рис. 1), $\gamma_1^\bullet$ – удельный вес воздуха в верхней полости к концу времени dt , $g = 980 \text{ см/с}^2$, $n = 1,4$ (для воздуха).

Учитывая Q по (10), откорректируем давление $P_1^\bullet$ и $P_2^\bullet$ к началу следующего шага. До начала поворота радиуса-вектора вес воздуха в верхней полости был $G_1 = \gamma_1 V_1$, а в нижней – $G_2 = \gamma_2 V_2$, где γ_1 и γ_2 – удельные веса воздуха соответственно в верхней и нижней полостях в соответствующий момент времени.

Через время dt количество воздуха в обеих полостях за счет перетекания Q будет определяться выражениями:

$$G_1^\bullet = G_1 - Q, \quad G_2^\bullet = G_2 + Q. \quad (11)$$

Соответственно изменятся и давления воздуха $P_1^\bullet$ и $P_2^\bullet$ в обеих полостях. Эти откорректированные давления обозначим $P_{1 \text{ нов.}}$ и $P_{2 \text{ нов.}}$, и они вычисляются по формулам:

$$P_{1 \text{ нов.}} = P_1^\bullet \frac{G_1^\bullet}{G_1^\bullet + Q}, \quad P_{2 \text{ нов.}} = P_2^\bullet \frac{G_2^\bullet}{G_2^\bullet - Q}. \quad (12)$$

Сила сопротивления F за время dt определяется по выражению (1), где вместо P_1 и P_2 берутся их откорректированные значения по (12). Затем расчет повторяется для нового приращения аргумента.

Таким образом, в течение цикла колебаний прибора устанавливается зависимость силы сопротивления F от угла поворота радиуса-вектора α или от времени t .

В соответствии с описанным алгоритмом решения задачи на компьютере просчитано множество вариантов с целью оптимизации размеров демпфера в рамках необходимой величины рассеяния энергии W_0 .

Так, при $W_0 = 8,8 \text{ кгсм}$, $d = 3 \text{ мм}$ и $h_1 = 1,87 \text{ мм}$ получены следующие параметры демпфера: $D = 23 \text{ мм}$, $h = 3 \text{ мм}$, $d_1 = 0,85 \text{ мм}$, $W = 9,64 \text{ кгсм}$.

На рис.2 приведен график изменения силы сопротивления F от α в течение цикла колебаний прибора для этих параметров.

В соответствии с описанным алгоритмом решения задачи на компьютере просчитано множество вариантов с целью оптимизации размеров демпфера в рамках необходимой величины рассеяния энергии W_0 .

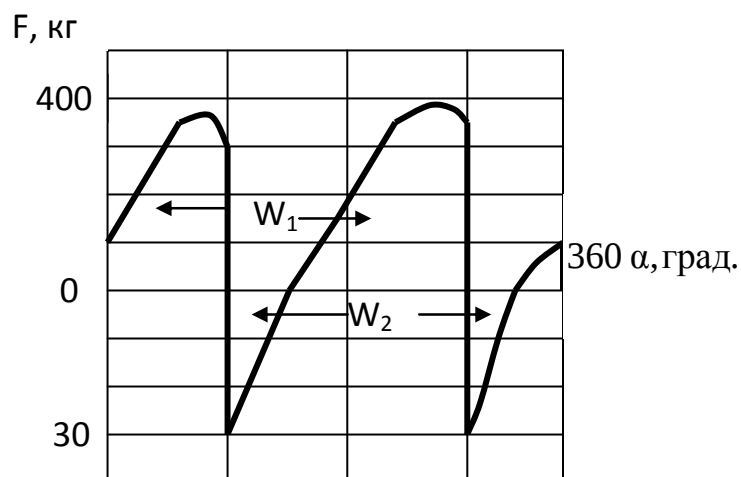


Рис. 2. График изменения силы за цикл колебаний

Так, при $W_0 = 8,8$ кгсм, $d = 3$ мм и $h_1 = 1,87$ мм получены следующие параметры демпфера: $D = 23$ мм, $h = 3$ мм, $d_1 = 0,85$ мм, $W = 9,64$ кгсм.

На рис. 2 приведен график изменения силы сопротивления F от α в течение цикла колебаний прибора для этих параметров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. – М.: Высшая школа, 1972. – 416 с.
2. Справочник машиностроителя. Т.2. – М.: Машиностроение, 1960. – 740 с.

© Г.А. Куриленко, М.Б. Устюгов, 2009

УДК 681.7.015.2

Е.А. Терешин

НФ ИФП «КТИПМ», Новосибирск

Т.Н. Хацевич

СГГА, Новосибирск

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛОВИЗОРОВ

E.A. Tereshin

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, "Technological Design Institute of Applied Microelectronics" (NB ISP SB RAS "TDI AM") Ac. Lavrentiev Ave, 2/1, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

T.N. Hatsevich

*Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul, Novosibirsk, 630108, Russian Federation

OPTICAL SYSTEMS OF INFRARED THERMAL DEVICES

Proposed principles of construction and particularly the calculation of optical systems using modern small-sized infrared photodetector.

Потребительские и технические характеристики тепловизионного прибора определяется оптимальным согласованием его оптической системы, фотоприемного устройства (ФПУ) и электронной системы обработки сигналов. К оптической системе тепловизионного прибора предъявляется целый ряд противоречивых требований, для удовлетворения которых в оптические системы, зачастую, включают асферические, дифракционные оптические элементы, снижающие технологичность прибора в целом и повышающие его стоимость.

В связи с совершенствованием матричных ФПУ инфракрасного диапазона спектра уже сегодня возникла такая ситуация, что, например, в тепловизорах «смотрящего» типа, использующих неохлаждаемые болометрические матричные ФПУ, стоимость оптики является определяющей в стоимости всего прибора [1].

Известно, что в области тепловизионной аппаратуры наша страна отстает по количеству и качеству производимых приборов от ведущих производителей. Анализ показывает, что это отставание не всегда обусловлено уровнем применяемых технологий. Для большого круга задач существует возможность удовлетворения требованиям систем применения без использования сложных и дорогих технологических процессов и оборудования. Именно с таких позиций мы подходим к разработке оптических систем современных малогабаритных тепловизоров.

Оптическая система тепловизионного прибора может включать различные компоненты, например, фокусирующий объектив, сканирующее зеркало, системы для микросканирования, телескопические системы переменного увеличения и др. Исключение составляют простые тепловизоры на неохлаждаемых матричных болометрических ФПУ, имеющие нерегулируемое увеличение и поле зрения, работающие на небольших дальностях до объекта наблюдения.

Поиск решения оптической системы для конкретного тепловизионного прибора может быть осуществлен различными методами, начиная от создания параметрической модели оптической системы в области параксиальной оптики, решения уравнений в области аббераций третьего порядка, до глобального поиска реальной оптической системы с использованием известных оптических проектировочных программ. Трудоемкость (затраты времени) каждого из этих методов зависит, прежде всего, от опыта разработчика. Нами разработан алгоритм эффективного проектирования многокомпонентных систем для инфракрасного спектрального диапазона [2]. Под эффективным проектированием в докладе понимается такой метод проектирования, который позволяет в минимальные сроки провести разработку новой многокомпонентной оптической системы, работающей в инфракрасном спектральном диапазоне и предназначенной для тепловизора, удовлетворяющей конкретным техническим требованиям.

Для подтверждения результативности алгоритма в докладе приводятся и обсуждаются многокомпонентные оптические схемы и результаты расчета оптических систем тепловизоров со спектральным диапазоном работы 8–12 мкм, а именно:

- Телескопические системы с переменным увеличением с различными перепадами увеличений: 2, 3, 4, 6, 10 крат, в том числе панкратические [3]. Системы предназначены для использования в тепловизионных сканирующих приборах с линейчатыми ФПУ;
- Объективы с переменным фокусным расстоянием, с перепадом фокусных расстояний более трех. Объективы предназначены для использования совместно с болометрическими матричными ФПУ [4].

Также в докладе приводятся результаты расчетов и схемы инфракрасных объективов с переменным фокусным расстоянием (в том числе панкратических) с вынесенными зрачками, обеспечивающих возможность без виньетирования осуществить оптическое сопряжение как с афокальными модулями, так и с холодной диафрагмой ФПУ.

Изготовлены несколько вариантов афокальных систем и объективов, подтвердивших эффективность приведенного алгоритма проектирования, который используется в НФ ИФП СОРАН «КТИПМ» при разработке новых тепловизионных приборов.

Все оптические системы обеспечивают дифракционное качество изображения и малую дисторсию, позволяющие сопрягать их с современными тепловизионными приемниками изображения. Системы являются

технологичными, реализованы на сферических преломляющих поверхностях, экспериментальная проверка подтверждает расчетные характеристики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенко. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
2. Е.А. Терешин, Т.Н. Хацевич. Алгоритм эффективного проектирования многокомпонентных систем для инфракрасного спектрального диапазона // Труды Оптического общества им. Д.С. Рождественского / Международная конференция «Прикладная оптика -2008», Санкт-Петербург, 20-24 октября 2008 г. Т.3. Компьютерные технологии в оптике. – С. 69–73.
3. Хацевич Т.Н., Терешин Е.А. Телескоп с панкратической сменой увеличения для дальней ИК области спектра // Патент РФ № 2342686. 2008.
4. Олейник С.В., Хацевич Т.Н. Линзовый объектив с изменяемым фокусным расстоянием для работы в ИК-области спектра (варианты) – Патент РФ № 2339983. 2008.

© Е.А. Терешин, Т.Н. Хацевич, 2009

УДК 681.784.22:519.87

А.Н. Поликанин

СГГА, Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ГЛАЗА

A.N. Polikanin

SSGA, Novosibirsk

RESEARCH OF EYE OPTICAL TRANSFER FUNCTION

The simulator of the primary information processing performed by the most important part of the human eye, retina, is considered. The author presents calculation of a space-frequency transfer function of fovea centralis as a space-frequency filter for the known raster topology. The experimental technique is suggested to be used for theoretical calculation checking.

Структура fovea играет исключительную роль в механизме раннего этапа обработки информации в зрительной системе. Число фоторецепторов глаза приблизительно 130 млн., на которые приходится всего около 1 млн. волокон в оптическом нерве. Такое уменьшение пропускания информационного тракта обусловлено отбрасыванием высоких пространственных частот на периферии поля зрения. Эволюция создала область повышенного разрешения в центре сетчатки. Для того чтобы это разрешение охватывало каждый участок наблюдаемой сцены, глазодвигательная система осуществляет фовеацию – наведение области fovea на цель. Таким образом, развитие знания о механизме первичной обработки оптического сигнала фовеальной областью сетчатки представляет большой интерес.

Существующие офтальмологические данные о взаиморасположении отдельных клеток чувствительных рецепторов fovea позволяют определить ее топологию как гексагональную решетку с равномерным периодом и распределением одномерных рецепторов (колбочек) в ее узлах (т.н. сотовое расположение) [1]. Геометрическая модель области чувствительности фовеальной части сетчатки человеческого глаза приведена на рис. 1.

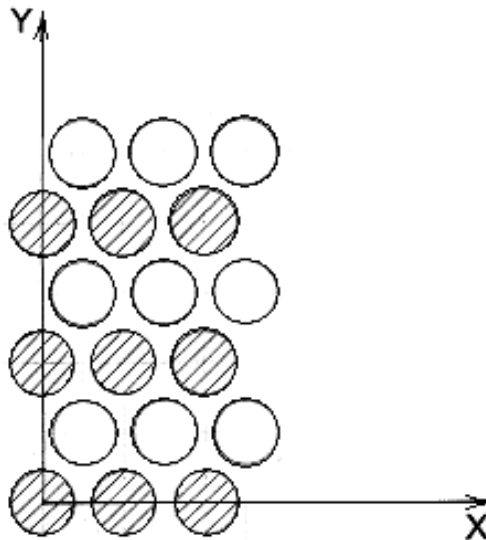


Рис. 1. Геометрическая модель fovea

Заштрихованные и пустые элементы на рисунке можно представить в виде двух массивов (две прямоугольные решетки) чувствительных рецепторов, как бы вложенных один в другой. Такое обозначение необходимо в дальнейшем для упрощения математических расчетов. Согласно [2] область центральной ямки, свободная от палочек (собственно fovea), имеет размер 0,6мм по горизонтали и 0,4мм по вертикали, что составляет соответственно $1,5^\circ$ и 1° поля зрения при аккомодации глаза на бесконечность ($f'_{\text{гл}} = 22,8\text{мм}$). В фовеальной области находятся 25 000 колбочек диаметром 2 мкм, плотность колбочек составляет 150 000 на мм^2 .

Исходя из этих данных, нетрудно определить число рецепторов (период решетки) по двум осям координат X и Y (см. рис. 1) для каждого массива. Период одной из прямоугольных решеток по оси OX составляет $1,56b$, где b – размер рецептора по горизонтали. По оси OY период равен $3,12a$, где a – размер рецептора по вертикали. Смещение каждого следующего ряда рецепторов относительно предыдущего (смещение пустой решетки относительно заштрихованной) составляет $0,78b$ по оси OX и $1,56a$ по оси OY.

Пусть M – число элементов по оси OX, N – число элементов по оси OY, соответственно равные 200 и 100 для того и другого массива рецепторов.

Найдем пространственно-частотную передаточную функцию (ПЧПФ) области чувствительности. Начало системы координат будет расположено в центре фовеальной области. Преобразование Фурье функции одного чувствительного элемента радиусом R , расположенного в начале системы координат YOX, можно представить формулой [3]:

$$W_0(\mu, \nu) = 2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \frac{I_1 \left(2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sqrt{\mu^2 + \nu^2} \right)}{\left(2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sqrt{\mu^2 + \nu^2} \right)}, \quad (1)$$

где I_1 – функция Бесселя первого порядка; μ, ν – пространственные частоты по осям OY и OX соответственно.

Выражение (1) представляет собой модуль комплексной передаточной функции данного чувствительного элемента. Каждый последующий элемент смещен относительно предыдущего по оси ОХ на расстояние $1,56mb$, где $m = 0, 1, 2, \dots, M$. На основании теоремы сдвига преобразование Фурье функции для ряда чувствительных элементов с координатами центров $y = 0, x = \pm 1,56mb$ (на рис. 1 – заштрихованный ряд в начале системы координат по оси ОУ) выполняется по формуле [3]:

$$W_1(\mu, \nu) = W_0(\mu, \nu) \cdot \left[1 + e^{i \cdot (-2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot 1,56 \cdot b)} + e^{i \cdot (2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot 1,56 \cdot b)} + e^{i \cdot (-2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot 3,12 \cdot b)} + e^{i \cdot (2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot 3,12 \cdot b)} + \dots + e^{i \cdot (2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot (M-1) \cdot 1,56 \cdot b)} + e^{i \cdot (-2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot M \cdot 1,56 \cdot b)} \right], \quad (2)$$

где выражение в скобках представляет собой две геометрические прогрессии, суммы членов которых определяются по формуле

$$W_1(\mu, \nu) = \frac{1 - \left[e^{i \cdot (2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot m \cdot 1,56 \cdot b)} \right]^M}{1 - e^{i \cdot (2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot m \cdot 1,56 \cdot b)}} + e^{i \cdot (-2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot m \cdot 1,56 \cdot b)} - \frac{\left[e^{i \cdot (-2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot m \cdot 1,56 \cdot b)} \right]^{M-1}}{1 - e^{i \cdot (-2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot m \cdot 1,56 \cdot b)}}. \quad (3)$$

Чувствительные элементы второго ряда смещены относительно первого по оси ОХ на величину $0,78b$, а по оси ОУ на величину $1,56a$. Преобразование Фурье функции для двух рядов решетки запишется в виде формулы:

$$W_2(\mu, \nu) = W_1(\mu, \nu) \cdot \left[1 + e^{i \cdot (2 \cdot \pi \cdot (\mu \cdot 1,56 \cdot a + \nu \cdot 0,79 \cdot b))} \right]. \quad (4)$$

Центральные два ряда элементов чувствительной фовеальной области по оси ОУ повторяются с периодом $\pm 3,12a$ в обе стороны от центра. Следовательно, ПЧПФ решетки в целом можно записать в виде формулы :

$$W(\mu, \nu) = W_2(\mu, \nu) \cdot \left[1 + e^{i \cdot (-2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot 3,12 \cdot a)} + e^{i \cdot (2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot 3,12 \cdot a)} + e^{i \cdot (-2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot 6,24 \cdot a)} + e^{i \cdot (2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot 6,24 \cdot a)} + \dots + e^{i \cdot (2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot (N-1) \cdot 3,12 \cdot a)} + e^{i \cdot (-2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot M \cdot 3,12 \cdot a)} \right]. \quad (5)$$

На рис. 2 представлены результаты моделирования для решетки размером $0,6\text{мм}$ по горизонтали и $0,4$ по вертикали.

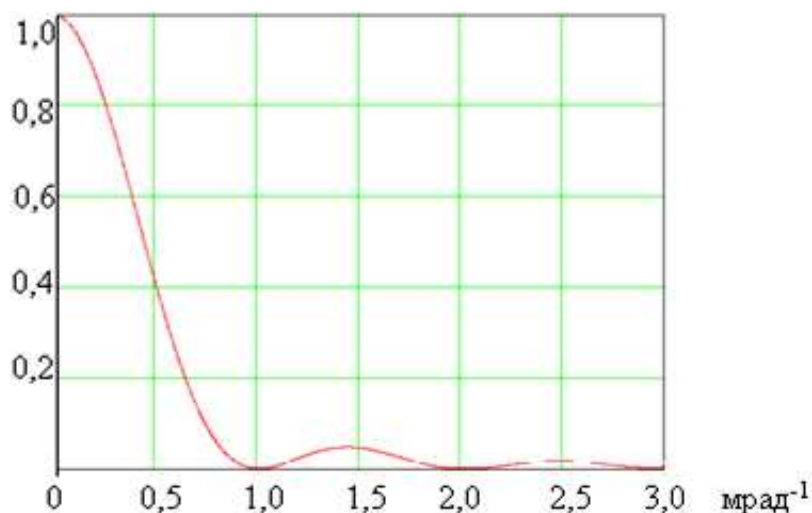


Рис. 2. ПЧПФ решетки при заданных размерах фовеальной области

Имея математическую модель фовеальной области сетчатки, можно представить для нее случай, когда часть элементов сетчатки не функционирует. Для этого достаточно произвести в формулах (3) и (5) несложные изменения с тем, чтобы ряд геометрической прогрессии прерывался на каком-то члене и возобновлялся через некоторый промежуток. Этот эксперимент может иметь конкретное прикладное медицинское значение для моделирования некоторых травматических последствий, приводящих к изменению структуры сетчатки (отслоение) или различных болезненных проявлений (катаракта). Для случая, когда центр решетки «лишен» некоторого массива элементов (удалено 40 % от их общего количества) ПЧПФ принимает вид, представленный на рис. 3.

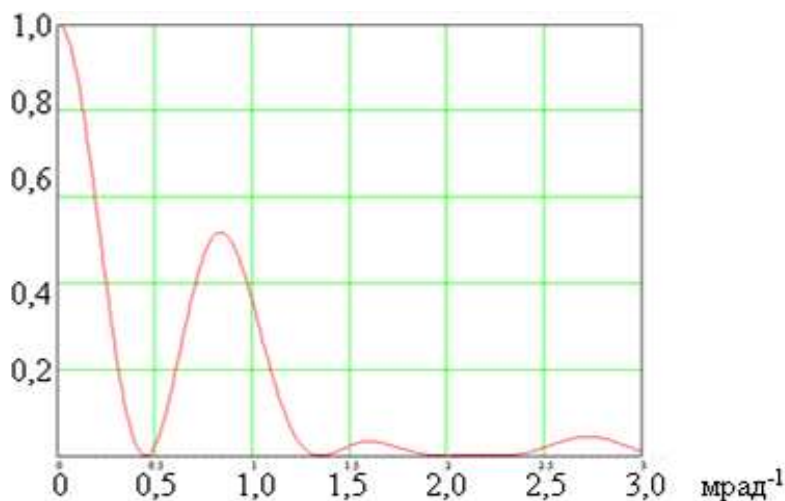


Рис. 3. ПЧПФ с исключением массива элементов

В дальнейшем, при увеличении размера удаленного массива элементов максимум частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) сдвигается в область более высоких частот, так как второй максимум в районе частоты 1 мрад⁻¹ на рис. 3 становится выше первого, расположенного в районе нулевой частоты.

Следует отметить, что на факт смещения максимума ЧКХ для всего глаза из нулевой области в область более высоких частот указано рядом исследователей. В частности, М.А.Островская [4] отмечает существенный спад ЧКХ глаза в районе частот от 0 до 0,25 радиан. Н.Н. Красильников [5] объясняет снижение ЧКХ в области низких частот действием внутренних шумов на частотах, близких к нулевой. Исходя из результатов исследования представленной модели, можно предположить, что это снижение может быть вызвано наличием в центральной зоне сетчатки так называемого слепого пятна – места, откуда исходит пучек нервных волокон. Это слепое пятно не имеет рецепторов для восприятия света. Таким образом, происходит то самое исключение массива элементов из зоны решетки, близкой к центральной, которое, как уже было показано, вызывает повышение контраста на высоких частотах.

Для проверки теоретических расчетов предлагается смоделировать ситуацию с выпадением массива чувствительных элементов в большей степени нежели это присутствует в реально работающей здоровой сетчатке человеческого глаза.

С этой целью необходимо оптически ограничить часть центрального поля зрения с последующим поочередным предъявлением наблюдателю ряда транспарантов с различной частотой периодических элементов, меняя при этом значение относительного контраста транспаранта вплоть до предельного значения. Предельное значение при этом должно фиксироваться относительно текущей частоты. График зависимости контраста и частоты покажет результат эксперимента.

С этой целью была написана программа, реализующая на дисплее компьютера несколько видов частотных растров с возможностью изменения как текущей частоты раstra, так и его контраста от 0 до 1. Возможные варианты предъявляемых растров представлены на рис. 4.

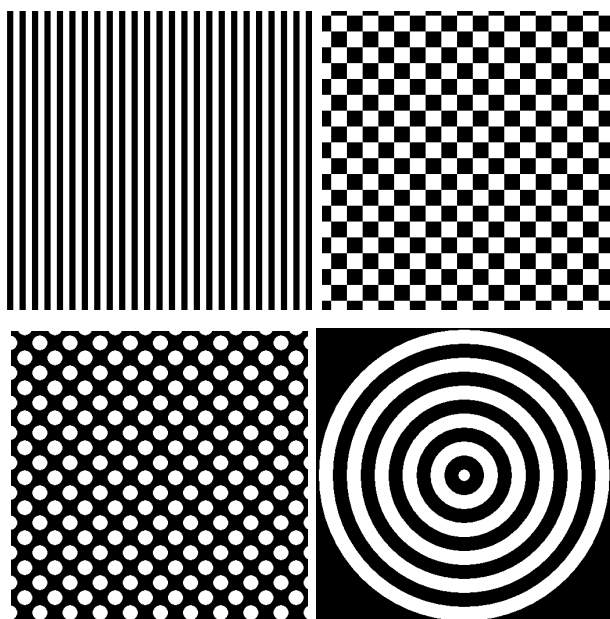


Рис. 4. Варианты предъявляемых растров

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хьюбел, Д. Глаз, мозг, зрение/ Д. Хьюбел. – М.: Мир, 1990. – 239 с.
2. Луизов, А. В. Глаз и свет/ А. В. Луизов. – Л.: Наука, 1983. – 275 с.
3. Криксунов, Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники/ Л. З. Криксунов. – М.: Сов. Радио, 1978. – 400 с.
4. Островская, М. А. Частотно-контрастная характеристика глаза / М. А. Островская // ОМП. – 1969. - №2. – С. 45–54.
5. Красильников, Н. Н. Применение принципов оптимального наблюдателя при моделировании зрительной системы человека / Н. Н. Красильников // Опт. журн. – 1999. – № 3. – С. 17–23.

© А.Н. Поликанин, 2009

УДК 519.8; 536.521

В.М. Тымкул, Ю.А. Фесько

СГГА, Новосибирск

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПИРОМЕТРА ДВОЙНОГО ОТНОШЕНИЯ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

V.M. Tymkul, Yu.A. Fesko

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

MATHEMATICAL SIMULATION OF WORK OF THE DOUBLE RATIO PYROMETER IN THE CONDITIONS OF REAL SIGNALS

In article considered mathematical simulation work of the double ratio pyrometer work in the conditions of real signals.

В оптической пирометрии известен метод двойного спектрального отношения (ДСО) для дистанционного измерения температуры объектов [1,2]. В основе данного метода лежат два спектральных отношения интенсивностей теплового излучения или цветовых температур, что позволяет снизить влияние излучательной способности поверхности изучаемого объекта на результат определения его температуры [1]. В работе [3] нами рассмотрена математическая модель пирометра двойного отношения в условиях воздействия внешней «помехи» излучения фона и внутренней «помехи» излучения оптических элементов схемы прибора. При этом выражение для определения термодинамической температуры наблюдаемой поверхности представлялось в виде:

$$\frac{1}{T_1} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{2 \Delta \lambda^2 c_2} \cdot \ln \left[\frac{U_{\Sigma}(\lambda_2)}{U_{\Sigma}(\lambda_1)} \cdot \frac{U_{\Sigma}(\lambda_1)}{U_{\Sigma}(\lambda_3)} \cdot \frac{U_{\Sigma}(\lambda_3)}{U_{\Sigma}(\lambda_2)} \right], \quad (1)$$

где

$$U_{\Sigma}(\lambda_i) = U(\lambda_i) + U_o(\lambda_i) + U_{\phi}(\lambda_i), \quad (2)$$

$$U(\lambda_i) = \frac{1}{\pi} \cdot A_o \cdot \omega \cdot S(\lambda_i) \cdot \tau_{\hat{o}}(\lambda_i) \cdot \tau_o(\lambda_i) \cdot \tau_d(\lambda_i) \cdot \varepsilon(\lambda_i) \cdot c_1 \cdot \lambda_i^{-5} \cdot \frac{1}{\frac{c_2}{e^{\lambda_i \cdot T} - 1}}, \quad (3)$$

$$U_{\hat{o}}(\lambda_i) = \frac{1}{\pi} \cdot A_o \cdot \omega \cdot \beta \cdot S(\lambda_i) \cdot \tau_{\hat{o}}(\lambda_i) \cdot \tau_o(\lambda_i) \cdot \tau_d(\lambda_i) \cdot \rho \cdot c_1 \cdot \lambda_i^{-5} \cdot \frac{1}{\frac{c_2}{e^{\lambda_i \cdot T_{\hat{o}}} - 1}}, \quad (4)$$

$$U_i(\lambda_i) = \frac{1}{\pi} \cdot A_o \cdot \omega \cdot S(\lambda_i) \cdot \tau_o(\lambda_i) \cdot \varepsilon_i(\lambda_i) \cdot c_1 \cdot \lambda_i^{-5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda_i \cdot T_i}} - 1} \cdot (5)$$

В формулах (1)–(5) приведены следующие обозначения:

$U(\lambda_i)$, $U_o(\lambda_i)$, $U_i(\lambda_i)$ – сигналы на выходе приемника излучения, которые формируются соответственно тепловым излучением поверхности объекта, излучением фона и оптических элементов схемы прибора;

$S(\lambda_i)$ – спектральная чувствительность приемника оптического излучения;

T_o и T_ϕ – температура поверхности оптической системы и окружающего фона;

ρ – коэффициент отражения поверхности объекта;

$\tau_o(\lambda_i)$, $\tau_o(\lambda_i)$, $\tau_a(\lambda_i)$ – коэффициенты пропускания оптической системы, спектрального фильтра и слоя атмосферы между объектом и прибором;

$\varepsilon(\lambda_i)$, $\varepsilon_i(\lambda_i)$ – коэффициенты излучения поверхности объекта и оптических элементов;

β – коэффициент габаритной яркости поверхности объекта;

T – задаваемая температура поверхности объекта;

T_m – моделируемая температура поверхности объекта;

λ_i – эффективная длина волны i -ого канала пирометра ($i = 1, 2, 3$);

A_o – площадь входного зрачка объектива пирометра;

ω – телесный угол поля зрения оптической системы прибора.

Нужно учесть то, что в реальных условиях спектральные фильтры не могут обеспечить достаточно узкую полосу пропускания, поэтому практически сигналы в выражениях (1)–(5) формируются в некоторой полосе пропускания длин волн. В этой связи, реальные сигналы, которые формируются на выходе приемника излучения тепловым излучением поверхности объекта имеют вид:

$$U(\Delta\lambda_i) = \frac{c_1 \cdot A_o \cdot \omega}{\pi} \cdot \int_{\lambda_1^{(i)}}^{\lambda_2^{(i)}} \frac{S(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda)}{\lambda^5 \cdot [\exp(c_2/\lambda \cdot T) - 1]} \cdot d\lambda, \quad (6)$$

где $\lambda_1^{(i)}$ и $\lambda_2^{(i)}$ – нижняя и верхняя границы полосы пропускания спектрального фильтра.

Тогда выражение для моделирования работы пирометра ДСО в условиях реальных сигналов примет вид (7):

$$\frac{1}{T_i} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{2 \Delta \lambda^2 c_2} \cdot \ln \left[\frac{U(\Delta\lambda_2)}{U(\Delta\lambda_1)} \cdot \frac{U(\Delta\lambda_3)}{U(\Delta\lambda_2)} \right]. \quad (7)$$

Для моделирования работы пирометра ДСО определены условия работы и заданы исходные параметры оптической системы, приемника оптического излучения и материала исследуемого объекта.

При расчете были использованы следующие параметры:

$$\begin{array}{lll} \lambda_1 = 9,5 & \lambda_1^{(1)} = 8,5 & \lambda_2^{(1)} = 10,5 \text{ мкм,} \\ \text{мкм,} & \text{мкм,} & \\ \lambda_2 = 10,5 & \lambda_1^{(2)} = 9,5 & \lambda_2^{(2)} = 11,5 \text{ мкм,} \\ \text{мкм,} & \text{мкм,} & \\ \lambda_3 = 11,5 & \lambda_1^{(3)} = 10,5 & \lambda_2^{(3)} = 12,5 \text{ мкм,} \\ \text{мкм,} & \text{мкм,} & \\ \tau_{\hat{o}}(\lambda_i) = \tau_a(\lambda_i) = \tau_o(\lambda_i) = 1, & \beta = 1, & \end{array}$$

$$A_o = 27.7 \text{ мм}^2, \quad \omega = 3.1 \times 10^{-4} \text{ ср,}$$

$$c_1 = 3.74 \times 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^{-2}, \quad c_2 = 1.438 \times 10^4 \text{ К} \cdot \text{м}.$$

В качестве приемника оптического излучения использовался пироэлектрический приемник МГ-32, а материалом наблюдаемой поверхности выбрана осадочная глина Грейди [4].

Моделирование проводилось с использованием компьютерной математической системы «MathCAD». По результатам вычислительного эксперимента исследованы зависимости моделируемой T_M и задаваемой T температур поверхности объекта, полученные как на основе формулы (1), так и соотношений (6) и (7) с использованием моделируемых реальных сигналов пирометра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Снопко, В.Н. Спектральные методы оптической пирометрии нагретой поверхности [Текст] // В.Н. Снопко. – Минск: Наука и техника, 1988. – 152с.
2. Свет, Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур [Текст] // Д.Я. Свет. – М., 1982. – 296с.
3. Тымкул, В.М., Математическая модель работы пирометра двойного отношения. [Текст] // сб. материалов III Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2007» Т.4. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника Ч.2 / В.М. Тымкул, Ю.А. Фесько – Новосибирск.: СГГА, 2007г. – С. 10-14.
4. Волф, У. Справочник по инфракрасной технике [Текст] // Ред. У. Волф, Г. Цисис. В 4-х тт. Т. 1. Физика ИК излучения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1995.- 606 с., ил.

© В.М. Тымкул, Ю.А. Фесько, 2009

УДК 681.7

Н.С. Лебедев, А.В. Моисеев

СГГА, Новосибирск

УСТРОЙСТВО СОПРЯЖЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С ПК

N.S. Lebedev, A.V. Moiseev

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo UI, Novosibirsk, 630108, Russian Federation

INTERCOUPLER OF THE SPECTRAL INSTALLATION WITH PC

Abstract: Question of the connection of the spectral installation is considered in work to PC through port LPT1 by means of designed intercoupler. The automation manual operation gives increasing to capacity and exception subjective operator error.

Целью данной работы является разработка устройства сопряжения спектральной установки с персональным компьютером (ПК). Разработка такого устройства необходима, так как необходимо увеличить производительность труда, а также исключить субъективные ошибки оператора за счет автоматизации ручного труда.

Применяемая спектральная установка используется для исследования спектральных характеристик катодных пленок, при производстве электронно-оптических преобразователей, в диапазоне от 200 нм до 1 200 нм.

Процесс исследования сводится к снятию в ручном режиме калибровочной спектральной характеристики монохроматора (вначале каждой рабочей смены), снятию в ручном режиме суммарной спектральной характеристики исследуемой катодной пленки и монохроматора и ручная обработка с исключением спектральной характеристики монохроматора (нормирование). После этих операций оператор должен сравнить полученную характеристику с заранее известной (эталонной) и принять решение о годности или негодности катодной пленки. В процессе этой работы оператор должен неоднократно вручную:

- Произвести переключение источников излучения;
- Сменить светофильтры в осветителе;
- Повернуть дифракционную решетку в монохроматоре.

При разработке устройства сопряжения спектральной установки с персональным компьютером был установлен шаговый двигатель в осветитель, чтобы производить смену источников излучения, путем вращения поворотного зеркала. Источник излучения состоит из ртутной лампы ДРС-50, предназначенной для работы в диапазоне от 200 нм до 350 нм и лампы накаливания ОП-33-0,3, предназначенной для работы в диапазоне от 350 нм до

25000 нм. Второй шаговый двигатель установлен для смены светофильтров. Третий шаговый двигатель установлен в монохроматор для управления положением дифракционной решетки. Выход фотоприемного устройства спектральной установки, через усилитель, подключен к 12-ти разрядному аналого-цифровому преобразователю (АЦП). Управление шаговыми двигателями осуществляется от персонального компьютера через порт LPT1 и блок управления шаговыми двигателями, входящего в состав устройства сопряжения спектральной установки с ПК. АЦП также расположен в устройстве сопряжения. Управление АЦП и считывание кода с АЦП также производится через порт LPT1. Снятие спектральных характеристик происходит в автоматическом режиме под управлением специального программного обеспечения. Обработка спектральных характеристик и принятие решений о годности или негодности катодных пленок принимается программой на основе заданных критериев. Пакет программ работает под управлением операционной системы WINDOWS-98.

Выводы.

1. Разработанное устройство позволяет подключить к персональному компьютеру неавтоматизированную спектральную установку.
2. Применение устройства сопряжения позволяет значительно увеличить производительность процесса контроля катодных пленок и исключить субъективные ошибки оператора.

© Н.С. Лебедев, А.В. Мусеев, 2009

ОПТИЧЕСКИЙ ТРЕХСПЕКТРАЛЬНЫЙ ПИРОМЕТР. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

V.M. Tymkul, D.S. Shelkovoy

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

OPTICAL THREE-SPECTRAL PYROMETER. THE TECHNIQUE AND RESULTS OF RESEARCH

The given work is devoted to the description of the practical circuit design of experimental installation for measurements of thermodynamic temperature by a dummy of a three-spectral pyrometer and to results of researches.

В работах [1–3] нами была предложена, методически и теоретически обоснована схема оптического трехспектрального пирометра для измерений термодинамической температуры поверхности излучающих объектов. Данная работа посвящена разработке методики и схемы экспериментальной установки для измерений термодинамической температуры макетом трехспектрального пирометра и анализу результатов исследований. Функциональная схема данной установки приведена на рис. 1.

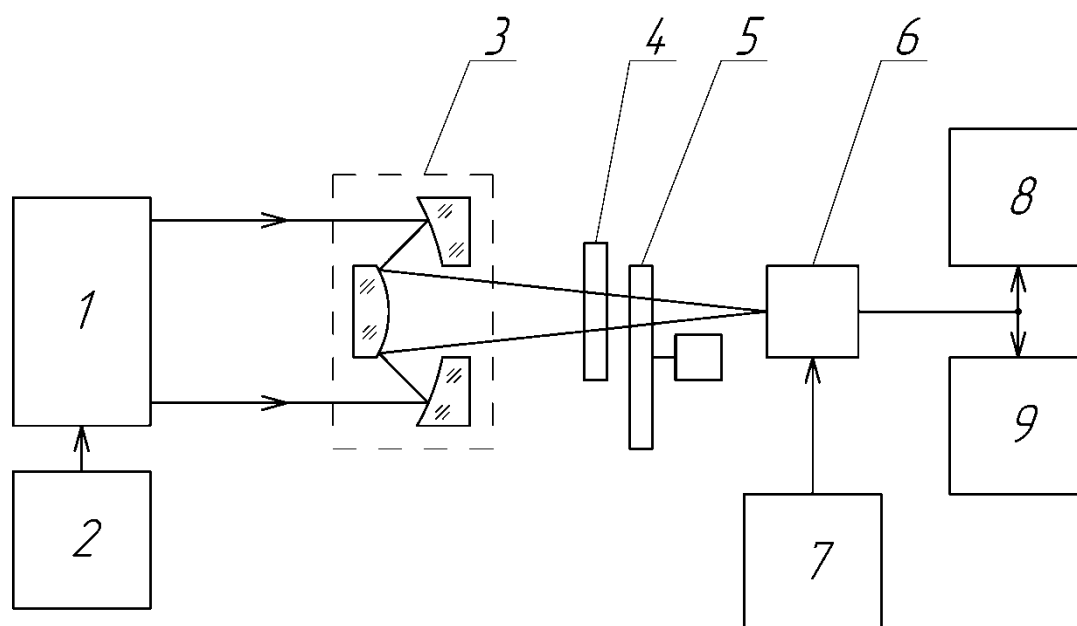


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки для измерений термодинамической температуры макетом трехспектрального пирометра

Данная схема содержит: 1 – калиброванный тепловой излучатель с блоком управления 2; 3 – зеркальный объектив, состоящий из сферического зеркала со слепым пятном и контррефлектора; 4 – турель с тремя спектральными фильтрами; 5 – механический модулятор; 6 – пироэлектрический приемник со схемой питания 7; 8 – цифровой вольтметр В7–27А/1; 9 – осциллограф. Следует отметить, что элементы 3–8 составляют макет пирометра. Калиброванный тепловой излучатель был взят из комплекта градуировочной аппаратуры к отечественному тепловизору «Радуга–ЭВМ» производства ФГУП «Азовский оптико-механический завод», г. Азов Ростовской области. Зеркальный объектив 3 представлял собой объектив от тепловизора «Радуга–2» и имел следующие параметры: световой диаметр $d = 40$ мм, заднее фокусное расстояние $f' = 64$ мм.

Разработка методики измерений термодинамической температуры поверхности объектов на данной функциональной схеме базировалась на решении следующего уравнения:

$$\beta_1 e^{(\gamma_1 - \gamma_3)x} + \beta_2 e^{(\gamma_2 - \gamma_3)x} = 1. \quad (1)$$

В данном уравнении приняты следующие обозначения:

β_1 и β_2 – параметры, характеризующие значения сигналов на выходе трех спектральных каналов пирометра;

γ_1 , γ_2 и γ_3 – величины, характеризующие спектральные параметры пирометра.

Разлагая экспоненты в этой формуле в ряд, и воспользовавшись в нем первыми тремя членами, было получено следующее квадратное уравнение относительно переменной $x = \frac{1}{T}$:

$$\left[\frac{\beta_1(\gamma_1 - \gamma_3)^2}{2} + \frac{\beta_2(\gamma_2 - \gamma_3)^2}{2} \right] x^2 + [\beta_1(\gamma_1 - \gamma_3) + \beta_2(\gamma_2 - \gamma_3)]x + (\beta_1 + \beta_2 - 1) = 1. \quad (2)$$

Решение данного уравнения получено в виде:

$$T = \left[\frac{-(\beta_1\gamma_{31} + \beta_2\gamma_{32}) + \sqrt{[(\beta_1\gamma_{31} + \beta_2\gamma_{32}) - 2(\beta_1\gamma_{31} + \beta_2\gamma_{32})(\beta_1 + \beta_2 - 1)]}}{\beta_1\gamma_{31}^2 + \beta_2\gamma_{32}^2} \right]^{-1}. \quad (3)$$

В конечном итоге, рабочее выражение для экспериментального измерения температуры излучающих объектов получено в виде:

$$T = \frac{\left(\alpha_1\gamma_{31}^2 \left[\frac{U(\lambda_1)}{U(\lambda_3)} \right] + \alpha_2\gamma_{32}^2 \left[\frac{U(\lambda_2)}{U(\lambda_3)} \right] \right)}{- \left(\alpha_1\gamma_{31} \left[\frac{U(\lambda_1)}{U(\lambda_3)} \right] + \alpha_2\gamma_{32} \left[\frac{U(\lambda_2)}{U(\lambda_3)} \right] \right) + \left(\alpha_1\gamma_{31} \left[\frac{U(\lambda_1)}{U(\lambda_3)} \right] + \alpha_2\gamma_{32} \left[\frac{U(\lambda_2)}{U(\lambda_3)} \right] \right)^2 - \frac{1}{-2 \left(\alpha_1\gamma_{31}^2 \left[\frac{U(\lambda_1)}{U(\lambda_3)} \right] + \alpha_2\gamma_{32}^2 \left[\frac{U(\lambda_2)}{U(\lambda_3)} \right] \right) \left(\alpha_1 \left[\frac{U(\lambda_1)}{U(\lambda_3)} \right] + \alpha_2 \left[\frac{U(\lambda_2)}{U(\lambda_3)} \right] \right)}}. \quad (4)$$

В этом выражении приняты обозначения:

величины $U(\lambda_1)$, $U(\lambda_2)$ и $U(\lambda_3)$ представляют собой электрические сигналы, которые формируются приемником излучения при ведении в оптическую схему экспериментальной установки соответственно первого, второго и третьего спектральных фильтров. Эти сигналы эквивалентны тепловому излучению поверхности излучателя 1;

$$\gamma_{31} = \frac{c_2(\lambda_3 - \lambda_1)}{\lambda_1 \lambda_3}, \gamma_{32} = \frac{c_2(\lambda_3 - \lambda_2)}{\lambda_2 \lambda_3}, \alpha_1 = \frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\lambda_3}, \alpha_2 = \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta\lambda_3};$$

$\Delta\lambda_1$, $\Delta\lambda_2$, $\Delta\lambda_3$ – спектральные интервалы трех спектральных фильтров;

λ_1 , λ_2 , λ_3 – эффективные длины волн каждого из спектральных интервалов.

Непосредственное измерение термодинамической температуры излучающей поверхности калиброванного излучателя 1 с помощью макета трехспектрального пирометра проводилось следующим образом:

1. С помощью блока управления 2 устанавливалась начальная температура T_3 поверхности излучателя.

2. Включался двигатель механического модулятора, и устанавливалась частота модуляции излучения, равная $f_M = 250$ Гц, которая регистрировалась осциллографом 9.

3. Поворотом турели 4 со спектральными фильтрами в схему вводились поочередно – первый, второй и третий фильтры.

4. При этом цифровым вольтметром 8 регистрировались значения соответственно выходных сигналов $U'(\lambda_1)$, $U'(\lambda_2)$ и $U'(\lambda_3)$.

5. Аналогично измерялись три сигнала, $U_f(\lambda_1)$, $U_f(\lambda_2)$ и $U_f(\lambda_3)$ эквивалентных шуму при закрытом входном зрачке объектива 3.

6. Вычислялись сигналы $U(\lambda_1)$, $U(\lambda_2)$ и $U(\lambda_3)$, эквивалентные тепловому излучению излучателя по формулам: $U(\lambda_1) = U'(\lambda_1) - U_f(\lambda_1)$, $U(\lambda_2) = U'(\lambda_2) - U_f(\lambda_2)$ и $U(\lambda_3) = U'(\lambda_3) - U_f(\lambda_3)$.

7. Предварительно в компьютер вводились значения параметров α_1 , α_2 , γ_{31} , γ_{32} и γ_{21} , которые определялись по параметрам спектральных фильтров макета пирометра.

8. Полученные в п. 6 значения сигналов $U(\lambda_1)$, $U(\lambda_2)$ и $U(\lambda_3)$ подставлялись в формулу (4), с использованием которой определялось измеренное макетом пирометра значение термодинамической температуры T поверхности излучателя 1.

9. Аналогично с помощью блока управления 2 устанавливались другие температуры T_3 калиброванного излучателя 1 и процедура измерения с помощью макета пирометра термодинамической температуры его поверхности повторялась согласно пп. 3–8.

На основании результатов экспериментальных исследований построен график корреляции измеренной температуры T и устанавливаемой T_3 поверхности калиброванного излучателя, который представлен на рис. 2.

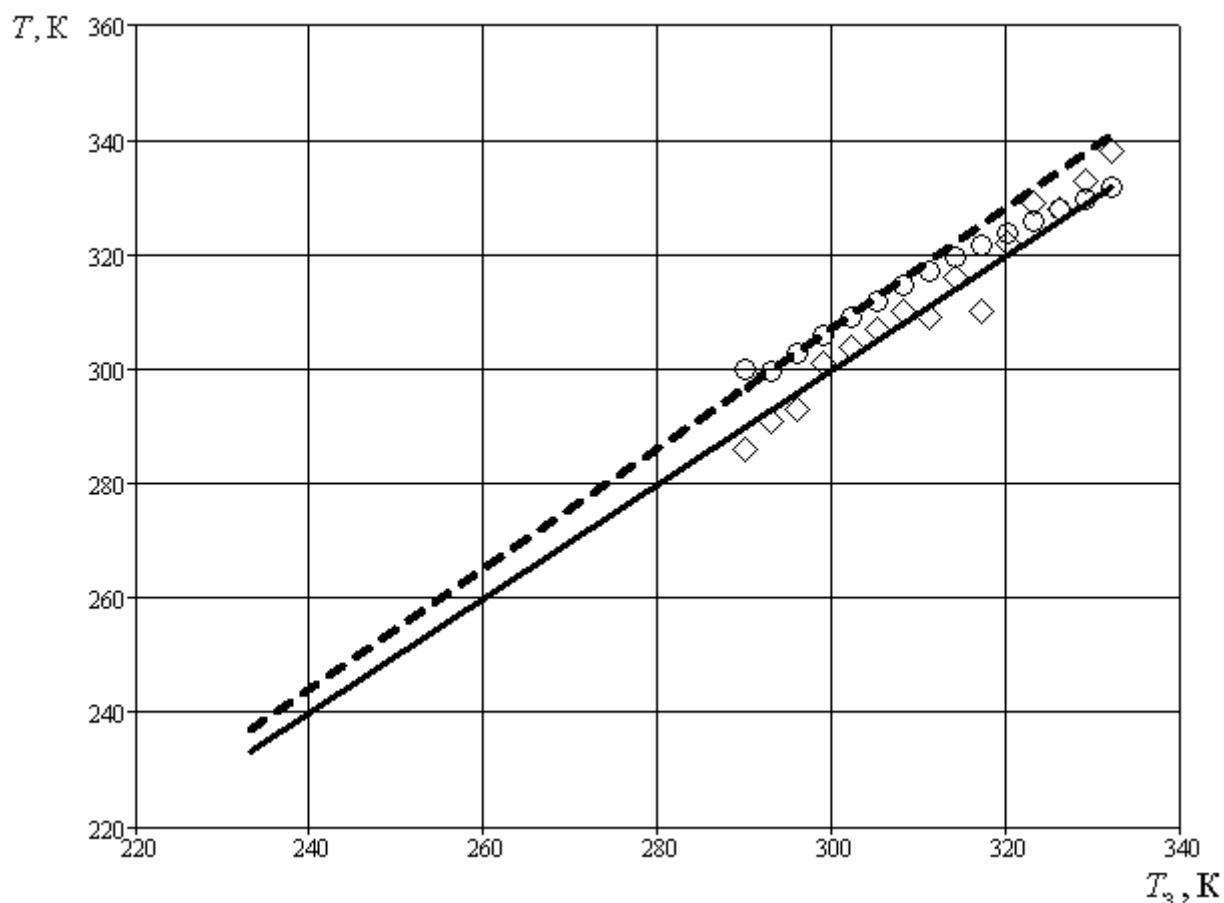


Рис. 2. График корреляции измеренной температуры T и устанавливаемой T_3 поверхности калиброванного излучателя

На этом рисунке приняты обозначения:

- — — — — результаты моделирования «идеального» пирометра;
- — результаты эксперимента с помощью макета трехспектрального пирометра;
- ◇ ◇ ◇ — результаты эксперимента с радиационным пирометром ThermoPoint TRT 8 ProPlus (фирма «FLIR Systems», США–Швеция);
- — — — — результаты математического моделирования работы оптического трехспектрального пирометром (данные согласно работы [2]).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2219504 Российская Федерация, МПК7 G 01 J 5/00. Пирометр истинной температуры [Текст] / Тымкул В. М., Лебедев Н. С., Шелковой Д. С., Воронин С. А.; заявитель и патентообладатель СГГА. – № 2002104325/28; заявл. 18.02.02; опубл. 20.12.03, Бюл. № 35. – 7 с.
2. Тымкул, В.М. Теория и математическая модель трехспектрального оптического пирометра [Текст] / В.М. Тымкул, Д.С. Шелковой // ГЕО-Сибирь-2008. Т. 4. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника: Ч. 1: сб. матер. IV Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2008», 22 – 24 апреля 2008 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2008. – С. 109–112.

3. Тымкул, В.М. Пирометр истинной температуры [Текст] / В.М. Тымкул, Н.С. Лебедев, Д.С. Шелковой // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. – Вып. 8. – Новосибирск, 2003. – С. 181–187.

© В.М. Тымкул, Д.С. Шелковой, 2009

УДК 681.586.73:(62+167/168)

В.Э. Каликин

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения,
Новосибирск

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СКОРОСТНАЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ИЗНОСА КОНТАКТНОГО ПРОВОДА В ДВИЖЕНИИ

V.E. Kalikin

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering (TDISIE)
Russkaya 41., Novosibirsk, 630058, Russian Federation

AUTOMATED FAST OPTICAL ELECTRONIC SYSTEM FOR WIRE WARE MEASUREMENT ON THE GO

Advanced automated optoelectronic system for contact wire wear inspection on the go using the method of structural illumination is presented. The algorithm of the video stream analysis and approaches to its implementation using high-performance electronic equipment are given. The automated system described has allowed measuring wear parameters with 10 mm interval at the inspection car's velocity of 60 km per hour. The root-mean –square error for the measurements of the remaining height and contact plot constitutes 0.15 and 1.5 mm² correspondently that allows one to make a considered decision about changing a worn section in a contact wire network.

1. Введение

Безопасность эксплуатации железнодорожного транспорта требует непрерывного контроля геометрических параметров изнашиваемых конструкций. Одна из актуальных на сегодняшний день задач железной дороги заключается в определении износа контактного провода и определении дефектов основных элементов контактной сети. В мире существует целый ряд внедренных автоматизированных систем [1–3], определяющих износ провода на ходу состава с помощью бесконтактного метода. В настоящее время на железных дорогах РФ износ контактного провода измеряется ручным микрометром, что помимо временных затрат требует временного обесточивания обмеряемых участков сети. Таким образом, задача автоматизированной бесконтактной дефектоскопии является одной из наиболее важных для железных дорог РФ.

В процессе эксплуатации контактный провод подвергается ряду дефектов, которые необходимо своевременно обнаруживать. Неизношенный контактный провод (рисунок 1а), и возможные дефекты показаны на рисунке 1 (b, c, d). Основной дефект, приводящий к увеличению удельного сопротивления и

вероятности разрыва провода – уменьшение площади поперечного сечения из-за трения о токоприемник (рисунок 1b). Износ провода характеризуется двумя основными параметрами (рисунок 1b), а именно: шириной контактной поверхности износа (w) и глубиной износа (D).

Были сформулированы следующие требования к системе: 1) разрабатываемый метод контроля должен быть бесконтактным; 2) система должна проводить измерение износа до 4х проводов в подвеске контактной сети одновременно, при этом, контролируемые провода могут находиться в любой точке пространства на расстоянии ± 500 мм от осевой линии по ширине и ± 750 мм по высоте; 3) погрешность измерений не должна превышать 0.2 мм; 4) система должна обеспечивать измерение параметров провода с шагом не менее 10 мм при скорости движения инспекционного вагона до 60 км/ч.

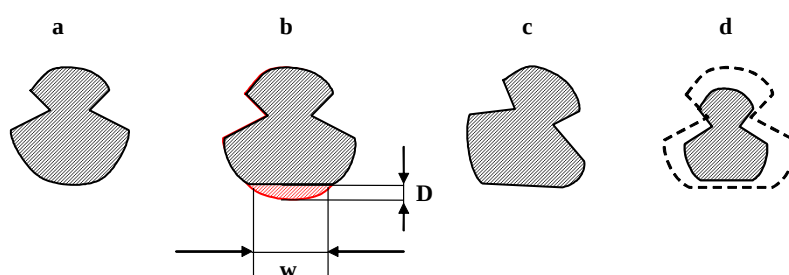


Рис. 1. Возможные дефекты контактного провода: а) неизношенный провод; б) стандартный износ; с) поворот; д) дефект «шейка»

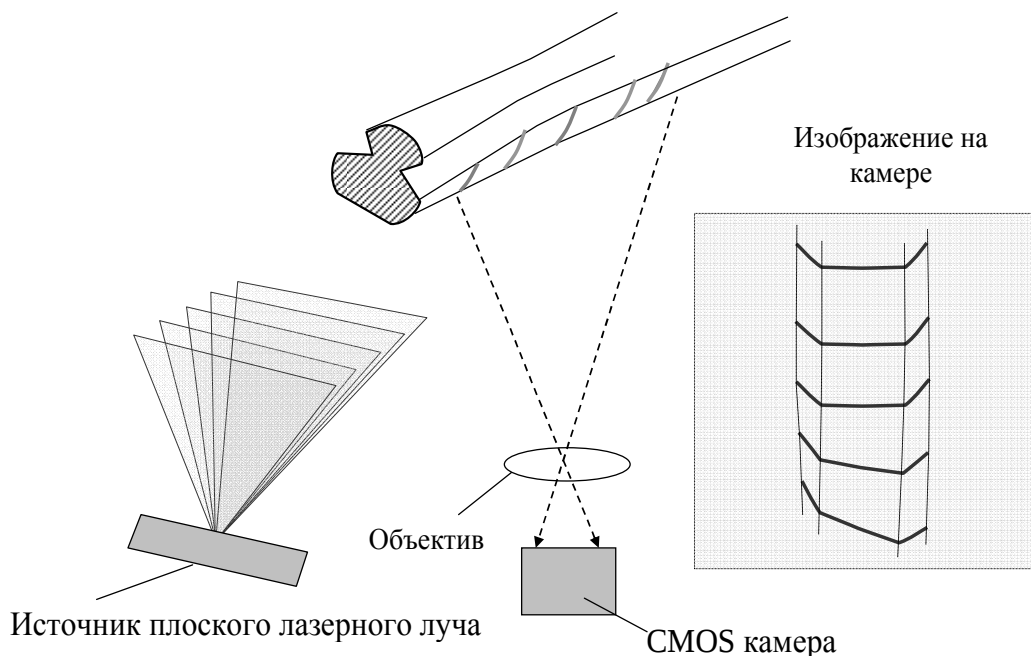


Рис. 2. Метод структурного освещения в приложении к измерению износа контактного провода

В данной работе представлено описание усовершенствованной (по сравнению с разработанным ранее макетом [8]) скоростной автоматизированной оптико-электронной системы контроля износа контактного провода.

2. Метод структурного освещения для измерения дефектов

Существует множество методов и систем контроля геометрических параметров промышленных изделий при их производстве и эксплуатации [4, 5]. Одним из наиболее простых и часто используемых методов контроля является теневой метод [6]. Для контроля контактного провода теневой метод неприменим ввиду особенностей конструкции контактной сети. Поэтому большинство автоматизированных оптических систем используют для определения износа метод измерения контактной площадки [1, 2]. Существенным недостатком данного метода является информационная ограниченность получаемого одномерного сигнала. Поэтому нами было предложено [8] использовать метод структурного лазерного освещения для диагностирования дефектов контактной сети (см. рис. 2). Осветителем формируется один или несколько веерных лучей, которые падают на поверхность провода под некоторым углом к его оси. С другого направления с помощью видеокамеры фиксируется излучение, рассеянное поверхностью провода, т. е. производится наблюдение световой формы кривой, образованной пресечением плоского луча с поверхностью провода. Более подробно метод и его возможности применительно к дефектоскопии контактного провода описаны в [7, 8].

3. Оптическая схема и элементная база

Изменение конфигурации оптической схемы модуля регистрации и элементной базы по сравнению с макетом [8] позволило снизить неопределенность измерений при большом износе провода и увеличить существенно скорость измерений. Конструктивно система состоит из измерительного модуля, расположенного на крыше инспекционного вагона, и станции накопления и обработки данных, расположенной внутри вагона. Измерительный модуль предназначен для получения первичной видеоинформации, содержащей данные о геометрических параметрах тестируемой контактной линии, и включает в себя осветитель с блоком регистрации изображения. В станции накопления и обработки данных осуществляется сбор информации, полученной с измерительного модуля, ее обработка и вычисление контролируемых параметров.

Лазерный осветитель обеспечивает заданное распределение интенсивности света во всем измерительном объеме, а блок регистрации – контрастное изображение, полученное с постоянным увеличением в любой точке этого объема. Для этого измерительный модуль перемещается перпендикулярно оси пути, синхронно с изменением положения провода, а расстояние от него до провода по высоте поддерживается постоянным.

Существенного повышения быстродействия блока регистрации удалось достичь путем использования высокоскоростной камеры A504k фирмы BASLER (США). Паспортная производительность камеры – 500 полных кадров в секунду. Оптическая схема измерительного модуля приведена на рис. 3.

Импульсный режим работы лазера обеспечивает высокую яркость рассеянного на поверхности контактного провода лазерного излучения, что значительно увеличивает соотношение сигнал/шум на регистрируемом изображении по сравнению с макетом системы. А малое время экспозиции решает проблему фоновой засветки. Таким образом, полученные снимки легче поддаются разбиению на связные области, что упрощает первичную фильтрацию снимков. Снимки сечений изношенного и неизношенного участков провода, полученные на частотах $\sim 1\ 000$ Гц с помощью структурного освещения, приведены на рис. 4.

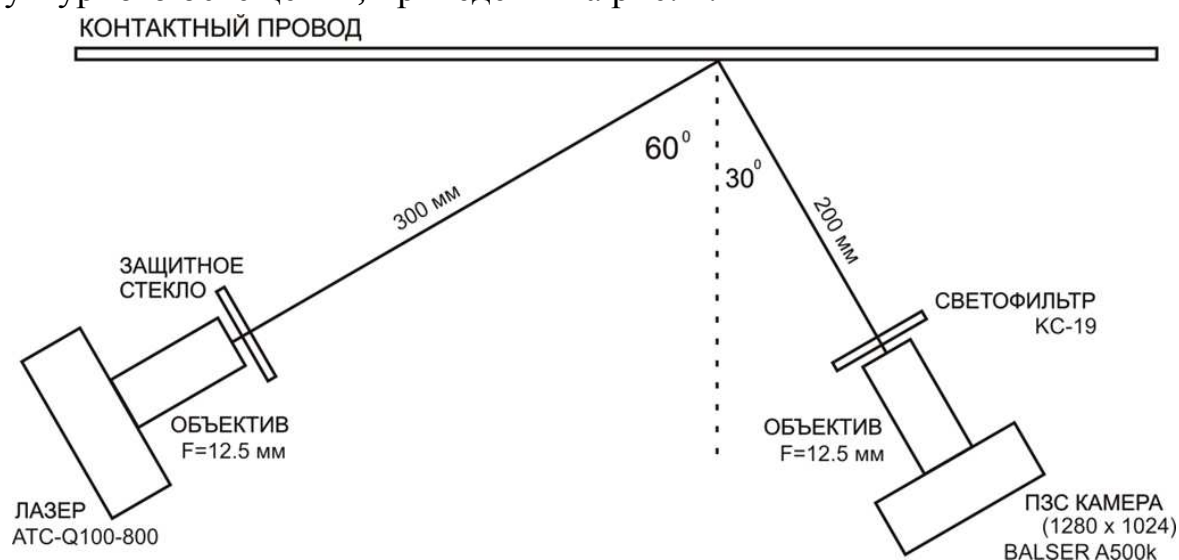


Рис. 3. Оптическая схема прототипа системы дефектоскопии контактного провода



Рис. 4. Снимки сечений неизношенного и изношенного участков (инвертировано)

Производительность новой системы ограничивается частотой импульсов лазера, который связан с фреймграббером видеопроцессора через синхронизирующую схему, и более не ограничена элементами самой видеосистемы (как было в макете системы). В заданном окне съемки $1\ 280 \times 128$ видеосистема без синхронизации с лазером позволяет получать до $2\ 000$ снимков в секунду.

С использованием видеопроцессора Matrox Odyssey Xpro+, а также стандартных программно-аппаратных решений в системе стала возможной адаптивная сегментация изображений в реальном времени, что в свою очередь повышает их коэффициент сжатия для последующего хранения.

Процессор также позволяет упростить работу со связными областями пикселей (BLOB).

4. Высокоскоростная обработка изображений

Первым шагом анализа изображения является нахождение информативных участков видеоизображения, т. е. участков кадра, содержащих изображение сечения провода лучом лазера. Такие участки ищутся как связные пиксельные области с достаточно большим числом пикселей. Для упрощения поиска эти связные компоненты отслеживаются на последовательности кадров во время проведения процедуры измерений.

Вместо тонкой линии сечения провода лучом лазера, видно распределение интенсивности излучения лазера с некоторой протяженностью вдоль провода. Предполагается, что сечение вдоль длины контактного провода слабо меняется на достаточно большом расстоянии, и поэтому можно найти центры масс по яркости для каждого вертикального столбца пикселей изображения, тем самым преобразовав распределение интенсивности в линию. Также необходимо учесть геометрическое искажение, обусловленное разными углами облучения и съемки провода [8]. Это является вторым шагом алгоритма анализа изображений (см. рис. 5).

После этого, путем обработки кривой, представленной найденными центрами масс, определяется профиль сечения провода. Для этого из всех найденных центров алгоритмически выделяются центры, принадлежащие неизношенной части провода (точки белого цвета на рис. 5). В этих областях поверхность провода в рассматриваемом сечении имеет форму круга, что позволяет статистическими методами вычислить центр контура сечения как центр круга, наиболее близкого к исходному набору точек (см. рис. 6).

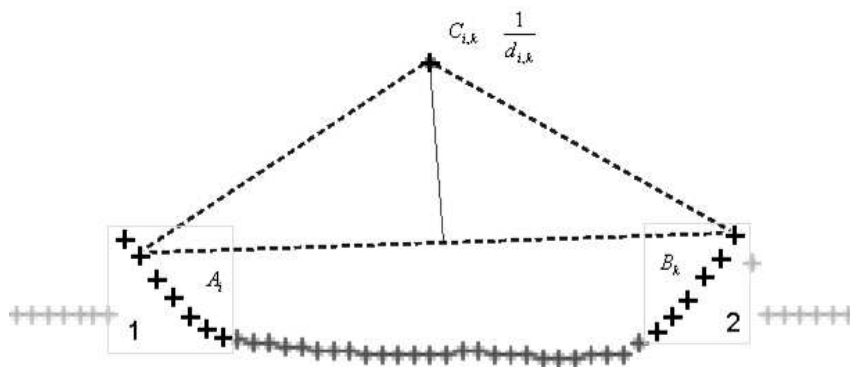


Рис. 5. Группы центров белого цвета используются для нахождения центра

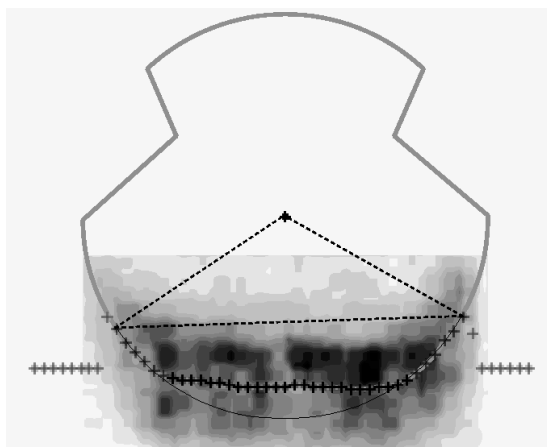


Рис. 6. По найденному центру восстановлен профиль сечения провода

Более детально алгоритм вычисления геометрического центра сечения выглядит следующим образом: а) производится перебор всех возможных сочетаний $(A_i B_k)$ где A_i пробегает все точки первой группы, а B_k второй (см. рис. 5); б) для каждого сочетания производится поиск центра круга $C_{i,k}$ с известным радиусом R содержащего обе точки; в) вычисляется среднеквадратическое отклонение $d_{i,k}$ всех точек обеих групп от круга, определенного на предыдущем шаге; г) после того как все комбинации перебраны, центр сечения определяется по формуле $C = (\sum_{i,k} C_{i,k} * \frac{1}{d_{i,k}}) / (\sum_{i,k} \frac{1}{d_{i,k}})$, то есть, находится центр масс определенных прежде точек $C_{i,k}$ с весами $\frac{1}{d_{i,k}}$.

Предполагается, что размер сечения и критическая высота износа определяются маркой провода и заданы изначально. Группы центров и результаты поиска профиля сечения показаны на рис. 5, 6.

Использование высокопроизводительной камеры и видеопроцессора потребовало новой программной реализации приведенного алгоритма. Основные шаги алгоритма анализа видеопотока были переформулированы в терминах библиотеки MIL 8.0 фирмы Matrox Imaging с использованием готовых алгоритмических решений, лежащих в ее основе. Делегирование задач адаптивной отсечки и последующей сегментации на большие связанные двоичные области, сокращенно BLOB, видеопроцессору позволило разгрузить CPU от операций по фильтрации первичного видеопотока, как это было реализовано в [8].

По завершении сессии на основе сохраненных данных создается файл отчета, содержащий исчерпывающую информацию о состоянии исследуемого участка.

5. Заключение

В данной работе представлено описание усовершенствованной автоматизированной оптико-электронной системы контроля износа контактного провода. Приведен алгоритм анализа видео-потока и подход к его реализации на высокопроизводительной элементной базе. Автоматизированная скоростная

система позволяет измерять параметры износа с шагом 10мм при скорости движения инспекционного вагона 60км/ч, погрешность (СКО) измерения высоты и площадки износа составляет 0.15 мм и 1.5 мм², соответственно, что позволяет принимать уверенно решения по замене изношенных участков контактной сети.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. S. Kusumi et al. Quarterly Report of RTRI, 2000, № 4, p. 169-172.
2. U. Richter, R. Schneider. Eisenbahningenieur, 2001, № 6, p. 18-23.
3. H. Nagasawa et al. Quarterly Report of RTRI, 2000, № 3, p. 117-119.
4. Galiulin Rav M et al. 2002 Optoelectronic computer aided systems for inspection of gas-turbine engine complex objects Proc. SPIE vol. 4900 ed Yu V Chugui, S N Bagaev, A Weckenmann, P H Osanna pp 178-184.
5. Weckenmann A and Nalbantic K, 2002 Measurement of conformity and wear of cutting tool inserts Proc. SPIE vol. 4900 ed Yu V Chugui, S N Bagaev, A Weckenmann, P H Osanna pp 541-547.
6. Gromilin O G, Kuchinskii K I, Ladygin V I, Yunoshev S P. 1999 J. Pattern Recognition and Image Analysis 9 (1), p. 141-142.
7. Skotheim O and Couweleers F, 2004 Structured light projection for accurate 3D shape determination Proc. 12th Int. Conf. on Experimental Mechanics (Bari, Italy, August, 2004) (McGraw-Hill).
8. V S Bazin et al., 2007 Optical remote inspection of live contact wire cross-sections in a train's electro-supply network. Proc. SPIE vol. 6280 ed Kuang-Chao Fan, Wei Gao, Xiaofen Yu, Wenhao Huang, Penghao Hu/

© В.Э. Каликин, 2009

УДК 535.4

Л.В. Тымкул

СГГА, Новосибирск

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ ПАССИВНОГО ТИПА

L.V. Tymkul

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

FUNCTIONAL COMPUTER SIMULATION OF WORK OF NIGHT VIEWING DEVICES PASSIVE TYPE

In work considered the technique of the functional computer simulation of night viewing devices work of passive type.

Вопросам разработки теории, математических и компьютерных моделей работы приборов ночного видения (ПНВ) посвящен ряд работ [1–6]. Так, в работе [1] рассмотрена теория формирования яркости изображения объектов и фонов на экране ПНВ активного и пассивного типов в приближении геометрической оптики. В этой же работе получены выражения для абсолютного и относительного контрастов изображения объектов на экране ПНВ. Следует отметить, что авторам этой работы удалось достаточно адекватно отразить основные функциональные составляющие оптического излучения, которые формируют суммарную яркость изображения объектов и фонов на экране ПНВ пассивного и активного типов. В порядке использования теории линейных систем применительно к ПНВ в работах [2, 3] нами с позиции физической оптики разработаны теория и математическая модель работы ПНВ активного и пассивного типов в неполяризованном свете. В этих работах получены математические модели пространственно-частотных спектров (ПЧС) яркости изображения объектов и фонов, а также аналогичные спектры абсолютного и относительного контрастов объектов, на основании которых представлена методика расчета дальности действия и разрешения ПНВ. В работах [4, 5] разработана математическая модель работы ПНВ пассивного типа в поляризованном свете и рассмотрены особенности компьютерного моделирования этого класса приборов как в поляризованном свете так и в неполяризованном свете. Работа [6] посвящена модели структурного описания ПНВ и компьютерной оценки дальности распознавания объектов наблюдения на основе геометрического соотношения между эквивалентным размером объекта и угловым разрешением системы «ПНВ – глаз».

Целью настоящей работы является разработка методики функционального компьютерного моделирования работы ПНВ пассивного типа.

В основу функционального компьютерного моделирования работы ПНВ пассивного типа заложены теория и математические модели, которые достаточно адекватно отражают оптико-физические и информационные основы их реального функционирования. При этом, адекватное отражение оптико-физических и информационных основ их функционирования содержит следующие положения:

- Физически правильное рассмотрение отражения направленного излучения Луны и полусферического излучения ночного неба сложной поверхностью наблюдаемого объекта;

- Учёт наличия излучения слоя атмосферы между объектом и прибором;

- Учёт наличия темнового свечения экрана электронно-оптического преобразователя (ЭОП) ПНВ;

- Формирование математической модели двумерного поля яркости изображения объекта и фона на экране ЭОПа ПНВ;

- Формирование пространственно-частотного спектра (ПЧС) яркости изображения объекта $L_i(\nu, \mu)$ и фона $L_o(\nu, \mu)$, а также ПЧС абсолютного $\Delta L(\nu, \mu)$ и относительного $K(\nu, \mu)$ контрастов на экране ЭОПа ПНВ;

- Учёт частотно-контрастных характеристик оптической системы прибора $h(\nu, \mu)$, ЭОПа $h_y(\nu, \mu)$ и глаза оператора $h_a(\nu, \mu)$, осуществляющих пространственную фильтрацию изображения объектно-фоновой обстановки;

- Выбор правильного критерия реализации прибором функционального решения поставленной задачи (обнаружение, распознавание, идентификация), который адекватно отражает информационный процесс работы глаза оператора;

- Формирование математических соотношений, которые связывают пространственные частоты ν и μ элементов изображения по координатам x и y с критическими размерами a_x и a_y объекта, фокусным расстоянием f' объектива ПНВ, линейным увеличением V ЭОПа, дальностью решения поставленной задачи l и числом периодов N_p пространственной миры, разрешаемых вдоль критического размера объекта.

На основе работ [2-4] основные информационные соотношения в математических моделях, которые адекватно отражают работу ПНВ пассивного типа имеют следующий вид:

$$L_i(\nu, \mu) = [L_{i\dot{i}}(\nu, \mu) + L_{i\ddot{e}}(\nu, \mu) + L_{i\ddot{n}}(\nu, \mu)] \times h_i(\nu, \mu) \times \\ \times h_y(\nu, \mu) + L_y(\nu, \mu); \quad (1)$$

$$L_o(\nu, \mu) = [L_{o\dot{i}}(\nu, \mu) + L_{o\ddot{e}}(\nu, \mu) + L_{o\ddot{n}}(\nu, \mu)] \times h_i(\nu, \mu) \times \\ \times h_y(\nu, \mu) + L_y(\nu, \mu); \quad (2)$$

$$\Delta L(\nu, \mu) = |L_o(\nu, \mu) - L_i(\nu, \mu)|; \quad (3)$$

$$K(\nu, \mu) = \left| \frac{L_o(\nu, \mu) - L_\phi(\nu, \mu)}{L_o(\nu, \mu) + L_\phi(\nu, \mu)} \right|; \quad (4)$$

$$h_{\hat{i}}(\nu, \mu) = e^{-2\delta_{\hat{i}}^2(\nu^2 + \mu^2)}; \quad (5)$$

$$h_{\hat{y}}(\nu, \mu) = e^{-2\delta_{\hat{y}}^2(\nu^2 + \mu^2)}; \quad (6)$$

$$\nu = N_p \cdot l / a_x \cdot f' \cdot V; \quad (7)$$

$$\mu = N_p \cdot l / a_y \cdot f' \cdot V. \quad (8)$$

В выражениях (1) – (8), кроме указанных выше, приняты следующие обозначения:

$L_{\hat{i}\hat{i}}(\nu, \mu)$, $L_{\hat{i}\hat{e}}(\nu, \mu)$ – составляющие модуля ПЧС яркости изображения объекта, формирующиеся за счет подсветки излучением ночного неба и Луны;

$L_{\hat{o}\hat{i}}(\nu, \mu)$, $L_{\hat{o}\hat{e}}(\nu, \mu)$ – составляющие модуля ПЧС яркости изображения фона, формирующиеся за счет подсветки излучением ночного неба и Луны;

$L_{\hat{n}}(\nu, \mu)$, $L_{\hat{y}}(\nu, \mu)$ – модуль ПЧС соответственно яркости изображения слоя атмосферы между объектом и прибором и свечения экрана ЭОПа;

δ_o , $\delta_{\hat{y}}$ – диаметр пятна рассеяния объектива и ЭОПа ПНВ соответственно.

Следует отметить, что составляющие модуля ПЧС яркости изображения объекта получаются на основе прямого преобразования Фурье:

$$L_{\hat{i}\hat{i}}(\nu, \mu) = L_{\hat{i}\hat{i}} \left[\left(\frac{1}{S_o} \right) \left| \iint_{S_o} \beta_{\hat{i}}(\psi_{\hat{i}}) e^{-j2\pi(\nu x + \mu y)} dx dy \right| \right]; \quad (9)$$

$$L_{\hat{i}\hat{e}}(\nu, \mu) = L_{\hat{i}\hat{e}} \left[\left(\frac{1}{S_o} \right) \left| \iint_{S_o} \beta(\psi_{\hat{i}}) e^{-j2\pi(\nu x + \mu y)} \cos \psi_{\hat{e}} dx dy \right| \right]; \quad (10)$$

$$L_{\hat{n}}(\nu, \mu) = L_{\hat{n}} \left[\left(\frac{1}{S_o} \right) \left| \iint_{S_o} e^{-j2\pi(\nu x + \mu y)} dx dy \right| \right]; \quad (11)$$

$$L_{\hat{y}}(\nu, \mu) = L_{\hat{y}} \left[\left(\frac{1}{S_o} \right) \left| \iint_{S_o} e^{-j2\pi(\nu x + \mu y)} dx dy \right| \right]. \quad (12)$$

В этих формулах приняты следующие обозначения:

$\beta(\Psi_n)$ – индикатриса коэффициента яркости отражения покрытия поверхности объекта при направленном освещении;

$\beta_n(\Psi_n)$ – индикатриса коэффициента яркости отражения покрытия поверхности объекта при полусферическом освещении;

S_o – площадь поверхности объекта в пространстве изображений;

Ψ_n, Ψ_n – угол между нормалью к элементу поверхности объекта и направлением на Луну и на наблюдателя;

$L_{\hat{I}i}$, $L_{\hat{I}e}$ – составляющие яркости в изображении объекта, которые формируются за счет подсветки соответственно излучением неба и Луны;

$L_{\hat{n}}$ – яркость в изображении объекта, которая формируется рассеянным излучением слоя атмосферы между объектом и прибором;

$L_{\hat{y}}$ – яркость темнового свечения экрана ПНВ.

В свою очередь модули ПЧС яркости изображения фона на экране ПНВ получают аналогично соотношениям (9)–(12).

Алгоритм компьютерного моделирования работы ПНВ пассивного типа и его структуру нами рассмотрен в работе [5], поэтому на нем останавливаться нет необходимости. Тем не менее, отметим следующий существенный момент, который касается выбора критерия реализации прибором функционального решения поставленной задачи. Для того, чтобы этот критерий отражал информационный процесс работы глаза оператора, нами предлагается одновременное выполнение следующих условий для абсолютного и относительного контрастов:

$$\Delta L(\nu, \mu) = |L_o(\nu, \mu) - L_{\phi}(\nu, \mu)| \geq m \cdot L_y(\nu, \mu); \quad (13)$$

$$K(\nu, \mu) = \left| \frac{L_o(\nu, \mu) - L_{\phi}(\nu, \mu)}{L_o(\nu, \mu) + L_{\phi}(\nu, \mu)} \right| \geq K_n, \quad (14)$$

где m – отношение сигнал/шум в изображении объекта на экране ПНВ;

K_n – пороговый контраст глаза оператора-наблюдателя.

При этом выдача значения дальности решения поставленной задачи l_p при моделировании соответствует следующему условию:

$$l_p = l(N_p) \Big|_{\Delta L(\nu, \mu) = m \cdot L_y(\nu, \mu); K(\nu, \mu) = K_n}. \quad (15)$$

Информационное обеспечение функционального компьютерного моделирования работы ПНВ было реализовано программой в среде Borland Delphi 7.

Для подтверждения достоверности предлагаемой методики функционального компьютерного моделирования работы ПНВ, в работе проведены исследования зависимости дальности обнаружения, распознавания и идентификации ПНВ МПН-8КМ от наблюдаемого контраста K_n и метеорологической дальности видимости S_m .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сухопаров, С.А. К вопросу дальности действия приборов ночного видения [Текст] / С.А. Сухопаров, Б.А. Пизюта // Труды НИИГАиК/ НИИГАиК.- 1974.-Т.32.-С. 45-48.
2. Тымкул, Л.В. Оптико-математическая модель приборов ночного видения пассивного типа [Текст] // Сб.тез. докл. Междунар. конф. "Прикладная оптика–2000" / Л.В. Тымкул, В.М. Тымкул - СПб, 2000. – С. 216.
3. Тымкул, В.М. Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета [Текст]: учеб. пособие / В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул. – Новосибирск: СГГА, 2005. – 215 с.

4. Тымкул, Л.В. Математическая модель работы приборов ночного видения в поляризованном свете [Текст] // сб. материалов III Междунар. науч. конгр. "ГЕО-Сибирь-2007", 25-27 апр. 2007 г., г. Новосибирск. Т.4. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника Ч.2. / Л.В. Тымкул. – Новосибирск: СГГА, 2007. – С. 14-18.

5. Тымкул, Л.В. Компьютерное моделирование работы приборов ночного видения в поляризованном и неполяризованном свете [Текст]// сб. материалов IV Международного науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2008», 22-24 апр. 2008 г., г. Новосибирск. Т.4. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника. Ч.2./ Л.В. Тымкул, И.В. Валиахметов. – Новосибирск: СГГА, 2008. – С. 161-164.

6. Малинин, В.В. Функциональное компьютерное моделирование телевизионных приборов ночного видения [Текст]: сб. материалов III Международного науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2007», 25-27 апреля 2007 г., г. Новосибирск. Т.4. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника. Ч.1. / В.В. Малинин, З.М. Цепиногова, Г.Н. Попов, Г.А. Моисеенко, В.В. Моисеенко. - Новосибирск: СГГА, 2007. – С. 29-33.

© Л.В. Тымкул, 2009

УДК 004:[681.7+621.38]

П.А. Звягинцева, Е.В. Грицкевич

СГГА, Новосибирск

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ КООРДИНАТ ТОЧЕК НА МЕСТНОСТИ

P.A. Zvyagintseva, Ye.V. Gritskevich

SSGA, Novosibirsk

COMPUTER MODEL OF OPTO-ELECTRONIC MEASURER OF THE AREA COORDINATE POINTS

The paper deals with the problem of modeling optoelectronic systems on the basis of area imagers for point objects coordinates determination. The conclusion is made on the possibility to calculate the optimal radius of the lens scattering circle by the criterion of measurement errors minimization.

В настоящее время на кафедре оптико-электронных приборов Института оптики и оптических технологий Сибирской государственной геодезической академии проводятся исследования в области компьютерного моделирования оптико-электронной системы измерения координат (ОЭСИК) светящихся точечных объектов.

Структурно-функциональная схема моделируемого прибора показана на рис. 1.

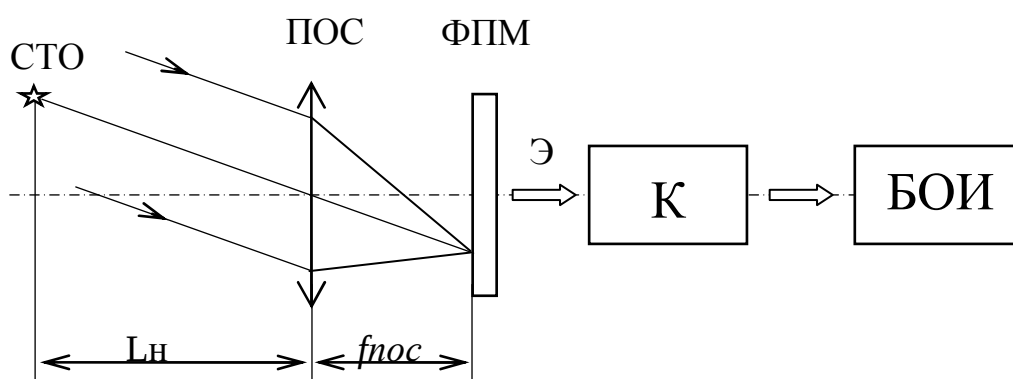


Рис. 1. Структурно-функциональная схема моделируемого прибора

Светящийся точечный объект (СТО), находящийся вне оптической оси приемной оптической системы (ПОС) на расстоянии L_n значительно большем, чем фокусное расстояние f_{noc} , проецируется в плоскость фотоприемной

матрицы (ФПМ), находящейся в фокальной плоскости (ПОС). Последняя создает изображение этой точки в виде кружка рассеяния в соответствии с функцией рассеяния точки (ФРТ) ПОС. Накопленные матрицей заряды в виде числовых кодов записываются в память компьютера (К), который обрабатывает их и передает координаты объекта в блок отображения информации (БОИ).

Сначала в модели генерируются входные воздействия в виде светящейся точки с заданными координатами. Затем рассчитывается распределение освещенности в плоскости ФПМ. После этого моделируется процесс накопления зарядов в элементах матрицы с учетом внутренних шумов фотоприемника. На последнем этапе проводится цифровая обработка матрицы отсчетов и определяются координаты объекта. Эти координаты сравниваются с заданными, и вычисляется погрешность измерения.

На рис. 2 показана конкретная реализация картины распределения зарядов по одной строке матрицы (нижняя часть рисунка) в идеальном случае отсутствия шумов при гауссовом распределении энергии в кружке рассеяния (верхняя часть рисунка). На рис. 3 воспроизведена ситуация при наличии шумов.

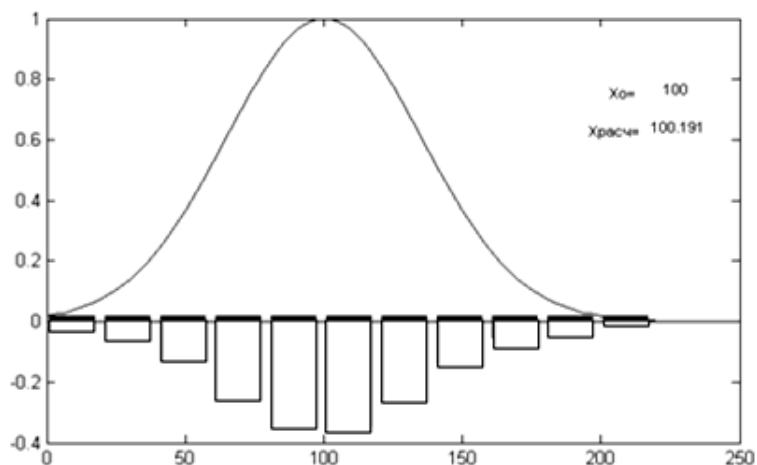


Рис. 2. Распределение зарядов в отсутствие шумов

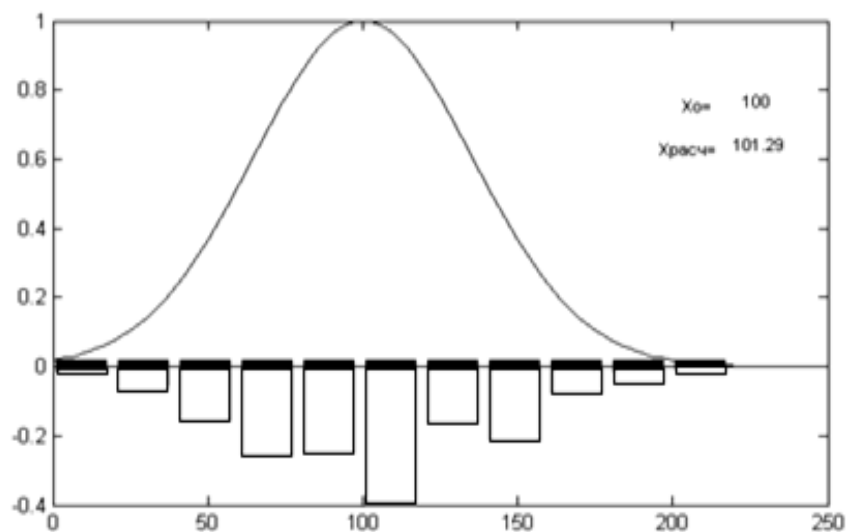


Рис. 3. Распределение зарядов при наличии шумов

Кружок рассеяния точки, создаваемый объективом считается гауссовым и задается радиусом, при котором внутри кружка сосредоточено 85 % всей световой энергии, падающей на фотоприемник от точечного объекта [1].

Для повышения наглядности и интерпретируемости получаемых результатов будет рассматриваться распределение зарядов только по одной строке матрицы. Величина темнового заряда, накапливаемого в каждом элементе, задается в долях от максимального заряда (от объема потенциальной ямы). Шумы считаются "белыми". Их величина задается в долях от сигнального (включая темновой) заряда, накопленного в отдельной ячейке.

В модели предусматривается возможность оптимизации системы по критерию минимума погрешности измерения координат точки. Параметром оптимизации является радиус абберрационного кружка ПОС.

Суть оптимизации по кружку рассеяния показана на рис. 4.

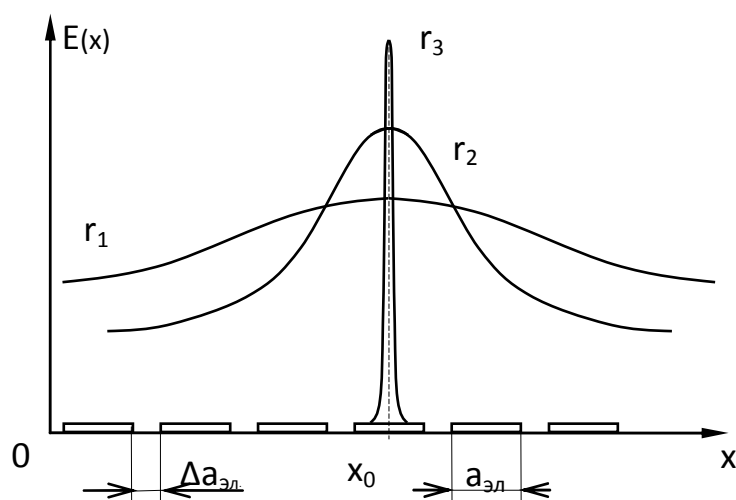


Рис. 4. Принцип оптимизации по ФРТ

В нижней части рисунка (по оси Ox) приведен разрез «линейки» фотоприемников, состоящей из отдельных элементов размером $a_{эл}$ каждый, с зазором между ними $\Delta a_{эл}$, а в верхней части (над «линейкой») приведены три случая гауссовых кривых, аппроксимирующих ФРТ ПОС с радиусами кружков рассеяния $r_1 > r_2 > r_3$.

В третьем случае весь накопленный заряд сосредоточится только под одним элементом, что не позволит точно рассчитать исходную координату x_0 . Для большего радиуса r_2 такая возможность появляется за счет включения в процесс обработки сигнальных зарядов других элементов. Таким образом, «ухудшение» параметров ПОС приведет к уменьшению погрешности измерения. При слишком большом радиусе r_1 разница между отдельными сигнальными зарядовыми пакетами «утонет» в шумах, и точность будет потеряна. Таким образом, существует оптимальный размер радиуса при заданных параметрах матрицы, который и даст наилучший с точки зрения минимизации погрешности измерения результат.

Проиллюстрируем вышесказанное с помощью конкретных результатов, полученных при имитационном моделировании ОЭСИК. На рис. 5 показан интерфейс программы с вводимыми данными и полученными результатами.

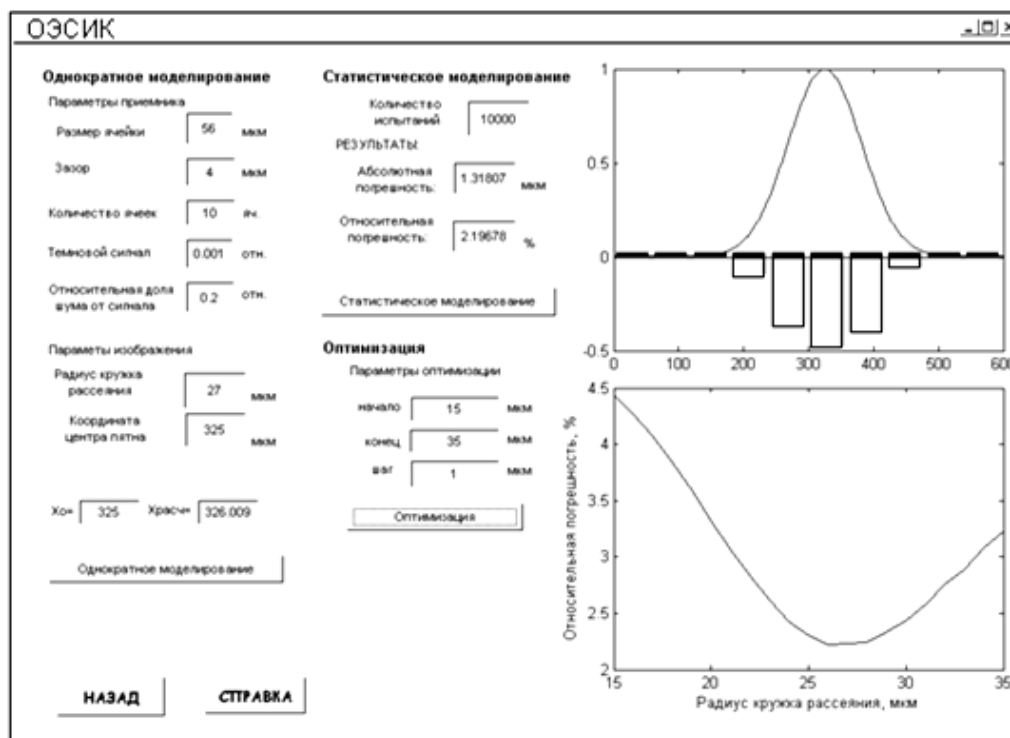


Рис. 5. Интерфейс программы после работы

Радиус кружка рассеяния меняется от 15 до 35 мкм. Для каждого значения радиуса погрешность измерения усреднялась по 10000 испытаниям. Использовался метод многократных статистических испытаний.

В правом нижнем углу выводится график соответствующей зависимости. Результаты полностью соответствуют ранее сделанным выводам. При увеличении радиуса погрешность снижается, достигая своего минимума при гкр ≈ 27 мкм. Можно сделать вывод, что для анализируемого фотоприемника оптимальным является объектив, создающий в плоскости изображения кружок рассеяния радиусом гкр ≈ 27 мкм. При этом минимальная относительная погрешность измерения составила 2,2 % от шага расположения элементов линейки фотоприемников.

Таким образом, можно говорить об оптимизации системы в целом по кружку рассеяния объектива. Рассмотренный пример компьютерного моделирования виртуального прибора позволяет сделать вывод о том, что разработанная модель может использоваться для оптимизации и исследования реальных ОЭСИК.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Якушенков, Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: Учебник для вузов. – М.: Логос, 2004. – 472 с.

УДК 681.7

М.П. Егоренко, В.С. Ефремов

СГГА, Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЕ ХРОМАТИЗМА МНОГОСПЕКТРАЛЬНОГО ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОГО ОБЪЕКТИВА

M.P. Yegorenko, V.S. Yefremov

SSGA, Novosibirsk

RESEARCH OF MULTISPECTRAL MIRROR-LENS CHROMATISM

Chromatic properties of Mangin mirror lens are considered concurrently in visual and thermal imaging (3–5 and 8–12 μm) spectral ranges with different combinations of the design values. The graphs of chromatic sums against surface-thickness and radius curvature have been produced. The ranges of the least chromatic sums variations due to the design values have been found in order to achieve optimal compensation of aberrations in the system “positive lens and Mangin mirror plus meniscus”.

В последние десятилетия появились оптические устройства, которые работают одновременно в видимом и инфракрасном спектральных диапазонах, что значительно расширяют эксплуатационные свойства изделия. Для построения подобных систем требуется соответствующая оптическая элементная база, позволяющая добиться необходимого качества изображения в рабочих участках спектра. Однако вследствие ограниченного выбора подходящих материалов, в известных оптических схемах применяются оптические кристаллы, как правило, плохо сочетаемые по оптическим и физико-химическим свойствам.

В связи с этим определенный интерес могут представлять зеркально-линзовые объективы, состоящие из положительной линзы и зеркала Манжена (рис. 1), выполненных из одного материала [1].

Исследование хроматических свойств зеркала Манжена ранее проводились в работах [2, 3] Д. Д. Максutowым и Д. В. Гавриловым, однако, рассматривался только визуальный диапазон спектра.

Попытка исследования хроматизма увеличения объектива была предпринята в работе [4], которая показала, что хроматизм увеличения не зависит от материала оптических деталей, а определяется оптической силой составляющих объектив компонентов. В настоящей статье проведено дальнейшее исследование хроматических свойств объектива численными методами с целью определения области возможных решений и интервалов изменения отдельных конструктивных параметров объектива. Именно,

рассматривается изменение хроматической суммы $S_{\text{Пхр}}$ в зависимости от толщины и оптической силы компонентов объектива.

Поскольку на качество изображения систем с фотоприемниками большее значение оказывает хроматизм увеличения, то в качестве примера на рис. 2 приведены графики изменения $S_{\text{Пхр}}$ от толщины линзы и системы «зеркало Манжена + мениск». Здесь и на последующих, рисунках принята единая система обозначений графиков: 1 – линза, рабочий диапазон $\Delta\lambda = 0,5 - 0,9$ мкм; 2 – линза, рабочий диапазон $\Delta\lambda = 3 - 5$ мкм; 3 – линза, рабочий диапазон $\Delta\lambda = 8 - 12$ мкм; 4 – система «зеркало Манжена + мениск», рабочий диапазон $\Delta\lambda = 0,5 - 0,9$ мкм; 5 – система «зеркало Манжена + мениск», рабочий диапазон $\Delta\lambda = 3 - 5$ мкм; 6 – система «зеркало Манжена + мениск», рабочий диапазон $\Delta\lambda = 8 - 12$ мкм.

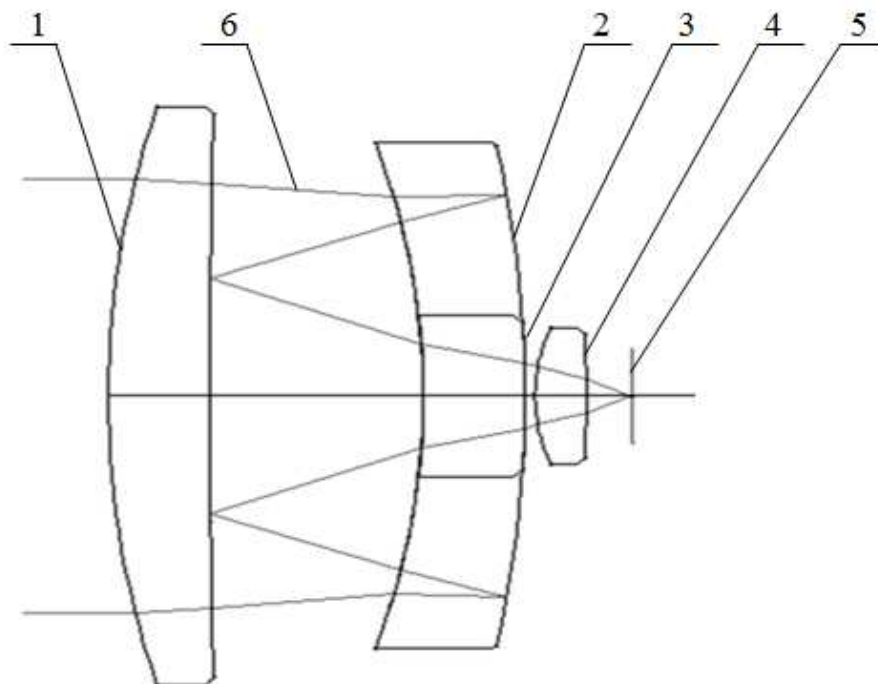


Рис. 1. Оптическая схема многоспектрального зеркально-линзового объектива:
1 – афокальный компенсатор; 2 – зеркало Манжена; 3, 4 – полевой линзовый компенсатор; 5 – фокальная плоскость; 6 – апертурный луч

Видно, что изменение толщины оптических деталей объектива практически не влияет на изменение хроматизма увеличения объектива.

Более значительное влияние на изменение хроматической суммы $S_{\text{Пхр}}$, согласно [4], должны оказывать оптические силы линзы и зеркала Манжена и мениска.

Для рассмотрения влияния изменения оптических сил компонентов на $S_{\text{Пхр}}$ будем изменять радиусы R_1 , R_3 и R_4 первой, третьей и четвертой поверхностей объектива (радиус кривизны R_2 второй поверхности линзы на величину хроматизма практически не влияет) и введем нормировку:

$$K_1 = R_1/R_4; K_2 = R_3/R_4.$$

Это позволит представить на одном графике влияние изменения оптических сил отдельно взятых линзы, зеркала Манжена и мениска на $S_{\text{Пхр}}$ соответственно.

Чтобы оптическая сила линзы и зеркала Манжена оставались положительными, а мениска – отрицательной, область изменения коэффициентов K_1 и K_2 должна лежать в интервале от 0,1 до 1,0.

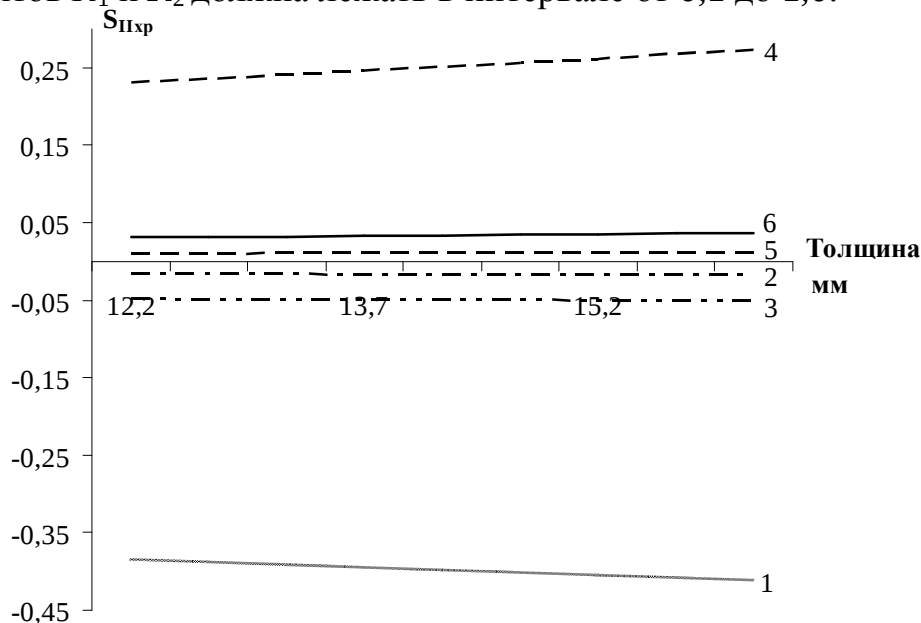


Рис. 2. Изменение $S_{\text{Пхр}}$ от толщины линзы и зеркала Манжена + мениска

На рис. 3 приведены графики изменения $S_{\text{Пхр}}$ в зависимости от изменения радиусов кривизны поверхностей линзы и системы «зеркала Манжена + мениск». Из графиков следует, что в области значений коэффициентов K_1 и K_2 от 0,33 до 0,43 имеется разрыв функции $S_{\text{Пхр}}$. Численные результаты расчета для рассматриваемых спектральных диапазонов приведены в таблице.

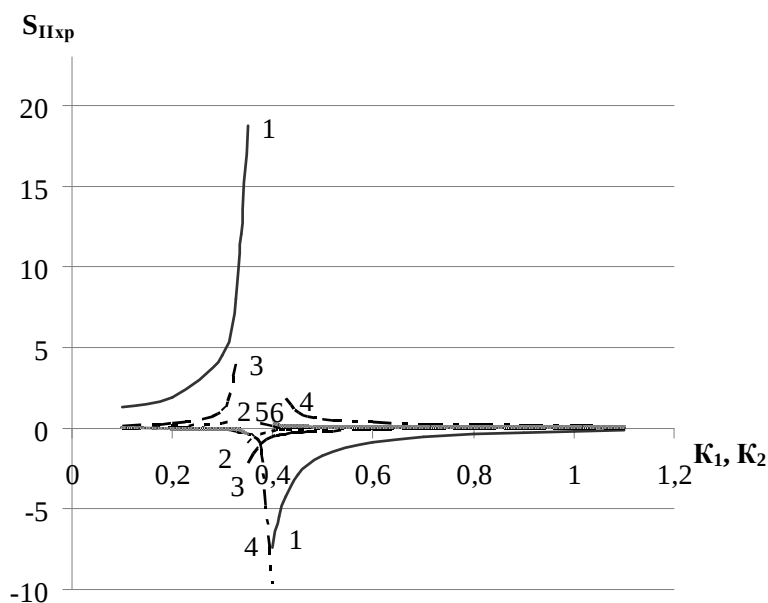


Рис. 3. Изменение $S_{\text{Пхр}}$ от оптической силы линзы, зеркала Манжена и мениска

Для дальнейшего анализа выберем часть графиков $S_{\text{Пхр}}$ на рис. 3, расположенную справа от линии разрыва с диапазоном изменения K_1 и K_2 от 0,5 до 1,0 (где хроматизм минимален). Изменение $S_{\text{Пхр}}$ в зависимости от оптической силы линзы и системы «зеркала Манжена + мениск» в указанном интервале значений K_1 и K_2 показано на рис. 4.

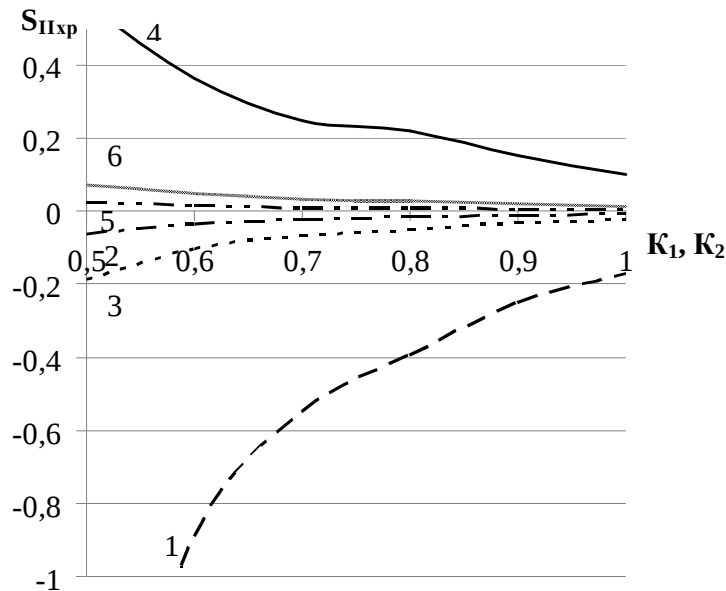


Рис. 4. Изменение $S_{\text{Пхр}}$ от оптической силы линзы, зеркала Манжена и мениска

Характер зависимостей на рис. 4 в целом соответствуют данным для видимой области спектра [5], согласно которым зеркало Манжена компенсирует примерно треть хроматической аберрации положительной линзы. Примерно такое же соотношение наблюдается и в спектральных интервалах 3 – 5 и 8 – 12 мкм, но сама величина $S_{\text{Пхр}}$ в инфракрасной области спектра существенно меньше (в ≈ 10 раз – для диапазона 3 – 5 мкм и в ≈ 20 раз – для диапазона 8 – 12 мкм).

Система «зеркало Манжена+мениск» компенсирует примерно половину хроматической аберрации положительной линзы, что открывает реальные возможности для дальнейшего уменьшения хроматизма, в частности, заменой зеркальной части первой линзы на второе зеркало Манжена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 10768558 СССР, МКИ 2 G02b 17/08. Зеркально-линзовый объектив [Текст] / Ефремов В.С., Павлюшенко Л.Н.; заявитель и патентообладатель ЦКБ «Точприбор»; заявл. 01.11.83; опубл. 12.06.84, Бюл. № 8. – С. 150.
2. Максutow, Д.Д. Астрономическая оптика [Текст] / Д.Д. Максutow, Д.В. Гаврилов. – Л.: Наука. – 1979. – 395 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. Егоренко, М. П. Расчет хроматизма увеличения многоспектрального зеркально-линзового объектива [Текст] / М. П. Егоренко // Изв. вузов Приборостроение. – 2007. - Т. 50, № 2. – С. 65–69.

5. Слюсарев, Г.Г. Расчет оптических систем [Текст] / Г.Г. Слюсарев. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние). – 1975.

© *М.П. Егоренко, В.С. Ефремов, 2009*

УДК 681.7:535.4

В.М. Ведерников, П.М. Дутов, А.И. Кокарев, В.П. Кирьянов, В.Г. Никитин, И.Г. Пальчикова, А.Р. Саметов, М.Ф. Ступак, Ю.В. Чугуй, В.В. Чуканов
Конструкторско-технологический институт научного приборостроения,
Новосибирск

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАБОТЫ В РЕЖИМЕ ПРОПУСКАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

V.M. Vedernikov, P.M. Dutov, A.I. Kokarev, V. P. Kiryanov, V.G. Nikitin, I.G. Palchikova, A.R. Sametov, M.F. Stupak, U.V. Chugui, V.V. Chukanov
Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering (TDI SIE)
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (SB RAS)
41, Russkaya str., Novosibirsk, 630058, Russia

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR CREATING SPECIALIZED TERAHERTZ BAND DIFFRACTION OPTICAL ELEMENTS APPLICABLE FOR HIGH-INTENSIVE TERAHERTZ RADIATION

Technologies of specialized polypropylene terahertz band transparent diffraction elements (SDE) fabrication by method of hot stamping in vacuum chamber are described. Experimental options of SDE samples are analyzed. Focal spot size dependence on polypropylene terahertz consumption is estimated.

В настоящее время активно развиваются направления современной науки, связанные с использованием терагерцового излучения. Применение терагерцового излучения предполагает решение целого ряда сложнейших технических задач, связанных с генерацией, управлением и детектированием волн субмиллиметрового диапазона. Для управления терагерцовым излучением наиболее часто применяются массивные внеосевые параболические зеркала. Однако возможности зеркал в части формирования фокальных областей с заданным распределением энергии в них весьма ограничены. Поэтому разработка специализированных дифракционных элементов (СДЭ) для этих целей является, несомненно, актуальной [1]. Характеристики используемого излучения являются важнейшим фактором, который необходимо учитывать при разработке СДЭ. Рассматриваемые в работе СДЭ пропускающего типа предназначены для управления излучением Лазера на Свободных Электронах (ЛСЭ) [2] Сибирского центра фотохимических исследований и технологий СО РАН. Излучение ЛСЭ имеет диаметр пучка ~ 100 мм, длительность импульса ~ 70 пс, рабочая длина волны перестраивается в диапазоне $0,12 \div 0,22$ мм. Длина когерентности излучения равна $\sim (1 \div 3)$ см, что соответствует длине светового

импульса. При такой длине когерентности возможно использование СДЭ. В то же время уникально высокая средняя мощность излучения (до 400 Вт) накладывает ограничения на выбор материалов подложки СДЭ и обуславливает необходимость проведения экспериментальных исследований коэффициентов поглощения и порогов разрушения СДЭ. В настоящей публикации представлены результаты работ по созданию специализированных пропускающих СДЭ терагерцового диапазона по технологии горячего прессования из листовых материалов в вакуумной камере.

1. Расчёт фазовой функции пропускания СДЭ

Простейший тип СДЭ – это дифракционная линза [3], фазовая функция пропускания которой вычисляется из таковой для безабберационной рефракционной линзы путём приведения функции к интервалу $[0, 2\pi)$. В первом порядке дифракции СДЭ реализуется фазовая функция пропускания $\frac{kr^2}{2f}$ сферической линзы в приближении Френеля. Здесь λ – рабочая расчётная длина волны излучения, k – волновое число, ρ – радиальная цилиндрическая координата в плоскости СДЭ, f – фокусное расстояние СДЭ. Чтобы выявить влияние равномерного поглощения излучения в материале СДЭ на распределение интенсивности в каустике, проведено численное моделирование дифракции излучения на СДЭ. Расчёт интенсивности в фокальной плоскости проводился в приближении Кирхгофа-Френеля. Амплитуда дифрагированного поля в каждой точке находилась как сумма амплитуд полей, дифрагированных на каждой из зон СДЭ. Поглощение линзы учитывается в виде дополнительного амплитудного коэффициента поглощения, зависящего от глубины профиля структуры СДЭ как $\exp\left(-\frac{\chi d}{2}\right)$, $d(\rho)$ – толщина СДЭ в зависимости от радиальной координаты, χ – коэффициент поглощения материала подложки ($\chi = 2,35 \text{ мм}^{-1}$).

На рис.1 приведены графики распределения интенсивности в фокусе дифракционной линзы без учёта поглощения (сплошная линия) и с учётом поглощения в линзе (пунктирная кривая). На рис. 1 видно, что характер распределения не меняется, размер фокального пятна сохраняется. Поглощение проявляется в уменьшении пика интенсивности и мощности излучения в пятне и приводит к нагреву СДЭ, что обуславливает деформацию зон и последующее их разрушение. Абберрации в фокальном пятне начинают проявляться на стадии деформации дифракционной структуры СДЭ.

2. Расчёт профиля поверхности пресс-формы

Профиль поверхности пресс-формы вычисляется путём обращения фазовой функции СДЭ. Структура поверхности представляет собой коаксиальные кольца, содержащие в себе по две зоны Френеля. Расчёт профилей поверхности в пределах каждого кольца проводится в среде программирования MathCAD.

В качестве иллюстрации на рис. 2 представлен расчётный профиль поверхности пресс-формы на периферии СДЭ.

Допустимые погрешности изготовления определяются требованием малости искажений формируемого волнового фронта в сравнении с длиной волны излучения, а именно: допустимая погрешность местоположения границы зоны составляет 5 мкм, допустимые неровности по полю – 2 мкм, угол заточки резца должен обеспечить ширину обратного ската на границе зоны на основании рельефа – не более 60 мкм. Перечисленные погрешности не препятствуют достижению оптического качества фокусировки с числом Штреля не менее 0,97.

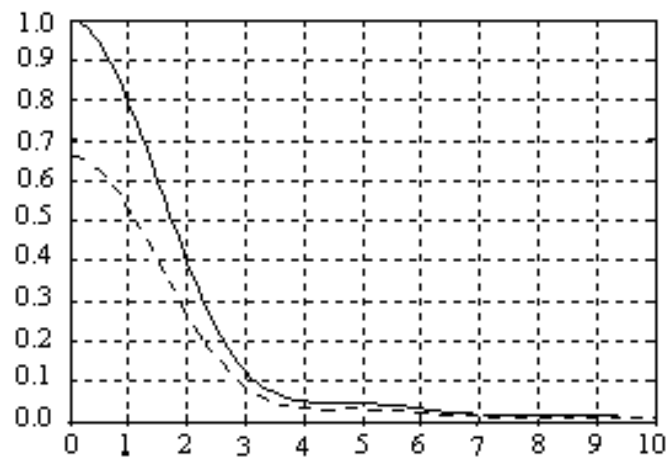


Рис. 1. Распределение интенсивности в фокусе дифракционной линзы радиусом 37,9 мм и фокусным расстоянием $f = 800$ мм без учёта поглощения в линзе (сплошная кривая) и с учётом поглощения в линзе (пунктирная кривая). По оси абсцисс отложено расстояние от оптической оси

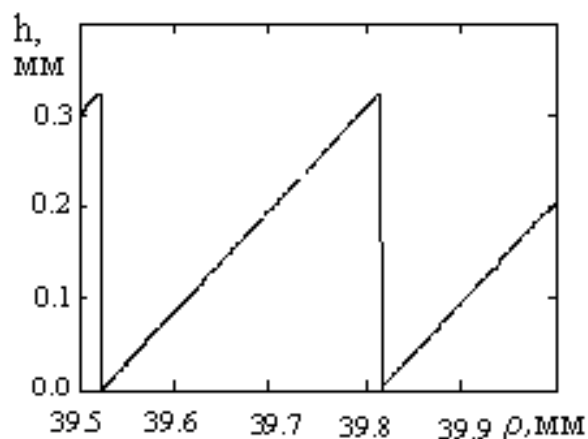


Рис.2. Профиль поверхности пресс-формы на периферии линзы с фокусным расстоянием $F = 80$ мм

Асферические СДЭ имеют монотонную фазовую функцию, содержащую полиномы от радиальной координаты порядка, выше второго. Это приводит к тому, что ширина зон на краю асферик уже, чем у сферических дифракционных линз. Этот факт накладывает более жёсткие ограничения на допустимые погрешности изготовления. Однако, если числовая апертура асферики $\sim 0,95$, и

рабочая длина волны не менее 130 мкм, то указанные выше погрешности являются допустимыми.

Реализованный программный блок для каждого дифракционного элемента непосредственно используется в процессе программирования станка при изготовлении пресс-формы.

3. Технология изготовления пропускающих СДЭ

В основе технологии изготовления СДЭ лежит метод прессования. Как показал эксперимент, наибольшие искажения рельефа СДЭ и однородности материала в процессе изготовления вносятся остатками воздуха в рабочем объёме пресс-формы. Удовлетворительное качество рельефа СДЭ было получено при использовании горячего прессования из листовых материалов в вакуумной камере. Комплект для прессования элементов в вакуумной камере представлен на рис. 3. Рабочие поверхности пресс-форм для модельного ряда СДЭ изготавливались алмазным точением на станках с ЧПУ. При изготовлении пресс-формы пришлось столкнуться с технологическим ограничением на крутизну обратного ската, связанным с углом заточки резца. Образующийся обратный скат, размером ≈ 50 мкм, приводит к падению дифракционной эффективности краевых зон СДЭ, достигающему 50 %. Это не сказывается на геометрических размерах фокального пятна, но снижает общую дифракционную эффективность СДЭ примерно на 15 %.



Рис. 3. Комплект деталей пресс-формы

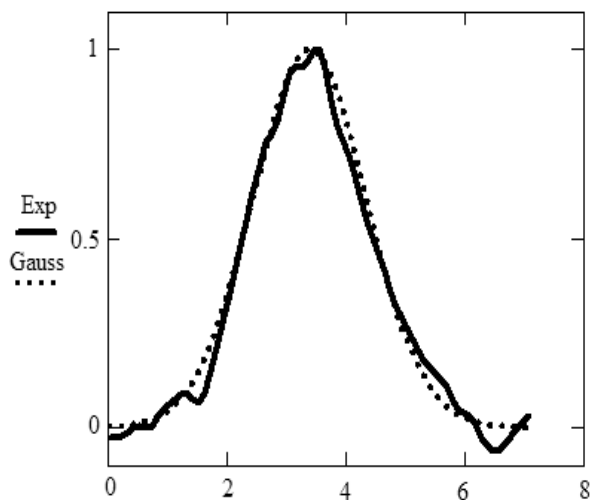


Рис. 4. Профиль гашения люминесценции в фокальной плоскости линзы

Для изготовления квазиоптических элементов необходимо использовать полимерные материалы, обладающие в терагерцовом диапазоне высоким пропусканием и относительно низким отражением. Наилучшими материалами [4] в этом смысле являются полиэтилен (polyethylene), полипропилен (polypropylene) и тефлон (polytetrafluoroethylene (Teflon)).

Используя известные [4] характеристики полиэтилена, оценим допустимую мощность пучка ЛСЭ, при которой СДЭ, изготовленный из этого материала, начнёт плавиться. При термодинамическом равновесии СДЭ плотность

поглощённой мощности излучения равна конвекционному оттоку тепла от его поверхности. Согласно, поглощённая мощность составляет в интересующем нас диапазоне длин волн примерно 20 % (для толщины образца равной 2 мм). За максимально допустимую температуру нагрева примем температуру плавления ($T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$), а температуру окружающей среды положим равной $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тогда для интенсивности излучения I_0 в каждой точке поверхности справедливо соотношение: $0,2 I_0 = 2\alpha(T - T_0)$, где коэффициент теплообмена $\alpha = 12\text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$. Отсюда следует, что $I_0 = 12\,000\text{ Вт/м}^2$. Полная допустимая мощность составит примерно 94 Вт, если считать пучок излучения с радиусом 50 мм однородным по сечению. Настоящим преимуществом СДЭ перед рефракционными является возможность изготавливать их в очень тонких подложках толщиной порядка 380 мкм. В этом случае ожидаемая лучевая стойкость будет выше оценочной.

Экспериментально изготавливались и исследовались образцы СДЭ из полипропилена и конструкционного органического стекла.

4. Экспериментальное исследование оптических характеристик СДЭ

Исследование оптических характеристик созданных СДЭ осуществлялось на одной из рабочих станций ЛСЭ. Излучение терагерцового диапазона подводится на металлическое зеркало, которое направляет излучение на поляризатор, с помощью которого устанавливается уровень излучения, необходимый для неискажённой регистрации излучения на люминесцентном экране.

Люминесцентный экран возбуждается ультрафиолетовым источником. Исследуемое излучение терагерцового диапазона производит тушение процесса люминесценции, причём эффективность тушения в каждой точке экрана пропорциональна падающей локальной мощности излучения терагерцового диапазона. Изменения в интенсивности люминесценции вещества экрана регистрируются с помощью ССД камеры. На рис. 4 приведены результаты измерения профиля гашения люминесценции, полученные после соответствующих нормировок в фокальной плоскости линзы (сплошная линия) и стандартное гауссово распределение (точечная линия). Измеренный диаметр фокального пятна (на уровне $1/e^2$) равен: 2,7 мм. При частичном заполнении светового диаметра линзы излучением, наблюдается уширение пятна.

Испытания СДЭ в пучке ЛСЭ с мощностью 100 Вт выявило чувствительность лучевой стойкости СДЭ к погрешностям изготовления пресс-формы. Локальное оплавление профиля началось в области линзообразной каверны в центре СДЭ примерно через 6 мин облучения. Это связано с локальным перегревом элемента в связи с паразитной концентрацией энергии. Локальные оплавления мелких элементов структуры СДЭ, образованных шероховатостью поверхности стальной матрицы пресс-формы существенной деградации пятна фокусировки не вызывали. Дополнительное конвекционное воздушное охлаждение и улучшение качества поверхности пресс-формы позволит СДЭ работать в пучке ЛСЭ с мощностью порядка 100 Вт.

5. Заключение

Разработанная технология позволит изготовить любой наперёд заданный модельный ряд СДЭ, даже таких у которых размер внешних зон сравним с

длиной волны терагерцового излучения. В результате исследования оптических характеристик изготовленных элементов выявлено, что значения диаметров пятна фокусировки этих элементов превышают дифракционный предел примерно на 10–15 %, что может быть связано, главным образом, с характером распределения энергии в пучке излучения и хроматической аберрацией ДОЭ из-за конечной ширины спектра излучения. Оптимизация и доработка созданной технологии позволит оснащать рабочие станции ЛСЭ специализированными селективными квазиоптическими элементами с высокой лучевой стойкостью.

6. Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИЯФ СО РАН профессору Б.А. Князеву и В.В. Герасимову за содействие в проведении экспериментов на ЛСЭ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Б.А. Князев, В.С. Черкасский. Отражающие дифракционные оптические элементы и их применение для управления излучением терагерцового лазера на свободных электронах. Вестник НГУ. Серия: Физика. 2006. Т. 1, вып. 2. С. 3–20.
2. Bolotin V.P., Vinokurov N.A., Kayran D.A. Et al. Status of the Novosibirsk terahertz FEL//Nuclear Instrument and Methods in Physics Research. A 543. 2005. p. 81–84.
3. I.G. Palchikova, V.P. Koronkevich. Modern zone plates. Optoelectronics, Instrumentation & Data Processing”, 1992, №1, p. 86–101.
4. http://www.tydex.ru/products/products6/thz_materials.html.

© В.М. Ведерников, П.М. Дутов, А.И. Кокарев, В. П. Кирьянов,
В.Г. Никитин, И.Г. Пальчикова, А.Р. Саметов,
М.Ф. Ступак, Ю.В. Чугуй, В.В. Чуканов, 2009

УДК 528.021.4

Е.В. Грицкевич

СГГА, Новосибирск

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Ye.V. Gritskevich

SSGA, Novosibirsk

POSSIBILITY OF USING AREA IMAGERS FOR GEODETIC PROBLEMS SOLUTION

Area imagers are suggested to be used in angle-measuring instruments to achieve higher accuracy due to the exclusion of human factors affecting measurement process. It is concluded that area imagers may be effectively used for solving the problems of locating the objects in the area.

Одной из основных геодезических задач, решаемых с помощью оптических приборов, является измерение углов. Визирную линию оптического прибора совмещают с каким-либо репером, находящимся в пространстве предметов, фиксируют положение прибора, снимают отсчет, а затем перемещают визирную линию (как правило, поворотом вокруг одной из осей, перпендикулярных оптической оси прибора) на другой репер, фиксируя новое положение прибора со снятием отсчета. Разница между двумя положениями оптической оси прибора, выраженная в угловой мере, и является элементарным «продуктом» геодезического производства.

Автоматизация геодезических работ до сих пор ограничивалась применением различных схем автоматической регистрации снимаемых отсчетов, а также решением вспомогательных задач типа совмещения вертикальной оси прибора с привязочной точкой. Наиболее ответственная операция – совмещение визирной линии прибора с репером – остаётся целиком «на совести» геодезиста, что вносит трудно учитываемую субъективную погрешность в углоизмерительный процесс.

Цель данной работы – восполнить этот пробел и предложить один из путей усовершенствования геодезических приборов с помощью применения матричных фотоприемников.

Рассмотрим фотоприемную матрицу, геометрический центр которой S жестко связан с оптической осью прибора.

Пусть размеры аэл элементов матрицы и зазоры $\Delta a_{эл}$ между ними одинаковы по вертикали и горизонтали. В плоскость матрицы проецируется изображение точечного источника излучения I . Изображение представляет из себя распределение интенсивности излучения вокруг точки I в соответствии с

функцией рассеяния точки (ФРТ) объектива. Перераспределение энергии пятна рассеяния на соседние элементы матрицы позволяет достаточно точно рассчитать координаты X и Y точки I в плоскости матрицы относительно «центральной» точки O . Для этого используются различные интерполяционные алгоритмы, например, метод определения «энергетического центра тяжести» изображения [1]. Погрешность измерения координат точки в плоскости изображения не превышает нескольких микрон. Допустим, что с помощью объектива с фокусным расстоянием $f_{oc} = 30$ см было получено в плоскости матрицы изображение бесконечно удаленной точки, для которой погрешность измерения координаты X составляет $\Delta x = 3$ мкм. В угловой мере такая погрешность даст результат приблизительно 20 угловых секунд, что вполне удовлетворяет потребностям современного геодезического производства.

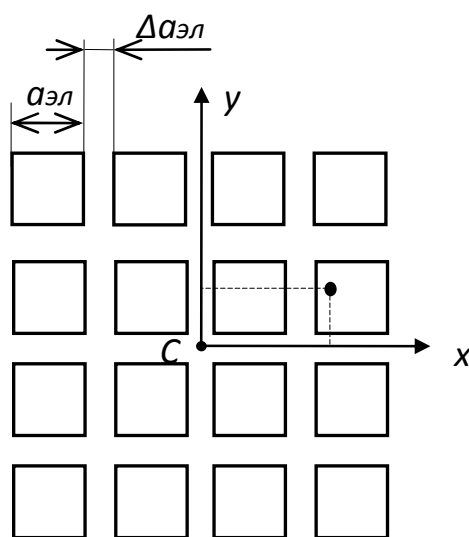


Рис. Схематичное изображение фотоприемной матрицы

Теперь представим себе, что матрица установлена в фокальной плоскости углоизмерительного прибора, а получаемое изображение выводится на дисплей, при этом прибор работает в режиме автоматического измерения координат точки. Тогда оператор «наводит» прибор на требуемую точку (репер), не добиваясь ее точного совмещения с оптической осью. Прибор автоматически зафиксирует дополнительный «поправочный» угол положения точки в поле зрения относительно оси прибора, суммирует эту поправку с базовым углом и запомнит результат. Под базовым понимается угол между положениями оптической оси в моменты снятия отсчётов по двум направлениям.

Таким образом, оператор освобождается от процедуры точного наведения прибора на репер, а сам процесс измерения и его погрешность не будут зависеть от субъективных факторов. В качестве реперов могут использоваться светящиеся точечные объекты, например, полупроводниковые лазеры, установленные на жестком основании (балка, рейка и т. п.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грицкевич, Е.В., Звягинцева, П.А. Разработка математической модели матричного анализатора/Е.В. Грицкевич//Гео-Сибирь – 2006. Т.4. Ч.1 Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника: Сб. материалов Международного научного конгресса, 25-27 апреля, 2006г, Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2007. – С.55-58.

© *Е.В. Грицкевич, 2009*

УДК 628.517.4, 539.3.

Г.В. Григорьева

СГГА, Новосибирск

А.И. Родионов

СГГА, НГТУ, Новосибирск

Г.С. Юрьев, В.Ф. Ким

НГТУ, Новосибирск

УЛУЧШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИОННЫХ СТЕНДОВ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

G.V. Grigorjeva

SSGA, NSTU, Novosibirsk

A.I. Rodionov

SSGA, NSTU, Novosibirsk

G.S. Yurjev, V.F. Kim

NSTU, Novosibirsk

IMPROVEMENT OF METROLOGICAL PERFORMANCE OF VIBRATION STANDS IN SPECIALIZED INSTRUMENT-MAKING

The paper deals with the device with anisotropically elastic element improving metrological performance of vibration stands in specialized instrument-making. The device was developed at the vibro-damping laboratory of Novosibirsk State Technical University guided by G.S. Yuryev. The development was caused by the fact that the motion of the vibrostand “table- product” system during the tests (with preset vibration effect along the operating axis) resulted in transverse vibrations of the product (and the table) with the amplitude exceeding the preset one by hundreds per cent. These vibrations had to be damped. Anisotropically elastic element serves as a basis of the device. It is placed between the vibration table and the test product. The characteristics of the element are as follows: rigidity in the direction of the operating axis, with vibration transfer coefficient being not less than 1; compliance in the direction of the transverse axis with minimal transfer coefficient.

Множество технологических процессов в специализированном приборостроении содержит операцию – испытание изделий на вибрацию. При этом вибрационное воздействие планируется определенным по направлению, частоте, амплитуде и др., согласно, например, условиям эксплуатации. Широкое распространение получила схема, в которой источником вибрации качающейся частоты является электродинамический вибратор (ЭДВ), на рабочем столе которого жестко устанавливается и закрепляется испытуемое изделие. Стол с изделием поддерживается упругими направляющими, обладающими повышенной жесткостью в поперечном по отношению к рабочей оси ЭДВ

направлении. Необходимое для испытаний возвратно-поступательное движение вибростола в направлении рабочей оси с заданными амплитудой и частотой обеспечивает «звуковая» катушка ЭДВ, питаемая управляющим током.

Предметом обсуждения является то, что при движении системы стол-изделие в процессе испытаний с заданным по рабочей оси вибрационным воздействием возникают поперечные колебания изделия (и стола) с амплитудой в сотни процентов по отношению к заданной.

Рабочий режим испытания изделия обычно не предполагает многократного запаса прочности, поэтому упомянутые перегрузки вызывают разрушительное действие или, по крайней мере, искажение результатов испытаний, что и послужило сигналом к началу наших исследований.

Действительно, в производстве изделий специализированного приборостроения при финишной операции – виброиспытании на определенной частоте регулярно происходил отказ электронной схемы и возврат изделия в производственный цикл. В другом случае при аттестации вибродатчиков на специально-калибровочном ЭДВ наблюдалось грубое искажение их метрологических характеристик на некоторых частотах за счет резонансно-поперечных колебаний стола, на котором закреплены вибродатчики, с амплитудой до 300% по отношению к рабочей.

Из всех опубликованных методов решения этой проблемы упомянем здесь о разработке лаборатории виброзащиты НЭТИ (НГТУ) под руководством Юрьева Г.С., переданной в виде технической документации и опытного образца заводу «ТОЧМАШ» и прошедшей там производственные испытания.

Основу устройства составляет анизотропно-упругий элемент, установленный между вибростолом и испытуемым изделием, достаточно жесткий в направлении рабочей оси ЭДВ, с коэффициентом передачи вибрации не менее единицы, и достаточно податливый в направлении поперечной оси, с минимальным коэффициентом передачи.

Из теории колебаний тела с анизотропно-упругими элементами подвески известно, что спектр собственных частот колебаний содержит группы низших и высших собственных частот с обширным безрезонансным диапазоном частот. Этот диапазон принимается в качестве рабочего, так что высшая из частот низшей группы должна быть не более низшей частоты рабочего диапазона ЭДВ с некоторым запасом.

Опытные образцы различных вариантов устройств по данному предложению разработаны, изготовлены и испытаны на ЭДВ типа ST – 1000, ST – 5000/300, УВЭ – 1/5000, УВЭ 50/5000, П – 810.

Простейшим фильтром поперечных колебаний является однородный гибкий стержень, установленный вдоль рабочей оси между подвижным элементом ЭДВ и объектом испытаний, причем последнему стержень служит единственно несущим элементом. В рабочем диапазоне одного из вариантов этого устройства 20–700 Гц, поперечные колебания составили не более 5 – 10 %. Если аналогичный стержень выполнен наборным (пучок пружинной проволоки с жестким защемлением по концам), рабочий диапазон расширяется до 2 000 Гц и более.

В другом варианте устройства, с «жидкостным фильтром», сопряжение подвижного элемента ЭДВ с объектом испытаний выполнено в виде цилиндропоршневой пары, ось которой совмещается с рабочей осью ЭДВ, а рабочее пространство ее заполняется жидкостью («жидкостный стержень», имеющий значительную площадь поперечного сечения и весьма малую длину). Гидрозаполнитель не обладает восстанавливающей силой в случае поперечного смещения его слоев, но имеет высокую жесткость на сжатие при увеличении площади и уменьшении толщины. Поэтому нижняя частота рабочего диапазона здесь приближается к нулю, а значение верхней достигает 3.5 кГц, поперечные колебания – за пределами чувствительности виброаппаратуры (менее 5 %). Проектные значения верхней границы рабочего диапазона, как показывают расчеты, могут превысить 5 кГц.

Рассматриваемые устройства могут применяться в специализированном приборостроении, как в составе эксплуатируемых ЭДВ, так и создаваемых вновь, вместо обычно применяемых вибростолов или в композиции с ними.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 1155803 РФ, МКИ6 F16F 13/00; F16F 3/02. Амортизатор./ Г.С. Юрьев // Изобретения. – 1993.

© Г.В. Григорьева, А.И. Родионов, Г.С. Юрьев, В.Ф. Ким, 2009

УДК 621.923

Л.А. Канушина, А.Н. Соснов, Н.К. Соснова
СГГА, Новосибирск

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕКЛА НА МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ

L.A. Kanushina, A.N. Sosnov, N.K. Sosnova
SSGA, Novosibirsk

GLASS THERMAL CHARACTERISTICS EFFECT ON FRACTURE MECHANISM

The paper describes the possibility of achieving brittle failure of different kinds of glass by means of stresses due to the difference of temperatures of the glass blanket and the liquid coolant striking the glass surface.

Явления, сопровождающие процесс шлифования, представляют собой комплекс механических и тепловых воздействий. При анализе кинетики разрушения поверхностного слоя стекол можно отметить хрупкое разрушение, возникающее при достаточно глубоком внедрении алмазных зерен, и хрупкое разрушение, возникающее за счет напряжений, вызванных термическими деформациями. Термические напряжения возникают за счет разности температур поверхностного и подповерхностного слоев, которые при высоких скоростях, присущих алмазному шлифованию, достигают значительных значений.

Если рассматривать зерно как резец с отрицательным передним углом, источниками теплоты в зоне контакта алмазного зерна и стекла будут: деформация материала, трение стружки по передней поверхности и трение задней поверхности зерна и стекла. Контактные температуры при этом достигают 523–773°K [1]. В процессе нагрева быстро возрастает температура поверхностного слоя, внутренние слои прогреваются значительно медленнее. В поверхностных слоях возбуждаются сжимающие напряжения, которые возрастают с повышением температуры. Последующее охлаждение СОЖ приводит снова к напряженному состоянию, но уже между подповерхностными и наружными слоями, то есть напряжениям с обратным знаком. Таким образом, поверхностные слои стекла при шлифовании алмазным инструментом подвергаются циклическим напряжениям, что приводит к термоусталости.

Характерным для явления термоусталости массивных тел является большая неоднородность тепловых и термонапряженных состояний. Степень этой неоднородности зависит от теплофизических свойств материала:

теплоемкости, теплопроводности и температуропроводности, от коэффициента термического расширения и модуля упругости Юнга.

Способность материала сопротивляться термоупругим напряжениям оценивается критерием термостойкости R:

$$R \cong \sigma (1 - \mu) / \alpha E, \quad (2)$$

где σ – предел прочности на сжатие;

μ – коэффициент Пуассона;

α – коэффициент термического расширения;

E – модуль упругости Юнга.

Термостойкость стекла зависит от частоты теплосмен по экспоненциальному закону и от градиента температур, а это значит, что при достаточно большом перепаде температур разрушение может наступить уже при однократном перепаде. Трещины при таком разрушении имеют вид лепестков, расположенных между поверхностным и подповерхностным слоями, как показано на рисунке 1.

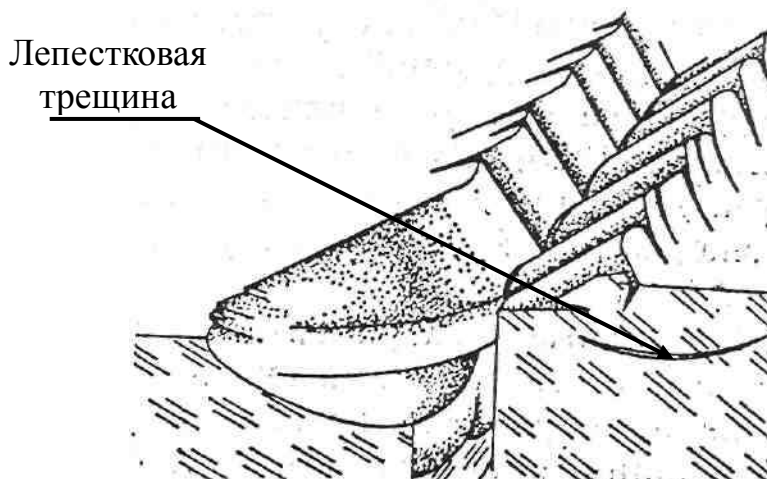


Рис. 1. Лепестковые трещины

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бартенев, Г.М. Механические свойства и тепловая обработка стекла / Г.М. Бартенев. - Госстандарт, 1960. – 165 с.
2. Маградзе, Д.В. Исследование зависимости среднеинтегральной температуры контакта от условий обработки оптического стекла / Д.В. Маградзе // ОМП. – 1989. – №3. – С. 13–14.

УДК 681.325.5:621.9

Т. В. Ларина

СГГА, Новосибирск

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

T.V. Larina

SSGA, Novosibirsk

DURABILITY OF HARD METALS

The paper investigates behaviour of the main groups of tool materials versus their structure, properties and composition. Recommendations on choosing tool materials are given.

Между качеством инструмента и некоторыми свойствами инструментальных материалов, как, например, твердость или износостойкость, не существует простой зависимости. Износостойкость не является исключительным свойством инструментального материала, а характеризует сложное взаимодействие инструмента и материала заготовки, зависящее в значительной степени от режимов резания. Вопрос качества инструмента не может быть простым, однако поведение основных групп инструментальных материалов в зависимости от структуры, свойств и состава исследуются с целью дать рекомендации по выбору инструментальных материалов и их дальнейшему совершенствованию.

В природе не существует материалов, обладающих одинаково высокой прочностью, твердостью и проявляющих одинаковую степень инертности ко всем обрабатываемым материалам. Поэтому понятие оптимальный (эффективный) инструментальный материал является относительным, т. е. зависит от свойств обрабатываемого материала, условий обработки и определяется конкретными характеристиками обрабатываемого материала и видом заданной операции обработки. Выбор материала инструмента при заданном обрабатываемом материале необходимо проводить с учетом возможного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов в процессе резания.

Полученный инструментальный материал можно охарактеризовать и оценить его готовность к применению в качестве режущего инструмента после проведения специальных испытаний по адгезии, диффузии, термостойкости, износостойкости при резании металлов.

Экспериментально установлено что, температура начала схватывания для сплавов КНТ-16 и Т15К6 - 1023 К, для ТН-20 - 1073 К, для TiC - NiTi - 1123 К. При 1273 К трудно однозначно сказать об адгезии, так как имеют место интенсивные диффузионные процессы.

Из результатов по оценке адгезии сплавов, представленных на рис. 1 видно, что разрушающее напряжение наибольшее у сплава Т15К6, а наименьшее у TiC - NiTi. Сплавы ТН-20 и КНТ-16 занимают промежуточное положение. Результаты показывают, что адгезионные процессы при резании сталей будут проходить с меньшей интенсивностью у сплава TiC - NiTi. Следовательно, наиболее стойкий к адгезии, по результатам теста, сплав TiC - NiTi, так как этот сплав имеет наименьшее разрушающее напряжение.



Рис. 1. Результаты адгезионного теста для твердых сплавов

Для правильного выбора режимов резания необходимо определить зону наростообразования. Использование в качестве связующей фазы никелида титана должно привести за счет снижения адгезионного взаимодействия твердого сплава TiC - NiTi с обрабатываемым материалом к уменьшению скоростных границ зоны наростообразования. Установить границы интенсивного взаимодействия стружки с инструментальным материалом можно путем построения зависимостей длины контакта стружки с резцом и усадки стружки от скорости резания и подачи.

Отклонения у сплавов ТН-20, Т15К6, КНТ-16 в значениях длины контакта незначительны, но длина контакта стружки с резцом у этих сплавов значительно превышает длину контакта сплава TiC-NiTi в диапазоне скоростей 0,25–1,91 м/с и подач от 0,07 до 0,57 мм/об.

Величина длины контакта у сплава TiC-NiTi на 30–40 % ниже, чем у сплавов ТН-20, Т15К6, КНТ-16. Зона схватывания у сплавов ТН-20, Т15К6, КНТ-16 составляет 0,25–1,66 м/с, у сплава TiC-NiTi ограничена 1,16 м/с.

Схватывание материала заготовки и инструмента является определяющим условием адгезионного изнашивания и является характерной особенностью процесса резания при использовании в качестве связующей фазы в безвольфрамовом твердом сплаве интерметаллического соединения. Однако скоростные пределы и величина длины контакта в данном случае снижаются по сравнению со значениями, которые имеют сплавы ТН-20, Т15К6, КНТ-16.

Длина контакта стружки с резцом при использовании в качестве связующей фазы в БВТС никелида титана уменьшается.

На рис. 2 представлены снимки металла, налипшего на инструмент, изготовленного из TiC-NiTi, где видно характерное сглаживание в направлении схода стружки.

Существенных отличий при изменении подачи от 0,07 мм/об до 0,57 мм/об в форме налипшего материала не обнаружено, но размеры имеют существенные отличия.

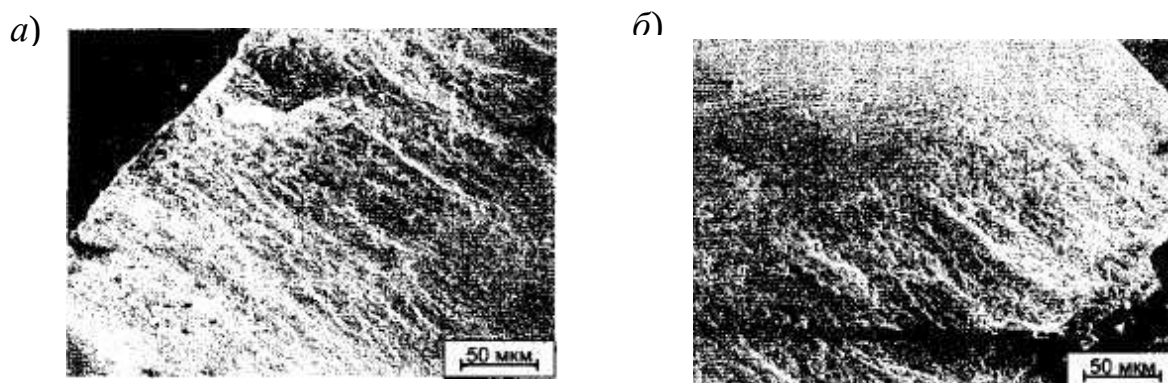


Рис. 2. Налипшая на инструмент из TiC-NiTi стружка: а) $V = 15$ м/мин, $s = 0,07$ мм/об, $t = 3$ мм; б) $V = 15$ м/мин, $s = 0,57$ мм/об, $t = 3$ мм

Диффузионные процессы, происходящие на контактных поверхностях, очень сложны. Оценку склонности к диффузионному износу инструмента из сплава TiC-NiTi при точении стали в сравнении со сплавом ТН-20 проводили по диффузионному тесту, результаты которого показывают что, в переходной зоне сталь - ТН-20 увеличивается содержание никеля, о чем свидетельствует четкий пик характеристического спектра никеля, но на глубине 3,5 мкм он исчезает. Характеристический спектр Ti пропадает на глубине 2,5 мкм. Характеристический спектр Fe практически реально различим на глубине 8,6 мкм. Снимок зоны контакта (рис. 3а) показывает, что ярко выраженной переходной зоны нет, но поверхности стали и ТН-20 образуют прочный контакт.

Результаты исследования зоны контакта сталь – TiC-NiTi указывают на то, что характеристический спектр железа в сплаве практически отсутствует. Также нет характеристического спектра никеля в стали, Ti исчезает на глубине 1,5 мкм. Это свидетельствует о низкой склонности диффузии сплава TiC-NiTi к низколегированной стали. Снимок зоны контакта сплава TiC-NiTi со сталью показывает, что в отличие от сплава ТН-20 нет плотного контакта по всей поверхности соприкосновения (рис. 3, б).

Термостойкость твердого сплава показывает возможность его использования при прерывистой обработке, в процессе которой материал подвергается многократному нагреванию – охлаждению. В результате такого воздействия в инструментальном материале возникают термические трещины.

Результаты испытаний показали, что наибольшее число циклов без разрушения выдержали сплавы TiC-NiTi и КНТ-16, наихудший результат показал сплав Т15К6 (рис. 6). Не на много более стоек сплав ТН-20. Иначе говоря наибольшей термоустойчивостью обладают сплавы КНТ-16 и TiC-NiTi.

а)



б)



Рис. 3. Зона контакта по диффузионному спаю: а) ТН-20-Сталь35; б) TiC-NiTi - Сталь35

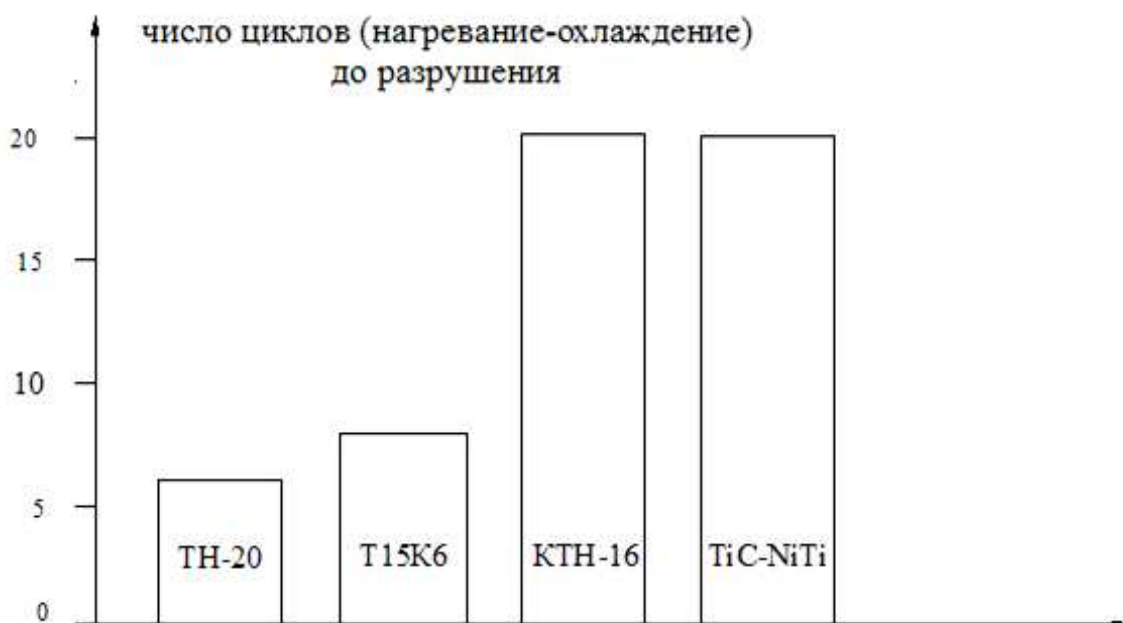


Рис. 4. Результаты оценки термостойкости твердых сплавов по циклу нагревание- охлаждение до разрушения у четырехгранных пластин типа SNUN

Интенсивность адгезионного изнашивания у сплава TiC-NiTi меньше, чем у сплава ТН-20. К тому же связующая фаза в сплаве TiC-NiTi – интерметаллическое соединение, которое не стремится, в отличие от никеля в сплаве ТН-20, образовать соединение с железом обрабатываемого материала.

Этот факт способствует тому, что адгезионное взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов снижается.

Результаты диффузионного теста свидетельствуют о малой склонности сплава TiC-NiTi к взаимодействию с обрабатываемым материалом. Если глубина проникновения железа в сплав ТН-20 составляет 8,6 мкм, то в аналогичных условиях рефлексы железа в сплаве TiC-NiTi не обнаруживаются.

Из выше сказанного следует, что сплав TiC-NiTi обладает пониженной склонностью ко всем основным видам изнашивания, как при непрерывном, так и при прерывистом точении, что нашло свое отражение в результатах испытаний на склонность к адгезии, диффузии и термостойкости, определяющих механизм изнашивания твердого сплава.

© Т.В. Ларина, 2009

УДК 681.7:681.2

Б.Э. Шлишевский, Е.Г. Бобылева

СГГА, Новосибирск

ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ОСВОЕНИЯ НОВОЙ ТЕХНИКИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

B.E. Shlishevsky, Ye.G. Bobyleva

SSGA, Novosibirsk

TECHNICAL SUPPORT OF THE NEW EQUIPMENT DEVELOPMENT IN AUTOMATED PRODUCTION

The paper deals with the problems and necessary measures for the technical support of the production and development of the new efficient equipment on the basis of the NC cutting equipment. Engineering solutions for their effective operation are given.

Авангардные технологии – это технологии, радикально повышающие производительность труда (в разы) и обеспечивающие существенное снижение себестоимости продукции при ее стабильно высоком качестве.

Внедрение авангардных технологий механической обработки – проблема общегосударственного значения. Она требует больших капиталовложений и, как показывает практика, длительного срока реализации (3–5, 8 лет), специального обучения персонала и выработки у него навыков скоростной обработки. Включает такие элементы, как перестройка в организации производственного процесса с целью компьютеризации, взаимосвязи и оптимизации всех его составляющих компонентов – основных и обслуживающих.

Основой авангардной технологии, т. е. ее носителем, являются современные многоцелевые станки с устройствами числового программного управления (УЧПУ), агрегатные станки с быстросменными шпиндельными головками, многошпиндельные автоматы с УЧПУ, а также оборудование заготовительного передела с УЧПУ.

Для реализации и эффективной эксплуатации перечисленного высококласного оборудования необходимо осуществить целый ряд мероприятий, главные из которых изложены в настоящей работе:

1. Подбор и заказ оборудования на основе тщательного расчета фактической потребности и загрузки, предварительной классификации деталей в однородные группы по конструктивно-технологическим признакам.

- 1.1. Оборудование заказывается для изготовления сложных, точных и особо сложных деталей, только в этом случае оправдано использование таких дорогостоящих станков, какими являются станки с ЧПУ и обрабатывающие

центры (ОЦ). Габариты станков обязательно должны соответствовать габаритам обрабатываемой детали, так как в противном случае система «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ) не будет обладать требуемой жесткостью, нужно использовать «штатные» инструменты с наименьшим вылетом державки и проводить обработку на интенсивных режимах.

Заказ и приобретение новых станков выполняется, соответственно:

- На основе альтернативного сравнения выбора и путем тщательных технико-экономических обоснований и расчетов;

- С использованием проверенных в производстве мобильных производительных станков с надежными системами ЧПУ, имеющих высокие скорости и большие диапазоны регулирования рабочих и холостых ходов ($n \geq 13\,000\text{--}20\,000$ об/мин., $V_{\text{уск}} \geq 30\text{--}40$ м/мин., время холостого хода от стружки до стружки меньше 5–15 с, время смены инструмента меньше 0,5–3 с), с дискретностью ввода-вывода информации 0,001–0,0005 мкм и с наличием столов-спутников или других устройств для автоматической смены заготовок (где это целесообразно).

Емкость магазина инструментов определяется количеством типов отверстий и их размерами, количеством плоскостей и типов криволинейных контуров. По обследованным деталям можно сделать вывод, что оптимальная емкость магазина колеблется в пределах от 20 до 40 инструментов и лишь для 3–5 % деталей требуется 50–60 инструментов. В тоже время следует отметить, что более емкие магазины позволяют ускорить переход на изготовление иной номенклатуры изделий и допускает смешанную обработку различных деталей без переналадки.

1.2. Внедрение прогрессивных методов и рациональных схем обработки; предельное использование мощности приводов станков путем более широкого использования новых прогрессивных высокостойких твердосплавных инструментов.

С целью расширения работы по внедрению прогрессивного режущего инструмента, оснащенного многогранными неперетачиваемыми пластинками (МНП) из безвольфрамовых твердых сплавов (БВТС) взамен напаянного; из сверхтвердых материалов (СТМ) на основе кубического нитрида бора; нитридно-карбидной минералокерамики; быстрорежущих сталей высоколегированных вольфрамом и кобальтом; инструмента с одно- и многослойными износостойкими покрытиями необходимо:

- Обращать особое внимание на оснащенность прогрессивным режущим инструментом и проявлять предприимчивость по его приобретению и настойчивость по его внедрению, так как высококачественный инструмент не менее важен, чем сам станок;

- Возрождать на машиностроительных предприятиях технологические лаборатории резания и усиливать их роль в апробации и внедрении интенсивных, скоростных и сверхскоростных режимов резания;

– Промышленным предприятиям следует обеспечивать себя широкой номенклатурой каталогов по стандартным режущим инструментам, с целью оптимального его использования.

1.3.Форсирование режимов обработки, внедрение скоростных и сверхскоростных режимов резания: для стали эти режимы могут быть от 150 до 180 м/мин.; для серого чугуна – 1 000–1 500 м/мин.; для алюминиевых сплавов – до 5 000 м/мин.;

1.4.Технологическая унификация: подбор номенклатуры деталей повышенной сложности и точности с высоким коэффициентом концентрации операций ($k_{з.о} \geq 10-20$), групповые методы технологии и организации производства, обеспечение бесперебойной трехсменной загрузки оборудования заготовками и предварительно настроенными на размер инструментами;

1.5.Обеспечение необходимой технологической оснасткой: необходимо уделять особое внимание высокопроизводительному режущему инструменту для внедрения интенсивных (скоростных и сверхскоростных) режимов резания и использование полной мощности привода станка. При наличии высококачественного парка станков с ЧПУ приоритетным направлением должно явиться приобретение и внедрение прогрессивных инструментов и трехсменная загрузка станков, а не закупка нового оборудования;

1.6.Отработка конструкций деталей на технологичность с целью максимального использования преимуществ их изготовления на станках с УЧПУ и типа ОЦ, для стабилизации качества изготавливаемой продукции, удобства работы станочника, быстрого освоения интенсивных режимов резания и упрощения наладки станка.

1.7.Заблаговременная (за 10–18 месяцев) эксплуатационная и техническая подготовка производства;

2. Организация трехсменной бесперебойной работы оборудования (ликвидация всех видов внутрисменных потерь по организационным и техническим причинам) с фондом штучно-калькуляционного времени в пределах 4 500–6 000 часов; дозагрузка станков типа ОЦ заказами со стороны; реализация излишнего оборудования. Большие средства предприятия могут извлечь и более рационально использовать от реализации излишнего или совсем не использованного оборудования с ЧПУ. Для этой цели необходимо произвести точные расчеты и инвентаризацию загрузки станков с ЧПУ и ОЦ.

3. Организация многостаночного обслуживания (2-3 станка на одного оператора) и расположение станков группами для хорошего обзора и минимизации пути перемещения рабочего. Внедрение бригадного подряда для многосменной работы оборудования по скользящему графику и использование прогрессивных форм оплаты труда всех категорий работников, стимулирующих увеличение полезного фонда времени работы станков (до 24 часов) и снижение трудоемкости обработки.

Стимулирование нужно применять шире:

– Оно может быть разовое или локальное – за своевременный монтаж, пуск, отладку станков, за каждую деталь, переведенную для обработки на станках с ЧПУ с большим снижением трудоемкости, за внедрение расчетных

норм, за текущее снижение трудоемкости обработки на этих станках в порядке рационализации;

- Постоянное стимулирование за уменьшение простоев, повышение сменности работы оборудования;
- За технологическое, производственное и, особенно, проектное и экономическое освоение многооперационных станков;
- За повышение зоны обслуживания и коэффициента многостаночности.

При этом положительный эффект дают вариантные, сдельные и бригадные формы стимулирования.

4. Улучшение технического нормирования и обеспечение 100 % охвата всех операций, выполняемых на станках с ЧПУ, технически обоснованными нормами. Техническое нормирование – мощный стимулятор, который при использовании имеющихся резервов позволяет увеличить производительность операторов минимум на 50–80 %.

5. Подготовка кадров: обучение технологов-программистов, наладчиков, операторов, ремонтников, специалистов по электронике. Вся эта категория исполнителей формируется только из высококлассных, специально обученных инженеров и техников.

При освоении станков целесообразно посылать на фирмы-изготовители оборудования рабочих-операторов, специалистов-технологов на стажировку на месяц и более. Затраты на это мероприятие полностью и быстро окупятся. В последствие при возвращении на базовое предприятие станочники, прошедшие стажировку, оказывают благоприятное воздействие на весь климат производственных участков, на техническую дисциплину, на промышленную гигиену, на взаимоотношения в коллективе и, в целом, на общую культуру работы подразделения.

Как правило, фирмы-изготовители также в течение 1-3 месяцев готовы разрабатывать управляющие программы изготовления изделий (из заготовок заказчика). Подобный сервис позволяет с малыми затратами и эффективно за короткий срок осваивать сложнейшую новую технику и технологию скоростной обработки;

6. Реализация широкого и успешного внедрения станков с ЧПУ и ОЦ возможно при условии возведения этих работ в ранг основной политики предприятия, с участием всех технических и оперативных служб, при постоянном контроле со стороны руководителей высшего ранга предприятия (главного инженера или директора). Очень важно организовать и укомплектовать специалистами высшей квалификации (рабочими-операторами УЧПУ и технологами) и соответствующим техническим оснащением службы технологов ЧПУ, подразделение подготовки и разработки управляющих программ (в том случае, если это не предусмотрено делать на ОЦ), службы технического обеспечения и ремонта станков и систем ЧПУ.

Специалистов этих служб целесообразно выделять, наделив более высокой оплатой труда и материальными поощрениями за высокие результаты

непосредственно своей работы. Эти службы могут иметь различную организационную структуру, в зависимости от количества станков с УЧПУ и их объема в общей численности. При объеме механообработки на станках с УЧПУ более 20 % целесообразно создать одну объединенную службу, которая включит все подразделения и будет находиться под руководством главного специалиста в этой области. Заметим, что на западных предприятиях используются и другие схемы, так как там много малых предприятий, оснащенных меньшим числом станков и осуществляющих обработку деталей по кооперации.

Реализация указанных мероприятий осуществляется путем разработки линейного графика «Техническая подготовка освоения новой техники в автоматизированном производстве». График составляется аналогично широко используемому плану технической подготовки производства новых изделий. В нем указываются сроки и ответственные исполнители (главные инженеры). За выполнением графиков должен осуществляться систематический контроль.

При полном выполнении выше изложенных мероприятий срок окупаемости приведенных затрат с учетом компонентов прямой и косвенной экономии укладывается в нормативные сроки, 7-8 лет и менее, и на предприятии достигаются громадные технологические экономические и организационные преимущества.

© Б.Э. Шлишевский, Е.Г. Бобылева, 2009

УДК 681.3.06(075.8)

Г.А. Сырецкий

СГГА, Новосибирск

ЦИФРОВАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ КАК КЛЮЧЕВАЯ ТЕНДЕНЦИЯ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ИНДУСТРИИ И ТЕХНИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ

G.A. Syretsky

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

THE DIGITAL ORGANIZATION IS KEY TENDENCY OF DEVELOPMENT THE MODERN INDUSTRIAL BUSINESS AND TECHNICAL EDUCATION

In the article influence of concept the CALS on development of the automated information telecommunication technologies of support life cycle of products is considered. The opportunity of application in the modern industrial business and technical education of technologies, digital manufactures, digital enterprises and virtual organizations is show.

Тенденции развития информатики как научно-практического глобально-интегрирующего направления свидетельствуют о целесообразности широкого использования современными промышленными предприятиями и техническими вузами разнообразных автоматизированных информационно-телекоммуникационных технологий. Такие технологии обеспечат ускорение разнообразных процессов, в их числе автоматизированного проектирования, моделирования, планирования, организации и мониторинга множества процессов промышленных предприятий, предприятий оптико-электронного приборостроения, а в технических вузах – учебного процесса с наперед заданными требованиями и ориентированного на индивидуальные образовательные траектории студентов и совместные работы обучаемых, а также управления учебным и самообразовательным процессами.

Согласно ГОСТ Р 52653-2006 «Информационно-телекоммуникационные технологии в образовании. Термины и определения» под информационно-телекоммуникационной технологией понимают «информационные процессы и методы работы с информацией, осуществляемые с применением средств вычислительной техники и средств телекоммуникаций».

Ныне в производственной сфере и технических вузах появилась возможность использования разнообразных систем и сетей на базе современной микропроцессорной и микроконтроллерной техники, фирменного программного обеспечения различного назначения, виртуальных интерактивных сред, виртуальных систем, виртуальных средств, виртуальных

инструментов и построения такой информационной среды, в которой возможна согласованная работа всех участников и заинтересованных сторон за счет автоматизации и информационной интеграции.

В настоящее время промышленные организации, производящие сложную наукоемкую продукцию, стремятся к повышению своей конкурентной способности за счет разработки и широкого использования эффективных информационно-телекоммуникационных технологий и систем концепции CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывное сопровождение и поддержка жизненного цикла продукции) (в отечественной терминологии аналогом CALS служит аббревиатура ИПИ (информационная поддержки жизненного цикла изделий)), появившейся в недрах министерства обороны США, или ее аналога в гражданской сфере – PLM (Product Lifecycle Management – управление жизненным циклом продукции). В нашей стране также проводится разработка и внедрение CALS систем. Их заказчиками становятся крупные предприятия оборонной промышленности и близких к ней отраслей, в том числе и организации опто-электронного приборостроения.

Содержание концепции CALS представлено рядом общих принципов (в их числе, системной информационной поддержки ЖЦ изделия на основе использования интегрированной информационной среды, обеспечивающей минимизацию затрат на всех стадиях ЖЦ; информационной интеграции, обеспечиваемой стандартизацией информационного описания объектов управления; безбумажного представления информации и использования электронной цифровой подписи; непрерывного совершенствования бизнес-процессов) и технологий управления (прежде всего, проектами и заданиями; ресурсами; качеством продукции и процессами предприятия; интегрированной логистической поддержкой) процессами и информацией (об изделии, процессах и среде).

Суть концепции CALS состоит в создании такой модели производимого изделия, которая сопровождала бы изделие как на производственных, так и постпроизводственных этапах жизненного цикла (ЖЦ). Конечная цель использования систем концепции CALS состоит в том, чтобы производитель поставлял сложное наукоемкое изделия с его актуальной трехмерной электронной моделью, обеспечивающей получение всех необходимых данных для сопровождения и эксплуатации изделия.

Концепция CALS неразрывно связана с созданием и ведением единого информационного пространства (ЕИП) средствами программной индустрии, CALS-системами. ЕИП, создаваемое и управляемое CALS-системами, призвано обеспечить информационную поддержку производственного и постпроизводственного ЖЦ продукции, требуемый уровень ее качества и производственных процессов в целом в условиях постоянного совершенствования процессов, сокращения сроков выполнения разных проектов и использования современных инструментов стратегического и тактического планирования.

Совершенствование компонентов CALS-систем (например, систем автоматизированного проектирования, ERP-систем, MES-систем, систем

управления технологическими процессами, систем хранения и управления информацией о промышленном изделии) и ЕИП вызвало появление новой организационной формы контрактного объединения организаций, поддерживающих этапы ЖЦ сложной продукции и имеющих общие бизнес-процессы, – «виртуального предприятия». Виртуальное предприятие формируется в неоднородной сетевой среде мультиагентными технологиями. Механизмы виртуализации давно применяются в различных вычислительных системах. Они поддерживаются в них аппаратно и программно. Благодаря виртуализации, вычислительные процессы эффективно обеспечиваются ресурсами, которые предоставлены для их совместного использования.

Функциональные возможности современных программных систем убедительно доказывают, что они доведены разработчиками до той степени развития, которая дает квалифицированным потребителям реальные ощутимые преимущества. Это обусловлено тем, что их создание базируется на большом и разностороннем интеллектуальном потенциале разработчиков ведущих компаний мира.

В настоящее время на рынке труда растет востребованность в хорошо подготовленных ответственных и самостоятельно мыслящих инженерных кадрах соответствующих направлений и специальностей, обладающих фундаментальными знаниями в своей области и владеющих методами и технологиями машинного моделирования, проектными компьютерными технологиями и методами, методами и технологиями концепций CALS и PLM: системными методами и информационно-телекоммуникационными технологиями по автоматизации и многоуровневому функциональному управлению в современной производственной организации.

В плане соблюдения отечественными производителями требований стандартов CALS и подготовки техническими вузами нужных кадров ныне существует тенденция отставания России от уровня передовых промышленно развитых стран мира.

С экономической точки зрения, в техническом вузе при реализации вышеуказанного средствами современной программной индустрии возможно существенное сокращение затрат (проявление рентабельности инвестиций (ROI, Return On Investment) вуза) на приобретение и использование множества экземпляров современного дорогостоящего автоматизированного технологического оборудования, систем быстрого прототипирования, охранных средств, технических средств защиты информации, программно-управляемых промышленных роботов, транспортных средств с проводной и беспроводной связью, автоматизированных систем хранения материалов, комплектующих и продукции, средств измерений, операторских панелей, электро-, гидро- и пневмоприводов, контроллеров, контрольно-измерительных приборов, промышленных компьютеров, структурно перестраиваемых сетей промышленного назначения, информационно-измерительных и управляющих систем и комплексов.

Сказанное неразрывно связано с возникшей в конце XX века в промышленной индустрии концепцией цифрового производства (DM, Digital

Manufacturing), базирующейся, прежде всего, на концепциях CALS, автоматизированного проектирования трехмерной виртуальной продукции (цифрового изделия) и виртуального моделирования разнообразных систем и процессов.

Нынешний уровень развития программной индустрии демонстрирует воплощение положений указанных концепций в линейках инструментального программного обеспечения ряда ведущих мировых компаний, в их числе Dassault Systemes, PTC и Siemens.

Концепция цифрового изделия поддерживается инструментами

- Разработки 3-мерной модели изделия;
- Промышленного дизайна;
- Проектирования интерактивной технической документации;
- Симуляции и проверки заданных требований;
- Проектирования приспособлений и оснастки;
- Симуляции обработки материалов.

Концепция цифрового производства поддерживается инструментами

- Сборки узлов и изделия из деталей;
- Единым ассоциативным источником информации для производства;
- Оптимизации работы предприятия;
- Моделирования работы человека;
- Анализа качества и управления данными;
- Управления производственными и технологическими процессами.

Использование в технических вузах информационно-телекоммуникационных технологий концепций CALS, PLM и DM позволит создать условия для мотивированного формирования у студентов наперед заданных профессиональных компетенций технических и технологических направлений, новой инженерной культуры и широкого внедрения в педагогическую практику новых методических разработок, направленных на интенсификацию учебного процесса, реализацию инновационных идей образовательного процесса.

Развитие технологий цифровых производств дает основание для того, чтобы рассматривать уже концепцию цифрового промышленного предприятия. С точки зрения автора, *цифровое промышленное предприятие* (цифровая промышленная организация) есть предоставляемая пользователям для интерактивного восприятия система внутри глобально интегрированного программно-аппаратного пространства, которая сформирована как фрагмент или целостная модель открытого промышленного предприятия и которая доступна для имитации в нем работы ее разных систем, сетей, людей, заинтересованных сторон и использования ресурсов с целью выявления условий достижения наперед заданных требований, предъявляемых к будущей или реально действующей промышленной организации. Цифровое промышленное предприятие является как приемником, так и источником

разнообразной информации ЕИП реальной (физической) производственной организации, поддерживающего производственный и постпроизводственный ЖЦ продукции соответствующими информационными системами и функциональные механизмы виртуальной организации.

На взгляд автора, понимание концепции цифрового промышленного предприятия, информационно-коммуникационных технологий, инструментов его создания и симуляции от различных зарубежных и отечественных компаний привнесет значимую составляющую в развитие конкурентно способного производственного предприятия, а также и технического вуза. В техническом вузе появится больше возможностей для проектирования эффективной образовательной системы, обеспечивающей реализацию не «поддерживающего обучения», а перехода к открытому «опережающему образованию», насыщенному передовыми технологиями и сведениями о новейших достижениях фундаментальных наук.

© Г.А. Сырецкий, 2009

УДК 620:191.33:681.7.624.012

О.К. Ушаков, Н.Р. Рахимов, Т.В. Ларина, В.А. Плиско

СГГА, Новосибирск

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

O.K. Ushakov, N.R. Rakhimov, T.V. Larina, V.A. Plisko

SSGA, Novosibirsk

OPTOELECTRONIC TECHNIQUE FOR DETERMINATION OF METAL SURFACES QUALITATIVE PARAMETERS

The authors investigate main qualitative parameters of metal surfaces: grain, roughness and colour. An optoelectronic device for measuring these parameters is offered.

Мониторинг металлических поверхностей – это самая массовая технологическая операция в самолетостроении, ибо ни одна деталь не может быть изготовлена без измерения ее технических характеристик. В связи с усложнением и требованием неуклонного повышения надежности новой техники трудоемкости контрольных операций в промышленности резко увеличиваются. Например, в развитых странах затраты на мониторинг металлических поверхностей составляют в среднем 1,5 – 3,5 % от стоимости выпускаемой продукция, а в отдельных т.н. наукоемких отраслях – до 20 % [1].

Оптоэлектронными методами мониторинга поверхностей исследователи занимаются более двадцати лет. Однако немногие оптоэлектронные системы преодолели пределы измерительных лабораторий, и дошли до применения в технологическом процессе. К числу параметров, мониторинг которых стало возможно производить, относятся: зернистость, шероховатость, дефектность, цветность и т. д.

Исторически, сначала мониторинг металлических поверхностей проводился визуально, путем сравнения поверхностей контролируемой и эталонной [2]. Недостатком данного метода контроля является большая доля субъективности и, соответственно, большая погрешность контроля (допускается до 50%), недостаточная оперативность и др.

Поэтому, появилась необходимость замены этого метода на достаточно близкий по физической сущности, с устранением его недостатков и сохранением, по возможности, его преимуществ и создания сначала базового образца, а затем и серии приборов для промышленности [3].

К методам оценки качества поверхностей в настоящее время можно отнести интерференционные теневые, метод светового сечения, профилографические, растровые, муаровые, интегральные рефлексометрические [1]. Данные методы

применяются в приборах контроля топографии поверхностей и объемных поверхностных дефектов. Эти приборы можно разбить на три большие класса:

1. Приборы контроля шероховатости поверхностей. При этом производится интегральная оценка поверхностных дефектов.

2. Приборы для контроля и измерения поверхностных дефектов и микрогеометрии. При этом контролируются отдельные дефекты изделий и измеряется глубина дефектов.

3. Приборы для контроля плоскостности, в основном, полированных поверхностей. Этими приборами обнаруживаются дефекты типа однородного изгиба, завалов, сложного изгиба (коробления), сколов.

По типу измерения их можно подразделить на приборы непосредственного измерения и приборы сравнения.

В абсолютном большинстве методов аппаратную основу приборов составляют микроскопы различных конструкций. При этом количественная и качественная оценка замеряемых параметров производится визуально. К тому же, следует отметить, что размеры контролируемой поверхности ограничены техническими возможностями микроскопов и определяются, в основном, размером свободного хода (до 90 мм) и полем зрения микроскопа (до 8 мм) [1].

Предлагаемый авторами [2, 3] оптоэлектронный метод мониторинга поверхностей представляется перспективным в отношении простоты, удобства, технологичности и быстроты. К настоящему времени авторами разработан ряд оптоэлектронных приборов для неразрушающего контроля различных веществ и материалов.

В данном методе применяется принцип сравнения качественных параметров исследуемого объекта с эталоном, в роли которого могут применяться образцовые стандартизованные меры шероховатости и дефектности. Теоретические и экспериментальные исследования для зеркальной составляющей отраженного потока для шероховатой поверхности со случайным распределением элементов профиля показывают, что возможно применение этого метода для определения шероховатости металлических поверхностей с R_z до 0,2 мкм [1].

Основной измеряемой оптической характеристикой при данном методе выступает интенсивность отраженного светового потока от поверхности контролируемого объекта (КО), которая сравнивается с величиной аналогичной характеристики эталона. При этом измеряемой электрической характеристикой выступает сила тока или напряжение на фотоприемнике. Они определяются выражениями [1] $U_{\phi} = S_{VEe} \cdot E_e$ и $I_{\phi} = S_{IEv} \cdot E_v$, где U_{ϕ} и I_{ϕ} – соответственно, напряжение фотосигнала и фототок; S_{VEe} и S_{IEv} – соответственно, вольтовая чувствительность к облученности и токовая чувствительность к освещенности; E_e и E_v – облученность и освещенность.

При исследовании цветности определяющей выступает четкость спектра излучения светоизлучающего диода (СИД) и монохроматическая чувствительность приемника оптического излучения (ПОИ), для других параметров – интегральная чувствительность ПОИ.

Таким образом, идея данного метода заключается в измерении интенсивности отраженного от КО светового потока или потока излучения и сравнении его с эталонным объектом (ЭО). При этом предлагаются два принципиальных схемотехнических решения:

1) С непосредственным сравнением параметров КО и ЭО (рис. 1). Как видно, при данном схемотехническом решении происходит одновременное снятие показаний с КО и ЭО, и сравнение их в блоке обработки фотозлектрического сигнала (БОФС). КО и ЭО подсвечиваются соответствующими идентичными СИД, которые питаются импульсным током от задающего генератора (ЗГ) через разделяющий триггер (РТ). Обработанный сигнал из БОФС в виде отношения сигналов (реального и эталонного) поступает либо на измерительный прибор (ИП), который представляет его в удобном для восприятия виде (например, в виде осциллограммы), либо на вход ЭВМ для хранения и дальнейшей обработки. Принципиальное неудобство данного решения заключается в технологической сложности согласования одновременной работы двух оптоэлектронных пар «СИД–ПОИ» с двумя объектами.

2) Со сравнением измеряемого параметра КО и известного параметра эталона (рис. 2). В этом схемотехническом решении результирующий сигнал с ПОИ может сопоставляться не с одним сигналом от эталонного образца, а с любым из ряда образцовых, хранящихся в запоминающем устройстве (ЗУ).

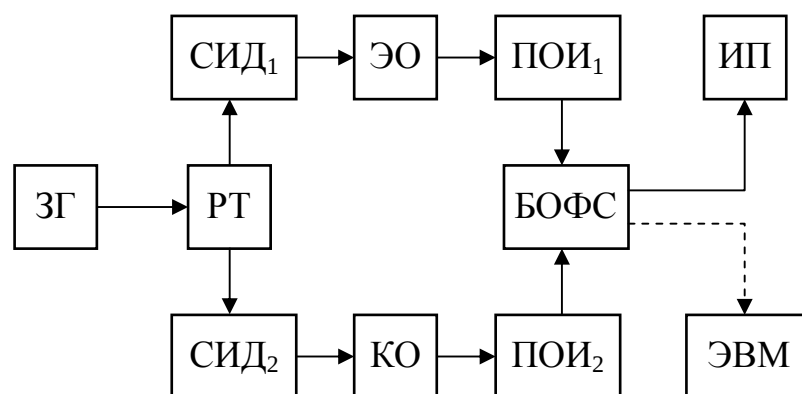


Рис. 1. Функциональная схема оптоэлектронных устройств с непосредственным сравнением

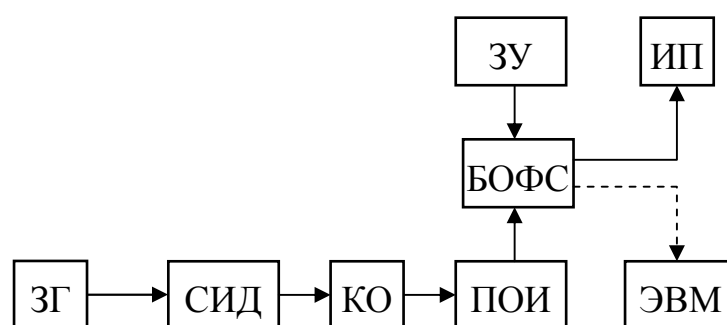


Рис. 2. Функциональная схема оптоэлектронных устройств со сравнением измеряемого параметра КО и известного параметра-эталона

Далее, как и в первом варианте, оба сигнала или их разность подаются на ИП или в ЭВМ. Удобство данного решения в том, что работает только одна оптоэлектронная пара «СИД–ПОИ», а сопоставление полученного сигнала с эталонным позволяет быстро и с достаточной точностью определить количественные значения параметров и отнести их к тому или иному классу (зернистости, шероховатости и т. п.).

В качестве оптоэлектронной пары для данного метода представляется целесообразным использование отражательных оптронов с открытым оптическим каналом. Применение оптронов связано с целым рядом преимуществ: согласованность элементов по спектральным и электрическим характеристикам, высокое быстродействие ($t_{\text{пер}} \sim 40 - 50$ нс), высокая направленность излучения СИД оптрона, согласованность по конструктивно-технологическим признакам [4].

Авторами предлагается оптоэлектронное устройство для определения дефектности поверхности, которое может быть реализовано в одном из двух вышеприведенных схмотехнических решений. Принципиальным в данном устройстве выступает блок оптопары (оптрон). Один из его вариантов представлен на рис. 3. Как видно, в блоке используются 2 оптопары с идентичными характеристиками (спектральными, энергетическими) – по потоку излучения и электрическими. Оптопары работают в импульсном режиме попеременно: оси падающего $\Phi_{\text{пад}}$ и отраженного $\Phi_{\text{отр}}$ световых потоков (оптопары) расположены под углом 90° относительно друг друга и симметричны относительно нормали к поверхности КО в точке отражения. Кольцевой кожух блока из плотной непористой резины служит для необходимой ориентации оптопар относительно поверхности КО и световой изоляции оптического канала во избежание искажения показаний. Оси оптопар (конструктивные и оптические) перпендикулярны друг другу. В данном простейшем исполнении они позволяют получить псевдостереоскопический эффект. Применяя СИД с высокой направленностью излучения и конденсорные линзы, можно добиться уменьшения диаметра луча СИД и, как следствие, повышения разрешающей способности прибора.

Достоинством предложенного метода и данного прибора выступает простота применения и работы, что позволяет использовать его непосредственно в технологическом цикле; большая площадь применения, ограниченная лишь в принципе протяженности линии связи «оптоэлектронный блок-блок аппаратуры»; объективность показаний, т.е. независимость их от оператора; возможность параллельной фиксации показаний в ЗУ для накопления и дальнейшей обработки. В процессе измерения блок оптопар может перемещаться по поверхности КО в квадратно-пересеченном порядке (рис. 4).

Перемещение блока может осуществляться как вручную, так по направляющим с помощью регулирующего механизма. Второй способ перемещения предпочтительный, так как он обеспечивает равномерность хода блока и как следствие, равномерность снятия показаний. Основным недостатком данного блока заключается в его одноканальности, т.е. показания снимаются с

A diagram showing a 4x4 grid of squares. The entire grid is enclosed within a thick solid black rectangular border. The grid lines are represented by dashed lines. Four arrows indicate flow directions: an arrow on the left points into the grid from the left, an arrow on the right points out of the grid to the right, an arrow at the top points into the grid from the top, and an arrow at the bottom points out of the grid to the bottom.

Эти устройства позволяют заменить визуальный контроль технологических параметров исследуемой поверхности по ГОСТ 9378-93 сравниваемой с эталонными образцами, причем расчеты показали, что стоимость устройства окажется в несколько раз ниже стоимости зарубежных приборов.

При этом объективность, оперативность и точность контроля данными устройствами намного выше, чем при визуальном контроле. Также устройства можно встраивать и в автоматизированное оборудование для одновременного контроля нескольких технологических параметров металлических поверхностей как шероховатость, зернистость, цветность и дефективность.

1. Ключев, В.В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий/ В.В. Ключев.- М.: Машиностроение, 1986. -382 с.

2. Топорец, А.С. Оптика шероховатой поверхности / А.С. Топорец.-Л: Машиностроение, 1988. – 162 с.

3. Тожиев, Р.Ж. Исследование качественных параметров металлических поверхностей на основе оптоэлектронных датчиков / Р.Ж. Тожиев Н.Р. Рахимов, Ш.К. Рузматов // ФерПИ. 2002. – № 3. – С. 73–77.

4. Рахимов, Н.Р. Анализатор цвета поверхности твердых материалов / Н.Р. Рахимов, К.Х. Ахунов, Ш.К. Рузматов // Материалы Республиканской

конференции «Техника и современные методы производственной технологии и информации». – Фергана, 2003. – С. 27–29.

© О.К. Ушаков, Н.Р. Рахимов, Т.В. Ларина, В.А. Плиско, 2009

УДК [621.9.06 – 52:658.527:681.3.06] (035)

Б.Э. Шлишевский, Е.Ю. Кутенкова

СГГА, Новосибирск

АВАНГАРДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

B.E. Shlishevsky, Ye.Yu. Kutenkova

SSGA, Novosibirsk

VANGUARD TECHNOLOGIES IN MECHANICAL OPERATIONS OF INSRUMENT-MAKING

The basis of vanguard technologies is formed by state-of-the art automatic equipment and high-quality cutting tools.

Под авангардными технологиями (это нестандартная терминология) подразумеваются технологии, которые в разы повышают производительность труда и обеспечивают стабильно высокое качество продукции (в соответствии с техническими требованиями). Их техническую основу составляют автоматические или автоматизированные станки с числовым программным управлением.

Особенность корпусных деталей, обрабатываемых в оптико-механической промышленности, особенно коробчатых и рамочных, - наличие точно координированных относительно друг друга классных отверстий и базовой поверхности. Отверстия располагаются с одной или нескольких сторон.

Статистическое обследование большого количества деталей приборостроения позволило выявить следующие их особенности: число обрабатываемых сторон составляет 3–8, число обрабатываемых поверхностей – 6–40 (рис. 1). Плоские поверхности, расположенные параллельно, составляют 40–50 %, а расположенные наклонно – 3–5 % всех поверхностей.

Внешние открытые поверхности, которые могут быть выполнены за один переход сквозным фрезерованием, составляют 65–70 %, с обработкой по контуру – 20–25 %, плоскости с внутренней обработкой – 5–8 %.

Обработка таких деталей требует применения прогрессивных технологий, в которых органически сочетаются автоматизация, гибкость, минимальные затраты живого труда, наивысшая производительность и наименьшая себестоимость; обеспечивается стабильное качество обработки изделий; максимальная экономия материала и энергоносителей; рациональная загрузка оборудования; соблюдаются требования экологии и охраны окружающей среды, техники безопасности рабочего персонала, а также удобство сервисного обслуживания и эксплуатации оборудования и средств автоматизации; высокая надежность в работе используемых в производстве технических средств:

станков-автоматов, устройств числового программного управления (УЧПУ), инструментов и другого технологического оснащения.

Сокращение длительности полного производственного цикла от идеи нового продукта до готовой детали является одним из центральных моментов сохранения и повышения конкурентоспособности предприятий во многих отраслях промышленности. Для достижения этой цели используется высокоскоростная обработка HSC (High Speed Cutting), которая все больше привлекает к себе внимания.

Датой рождения HSC является 27 апреля 1931 года. В этот день немецкий изобретатель Саломон С. получил патент № 523594 «Способ обработки металлов резанием». Саломону удалось обнаружить, что при достижении определенной скорости резания происходит существенное снижение температур в зоне резания. Он также показал, что для конкретного материала - существует определенная скорость резания, при достижении которой дальнейшая обработка резанием невозможна (это своеобразная «долина смерти»!). На сегодняшний день скорость резания при применении HSC в 5-10 раз превышает скорость резания при традиционной обработке.

В результате исследований было установлено, что увеличение скорости резания приводит помимо всего прочего к существенному улучшению качества обработанной поверхности. При этом большая часть образующегося в процессе резания тепла отводится вместе со стружкой.

Практическое определение HSC сегодня:

- HSC – это процесс обработки резанием, комбинирующий высокие подачи и ускорения станка с высокой мощностью высокоскоростного шпинделя для получения высокой скорости срезания материала, экстремальной точности и высоким качеством обрабатываемых поверхностей;

- HSC – это не просто процесс обработки с высокой скоростью. Это процесс, все составляющие которого реализуются специальными методами с использованием специального оборудования;

- HSC представляет собой самостоятельную технологию обработки деталей резанием, которая может полностью заменить «нормальные» технологии - черновое и чистовое фрезерование, шлифование, полирование, эродирование, но имеет свои отличительные особенности;

- HSC позволяет существенно сократить вспомогательное время и сократить или совсем исключить затраты времени на доработку и доводку;

- HSC обеспечивает возможность изготовления деталей из цельного куска материала высокой твердости с высоким качеством обработанных поверхностей.

Проведенный в Германии, Японии и США статистический опрос предприятий показал, что 20 % опрошенных рассматривают HSC как наиболее перспективную технологию будущего. HSC таким образом занимает второе место после усиленного внедрения систем автоматической подготовки производства. Процент предприятий, планирующих инвестиции в области

HSC, составляет в Японии 90 %, в Германии – 60%. Эти цифры не требуют дополнительных комментариев.

Для реализации высокоскоростной обработки HSC необходимо высокоскоростное и высокомошное оборудование. В течение последних 10–15 лет промышленность развитых стран и некоторые предприятия Российской Федерации освоили серийный выпуск технологических машин (металлообрабатывающих станков и иного оборудования), которые отвечают требованиям универсальности, автоматичности, производительности, а также скоростной обработки (точением, фрезерованием, давлением и др.); и обеспечивают возможность силового скоростного и сверхскоростного резания или штамповки, выдавливания и прессования основных видов конструкционных материалов, используемых в машино- и приборостроении.

Как правило, это в первую очередь мощные высокоскоростные автоматические одно- и многоцелевые или многошпиндельные станки, прессы и другое оборудование. В данной работе рассматриваются станки типа обрабатывающие центры (ОЦ) с УЧПУ.

Различают станки с УЧПУ: одно- и многоцелевые сверлильно-фрезерно-расточной группы, их именуют «Обрабатывающие центры сверлильно-фрезерно-расточной группы» (ОЦ СФР); многоцелевые станки для токарных работ называют «Токарные обрабатывающие центры» (ТОЦ).

Технология обработки на станках типа ОЦ и ТОЦ – это комплексная система самого высокого технического уровня, ее базой является триада интегрированных компонентов:

- Непосредственно многоцелевых станков с УЧПУ с высокочастотным регулируемым главным приводом и с шарико-винтовыми или линейными приводами подач;

- Многофункциональные системы УЧПУ – это устройства четвертого – шестого поколения, математическая мощность которых модульно наращивается под технологию конкретного заказчика, по принципу восходящей совместимости и позволяет осуществить в автоматическом режиме управление и контроль всех функций работы станка при реализации и проектировании управляющих программ (УП);

- Технологического оснащения, которое, в первую очередь, включает прогрессивный высокостойкий режущий инструмент и, в ряде случаев, универсальные или многопозиционные установочные приспособления для смешанной обработки заготовок различных деталей.

Здесь следует отметить, что каждый элемент триады несет свою нагрузку и не может заменить другой. Перечисленные элементы является результатом самых новейших достижений науки и техники на данный момент. Их взаимодействие позволяет реализовывать наиболее прогрессивные технологии в металлообработке, если компоненты триады работают совместно по заданной конкретной управляющей программе (УП) [1].

Многоцелевые станки с ЧПУ – это системы механотроники самого высокого уровня, в них механические, электрические, гидравлические узлы

органически сочетаются между собой и электронными компонентами. В то же время обеспечивается хороший дизайн и максимальная безопасность и комфортность работы (за счет блокировок и звукопоглощающих дверных ограждений станка), удобный доступ оператора к рабочей зоне ОЦ СФР или ТОЦ и обеспечения требования охраны труда.

Исключаются постоянные и случайные погрешности каждого из станков с ручным управлением, а также погрешности многочисленных переустановов, закрепления заготовок и базирования. Все это обеспечивает стабильную точность размеров и качество обработки в целом, и высокую производительность. Особенно важно сокращение вспомогательного времени на смену инструмента, ибо за одну смену таких замен может происходить до 1100 – 1200 на одном станке. Ликвидируются затраты времени на многократные перемещения межоперационных заготовок по цеху, количество которых пропорционально числу операций при обработке на станках с ручным управлением, а также сокращается время пролеживания заготовок в ОТК и на рабочих местах. Отсутствие мерной и специальной тары для ответственных деталей может наносить ущерб качеству изделий (забоины, риски, вмятины и др.).

Многоцелевые станки позволяют осуществить концентрацию разнообразных работ на одном операционном поле, таких как точение, все виды фрезерования, растачивание, сверление, зенкование, развертывание, цекование, а в некоторых моделях токарных ОЦ – протягивание, дорнование, изготовление и сборку 3–5 деталей в собранный узел; возможна многосторонняя обработка по каждой из трех осей координат X, Y, Z плюс вращение заготовки вокруг координатных осей, то есть многоосевая обработка до 6–12 осей. В ряде конструкций ОЦ реализована возможность автоматической переустановки заготовки и ее доработка относительно дополнительных параллельных осей координат. В ОЦ СФР автоматизированы не только процессы непосредственно резания, но и вспомогательные ходы: быстрый и сверхбыстрый подвод инструмента до заготовки с ускорением 10 м/сек^2 и отводом на исходную позицию, быстрая автоматическая смена инструмента по командам УП для разнотипной обработки. При затуплении – автоматически вызывается инструмент-дублер.

Станки типа ОЦ СФР и ТОЦ и автоматические линии на их основе широко функциональны, снабжены магазинами инструментов, которые по управляющей программе (УП) автоматически заменяются и вступают для выполнения очередного технологического перехода. Таким образом, за один установ в непрерывном цикле выполняются самые разнообразные виды съема стружки, вместо их обработки на многих операциях (и установках) на традиционном оборудовании с ручным управлением, что обеспечивает стабильную повторяемость высокого качества и весьма существенную экономию вспомогательного времени.

Современные ОЦ СФР и ТОЦ, в комплексе с прогрессивным режущим инструментом, определяют возможность внедрения новых технологий механической обработки, повышающих единичную производительность

станков в 3,5–5 раз. Кратко рассмотрим их основные технические и технологические возможности.

Устройства УЧПУ осуществляют автоматическое управление всеми рабочими функциями станка, его приводами и механизмами по реализации управляющих программ, включая наряду с обработкой резанием, контроль размеров обрабатываемой заготовки, самодиагностику УЧПУ и контроль исправности станка, а также возможность в автоматизированном режиме разработать УП параллельно на иную номенклатуру деталей, предупреждать о возможных сбоях в работе УЧПУ станка, в широких пределах корректировать УП на рабочем месте станка, и множество других функций.

Достижение «высочайшей производительности» в механообработке возможно только в случае использования современного прогрессивного режущего инструмента при условии скоростного и силового резания.

Внедрение авангардных технологий вопрос долгий, и этот процесс длится годами. Прежде (20 лет назад) они внедрялись в результате жесткого диктата государства и контроля государственными органами, что давало ощутимые результаты. В новых реалиях надежда на конкуренцию, частную инициативу и рыночную экономику не оправдались. Каждый из указанных в данной работе тезисов требует внимательного рассмотрения и стимулирования участников для их реализации. В настоящее время могут быть актуальными в приемлемом виде для рыночных условий лозунги: «Техника решает все» и «Кадры решают все». Подобная практика стимулирования бизнеса и развития техники принята в развитых странах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГЕО-Сибирь-2008. Т. 4. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника. Ч. 1: сб. матер. IV Междунар. науч. конгресса «ГЕО-Сибирь-2008», 22-24 апреля 2008 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2008. – 187 с.

© Б.Э. Шлишевский, Е.Ю. Кутенкова, 2009

УДК 681.7.067

А.Н. Соснов, Н.К. Соснова, С.В. Критинина

СГГА, Новосибирск

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ТОКСИЧНЫХ ОТХОДОВ ОТ ОБРАБОТКИ ИК-МАТЕРИАЛОВ ИКС-25 И КО-4

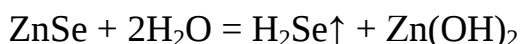
A.N. Sosnov, N.K. Sosnova, S.V. Kritinina

SSGA, Novosibirsk

POSSIBLE WAYS OF INFRARED MATERIALS (ИКС-25 AND KO-4) TOXIC WASTE NEUTRALIZATION

Common optical glasses based on oxygen compounds SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , As_2S_3 and others are transparent in infrared as long as $\lambda = 2.6\text{--}2.7$ μm . Anoxic glasses and optical polycrystals (ceramics) are transparent in infrared in the range of 1–17 μm (depending on their chemical composition). High thermal shock resistance and the possibility to use them for making heavy blanks, whose optical properties are like those of monocrystals make these materials highly suitable for modern science and technology applications. A grave disadvantage of infrared materials is aggressivity of some technological media due to the composition of some constitutive substances. The structure-forming substances for ИКС-25 and КО-4 are arsenic sulphide As_2S_3 , antimony sulphide Sb_2S_3 , arsenic selenide AsSe_3 , zinc selenide ZnSe and others.

Подвергаясь воздействию физико-химических факторов (водная среда СОЖ, микроочаги высоких температур в зоне резания, абразивное диспергирование и др.), мелкодисперсный шлам служит источником появления соединений по типу:



Наибольшего внимания из соединений селена заслуживают селенистый водород H_2Se (селан), селенистый ангидрид SeO_2 и соединения селена с тяжелыми металлами; из соединений мышьяка – мышьяковистый водород AsH_3 (арсин) и кислородные соединения As_2O_3 и As_2O_5 .

Воздействие селенистых и мышьяковистых соединений на организм человека достаточно подробно изучено; в литературе имеются сведения по ТБ и промышленной санитарии при работе с вредными веществами, однако работ, обобщающих опыт борьбы с вредными соединениями, отходящими в процессе обработки оптических материалов, очень мало. Для аналитической оценки рассматриваемых веществ на токсичность и рационального решения вопросов по снижению количества соединений в воздухе рабочей зоны необходимо иметь представление о физико-химических свойствах селена, мышьяка и их соединений.

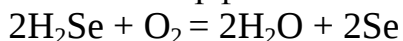
Селен. Наличие шести электронов во внешнем слое атома селена ($4S^2 4P^4$) обуславливает его металлоидный характер. Основные его минералы селиниды висмута, меди, серебра; в соединениях селен проявляет следующие степени окисления:



а также образует и некоторые комплексные соединения типа $Me(SeHal)_6$.

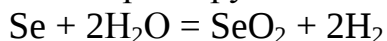
Селен устойчив и нерастворим в воде. С водородом селен образует газообразное соединение H_2Se , обладающее неприятным запахом и растворим в воде.

Кислородом воздуха водный раствор H_2Se постоянно окисляется с выделением аморфного селена:

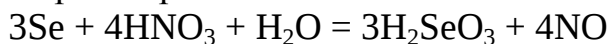


Селеноводород (как и сероводород) легко окисляется, проявляя сильные восстановительные свойства.

С кислородом селен соединяется после предварительного нагрева с образованием нескольких окислов, среди которых наиболее устойчив SeO_2 . С многими металлами селен (как и сера) образует селениды. С водой при нагревании реагирует лишь аморфный селен:



Se растворяется только в смеси соляной и азотной кислот:



Селенистый ангидрид (бесцветное кристаллическое вещество) хорошо растворяется в воде с образованием довольно слабой селенистой кислоты:



Соли селенистой кислоты (селениты) во многом похожи на сульфиты, но от последних отличаются отсутствием восстановительных свойств. Селеновая кислота получается окислением селенистой кислоты сильными окислителями, перекисью водорода H_2O_2 , перманганатом калия $KMnO_4$ и другими.

Аналитические методы определения селена основаны на способности его соединений восстанавливаться до элементарного селена под действием

некоторых восстановителей: сернистого газа SO_2 в концентрированной соляной кислоте, сульфитов (соли сернистой кислоты) в среде соляной или серной кислоты, гидроксидов NH_2OH , станнитов в щелочной среде, гидразина H_2NNH_2 и других.

Из органических восстановителей используют $NH_2C(S)NH_2$ и её производные, аскорбиновую кислоту $C_6H_6O_6$. В соединении с пирролом C_4H_5N , кодеином $C_{18}H_{21}O_3N$ селен даёт цветные реакции, используемые в колориметрическом анализе. Известны также физико-химические методы определения селена: полиграфический, амперометрический, атомно-адсорбционный, химико-спектральный.

Мышьяк. Атом мышьяка имеет на валентном слое пять электронов ($4S^2 4P^3$), определяющих его неметаллические химические свойства.

Элементарный мышьяк имеет металлический блеск, обладает электропроводностью.

При нагревании на воздухе мышьяк сгорает, образуя мышьяковистый ангидрид As_2O_3 , растворяющийся в воде в гидроокись мышьяка.

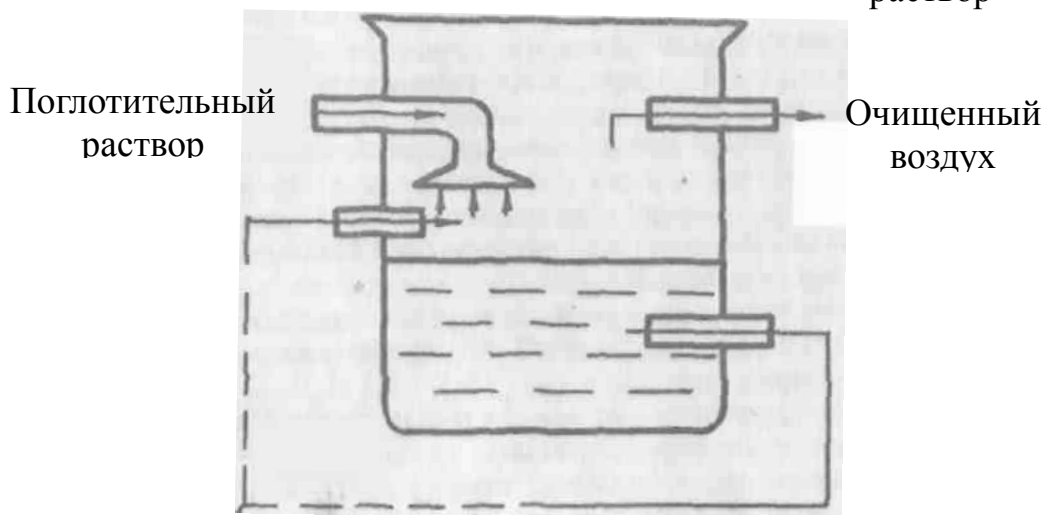
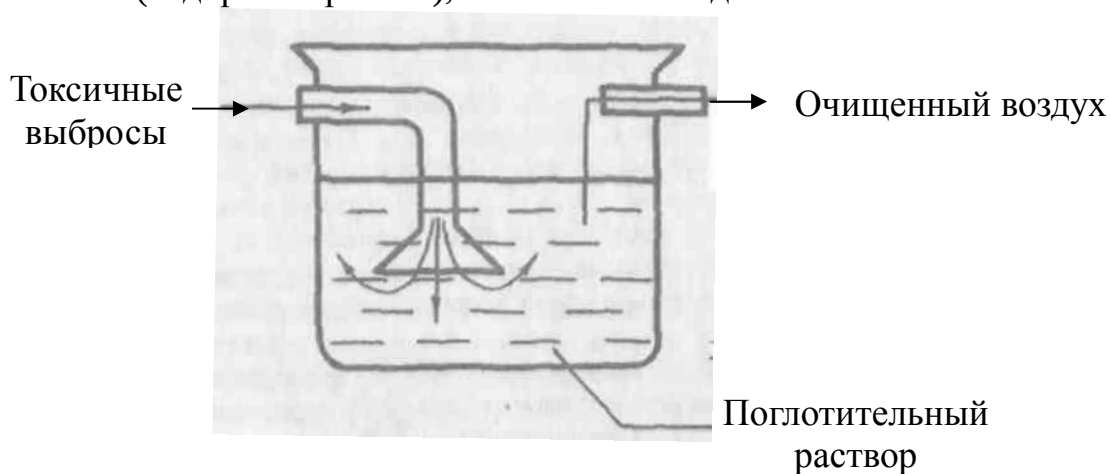
Крепкая азотная кислота и «царская водка» окисляют мышьяк в мышьяковую кислоту $\text{H}_3\text{S}_2\text{O}_4$. Под действием разбавленных кислот на арсениды образуется высокотоксичное соединение арсина со специфичным запахом чеснока. Арсин – сильный восстановитель, легко распадающийся на элементы.

Устойчивый сульфид мышьяка As_2S_3 образуется в результате непосредственного соединения мышьяка и серы. Соединение нерастворимо в воде, в разбавленных кислотах и, следовательно, не обладает токсичными свойствами.

Почти все методы определения мышьяка основаны на предварительном отделении его от других элементов. Наиболее распространённым методом выделения микро – и макроколичеств мышьяка является его отгонка в виде AsCl_3 .

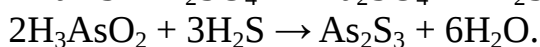
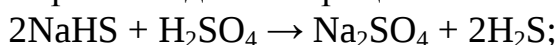
Адсорбционные процессы. Адсорбционный метод очистки жидкими поглотителями предполагает создание контура, содержащего емкости с поглотительным раствором. На рисунке представлены возможные схемы реализации очистки в насадочном скруббере.

В качестве поглотителей для селенистых и мышьяковистых соединений можно рекомендовать активированный уголь марок АРТ-2 и АНТ-3, крахмал технический (водорастворимый), силикагель и т. д.



Возможен способ поглощения токсичных соединений непосредственно в зоне обработки. Для этого твёрдый адсорбент подвергают размолу (зёрна 0,1–0,5мм) и добавляют к абразивному материалу в количестве 10 %. Твёрдые адсорбенты проводят очистку среды от всех примесей.

Окислительные процессы. При механической обработке исследуемых материалов выделяются газообразные продукты типа H_2Se , AsH_3 , способные легко окисляться. Достаточным окислителем для них служит перекись водорода H_2O_2 и марганцевокислый калий (KMnO_4) в кислой среде. Продукты окисления H_2Se , AsH_3 переходят в СОЖ. Окислители вводят в раствор СОЖ в количестве для H_2O_2 50 мл на 1 литр СОЖ, для KMnO_4 1,6 г на 1 литр СОЖ с добавлением 3-4 мл/л концентрированной кислоты H_2SO_4 или HNO_3 . Для обезвреживания водных растворов, содержащих мышьяк можно рекомендовать процессы:

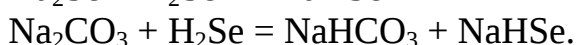
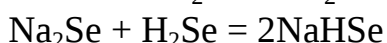
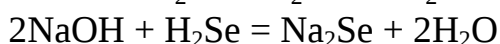
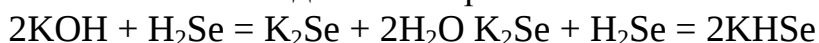


Реакция протекает со скоростями V_1 и V_2 . Экспериментально определяются условия, при которых соблюдается неравенство $V_2 \geq V_1$, т. е. не происходит выделения составляющих из объёма жидкой фазы в воздушную среду. Равновесие достигается соблюдением режима дозировки сульфидосодержащего реагента, характеризующегося определённой скоростью его подачи в мышьякосодержащий раствор при заданном гидродинамическом режиме перемешивания. При этом происходит осаждение мышьяка в безопасных количествах (остаточная концентрация в воде 80–100 мг/л) и образуется осадок сложного состава с преобладанием мышьяка и серы. Применяемое химически – активное ионитное полотно ВИОН натягивается на рамки, устанавливаемые в прямоугольном коробчатом корпусе аппарата химической очистки на волокнистых ионитах. При прохождении через него воздуха происходит химическое связывание и окисление токсичных веществ до очищенного воздуха. Ионитное полотно периодически оmyвается содовым раствором для восстановления его свойств.

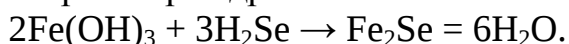
Изменение РН-среды. Так как некоторые токсичные продукты H_2Se , SeO_2 , As_2O_3 растворяются в СОЖ и образуют кислую среду, их нейтрализация будет препятствовать переходу их в воздух рабочей зоны.

В качестве веществ, нейтрализующих кислые продукты, можно рекомендовать карбонат натрия, калиевую соль олеиновой кислоты (щелочное мыло), едкое кали, едкий натр и другие, добавляемые в раствор СОЖ.

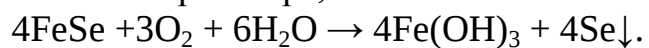
Указанное взаимодействие протекает по схеме:



При очистке газовой среды от селенистого водорода можно применять водный раствор гидроокиси железа:



После эжекции кислорода в раствор происходит регенерация отработанного раствора, и восстановление элементарного селена:



Авторы выражают глубокую благодарность Е.Е. Трифонову и Б.Э. Шлишевскому, принимавшим участие в работе и в подготовке первого варианта статьи.

© *А.Н. Соснов, Н.К. Соснова, С.В. Критинина, 2009*

УДК 681.7

М.Л. Маневич, И.М. Варшал, О.Я. Абель, Н.П. Айзенберг

Институт «Лев», Иерусалим, Израиль

Ю.А. Резников, Ю.И. Курьёз

Институт физики, Киев, Украина

А. Н. Соснов

СГГА, Новосибирск

МАТРИЦЫ АДАПТИВНЫХ МИКРОЛИНЗ, СОДЕРЖАЩИЕ ФОТОРЕЗИСТ И ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ

M.N. Manevich, I.M. Varshal, O.Ya. Abel, N.P. Eisenber

Institute «Lev», Jerusalem, Israel

Yu.A. Reznikov, Yu.I. Kurioz

Institute of Physics, Kiev, Ukraine

A.N. Sosnov

SSGA, Novosibirsk

ARRAYS OF ADAPTIVE MICRO-LENSES CONTAINING A PHOTORESIST AND LIQUID CRYSTALS

New adaptive micro-lens arrays based on photoresist-made micro-lenses immersed in nematic liquid crystals with an electrically controllable focal length have been developed. Parameters of new micro-optical devices are discussed.

Матрицы микролинз являются важными элементами современной электрооптики, они используются во многих областях, таких, как: оптические коммуникации, оптические устройства сопряжения различных типов, в том числе плоские интегральные соединители и т. д. [1].

Однако, большинство из этих устройств не обладает свойствами адаптивности их оптических параметров, главным образом, фокусного расстояния, несмотря на имеющуюся необходимость. Ранее было предложено несколько вариантов адаптивных микрооптических устройств, базирующихся на эффекте реориентации нематических жидких кристаллов во внешнем электрическом поле [2, 3].

Многообещающий подход был предложен недавно в [4]. В этой работе структура, состоящая из матрицы полых электродов была наполнена нематическими жидкими кристаллами. К сожалению, качество адаптивных микролинз в этом случае оставляло желать лучшего из-за увеличенных аберраций и дисторсии фокальных пятен.

В данной статье рассмотрены вновь разработанные матрицы адаптивных микролинз, изготовленные с помощью комбинирования фоторезиста с нематическими жидкими кристаллами. Конструкция

предложенных матриц микролинз схематически представлена на рис. 1. Приложение электрического поля ведёт к реориентации директора и к изменениям фокусного расстояния микролинз.

Микролинзы, изготовленные из органического фоторезиста, характеризуются высоким оптическим качеством, как показано в работе [5]. Такое качество обеспечивается благодаря очень точному технологическому методу микролитографии с зазором, предложенному в [6]. При этом методе создается зазор между рабочими поверхностями подложки и бинарного хромового фотошаблона, который содержит матрицу отверстий в слое хрома, имеющих диаметр 50 микрон. За счёт изменения расстояния между освещаемым фотошаблоном и плоскостью подложки можно изменять профиль распределения света с плоского на закруглённый. Это позволяет оптимизировать геометрические параметры микролинз, такие как их диаметр и максимальная толщина, а в конечном итоге радиус кривизны.

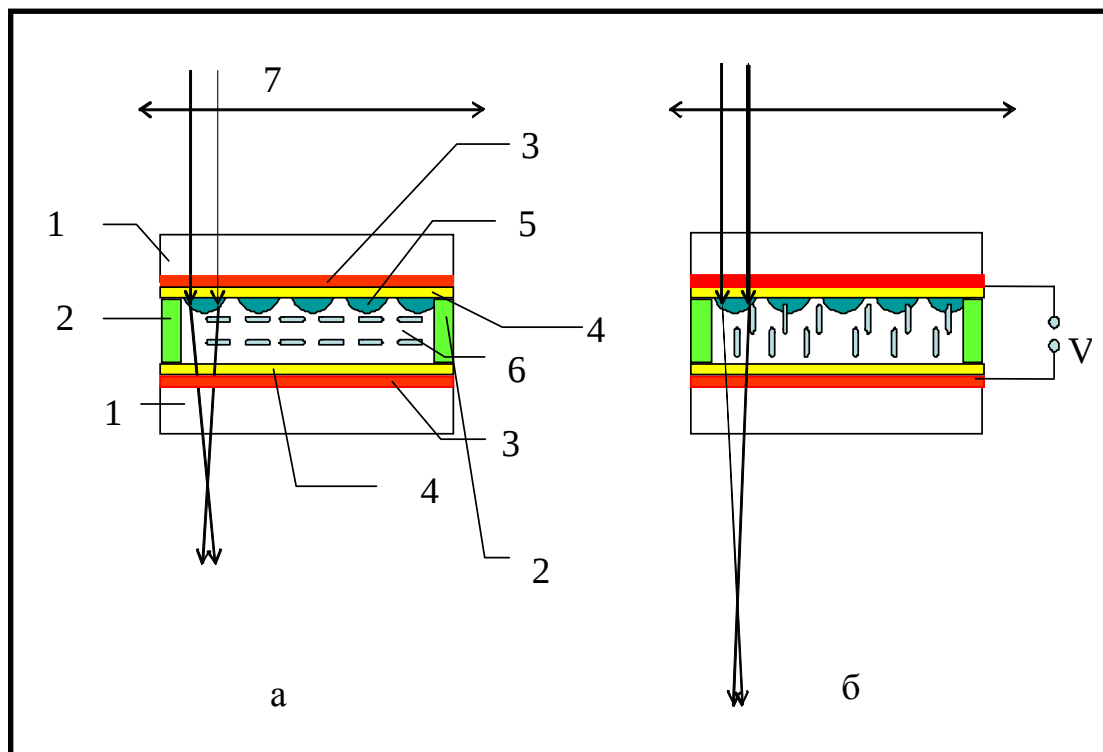


Рис. 1. Конструкция матрицы адаптивных микролинз: (а) без электрического поля; (б) с включённым электрическим полем: 1 – стеклянная подложка; 2 – прокладка; 3 – электроды из окисла индий-олова (ITO); 4 – поливиниловый спирт; 5 – фоторезистивная матрица микролинз; 6 – жидкий кристалл Е 90; 7 – поляризатор

Во вновь разработанном технологическом процессе применяется органический фоторезист AZ 4562 фирмы «Hoechst». При экспонировании фоторезиста используется зазор между рабочими поверхностями подложки и бинарного хромового фотошаблона, равный 400 микрон, время экспонирования ксеноновым источником света составляет 1 минуту.

Основные параметры матриц адаптивных микролинз представлены в таблице.

Диаметр микролинзы, мкм	62.5
Максимальная толщина микролинзы, мкм	5.3
Шаг матрицы микролинз, мкм	550 × 550
Размеры матрицы микролинз, мкм	3 300 × 3 300
Тип фоторезиста	AZ 4562
Тип жидкого кристалла	E 90
Интервал изменений показателя преломления жидкого кристалла	1.523–1.7313
Интервал изменений приложенного напряжения, вольт	3.5–7.2
Интервал изменений фокусного расстояния, мкм	510–670

Заключение

Разработаны и исследованы новые матрицы адаптивных микролинз. Фокусное расстояние этих микрооптических устройств изменяется приблизительно на 30 %, от 510 мкм до 670 мкм при изменении приложенного напряжения от 3.5 до 7.2 вольт.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. T.J. Suleskiand and R.D. TeKolste, "Fabrication trends for free-space micro-optics", J. Lightwave Technol. 23, 633 (2005).
2. H. Ren, Y.H. Fan, S. Gauza, and S.T. Wu, "Tunable-focus cylindrical liquid crystal lens", Jpn.J.Appl.Phys. Part 1, 43, 652 (2004).
3. H. Ren, Y.H. Fan, Y.H. Lin, and S.T. Wu, "Tunable-focus micro-lens arrays using nanosized polymer-dispersed liquid crystal droplets", Opt. Commun. 247, 101 (2005).
4. O. Pishnyak, S. Sato, O.D. Lavrentovich, "Electrically tunable lens based on a dual-frequency nematic liquid crystal", Applied Optics, 45, 4576 (2006).
5. N.P. Eisenberg, M. Manevich, A. Arsh, M. Klebanov, V. Lyubin, "New micro-optical devices for the IR based on three-component amorphous chalcogenide photoresists", J. Non-Cryst. Sol. 352, (2006).
6. M. Manevich, M. Klebanov, V. Lyubin, J. Varshal, J. Broder, N.P. Eisenberg, "Gap micro-lithography for micro-lens array fabrication", Chalcogenide Letters Vol. 5, No. 4, April 2008, p. 61-64.

© М.Л. Маневич, И.М. Варшал, О.Я. Абель, Н.П. Айзенберг,
Ю.А. Резников, Ю.И. Курьёз, А.Н. Соснов, 2009

УДК 681.782.473:5:621.384.3

Н.Р. Рахимов, О.К. Ушаков, Е.Ю. Кутенкова, М.П. Исаев

СГГА, Новосибирск

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ АНАЛИЗАТОР ЦВЕТА ПОЛУПРОЗРАЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

N.R. Rakhimov, O.K. Ushakov, Ye. Yu. Kutenkova, M.P. Isayev

SSGA, Novosibirsk

OPTOELECTRONIC ANALYZER OF SEMITRANSSPARENT LIQUIDS COLOUR

The colour of semitransparent oil products (petrol, oil, autol, black oil, etc) produced by petroleum-refining industry is an important characteristic of their quality.

Цвет полупрозрачных нефтепродуктов (бензина, масла, автола, мазута и т. п.), выпускаемых нефтеперерабатывающей промышленностью, является значимым показателем их качества.

Концентрацию одного нефтепродукта в другом определяют по интенсивности окраски их смеси на основании закона Бугера – Ламберта – Бера:

$$\Phi_{\lambda} = \Phi_{0\lambda} e^{-k_{\lambda} C d}, \quad (1)$$

где Φ_{λ} – поток монохроматического излучения с длиной волны λ , после прохождения через нефтепродукт; $\Phi_{0\lambda}$ – первоначальный поток монохроматического излучения, попадающий в нефтепродукт; k_{λ} – коэффициент поглощения, зависящий от длины волны излучения, природы растворенного нефтепродукта и температуры; C – концентрация растворенного вещества; d – толщина поглощающего слоя.

Преобразованием данного уравнения можно получить основные фотометрические величины, применяемые в практике. Это – оптическая плотность D , светопропускание T_{λ} , светопоглощение A_{λ} . В зависимости от коэффициента поглощения k_{λ} и толщины слоя d , можно определить концентрацию растворенного вещества C [1].

В практических решениях, преобразовывая световые потоки $\Phi_{0\lambda}$ и Φ_{λ} с помощью оптоэлектронных преобразователей в соответствующие электрические сигналы Y_0 и Y , можно по их величине определить те или иные оптические характеристики нефтепродуктов. При работе оптоэлектронного преобразователя на линейном участке световой характеристики, когда

$$\Phi = K_x Y, \quad (2)$$

где K_x – коэффициент пропорциональности.

Учитывая (2), можно записать

$$T_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda}}{\Phi_0} \times 100\% = \frac{Y}{Y_0} \times 100\% \quad (4)$$

$$D = \lg \frac{\Phi_{\lambda}}{\Phi_{0\lambda}} = \frac{Y}{Y_0} K_{\lambda} C d \quad (3)$$

$$A_{\lambda} = \frac{\Phi_0 - \Phi}{\Phi} \times 100\% = \frac{Y_0 - Y}{Y} \times 100\% \quad (5)$$

Из этих уравнений видно, что оптическая плотность D прямо пропорциональна концентрации вещества в растворе. Если изменение концентрации C раствора красителя или любого химического компонента вызывает изменение K_{λ} , то будем иметь отклонение от закона Бугера – Ламберта – Бера.

Для оценки разрешающей способности колориметрического метода контроля за цветом образцов необходимо снять их спектральные характеристики в видимом диапазоне $0,38 \div 0,78$ мкм (табл. 1).

Таблица 1. Цветовые и спектральные характеристики некоторых полупрозрачных нефтепродуктов

Нефтепродукты	Цвет	Спектральная область, мкм
бензин а-72	розовый	0,6 ÷ 0,64
бензин а-76	желтый	0,56 ÷ 0,59
бензин а-93	оранжево-красный	0,61 ÷ 0,67
мазут м-40	желто-красный	0,56 ÷ 0,7

Контроль цветовых параметров нефтепродуктов, протекающих через трубу, связан с некоторыми трудностями, определяющимися условиями технологического процесса. В частности, тем, что контроль цвета в упомянутых приборах производится, в основном, по двухканальной схеме. Эти методы основаны либо на сравнении исследуемого вещества с набором светофильтров, либо на измерении поглощения проходящего через нефтепродукт света на отдельных длинах волн [2, 3]. Недостатком существующих приборов является применение светофильтров, что снижает надежность, и, кроме того, возможность их использования только в лабораторных условиях.

Цветовые параметры определяются как объективное свойство предметов, проявляющееся в спектральном составе исходящего от них (пропускаемого, отражаемого) излучения и воспринимаемое как осознанное зрительное ощущение. В этом определении даны два аспекта – физический и психофизиологический, неразрывно связанные друг с другом.

Современная теория распознавания цвета основана на однозначно установленном факте трихроматности зрения человека, т.е. зрительный аппарат содержит три вида рецепторов, каждый из которых преимущественно реагирует на красный, зеленый или синий цвет [4].

Согласно этому, цветовой параметр математически выражается вектором в трехмерном цветовом пространстве, причем начало этого вектора совпадает с

началом цветовой координатной системы (ЦКС). Если в качестве основных цветов использовать единичные векторы трех цветов красного g_n , зеленого g_n и синего b_n , то любой цвет можно выразит в виде:

$$Ц = R_{r_n} + G_{g_n} + B_{b_n}, \quad (6)$$

где R, G, B – качества соответствующих цветов.

На рис. 1 показаны кривые сложения цветов систем RGB (а) и XYZ (б). RGB-система называется эмпирической, которая используется в качестве основных цветов чистого спектрального излучения красного ($\lambda=700$ нм), зеленого ($\lambda=546,1$ нм) и синего ($\lambda=435,8$ нм) цветов. А XYZ называется феноменологической системой. Смысл этих систем заключается в том, что спектрально чистый цвет с $\lambda=600$ нм воспринимается глазом как состоящий из красного и зеленого компонентов в соотношении 14:3, излучение с $\lambda=450$ нм воспринимается в виде соотношения 7,5:1:35 красного, зеленого и синего цветов соответственно.

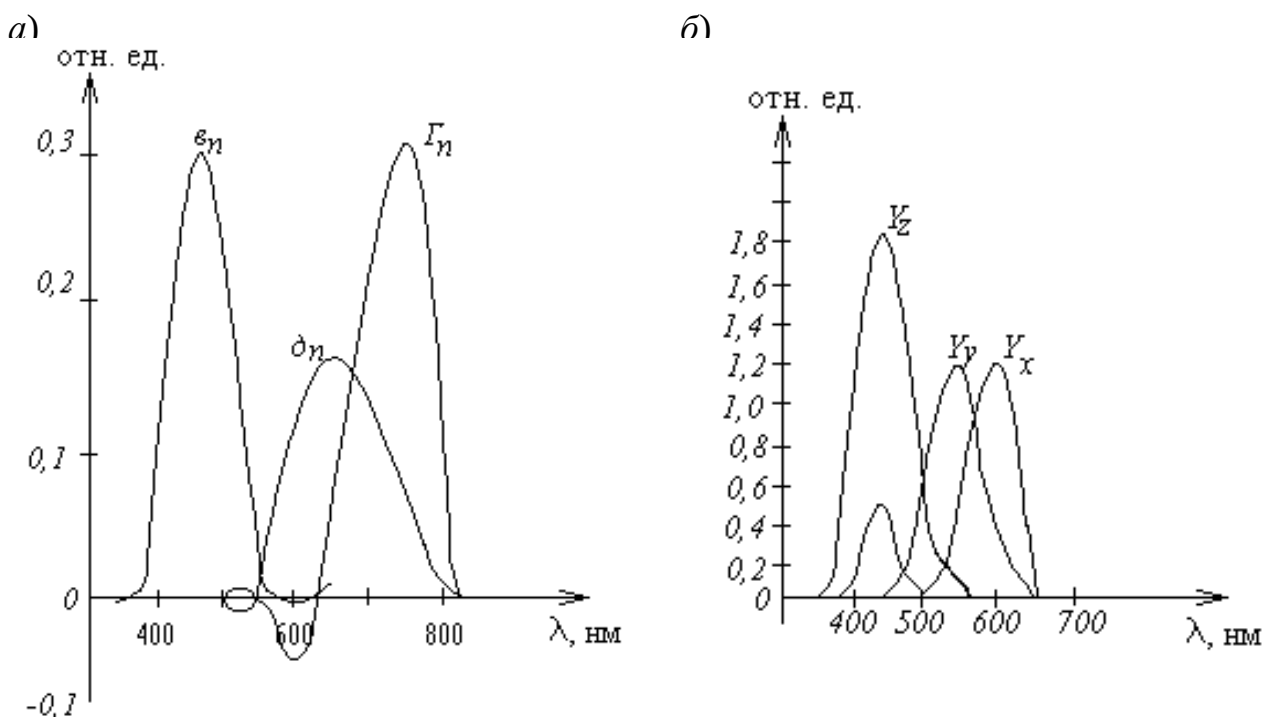


Рис. 1. Кривые сложения цветвых систем RGB (а) и XYZ (б).

В системе RGB кривые красного r_n , зеленого g_n и синего b_n построены так, что для каждого из трех основных цветов отличаются от нуля лишь ординатой одной кривой. Принципиальный недостаток этих кривых сложения заключается в наличии отрицательного участка у кривой. При измерении цветвых координат вычитание цвета реализовать невозможно, поэтому в колориметрии эта система не применяется [5].

Таким образом, задача контроля цветвых параметров на основе XYZ системы осуществляется тремя способами. Первый – это визуальное

сопоставление измеряемого цвета с эталонным. Эталон выбирается из заранее составленного цветового атласа или компьютерным программированием каждого из цветов. Второй – это спектрофотометрирование, наблюдаемого излучения и расчет координат X , Y , Z . Третий – это непосредственное измерение координат X , Y , Z при использовании трех эталонных приемников оптического излучения, спектральные функции чувствительности которых в точности соответствуют кривым Y_x , Y_y , Y_z . Этот способ, несомненно, является наиболее перспективным, так как он удовлетворяет требованиям технологического процесса.

Для разработки по этому способу устройство должно выполнить следующие операции:

- Выделение анализирующего излучения на трех длинах волн (красный, зеленый и синий);
- Прием прошедших через объект потоков излучения и преобразование в фотоэлектрический сигнал;
- Обработка фотоэлектрического сигнала.

На рис. 2 показаны блок-схема и конструктивное выполнение устройства для контроля цветовых параметров нефтепродуктов.

Устройство состоит из корпуса 1, двух идентичных кварцевых колпачков 2, задающего генератора (источника импульсного питания) 3, коммутатора (разделителя импульса) и трех измерительных 5, 9, 13 трех компенсационных 6, 10, 14 светоизлучающих диодов, трех V-образных передающих оптоволокон 7, 11, 15, трех принимающих оптоволокон 8, 12, 16, трех эталонных приемников оптического излучения 17, 18, 19, трех идентичных блоков обработки фотоэлектрического сигнала и трех измерительных приборов 20, 21, 22 или ЭВМ 23.

Устройство работает следующим образом. При установке корпуса 1 на трубу, по которой протекает нефтепродукт при заданном технологическом процессе, между кварцевыми колпачками пространство заполняет контролируемая полупрозрачная жидкость. Задающим генератором (3) вырабатываются прямоугольные импульсы, которые подаются на вход коммутатора (4). Разделенные импульсы попеременно подаются к светоизлучающим диодам (5, 6, 9, 10, 13, 15), а затем эти излучения подаются на оптоволокно 7, 11, 15, потоки излучения, проходящие через слой контролируемого нефтепродукта 24, поступают на оптоволокно 8, 12, 16, а затем на светочувствительную поверхность приемников оптического излучения (17, 18, 19). Фотоэлектрические сигналы с выхода приемников оптического излучения, соответствующие красному и инфракрасному, зеленому и инфракрасному, синему и инфракрасному потокам подаются на вход идентичных блоков обработки фотоэлектрического сигнала и измерительного приборов (20, 21, 22) или ЭВМ (23) для анализа соответствующих цветовых параметров.

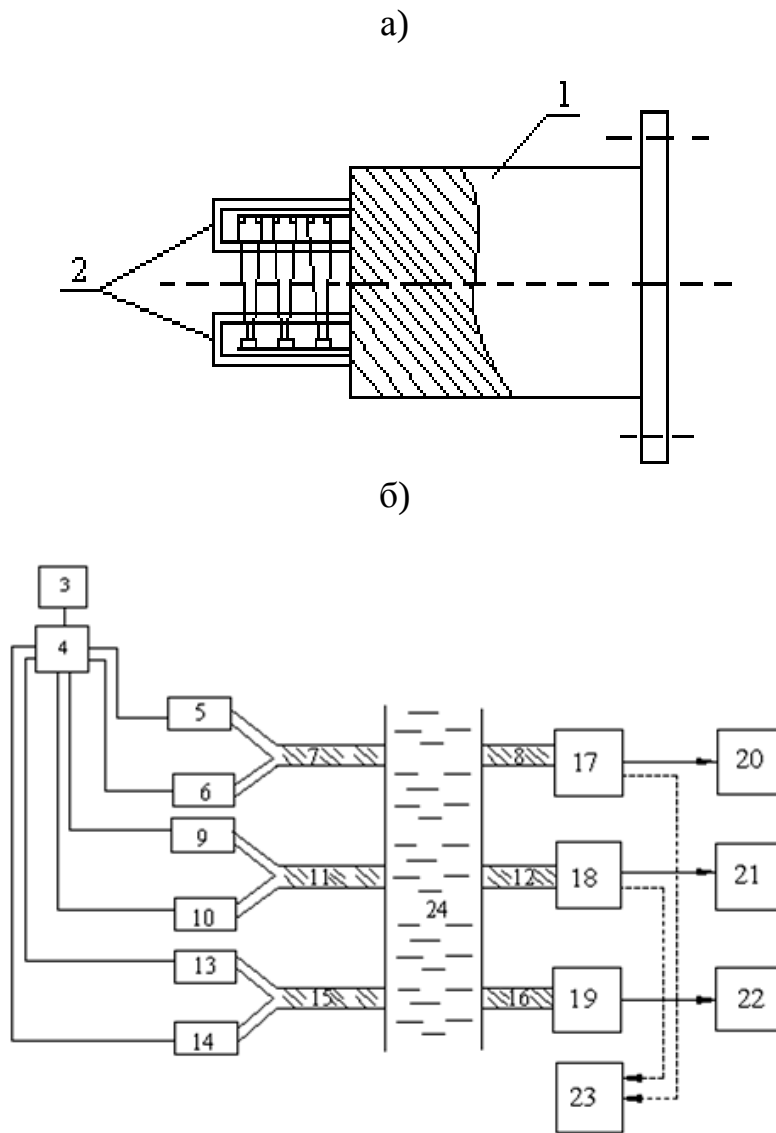


Рис. 2. Конструктивное выполнение (а) и блок-схема (б) устройства

Назначение каждой оптопары поясняется следующим образом: контролируемая жидкость облучается двумя световыми потоками с длинами волн λ_1 и λ_2 , одна из которых является измерительным, а другая компенсационным. Согласно закону Бугера – Ламберта – Бера, проходящие потоки излучения через слой контролируемой жидкости на компенсационной и измерительной длинах волн, имеют вид:

$$\Phi_{\lambda_1} = \Phi_{0\lambda_1} e^{-\kappa_1 C d}; \quad \Phi_{\lambda_2} = \Phi_{0\lambda_2} e^{-\kappa_1 C d} e^{-\kappa_2 C d}, \quad (7)$$

где $\Phi_{0\lambda_1}$ и $\Phi_{0\lambda_2}$ – световые потоки до прохождения через слой контролируемой жидкости; Φ_{λ_1} и Φ_{λ_2} – световые потоки после прохождения через слой контролируемой жидкости; κ_1 – коэффициент рассеяния; κ_2 – коэффициент поглощения, зависящий от цвета контролируемой жидкости; e – основание натурального логарифма; d – толщина слоя контролируемой жидкости.

Выворняв начальные потоки излучения $\Phi_{0\lambda_1} = \Phi_{0\lambda_2}$, получим:

$$\frac{\Phi_{\lambda 1}}{\Phi_{\lambda 2}} = e^{k_2 C d} . \quad (8)$$

Из этих выражений видно, что при $d = \text{const}$ отношение проходящего потока излучения на компенсационной и измерительной длинах волн через слой контролируемой жидкости пропорционально цвету контролируемого нефтепродукта.

Предлагаемое устройство обладает повышенной точностью распознавания цвета в ходе технологического процесса за счет трех оптопар, которые контролируют три цветовых параметра, соответствующие параметрам X, Y, Z.

Устройство обладает повышенной точностью контроля за счет трехмерного измерения с длинами волн $\lambda_1 = 680$ нм, $\lambda_2 = 560$ нм, $\lambda_3 = 450$ нм, когда в качестве эталонных приемников оптического излучения применены фоторезисторы.

При необходимости сигнал с выхода блока обработки фотоэлектрического сигнала можно подать в систему автоматического контроля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рахимов, Н.Р. Исследование фотоэлектрических свойств АФН-пленок теллурида кадмия с серебром и разработка оптоэлектронных приборов на их основе: дис. канд. техн. Наук.- Ташкент 2001.- 140с.
2. Rahimov N.R; Gafurov U.A., Zokirov R. Semitransparent fluid color sensor-analyzer «ДЦ-5М». – Moscow, Vneshtorgizdat, 1991, N 3822 Т, р. 2.
3. Рахимов, Н.Р. Оптоэлектронный анализатор цвета полупрозрачных жидкостей // Приборы и средства автоматизации научных исследований и народного хозяйства Республики. – Ташкент, 1991 г.- С. 90-93.
4. Юстова Е.Н. Вопросы измерения и стандартизации цвета: дис. на соиск. учен. степ. д.т.н.- Л., 1974.
5. Мешков, В. В. Основы светотехники.- М: Энергия, 1979.

© Н.Р. Рахимов, О.К. Ушаков, Е.Ю. Кутенкова, М.П. Исаев, 2009

УДК 681.7

М.М. Кузнецов, П.И. Петров

СГГА, Новосибирск

КОНТРОЛЬ КЛИНОВИДНОСТИ ПЛАСТИН ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

M.M. Kuznetsov, P.I. Petrov

SSGA, Novosibirsk

PHOTOELECTRIC WAY OF PLATES WEDGING CONTROL

The work puts forward the description and operation principles of the universal machine for plates wedging testing by photoelectric way.

За частую, на практике в условиях массового и серийного производства возникает необходимость оперативного, сравнительно простого и недорогого способа контроля клиновидности стеклянных пластин.

Предлагаемая установка, оптическая схема которой представлена на рис. 1 состоит:

1. Источник света;
2. Точечная диафрагма;
3. Объектив коллиматора;
4. Контролируемая деталь;
6. 5, 6. Зеркала;
7. Объектив приемного устройства;
8. Ирисовая диафрагма;
9. Фотодиод.

Принцип действия установки основан на преобразовании световой энергии оптической системы в электрический сигнал. В качестве приемника излучения предлагается использовать фотодиод любой марки.

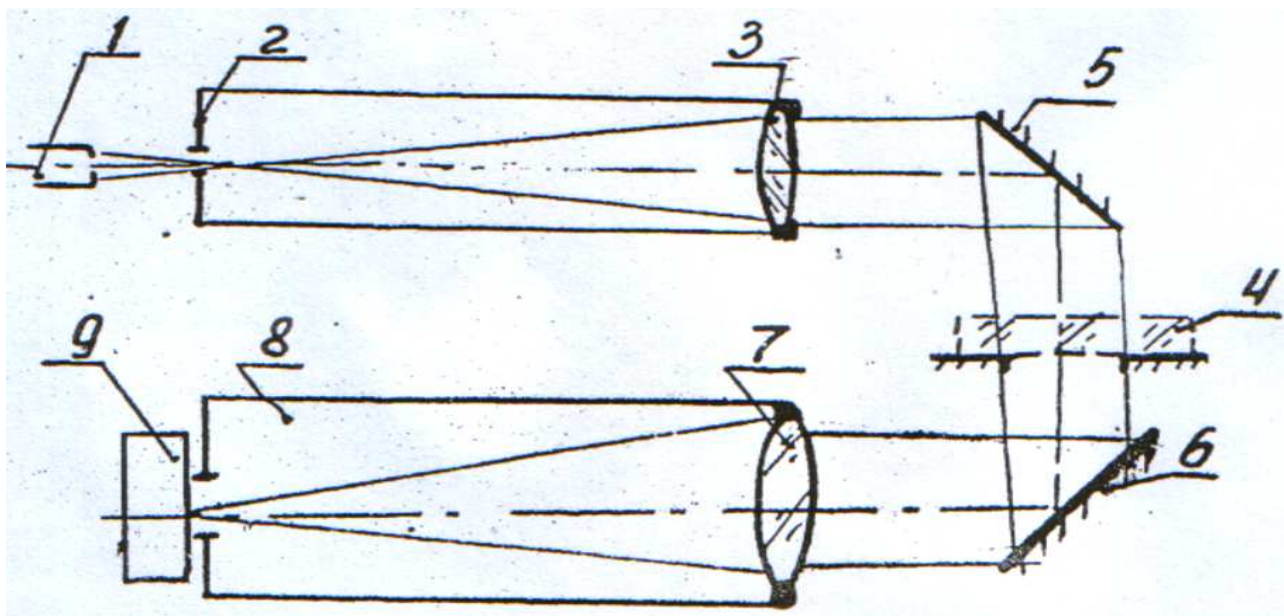


Рис. 1. Принципиальная схема установки

Источник света 1 освещает точечную диафрагму 2, расположенную в фокусе объектива 3 коллиматора. Параллельный пучок, вышедший из объектива коллиматора, поворачивается зеркалами 5 и 6 на 180° и попадает в объектив 7 приемного устройства. Объектив 7 строит изображение точечной диафрагмы в центре приемной площадки фотодиода.

Фотодиод является преобразователем световой энергии в электрический сигнал. При попадании света на приемную площадку фотодиода срабатывает электрическая схема приемного устройства и загорается сигнальная лампочка. Второй вариант схемы: составив переводную таблицу и измеряя фототок можно говорить о величине отклонения или клиновидности пластины.

Контролируемая деталь 4, вводимая в параллельный пучок лучей между зеркалами 5 и 6, отклоняет изображение диафрагмы на некоторый угол (в зависимости от величины клиновидности детали). Ирисовая диафрагма 8 расположена в плоскости приемной площадки фотодиода и ограничивает предел допустимого значения угла отклонения проверяемой клиновидной пластины.

Перед проведением измерений необходимо провести настройку прибора на необходимый или допустимый угол клина следующим образом: ирисовую диафрагму закрыть, а в параллельный ход лучей прибора между зеркалами 5 и 6 ввести эталонную деталь, имеющую предельно допустимый угол клина. Медленно увеличивая диаметр раскрытия ирисовой диафрагмы необходимо добиться момента загорания лампочки. В этом случае изображение светящейся точки попадает на приемную площадку фотодиода (рис. 2). Установка считается настроенной на заданный угол отклонения.

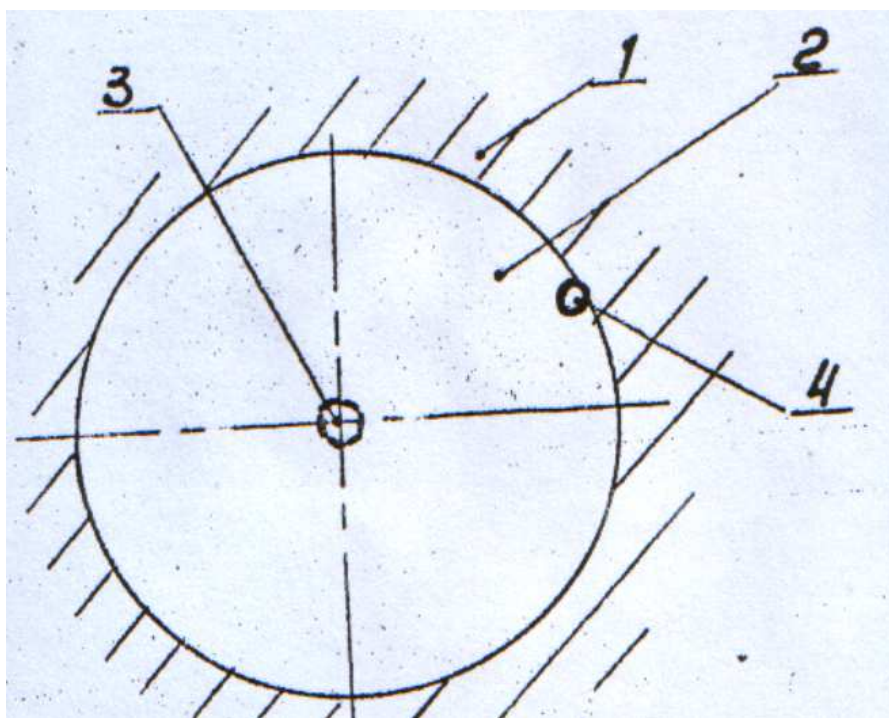


Рис. 2. Порядок настройки установки

1. Ирисовая диафрагма;
2. Приемная площадка фотодиода;
3. Изображение точечной диафрагмы до введения эталонной детали;
4. Изображение точечной диафрагмы, смещенное эталонной деталью.

Далее, вместо эталонной детали в ход лучей прибора устанавливается контролируемая деталь. Если сигнальная лампочка загорается – деталь считается годной; если лампочка не загорается (то есть угол отклонения детали больше допустимого, и изображение светящейся точки уходит за пределы приемной площадки фотодиода) – деталь негодная.

© М.М. Кузнецов, П.И. Петров, 2009

УДК 681.586.2

М.М. Кузнецов

СГГА, Новосибирск

МОНТАЖ ОТВЕТСТВЕННЫХ УЗЛОВ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

M.M. Kuznetsov

SSGA, Novosibirsk

ASSEMBLY OF MAIN UNITS FOR GYROSCOPE INSTRUMENTS

The technological process is described which is used for mounting ball bearings of gyroscope instruments in small-scale production.

Современный этап развития гироскопических приборов и устройств характеризуется повышенными требованиями к их точности и надежности [1].

Обеспечение высокой точности и надежности гироскопических приборов обуславливается не только совершенствованием самих технологических процессов, а во многом зависит и от производственной среды, в которой происходит сборка, регулировка и испытания приборов.

Процесс сборки, регулировки и испытания приборов отличается большой сложностью и трудоемкостью. Это обуславливает применение особо прецизионной испытательной аппаратуры, точного оборудования и высоко квалифицированных кадров.

Остановимся на технологии монтажа шарикоподшипников гироскопа – наиболее ответственной технологической операции, от которой во многом зависит качество и надежность работы гироскопического прибора.

Технологический процесс включает в себя следующие работы:

- Расконсервацию подшипников;
- Входной контроль;
- Промывку;
- Монтаж подшипников;
- Регулировку зазоров.

В процессе расконсервации, подшипники, поступившие на сборку, распаковывают, отчищают от консервирующей смазки и промывают в чистом авиационном бензине.

Промывка должна выполняться в специальных бачках. Бензин должен подаваться на подшипник тонкой струйкой, направленной по углом. Струйка бензина должна заставлять наружное кольцо подшипника вращаться со скоростью до 200 об/мин. Такой режим обеспечивает высококачественную промывку подшипника. Загрязненный бензин может фильтроваться через ватный фильтр и снова использоваться в работе. Сушку подшипников лучше

проводить под стеклянным колпаком, при этом промытые подшипники, во избежание коррозии, лучше перемещать с использованием латунных пинцетов. Брать детали подшипников руками нельзя.

При входном контроле следует проверить действительные размеры посадочных поверхностей. Измерения должны производиться с точностью, соответствующей точности подшипников и сопрягаемых деталей. Для подшипников 2 и 4-го классов точности измерения производятся с точностью до 0,0005 мм.

Рабочие поверхности подшипников следует подвергнуть осмотру при 30-кратном увеличении на отсутствие коррозии и механических повреждений. Фактический начальный радиальный зазор определяется измерением смещения наружного или внутреннего кольца в радиальном направлении на специальных приспособлениях. Величина смещения должна фиксироваться по отсчетному устройству с точностью до 0,0002–0,0005 мм. Одной из главных проверок входного контроля подшипников является проверка легкости хода. Легкость хода может быть проверена путем измерения времени выбега или определением момента трения. Так как сухое трение в подшипнике не допускается, перед проверкой легкости хода следует смазать его очень небольшой дозой рабочей смазки.

Для проверки времени выбега наружное кольцо подшипника с помощью эластичного вращающего круга разгоняют до 2 000 об/мин, а затем по секундомеру фиксируется время до полной остановки. Это время должно быть не менее указанного в ТУ.

Кроме указанных проверок, подшипники главных опор должны контролироваться на выявление дефектов по следу прокатки и на величину осевого смещения колец.

Промывку шарикоподшипников лучше проводить в несколько этапов:

- Перед предварительной сборкой;
- После подгонки посадочных мест;
- Перед окончательной сборкой.

Промывку следует проводить на специальных участках, оборудованных промывочными ваннами. Составы ванн следует обновлять после промывки 30 подшипников, но не реже двух раз в смену. Во избежание перепутывания, каждую ванну следует оснастить табличками с названием жидкости и порядковым номером. Подшипники необходимо брать латунными пинцетами и после окунания в ванну очищать кистью. У разборных подшипников с текстолитовым сепаратором необходимо промывать только кольца.

Перед предварительной сборкой промывку следует проводить в ваннах следующего состава:

- Первая ванна – бензин;
- Вторая ванна – бензин;
- Третья ванна – мыльный раствор;
- Четвертая ванна – бензин;

- Пятая ванна – спиртобензольная смесь (1:2);
- Шестая ванна – бензин.

Длительность операции в каждой ванне от 0,5 до 1 мин. После притирки посадочных мест следует производить дополнительную промывку подшипников в двух бензиновых ваннах.

После подгонки посадочных мест промывка должна производиться незамедлительно в следующем порядке:

- Первая ванна – бензин;
- Вторая ванна – бензин;
- Третья ванна – бензин;
- Протирка батистовой салфеткой;
- Пятая ванна – мыльный раствор;
- Шестая ванна – бензин;
- Седьмая ванна – спиртобензольная смесь;
- Восьмая ванна – бензин.

Промытые подшипники следует сушить на конденсаторной бумаге обдувкой воздухом из полиэтиленовой груши; затем сушить в термостате при температуре +800 °С (время 10–15 мин) с последующей укладкой в специальную тару (закрывающуюся баночку из оргстекла) и хранением в плотно закрывающейся таре с силикагелем.

Монтаж шарикоподшипников главных опор является одной из специфических операций, характерных для гироскопических приборов. Эта работа выполняется в два этапа:

- Предварительная сборка;
- Окончательная (чистовая) сборка.

Обеспечение требуемой посадки подшипников достигается методом подбора или подгонкой сопрягаемых деталей.

Предварительная сборка подшипников обычно сводится к подгонке шейки вала и посадочного гнезда корпуса до требуемого действительного размера. Доводка шейки вала производится притиркой.

Процесс доводки сопровождается постоянными проверками размера. Отверстия под подшипник в корпусе прибора доводятся путем калибровки эталонной пробкой или эталонным кольцом, которые прогоняются в отверстиях на специальном приспособлении или на ручном прессе. Калибровка идет за счет уплотнения материала. При калибровке должны быть исключены возможности перекоса инструмента.

На окончательной сборке происходит окончательная установка подшипника на валу и в отверстие корпуса. Так как подшипники главных опор обычно бывают разборными, монтаж наружного и внутреннего колец выполняется независимо.

Последовательность монтажа неразборных подшипников определяется конструкцией вала, но, как правило, сначала собирается соединение с наибольшим натягом. В большинстве случаев таким соединением является наружное кольцо – корпус. Целесообразность такой последовательности объясняется тем, что при установке подшипника в корпус в большей степени возможна вероятность образования перекоса, однако некоторые конструкции подшипниковых узлов предполагают одновременную установку подшипника в корпус и на вал. При таком варианте установки значительную роль играют предварительный подбор подшипников и предварительная подгонка сопрягаемых деталей.

Установка подшипника или его колец на вал и в корпус производится на специальных приспособлениях или ручных прессах с использованием оправок и других направляющих элементов, исключающих перекос колец. Во избежание механических повреждений нагрузка при запрессовке должна прилагаться плавно. Приспособление должно оснащаться динамометром для фиксирования усилия запрессовки. По величине усилия запрессовки судят о величине фактического натяга и его соответствии предписанной посадке.

Для предохранения от механических повреждений и уменьшения усилия запрессовки посадочные поверхности подшипниковых колец следует смазать небольшим количеством смазки.

Величина радиального зазора шарикоподшипника оказывает большое влияние на точность прибора. Уменьшение зазора приводит к увеличению момента трения подшипников и быстрому износу их, так как в результате защемления шариков возможен разрыв смазывающей пленки, а в результате одностороннего вращения шариков – неравномерный и быстрый износ по кольцу.

Увеличение зазора сверх оптимальной величины также повышает момент трения и увеличивает износ, так как уменьшается число одновременно работающих шариков и соответственно увеличивается нагрузка на каждый из них, и кроме того, возможно нарушение соосности деталей и возникновение неопределенности относительного положения деталей в осевом направлении, что создает трудности при динамической балансировке деталей.

Регулировка зазоров производится за счет относительного смещения наружного и внутреннего колец подшипников в осевом направлении. Это касается как радиальных, так и радиально-упорных подшипников. Так как между радиальным и осевым зазором существует прямая зависимость, представленная в формуле 1, за счет изменения осевого зазора регулируется и радиальный:

$$\delta S = 2 * [(2r - d_{ш})e]^{1/2} \quad (1)$$

где δS – осевой зазор, мм; r – радиус желоба, мм; $d_{ш}$ – диаметр шарика, мм; e – радиальный зазор, мм.

Практически регулировка осевого зазора осуществляется с помощью шайб, прокладок, резьбовых деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шепелев, Н.И. Сборка, регулировка и испытание гироскопических приборов. – М.: «Машиностроение». – 1977. – 192 с.

© М.М. Кузнецов, 2009

УДК 001.4

М.М. Кузнецов

СГГА, Новосибирск

Д.А. Кузнецова

ФГУП «ПО «НПЗ»» Новосибирск

КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ В СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

M.M. Kuznetsov

SSGA, Novosibirsk

D.A. Kuznetsova

Federal state unitary enterprise

“Production association

Novosibirsk Instrument-making Plant”

CLASSIFICATION OF PRODUCTS TESTS TYPES IN SERIAL PRODUCTION

The article deals with systematization and classification of products testing types to be used in serial production.

По характеру воздействующих факторов, главным образом, различают механические и климатические испытания.

Климатические испытания:

- Испытания на теплоустойчивость;
- Испытания на холодоустойчивость;
- Испытания на влагоустойчивость;
- Испытания на брызгозащищенность;
- Испытания на воздействие атмосферного давления;
- Испытания на воздействие солнечной радиации;
- Испытания на пыле устойчивость и пыле защищенность.

Механические испытания:

- Испытания на вибрационные нагрузки;
- Испытания на ударные нагрузки;
- Испытания на прочность к транспортированию.

Испытания на теплоустойчивость проводят с целью определения способности изделий сохранять свои параметры в условиях воздействия повышенной температуры среды.

Испытания на холодоустойчивость проводят с целью определения способности изделий сохранять свои параметры в условиях воздействия пониженной температуры среды.

Различают два вида испытаний на влагоустойчивость: при длительном и кратковременном воздействии.

Испытания при длительном воздействии повышенной влажности проводят с целью определения устойчивости параметров изделий и выявления различных дефектов (коррозии, повреждения покрытий и т. д.).

Испытания при кратковременном воздействии производят с целью выявления дефектов, которые могут возникнуть из-за нарушения технологии производства изделий и качества применяемых в производстве материалов.

Изделия, предназначенные для работы на открытом воздухе в наземных условиях или на кораблях, под навесами, в открытых транспортных средствах или помещениях, а так же в условиях непосредственного погружения в воду, должны подвергаться испытаниям на брызгозащищенность (дождевание), водозащищенность и водонепроницаемость.

При испытаниях на брызгозащищенность изделия подвергают равномерному обрызгиванию водой поочередно со всех сторон.

При испытаниях на водозащищенность и водонепроницаемость изделия погружают в воду на определенную глубину.

Особые условия эксплуатации изделий или их транспортирование на летательных аппаратах и в высокогорных районах требуют необходимости их испытаний при пониженном атмосферном давлении.

Проведение испытаний на воздействие солнечной радиации в совокупности с другими климатическими факторами имеет целью выявить возможность нарушения покрытий кожухов и крышек приборов, а так же оптических и электронно-оптических узлов, состояние маркировки и шкал, старение проводов и кабелей.

В зависимости от условий эксплуатации и назначения изделий необходимо предусматривать одно из двух видов испытаний на воздействие пыли. Если изделие предназначено для работы в среде с повышенной концентрацией пыли, его подвергают испытаниям на пылезащищенность, целью которого является выявление способности изделия не допускать попадания пыли внутрь корпуса (кожуха). Если изделие специально не защищено от проникновения пыли, но вынуждено работать в среде с повышенной концентрацией, то с целью установления способности материалов и покрытий противостоять разрушающему (абразивному) действию пыли его испытывают на пылеустойчивость.

Основной целью вибрационных испытаний является установление способности изделий противостоять разрушающему влиянию механических воздействий, а так же определение их способности выполнять свои функции при сохранении электрических параметров в пределах установленных норм.

Испытания на ударную нагрузку проводят с целью оценки прочности и устойчивости изделий к большим ускорениям.

Испытания на прочность при транспортировании проводят с целью подтверждения способности изделий транспортироваться любым наземным видом транспорта.

Конкретные категории и виды испытаний и методики их проведения устанавливаются в технологической и конструкторской документации.

© М.М. Кузнецов, Д.А. Кузнецова, 2009

УДК 681.7.015.2

М.М. Кузнецов

СГГА, Новосибирск

ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. СПОСОБ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

M.M. Kuznetsov

SSGA, Novosibirsk

INFRARED RADIATION. VIZUALIZATION

The article demonstrates the way of making the screen for infrared visualization.

По конструкции экран представляет собой широкополосный интерференционный светофильтр, работающий в отраженном свете. Светофильтр состоит из двух слоев: первый слой – алюминиевое зеркало; второй – окисел ванадия, образующийся при термическом окислении на воздухе слоя металлического ванадия. Покрытие следует наносить на пластинку из слюды, шлифованную с одной стороны. При воздействии на экран инфракрасным излучением в слое окисла происходит изменение показателя преломления, что вызывает изменение коэффициента отражения и приводит к изменению цвета экрана. При комнатной температуре цвет экрана светло-голубой, при нагреве до 700 °С цвет экрана переходит в темно-синий.

Нанесение покрытия производится в любой вакуумной установке, обеспечивающей давление в рабочей камере не выше $1-2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Для нанесения слоя используют «чистый» алюминий и ванадий в количествах 0,3–0,5 г каждого.

После завершения процесса нанесения покрытия полученную пластинку следует отжечь в муфельной печи при температуре 5 000 °С в течение полутора минут.

Контроль изменения цвета при нагреве и равномерность нанесения покрытия производят визуально путем сравнения с эталоном.

При комнатной температуре 25 ± 10 °С экран должен иметь светло-голубой цвет или цвет морской волны. При нагреве экрана до температуры +70 °С его цвет должен быть темно-синим.

© *М.М. Кузнецов, 2009*

УДК 546.346:669.01

В.П. Перминов

СГГА, Новосибирск

МАГНИДЫ И Г.В. САМСОНОВ

V.P. Perminov

SSGA, Novosibirsk

MAGNESIUM DIBORIDES AND G.V. SAMSONOV

The author presents the certainty value of the prognoses made 40 years ago in monograph “Magnesium diborides and magnethermy”.

Под термином «магниды» условились понимать не только класс соединений, в которых магний является более электроотрицательным элементом, чем его партнеры, но и соединения, в которых магний электроположителен, поэтому это название несколько условно, так же, как, например, «алюминиды». Однако автор предпочитает оперировать этим термином не только из-за его лаконичности по сравнению, скажем, с термином «металлиды магния», а ещё и в силу глубокого уважения к своему выдающемуся учителю и соавтору монографии МАГНИДЫ [1] Григорию Валентиновичу Самсонову – координатору работ по получению и исследованию боридов, карбидов, силицидов и других материалов.

В данной работе предпринята попытка оценки степени достоверности прогнозов, высказанных нами 40 лет назад в монографиях МАГНИДЫ и МАГНИИТЕРМИЯ [1, 2].

За истекший период были построены свыше десятка новых бинарных диаграмм состояния с участием магния и сделаны первые шаги в построении более 300 тройных [3].

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

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

Не были обнаружены подобные соединения (как и предполагалось нами) в системах магния с лантаном, церием, празеодимом, неодимом, европием и гадолинием.

Обнаружение в системах магния с La, Ce, Pr Na и Sm магнидов вида Me_5Mg_{41} приведет к некоторой корректировке известных диаграмм состояния.

Мной предложена матрица периодической системы элементов в виде круга, из которой можно понять, в каких направлениях идут исследования тройных и более систем с участием магния [4].

Больше всего магнидов в последние годы обнаружены в системах Mg-Al-Э (свыше 3х десятков) и Mg-Zn-Э (свыше 4х десятков), где Э – элемент периодической системы.

Недавно нами [5] впервые в мире получен MgB_2 взрывом и тем самым намечен новый путь получения этого перспективного вещества.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. Самсонов Г.В., Перминов В.П. Магниды. – Киев: Наукова думка, 1971. – 344 с.
2. Самсонов Г.В., Перминов В.П. Магниетермия. – М.: Металлургия, 1971– . 174 с.
3. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем в 3т. – М.: Машиностроение, 1996–2000.
4. Перминов В.П. Новые области применения магнидов. Сборник статей по материалам 54 научно-технической конференции, посвященной 225-летию геодезического образования в России. – Новосибирск: СГГА, 2005. – С. 113–117.
5. V.I. Mali, V.A. Neronov, V.P. Perminov et.al. – Synthesis of MgB_2 by explosion X APM TOPICAL SEMINAR and III "CONFERENCE MATERIALS of SIBIRIA NANOSCIENCE AND TECHNOLOGY" Novosibirsk, RUSSIA, 2003, June 2-6, s. 369–370.

© В.П. Перминов, 2009

УДК 681.7

А.А. Марач

СГГА, Новосибирск

МОДЕЛИ ОПЕРАТИВНО-КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

A.A. Maratch

SSGA, Novosibirsk

MODELS OF CURRENT CALENDAR PLANNING DANS LA PRODUCTION OPTIQUE

Models of current calendar planning make up an organizing link bringing together all the adopted organizational features as concerns the process of optical production management, the decisions on enterprise resources distribution and technological processes of component-parts making. It is the chosen model adequacy that determines accuracy of management system development. That results in the reduction of nonmanufacturing overheads as the main factor of enterprise efficiency increase.

Модели оперативно-календарного планирования связывают воедино систему производства, диспетчирование и управление. Относительно содержания и сроков действия оперативное планирование подразделяется на три вида: объемное планирование, календарное планирование и оперативное управление. Эти виды зависят от разрабатываемых объемных и календарных показателей и основаны на соблюдении технологической схемы производства.

Технологическая схема производства содержит последовательный перечень работ (операций) обработки исходных материалов (начиная от приемки до выпуска готовой продукции) с применением соответствующего оборудования и обязательным указанием режимов обработки (температуры варки стекла, скорости вращения шпинделя, состава СОЖ).

Модели объемного планирования, позволяют определить на каком множестве номенклатуры возможно выполнение оперативного плана. При известном количестве основного и вспомогательного оборудования определяется, весь ли состав оборудования может быть при этом использован.

Цель данной предварительной модели – определить возможность запуска партия операций с учетом транспортных операций и определение оптимального состава единицы планирования, закрепленных за оборудованием.

Математическая модель предварительного объемного планирования имеет следующий вид:

$$F_{l \rightarrow \min}, l \in \{1, f\}; \quad (1.1) \quad \text{—}$$

$$\sum_i^m \sum_{j=1}^{p_i} e_{ijk} e_{ijk}^{BO} (a_{ij} t_{oe_{ijk}} + t_{ПЕР e_{ijk}}) < \Phi_{ck}, k = 1, n; n \in N; \quad (1.2)$$

$$\sum_i^m \sum_{j=1}^{p_i} e_{ijk} e_{ijk}^T t_{TPsk} < \sum_{l=1}^r \Phi_{Tl}, l \in R; \quad (1.3)$$

$$\begin{matrix} 1, \\ 0 \end{matrix} e_{ijk}^T \left\{ \begin{matrix} \exists e_{ij-1,s} | e_{ij-1,s} \subset \Phi_{Cs} \ s \neq k, s, k \in N \end{matrix} \right. \quad (1.4)$$

$$T_{ПЕР} = \{t_{ПЕР e_{ijk}}\}; \quad (1.5)$$

$$T_{ТР} = \{t_{ТРsk} | s, k \in N\}; \quad (1.6)$$

$$T_O = \{t_{oe_{ijk}}\}; \quad (1.7)$$

$$N = \{1, n | n \geq 1\}; M = \{1, m | m > 1\}; R = \{1, r | r \geq 1\}, \quad (1.8)$$

где Φ_{ck} – фонд времени работы к-го модуля; Φ_{Tl} – фонд времени i-го транспортного средства; $T_{ПЕР}$, $T_{ТР}$ и T_O матрицы переналадки транспортирования и времени обработки заготовки, соответственно. Единицы планирования e_{ijk} определяются после окончания вычислений, и тем самым составляют перечень наименований изделий, включенных в загрузку той или иной модели. Включение ограничений по фонду времени каждой единицы оборудования (1.2) из всего множества единиц планирования e_{ijk} , значительно облегчают формирование уравнения модели. Возможность учета в объемной модели транспортных средств, за счет наличия ограничений по фонду времени и их количества (1.3), появляется с использованием в данном ограничении переменных e_{ijk}^T , означающих наличие операций транспортирования для единиц планирования. Значение переменных e_{ijk}^T , определяется выражением (1.4), согласно которому для единиц планирования существует операция транспортирования с одного модуля на другой, при условии что для данной детали j-я операция включена в состав обрабатываемых единиц планирования. Строгие неравенства в ограничениях (1.2) и (1.3) обусловлены тем, что случай равенства левых и правых частей является непредпочтительным, так как модель является приближенной и не учитывает простоев оборудования. [3]

Многие искомые параметры модели имеют характер булевых переменных, в алгоритме решения задачи используется метод булевого программирования – алгоритм Э. Балаша [4].

В результате решения данной задачи становятся известными:

- предварительные назначения деталей модели

$$\Theta^I = \{\Theta_1^I \{e_{111}, e_{121}, \dots, e_{ij1}\}, \Theta_2^I \{e_{312}, \dots, e_{lk2}\}, \dots \{\Theta_n^I \{e_{m1n}, \dots, e_{gpgn}\}\}\}; \quad (1.9)$$

номенклатура деталей, вошедших в первое оптимальное назначение – M^I

- предварительная загрузка парка и транспортных средств.

Детали, не вошедшие в назначение, удаляются из множества номенклатуры планирования на текущем периоде и переносятся на следующий план работы комплекса.

Расчетные данные предварительной объемной модели планирования являются информационной основой для последующего анализа формируемого расписания.

Модель укрупненного планирования позволяет сформировать, с определенной долей приближения, последовательность запуска единиц планирования на то оборудование, которое было определено при решении предыдущей задачи объемного планирования.

При достаточно большой мощности изначального множества номенклатуры фонды работы оборудования кратно увеличивают (до двух, четырех смен). При этом предварительное планирование (1.9) отражает загрузку парка оборудования на несколько смен, что позволяет оценить временные параметры выполнения единиц планирования и само множество номенклатуры деталей.

Модель укрупненного планирования имеет следующий вид:

$$F_l \rightarrow \min, l \in \{1, f\}; \quad (2.1)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{p_i} e_{ijk} \left(a_{ij} \times t_{Oe_{ijk}} + t_{ПЕРe_{ijk}} + t_{ОСе_{ijk}} + t_{ОСтe_{ijk}} \right) \leq \Phi_{nk}, \quad (2.2)$$

$$k = 1, n; \quad \text{—}$$

$$\sum_{m=1}^{z_l} t_{TP_{lm}} e_{ijk} \leq \Phi_{rl}, \quad l = 1, r; \quad (2.3)$$

$$\tau_{Oe_{ijk}}^H \geq \tau_{Oe_{ij-1s}}^{KH}, \quad k, s \in N\{1, n\}; \quad (2.4)$$

$$\tau_{Tle_{ijk}}^H \geq \tau_{Tle_{mhq}}^{KH}, \quad l \in R; i, m \in M; k, q \in N\{1, n\}; \quad (2.5) \quad \text{—}$$

$$T_{ПЕР} = \{t_{ПЕРe_{ijk}}\}; \quad (2.6)$$

$$T_{ТР} = \{t_{TP_{sk}} | s, k \in N\}; \quad (2.7)$$

$$T_O = \{t_{Oe_{ijk}}\}; \quad (2.8)$$

$$N = \{1, n | n \geq 1\}; M = \{1, m | m \geq 1\}; R = \{1, r | r \geq 1\}; \quad (2.9)$$

где $t_{ПЕРe_{ijk}}$ – потери времени, связанные с наличием операций переналадок при поступлении новых партиаопераций деталей;

$t_{ОСе_{ijk}}$ – потери времени, связанные с ожиданием партии деталей, находящиеся в требуемый момент на обработке на предыдущей операции;

$t_{ОСтe_{ijk}}$ – потери времени, связанные с ожиданием партии деталей, находящиеся в процессе транспортирования;

$t_{ОСе_{ijk}}^{\Sigma}$ – суммарное время простоя k -го модуля при обработке единиц планирования, равное сумме предыдущих времен простоев. Выражение (2.1) отражает функционал однокритериальной задачи оптимизации, выражение (2.2–2.3) – ограничения по фонду времени работы модуля и транспортных средств, (2.4) – условие предшествования, отражающее логику выполнения операций, (2.5) – условие, обеспечивающее выполнение только одной заявки во времени. Остальные выражения в модели аналогичны по смыслу объемной модели.

В отличие от предыдущей объемной модели данная модель оперирует моментами времени начала и окончания операций и переходов, времени на

транспортировку заготовок (τ_{Oeijk}^H , τ_{Oeijk}^{KH} , $\tau_{ПЕРЕijk}^H$, $\tau_{ТРЕijk}^H$, $\tau_{ТРЕijk}^{KH}$ соответственно), что дает не только назначения единицы планирования, но и четкую последовательность запусков единиц планирования, а также все временные параметры расписания.

Модель укрупненного планирования позволяет получить следующие данные: уточненную номенклатуру, по сравнению с предыдущей моделью объемного планирования, представленную последовательностью; временную динамику использования оборудования (основного, вспомогательного); возможные объемы незавершенного производства.

Имитационная модель позволяет наглядно представить картину передвижения единицы планирования согласно технологическому процессу, а также дает возможность оперативной оценки влияния компоновочных и структурных факторов используемых технологических и вспомогательных средств (типа и расположения оборудования) на загрузку оборудования и формирования расписания. В данной модели предложен метод синтеза сетей Петри [3] и поведение системы во времени как функции изменения состояния множества номенклатуры.

Принцип функционирования сети следующий. В начальный момент заготовка находится на складе и для перехода ее состояние обработки или перемещение на другой модуль определяется сравнением по адресу местонахождения. Таким образом, каждая заготовка имеет следующую маркировку

$$e_{ij} = \{i, j, \tau^H, \tau^{KH}, k, t\}, \quad (3.1)$$

где k – адрес местонахождения, t – время начала и окончания пребывания в данном состоянии. Сначала формируется перечень терминальных процедур, которые затем используются при описании макропроцедур (перемещение заготовки со склада на рабочее место сборщика, перемещение узла на промежуточный склад и т. д.).

Особенность данной модели состоит в том, что за счет свойств масштабирования во времени, есть возможность проследить движение единицы планирования на любом отрезке пути; возможность моделирования уже созданной сети в пределах любых интервалов времени; провести оценку предварительных расписаний работы каждого модуля. [1]

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Загидулин Р. Р. Оперативно-календарное планирование в гибких производственных и интегрированных системах. – М.:Издательство МАИ, 2004г. -208 с.
2. Назаретов В. М.; Кульба А. В. Использование модифицированных сетей Петри для имитационного моделирования гибкого автоматизированного производства //Проблемы создания гибких автоматизированных производств.- М.: Наука 1987.С56-62.
3. Мухачева Э. А., Рахимов Э. Г, Балезина О. Г. Расчет оптимального варианта постановки размеров при заданном маршруте обработки детали и фиксированных установочных базах. Труды УАИ, вып.41 Уфа,1973.

4. Султан-заде Н. М., Загидулин Р. Р. Повышение производительности ГПС путем оптимизации расписаний //СТИН, 1996. - № 12. – С.9-13.
5. Васильев В. Н., Садовская Т. Г. Организационно-экономические основы гибкого производства. – М.: Высш. шк., 1988.-272 с.

© А.А. Марач, Новосибирск, 2009

УДК 004

М.М. Кузнецов

СГГА, Новосибирск

М.С. Комбаров

ФГУП «ПО «НПЗ»», Новосибирск

СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА SPRINT

M.M. Kuznetsov

SSGA, Novosibirsk

M.S. Kombarov

Federal state unitary enterprise

“Production association

Novosibirsk Instrument-making Plant”

SYSTEM OF COMPLEX AUTOMATION OF PRODUCTION (SPRINT)

The system of complex automation of production (SPRINT) is described.

История создания системы Спринт началась в 2000 году, когда специалистам одной из организаций было предложено заняться комплексной автоматизацией производства, и, прежде всего, – создать корпоративную систему электронного документооборота, на крупном машиностроительном предприятии города Новосибирска [1].

При проектировании Спринта, разработчики изначально решили применить в его составе широко известную систему управления базами данных, – СУБД FireBird. Сейчас применяется версия 2.0.1 этого продукта, но разработчики работают над созданием интерфейсов, драйверов к другим масштабно используемым СУБД, в частности – ORACLE. Для написания «интеллектуальной» оболочки, модулей и интерфейсов Спринта, выбор создателей системы был сделан в пользу языка высокого уровня C++. Объектно-ориентированный подход, при реализации технологии «клиент – сервер», оказался более чем оправдан. Специалисты-разработчики по системному и прикладному программному обеспечению, в качестве инструментальной платформы разработки избрали знаменитый пакет, – средство программирования Borland Builder C++ 5.0 и его объектные библиотеки, благодаря чему Спринт легко устанавливается и работает на устойчивой, распространенной операционной системе семейства Windows 2000/XP.

Работая над решением такой многогранной задачи – создания системы для комплексной автоматизации уровня делопроизводства промышленного предприятия – разработчики понимали, что им не обойтись без тесного сотрудничества со многими специалистами: конструкторами, технологами, плановиками и управленцами разных уровней, учетчиками, кладовщиками,

бухгалтерами и еще многими, многими, непосредственно обеспечивающими прибыль большого предприятия людьми. Каждый из них, в своей профессиональной предметной области, обладал необходимыми знаниями, навыками, и был задействован в сложном механизме предприятия.

Разработчикам пришлось, прежде всего, детально разобраться по всем видам деятельности, – как отдельных работников предприятия, так и его структурных единиц, – цехов, отделов, служб, что бы лучше понять, как устроен этот самый, сложный механизм. Прежде чем создать Спринт, они проанализировали многие тысячи взаимодействий, – документарных, хозяйственных, финансовых, трудовых, – словом всех тех отношений, которые необходимо представить в виде строгих диаграмм последовательности, а затем, – «воплотить» в программной системе.

Кроме этого, программисты в полном объеме изучили и само производство сложных технических изделий, – от их конструкторского замысла до воплощения «в железе». Здесь также были выявлены и формализованы многие важные аспекты реального производства и сбыта, – ритмичность, сбои, циклы, цепочки. От заказа и создания проектно – конструкторской, технологической документации, от поставок сырья и комплектующих – до накладных на отгрузку готовой продукции.

Вся собранная информация была систематизирована, проанализирована и обобщена для того, чтобы воплотить систему Спринт, как универсальный продукт, программную и методологическую основу для построения «интеллектуальных» баз данных предприятий, решения конкретных задач по автоматизации их производственно – коммерческой деятельности. Ведь деловой успех любого современного предприятия на рынке невозможен без хорошей системы комплексной автоматизации.

В процессе работы над созданием системы создатели – разработчики пришли к выводу, что необходимо реализовать очень простые в использовании и, – в тоже время, – чрезвычайно гибкие программные механизмы, которые пользователи системы смогут легко задействовать на своем предприятии, например при формировании и сопровождении архивов документов.

Программисты реализовали эту идею, и пошли дальше, создав такой же простой и гибкий инструментарий для построения сколь угодно сложных структурных выборок, запросов. То есть, быстрого и качественного получения пользователями системы любой аналитической, расчетной или статистической информации, основанной на данных из архива. А это, в свою очередь, – основа для хорошей, единой поисковой системы предприятия и, – его также единой и универсальной справочной. Теперь разные задачи в системе могут к ним обращаться, и при этом не возникнет коллизий (конкуренции версий, или двойного учета, – например). Благодаря этим же свойствам, появилась возможность для построения общих методик определения аналитических срезов информации.

Проектируя оболочку управления данными, разработчики заложили в нее принципы унификации объектов, применимые к исходным документам, регистрам, и тому подобное. Это достаточные, почти идеальные условия для

наименования и последующего доступа не только к внешним, но и внутренним полям хранимых документов. Такой подход позволяет любому желающему получать изменяемые по необходимости, но при этом действительно единые форматы и шаблоны, а затем их использовать при информационном заполнении архивов.

После заполнения архивов, данные из них, становятся доступны, и легко интерпретируются любыми прикладными задачами, уже созданными на базе технологии Спринт, либо теми, которым предстоит еще появиться, благодаря расширению и развитию прикладной среды автоматизации. Кстати говоря, система Спринт снабжена отличной программной компонентой: открытой библиотекой процедур пользователей, что как раз и нацелено на расширение прикладных задач непосредственно силами специалистов предприятий, планирующих использовать этот действительно универсальный продукт.

В заключение, единообразие и типизация это хорошие методы, которые разработчики программы применили сами и рекомендуют использовать всем, кто связан с вводом и обработкой больших объемов информации. При комплексной автоматизации предприятий, разнообразие типов документов в обороте бывает велико. Если бы мы с вами не задумывались о максимально возможной типизации, то получили бы в информационной системе неподъемное количество правил для работы с документами, например – при вводе их в систему. Так вот: любая типизация возможна, используя систему Спринт.

В итоге система Спринт позволяет получить электронный архив структурированной информации по всем проектам.

Упорядоченный по этапам и литерам этот архив закладывает основу в описании цикла жизнедеятельности изготавливаемых изделий и является основой интеллектуальной базы данных предприятия:

- Необходимый перечень автоматически получаемых выходных конструкторских и технологических документов, оформленных в рамках системы ГОСТ.

- Возможность автоматического оформления стандартных проектных документов по ГОСТ и автоматического получение документов любого вида, необходимого для конкретного производства, позволит серьезно облегчить труд проектировщиков, освободить их от рутинного труда и сэкономить их время для творческого процесса;

- Организацию совместных работ проектных коллективов конструкторов, технологов, нормировщиков и т. д.

Организация совместных работ обеспечивает мощный механизм проектного документооборота системы Спринт, а также компонента визуализации проектных работ по признакам состояния проектирования документов в журнальных формах экрана.

Поделенный на ряд разделов Аналитического и Характеристического типа, этот архив позволяет быстро выйти на любые регистры и документы,

связанные с текущим ключевым справочным значением, что является основой мощной поисковой системы:

- Библиотеку описаний НСИ (номенклатурно-справочной информации) или карточки справочников, которые содержат всю дополнительную информацию по любым аналитическим и характеристическим справочным элементам. Эти данные носят характер условно-постоянной информации;

- Библиотеку внешних процедур, ориентированную на специфику собственного производства. Эту библиотеку можно рассматривать в рамках концепции интеллектуальной базы данных предприятия, как информационный архив, где собраны методики и алгоритмы по всем типам нормирования, всевозможные инженерные расчеты, расчеты себестоимости, допусков, припусков, раскроя, режимов резания, любые расчетные методики получения всевозможных производственных показателей и т. д., учитывающую специфику собственного производства;

- Библиотеку паспортной информации по строительным объектам, цехам, оборудованию, по инструменту, покупным изделиям и т. д., т. е. основную условно-постоянную информацию предприятия с отслеживанием этапов ее изменения (модификации);

- Библиотеку типовых элементов проектирования, куда входят все типовые и модульные техпроцессы, переделы, различные типовые проекты, графические и текстовые шаблоны – словом все то, что позволяет интеллектуальной базе данных постоянно развиваться.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Спринт. – Режим доступа: [http://_www.sibsapr.ru](http://www.sibsapr.ru)

© М.М. Кузнецов, М.С. Комбаров, 2009

УДК 621.396

Б.В. Поллер, В.А. Косинов, О.В. Косинов, Д.Е. Трушенко

ИЛФ СО РАН, Новосибирск

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОКРЫТИЯ ДИОКСИДОМ ТИТАНА СТЕКЛА И ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК

B.V. Poller, V.A. Kosinov, O.V. Kosinov, D.E. Trushenko

Institute of Laser Physics, Novosibirsk

DEFINITION OF PARAMETERS COVERING TITANIUM DIOXIDE ON GLASS AND POLYMERIC FILMS

The optical parameters titanium dioxide films covering glass and polymers are discussed.

Покрытое диоксидом титана стекло в настоящее время находит широкое применение, в частности, при нанесении теплосберегающего покрытия на листовое стекло, которое используется в строительстве при изготовлении оконного остекления. Покрытое диоксидом титана стекло обладает самоочищающимися свойствами, что очень важно при остеклении труднодоступных объектов [1, 2]. По этой причине, практически все зарубежные фирмы, выпускающие листовое стекло с теплосберегающим покрытием, перешли на использование диоксида титана, взамен оксида висмута и алюминия.

Методика определения параметров покрытия диоксидом титана основана на анализе так: поскольку эти вещества такими свойствами не обладают спектральной характеристики отраженного или прошедшего света [3].

Спектральный состав отраженного от покрытия света измерялся при помощи специального прибора-рефлексометра в диапазоне длин волн 300÷700 нм. При этом спектр отраженного света обрабатывался на компьютере и регистрировался на экране дисплея, где одновременно записывалась длина волны и относительная интенсивность. Относительная интенсивность отраженного от покрытия света определялась как отношение интенсивности света отраженного от покрытия, к интенсивности света, отраженного от эталонного зеркала. На рис. 1 приведен пример компьютерной обработки света, отраженного от слоя диоксида титана, нанесенного на стекло.

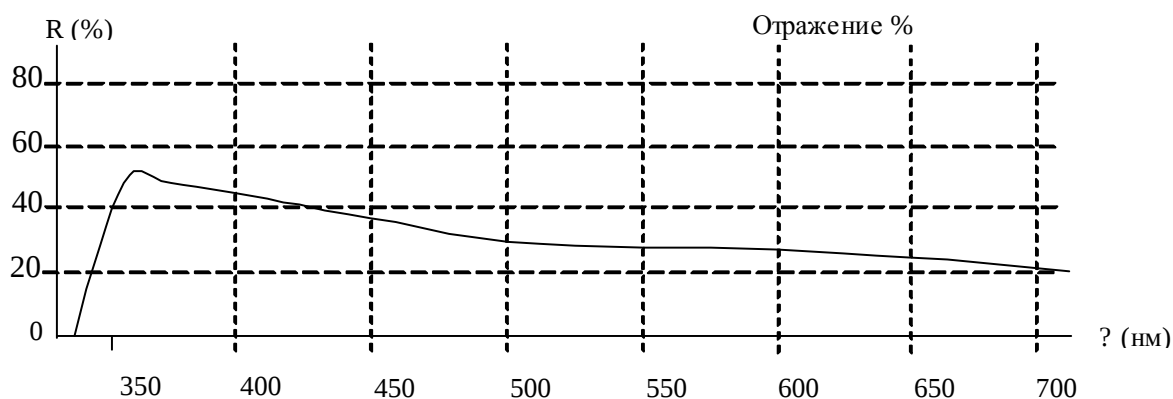


Рис. 1

Известно [3], что при нормальном падении света из среды с коэффициентом преломления n_1 в среду с коэффициентом преломления n_2 , коэффициент отражения света (отношение интенсивности отраженного света J_R к интенсивности падающего света J_O) определяется выражением

$$R = \frac{J_R}{J_O} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2. \quad (1)$$

В данном случае n_1 – коэффициент преломления воздуха, который приблизительно можно считать равным 1, n_2 – коэффициент преломления слоя диоксида титана.

Полагая $n_1 = 1$, имеем

$$R = \left(\frac{1 - n_2}{1 + n_2} \right)^2. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что уравнение для n_2 имеет два решения

$$\frac{1 - n_2}{1 + n_2} = \pm \sqrt{R}. \quad (3)$$

Принимая положительное значение $\sqrt{R}$, из выражения (3) получаем

$$n_2 = \frac{1 - \sqrt{R}}{1 + \sqrt{R}}, \quad (4)$$

что при $R > 0$ лишено смысла, так как в этом случае $n < 1$.

Принимая отрицательное значение $-\sqrt{R}$ имеем:

$$\frac{1 - n_2}{1 + n_2} = -\sqrt{R}. \quad (5)$$

Тогда из выражения (5) получаем

$$n_2 = \frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}}. \quad (6)$$

Выражение (2) получено в предположении пренебрежения влиянием на интенсивность света, отраженного от внешней границы слоя, светом, отраженным от внутренней границы слоя. Оценочные расчеты показывают, что пренебрежение вкладом в интенсивность света, отраженного от внутренней

границы слоя, дает погрешность, не превышающую нескольких процентов. Для доказательства этого рассмотрим схематический вид отраженного света от слоя диоксида титана, нанесенного на стекло (рис. 2).

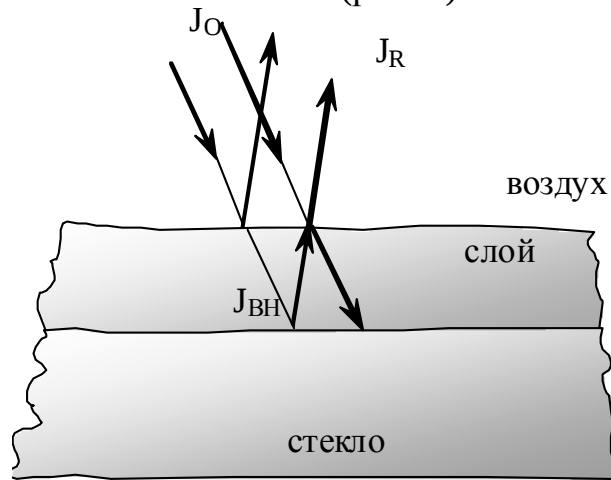


Рис. 2

Из рис. 1 видно, что при длине волны $\lambda = 500$ нм коэффициент суммарного отражения составляет $R \approx 0,26$. Тогда из выражения (6) следует, что

$$n_{2эф} = \frac{1 + \sqrt{0,26}}{1 - \sqrt{0,26}} = 3,08.$$

Из рис. 1 $R \approx 30\%$, что подтверждается и в [3]. Принимая коэффициент отражения от внешней границы слоя равным 0,26, получаем, что внутрь слоя прошло часть света $T_{сл} = 1 - R = 0,74$. Полагая коэффициент преломления стекла (рис. 2) $n_{ст} = 1,5$, из выражения (1) получаем для коэффициента отражения пленка–стекло

$$R_{сл} = \left(\frac{3,08 - 1,5}{3,08 + 1,5} \right)^2 \cdot 0,74 = 0,088.$$

Таким образом, вклад света, отраженного от внутренней границы стекло-слой не превышает 9 % для данного случая. В общем случае свет, отраженный от внутренней границы будет либо вычитаться, либо прибавляться в свету, отраженному от внешней границы, в зависимости от толщины слоя.

Из выражения (6) следует, что коэффициент преломления слоя диоксида титана имеет аномально высокое значение по сравнению с монокристаллами. Ранее было обнаружено, что коэффициент преломления пленки зависит от толщины слоя [3]. В свою очередь толщина слоя зависит от длительности времени покрытия и интенсивности испарения, зависящей от тока питания магнетрона. Поэтому для получения требуемой спектральной характеристики теплоотражающего покрытия фиксировалось время нанесения слоев диоксида титана, которое в дальнейшем поддерживалось постоянным. Незначительные отклонения получаемой спектральной характеристики от заданного эталона корректировались изменением тока питания магнетрона.

Для определения толщины пленки был использован процесс интерференции света, отраженного от внешней и внутренней границ слоя

диоксида титана. Известно [3, 4], что если над слоем находится среда с коэффициентом преломления меньшим, чем у слоя, а под слоем среда с большим коэффициентом преломления, при интерференции имеет место минимум, если разность хода лучей равняется половине длины волны падающего света

$$2\delta = (2\kappa + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (7)$$

где $\kappa = 0, 1, 2, \dots$; δ – оптическая толщина слоя, равная:

$$\delta = n_{\lambda}d. \quad (8)$$

Здесь n_{λ} – коэффициент преломления слоя на длине волны минимума, d – геометрическая толщина слоя.

Однако, при нанесении слоя диоксида титана на чистое стекло оказывается, что коэффициент преломления слоя, как следует из выражения (2), значительно выше коэффициента преломления стекла, равного $1,5 \div 1,6$. Поэтому для определения геометрической толщины слоя диоксида титана на стекло предварительно наносилось покрытие из чистого металла, например титана, с коэффициентом отражения $R \geq 0,5$. В этом случае эффективный коэффициент преломления «зеркального» покрытия, определенный из выражения (2), оказывается выше, чем у слоя диоксида титана. На рис. 3 показана интерференционная картина слоя диоксида титана на «зеркальном» покрытии.

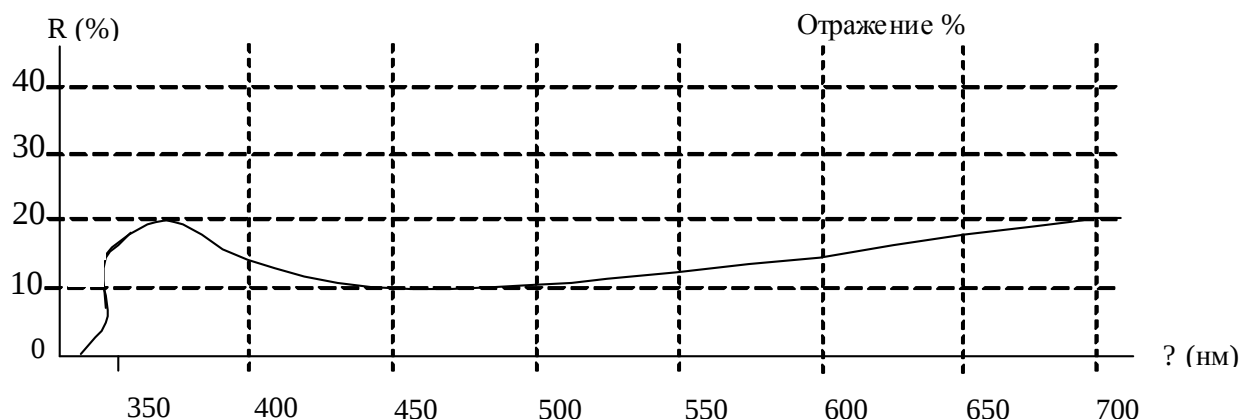


Рис. 3

Определяя длину волн λ минимума при $\lambda=450$, что соответствует первому минимуму, получаем:

$$2n_{\lambda}d = \frac{\lambda_m}{2}. \quad (9)$$

Откуда

$$d = \frac{\lambda_m}{4n_{\lambda}}. \quad (10)$$

Таким образом для длины волны минимума отражения, пленка имеет толщину $\lambda/4$.

Светопрозрачность слоя диоксида титана на стекле измерялась на длине волны $\lambda = 550$ нм, которая соответствует середине видимого спектра.

На рис. 4 приведена схема прибора для измерения светопропускания покрытия.

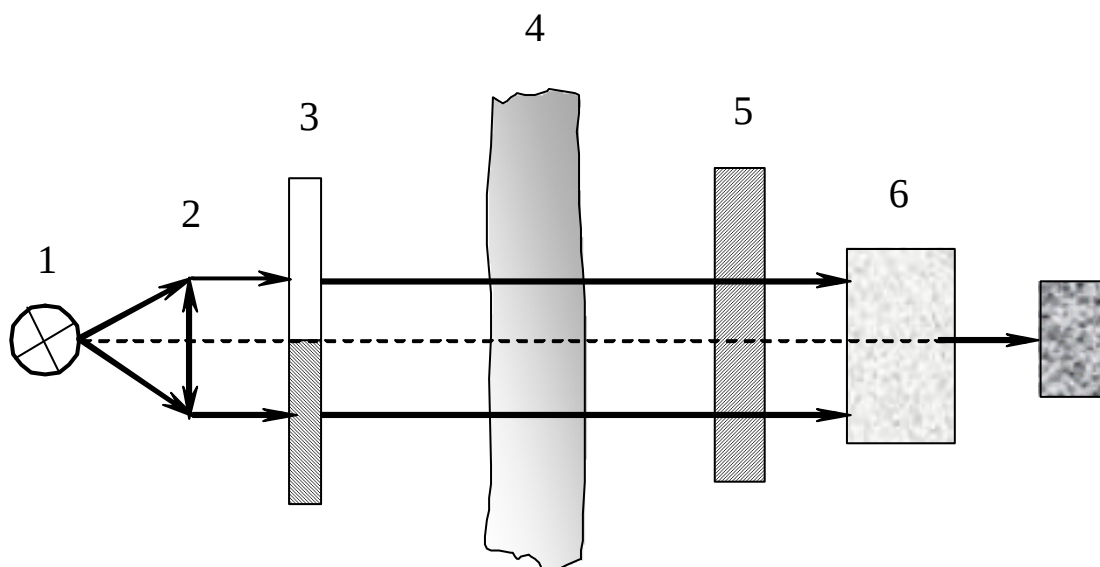


Рис. 4

В экспериментах по измерению светопрозрачности слоя диоксида титана на стекле вначале при отсутствии образца 4 прибор калибровался на 100 % пропускание. Поток от источника излучения 1, модулировался с частотой 200 Гц светомодулятором 3 и освещал образец 4. Светофильтром 5 выделялась область 550 нм, как максимально чувствительная для глаза человека. Сигнал от фотоприемника 6 регистрировался узкополосным регистрирующим прибором 7. Интенсивность отраженного от образца света предварительно измерялась при помощи рефлексометра. Поглощение света в образце вычислялось по выражению

$$I = 1 - R - T, \quad (11)$$

где I – коэффициент поглощения света, R – коэффициент отражения, T – коэффициент пропускания.

В этих экспериментах было обнаружено, что в чистой окиси титана поглощение не превышало 1 %. Однако, если слой диоксида титана незначительно загрязнялся недоокисленными примесями, поглощение света в слое резко возрастало. Так для прозрачных пленок из чистого титана поглощение составляло порядка 40 %.

Структура поверхности слоя в этих экспериментах определялась визуально. Если покрытие имеет пористую, «столбчатую» структуру с расстоянием между столбами соизмеримой с длиной волны падающего света, то в отраженном свете наблюдается дифракция света, окрашивающая поверхность покрытия в радужные цвета при изменении угла падения луча. Однако такого окрашивания при нанесении слоя диоксида титана на стекло, по нашей технологии, не наблюдалось. Это указывает, что пористость поверхности наших покрытий, по-видимому, меньше длины волны падающего света. Косвенным методом, указывающим на мелкопористую структуру покрытия, может служить измерение коэффициента преломления слоя после смачивания его

дистиллированной водой с последующим его высушиванием. При этом коэффициент преломления уменьшался на несколько процентов. Мелкопористая структура, вероятно, является причиной аномально высокого значения коэффициента преломления слоя TiO_2 [2].

Низкая температура в камере напыления позволила нанести покрытия также на некоторые образцы термостойких полимеров. Такое покрытие защищает оптические полимеры, используемые в качестве волоконных или планарных волноводов, от воздействия окружающей атмосферы [2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов, О.П. Перспективы использования магнетронного напыления диоксида титана в теплотехнике, оптике и нанооптике / О.П. Кузнецов, М.М. Куниевский, Б.В. Поллер, В.А. Косинов, В.А. Васильев // Сб. матер. III междунар. научн. конгресса «Гео-Сибирь-2007» – Новосиб., 2007 – Т. 4., ч. 1. – С. 233–234.
2. Поллер, Б.В. О характеристиках оптических полимерных пленок с нанопокрывтиями диоксида титана / Б.В. Поллер, В.А. Косинов, О.В. Косинов, А.В. Бритвин, Д.Е. Трушенко // Сб. матер. IV междунар. научн. конгресса «Гео-Сибирь-2008». – Новосиб., 2008. – Т. 4, ч. 2. – С. 3–6.
3. Гребенщиков, И.В. Просветление оптики / И.В. Гребенщиков, А.В. Власов, Б.С. Непорент, Н.В. Суйковская М. — Л.: СГИЗ, Гостехиздат. – 1946.
4. Карякин Н.И. Краткий справочник по физике / К.Н. Быстров, П.С. Киреев. – М: Высшая школа. – 1964.

© Б.В. Поллер, В.А. Косинов, О.В. Косинов, Д.Е. Трушенко, 2009

УДК 535.211

В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков

СГГА, Новосибирск

ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СЛОИСТЫЕ ТОНКОПЛЁНОЧНЫЕ СТРУКТУРЫ

V.V. Chesnokov, D.V. Chesnokov

SSGA, Novosibirsk, *garlic@ngs.ru*

LASER IRRADIATION HEAT FORCE ON MULTILAYER THIN-FILM STRUCTURES

Problems of making thin-film mechano-optical converter of optical radiation into mechanical energy are considered. Theoretical models and calculation methods of temperature field deviation in multilayer structures, initializing by laser step pulse, are investigated, including possibility of phase transformation internal layers of structure. The rough estimate of boundary surface layers mechanical shift are presented.

Известен ряд исследований температурных нестационарных полей в однослойных покрытиях на подложках. Так, в работе [1] приведен анализ тепловой волны, вызванной лазерным непрерывным облучением в тонкой пластине с учетом многократных отражений волны от поверхностей пластины, а также в металлической плёнке на металлической подложке. В [2] рассмотрено распределение тепловой энергии между плёнкой и подложкой при импульсном коротком лазерном облучении; в [3] представлены формулы расчета теплового поля в структуре типа «плёнка на подложке» при разных формах лазерного импульса; в работе [4] найдено выражение для максимальной во время импульса температуры поверхности плёнки на подложке; в работе [5] представлена импульсная теория теплопроводности в твердых телах, в т.ч. имеющих слоистую структуру.

В ряде работ, например [1, 5], анализ теплового поля проведен также с учетом температурных изменений теплофизических параметров.

Решаемая в настоящей работе задача заключается в исследовании поведения многослойной облучаемой структуры на подложке, при этом используются результаты [5] и метод электрических аналогий. Подобные структуры могут быть применены в оптико-механических преобразователях.

Рассмотрим термокинетические процессы в многослойной структуре (рис.1), происходящие после поглощения импульса излучения внешней поверхностью структуры. Металлический слой 1 и слои 2 и 3 структуры располагаются на подложке 4, которая имеет неограниченную толщину, обладает неограниченной теплоемкостью и является стоком теплового потока.

Внешний слой структуры является металлической плёнкой; под ним располагается плёнка легко испаряющегося вещества, затем слой теплоизолятора на подложке из материала с большими значениями теплоёмкости и теплопроводности. Фотоны потока излучения взаимодействуют с электронным газом металлического слоя 1; газ передает тепловую энергию кристаллической решетке вещества. Время преобразования энергии излучения в тепловую энергию решетки составляет $u \sim 10^{-11}$ с, глубина проникновения излучения в металле $d_0 \approx$ десятки нм [1]. Воздействие излучения представим в виде временной ступеньки: $P(u)=0$ при $u \leq 0$; $P(u)=P_0$ при $u > 0$. Здесь P_0 – плотность мощности излучения, падающего на поверхность слоя.

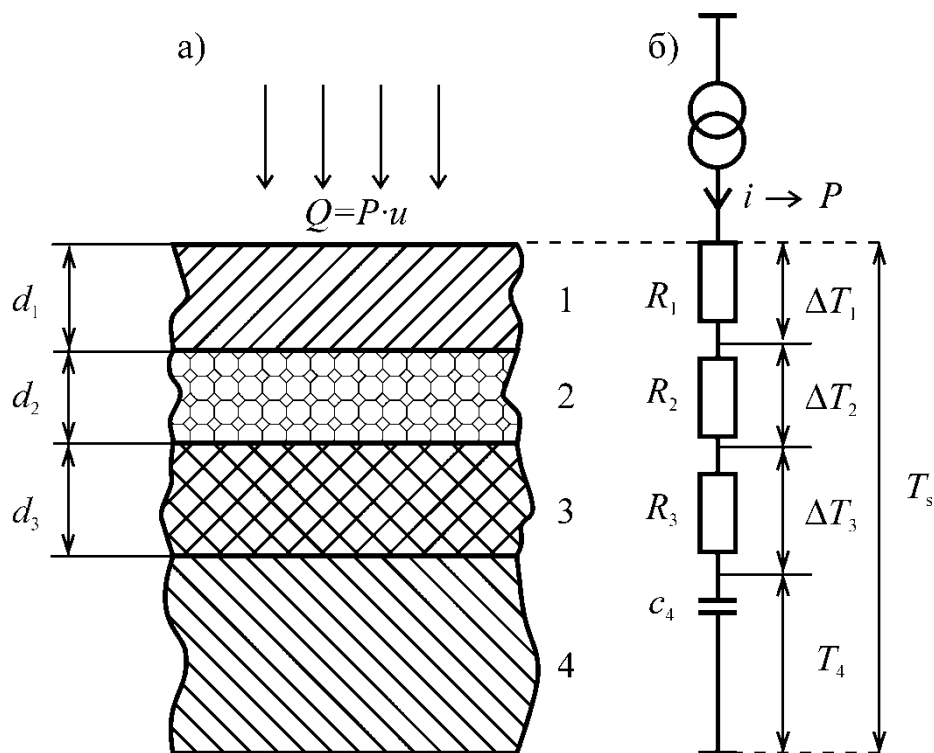


Рис. 1. Эквивалентная схема термокинетических процессов в многослойной структуре

Таким образом, в рассматриваемом устройстве первый слой (металлический) является преобразователем энергии излучения в тепловую.

При непрерывном облучении тепло в виде волны с плоским фронтом распространяется вглубь структуры, охватывая все её слои последовательно, один за другим. При этом температура облучаемой поверхности непрерывно нарастает, но зависимость температуры от времени не является монотонной, содержит в моменты достижения фронтом нового слоя отклонения от монотонности. Кроме того, тепловое расширение слоёв приводит к перемещению внешней границы структуры, которое можно обнаружить оптическими средствами, и возникновению механических импульсов, распространяющихся в подложку [4]. Механические проявления можно

усилить, используя для пленок вещества, испытывающие при некоторых температурах фазовые превращения с изменением объема.

В рассматриваемой структуре второй слой при нагревании до температуры фазового перехода может переходить в парообразное состояние; пар своим давлением локально деформирует первый слой – мембрану, производит механическую работу. После прекращения облучения структура остывает, и вещество второго слоя возвращается в конденсированное состояние.

Третий слой – теплоизолятор; четвертый предназначен для стока тепла из структуры: обеспечивает охлаждение слоев устройства после прекращения облучения, а также предотвращает чрезмерное нагревание слоистой структуры при продолжительном облучении устройства; слой должен обладать возможно более высокой температуропроводностью.

Тепловой поток, возникший в приповерхностной области толщиной d_0 первого слоя, перемещается в слоистой структуре в виде тепловой волны в глубину структуры. Температура любой точки, охваченной волной, с течением времени нарастает.

Поверхностная плотность поглощенной первым слоем энергии излучения равна:

$$Q_s = P_0 u (1 - R_{omp}) = P_s u, \quad (1)$$

где R_{omp} – коэффициент отражения излучения; $P_s = P_0 (1 - R_{omp})$.

При дальнейшем рассмотрении приняты следующие приближения.

Первый слой структуры обладает высокой температуропроводностью, малой толщиной; перепадом температуры по его толщине можно пренебречь. Учитывая теплоизолирующий характер третьего слоя, структуру из первых двух плёнок можно считать единым слоем, обе граничные поверхности которого теплоизолированы. Непрерывное облучение структуры приводит к постоянному увеличению температуры первой поверхности третьего слоя, тогда как вторая его поверхность, граничащая с подложкой, не изменяет свою начальную температуру. Для оценок изменения распределения температуры в слоях структуры можно использовать результаты, полученные в [5], а) для слоя, обе поверхности которого теплоизолированы от окружающей среды, и б) для слоя, одна граничная поверхность которого увеличивает свою температуру со временем по линейному закону, а вторая поверхность – изотерма.

Можно показать в соответствии с [5], что к моменту $t_1 = \frac{d_1^2}{a_1}$ (тепловая волна пройдет весь первый слой) температура на поверхности первого слоя равна

$$T_s = \frac{P_s}{\gamma_1 d_1} \left(t_1 + \frac{1}{3} \frac{d_1^2}{a_1} \right) \approx \frac{P_s \cdot t_1}{\gamma_1 d_1}, \quad (2)$$

где $\gamma_1 = c_{y01} \cdot \rho_1$ – объемная теплоемкость; a_1 – температуропроводность; ρ_1 – плотность вещества первого слоя; t – момент наблюдения.

Второй слой рассматриваемой структуры находится в «запечатанном» состоянии, т. е. парообразование в нем затруднено даже при достижении соответствующих температур. Возможны два случая. В первом, когда механическая жесткость окружающих слоев высока, их сжимаемость мала, при расчете температуры нагревания слоя тепловым потоком его теплоемкость вплоть до критической температуры и более высоких температур остается равной теплоемкости твердого вещества, теплотой испарения пренебрегаем.

Второй случай реализуется при некоторой податливости соседних с рассматриваемым слоях структуры, например, при возможности изгибной деформации первого слоя под давлением пара второго слоя. Так как при изгибе совершается работа, для нагревания требуется большее количество тепловой энергии. Образовавшийся пар вещества второго слоя находится в равновесии с веществом слоя и является насыщенным. При расчетах следует учитывать дополнительно теплоту парообразования.

Рассмотрим изменения запаса теплоты слоев структуры по мере продвижения в ней тепловой волны. Обозначим символом T'_s температуру внешней поверхности структуры в момент достижения тепловой волной третьего слоя. Запас теплоты структуры при отсутствии испарения второго слоя определится выражением:

$$Q'_{cm} = P_{cm} u_2 = T'_s (\gamma_1 d_1 + \gamma_2 d_2) + Q_3. \quad (3)$$

Здесь Q_3 – количество тепла, попавшего в третий слой, d_2 и γ_2 – параметры слоя 2.

Если испарение имеет место, то к концу испарения слоя 2 запас теплоты структуры будет:

$$Q''_{cm} = T_{kun} (c_1 \rho_1 d_1 + c_2 \rho_2 d_2) + Q_3 + L_{исп} \cdot \rho_2 d_2. \quad (4)$$

Здесь $L_{исп}$ – удельная теплота испарения вещества слоя 2.

Оценки показали, что при принятых параметрах слоёв перепад температур по толщине первых двух слоёв мал, и изменение температуры поверхности третьего слоя следует за температурой внешней поверхности структуры. Принимая условие $Q_3 \ll Q'_{cm}$, получим в отсутствие испарения значение температуры при продолжительности действия излучения u_2 :

$$T'_s \approx \frac{P_s \cdot u_2}{\gamma_1 d_1 + \gamma_2 d_2}. \quad (5)$$

Для распределения температуры в слое 3, имеющем одну изотермическую поверхность, для момента времени $\Delta t_3 = \frac{d_3^2}{a_3}$, когда тепловая волна достигает слоя 4, можно найти выражение:

$$\frac{T(r)}{T_s(u_0)} \approx 1 - \frac{r}{d_3}, \quad (6)$$

где r – координата точки в слое 3, отсчитываемая от поверхности, смежной со слоем 2. Последнее уравнение означает, что температура в слое 3 линейно

уменьшается по толщине слоя от нагреваемой поверхности к температуре изотермической поверхности к концу временного промежутка Δt_3 .

Применим распределение (6) для вычисления поглощенного слоем 3 количества тепла:

$$Q_3 = \frac{1}{2} \cdot T'_s \cdot \gamma_3 \cdot d_3. \quad (7)$$

Здесь $\frac{1}{2} T'_s$ – среднее значение температуры в слое 3, γ_3 – объемная теплоемкость слоя 3.

Подставив (7) в (3), найдем:

$$Q'_{cm} = T'_s \left(\gamma_1 d_1 + \gamma_2 d_2 + \frac{1}{2} \gamma_3 d_3 \right). \quad (8)$$

Учитывая, что $Q'_{cm} = Q_s = P_s \cdot t$, найдем из (8) значение температуры поверхности структуры с учетом влияния третьего слоя:

$$T'_s = \frac{P_s \cdot \Delta t_3}{\gamma_1 d_1 + \gamma_2 d_2 + \frac{1}{2} \gamma_3 d_3}. \quad (9)$$

При продолжении поступления тепла температура всех элементов возрастает.

После достижения тепловым фронтом слоя 4 тепловой поток начинает стекать в этот слой, и температура элементов будет определяться ростом температуры границы слоя 4, смежной со слоем 3.

При продолжении облучения процесс передачи тепла приблизится к установившемуся, при котором поток тепла в структуре во всех её слоях одинаков и равен тепловому потоку облучения. Расчет можно вести, прибегнув к электрической аналогии, в которой тепловой поток P_s соответствует электрическому току. Эквивалентная электрическая схема генератора тока, моделирующая распространение теплового потока в структуре слоев в установившемся режиме, показана на рис. 1, б.

На схеме рис. 1, б R_1, R_2, R_3 – электрические сопротивления, эквивалентные тепловым сопротивлениям слоёв; $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$ – разности температур поверхностей слоёв 1, 2, и 3, T_4 – температура поверхности подложки, – эквивалентные разностям электрических потенциалов.

Так как тепловой поток имеет одно и то же значение по всей своей протяженности в данный момент времени, справедливо выражение:

$$T_s^{en} = P_s \cdot R_1 + P_s \cdot R_2 + P_s \cdot R_3 + T_4. \quad (10)$$

Здесь

$$R_1 = \frac{d_1 - d_0}{K_{T_1}}; \quad R_2 = \frac{d_2}{K_{T_2}}; \quad R_3 = \frac{d_3}{K_{T_3}} \quad (11)$$

– тепловые сопротивления слоев; d_1, d_2, d_3 – их толщины; $K_{T_1}, K_{T_2}, K_{T_3}$ – их теплопроводности; d_0 – глубина проникновения излучения в верхний слой

структуры; T_4 – температура поверхности слоя 4; T_s^{6H} – температура внешней поверхности многослойной структуры.

Температуру T_4 найдем из следующих соображений. Будем считать толщину слоя 4 неограниченной. В работе [5] рассмотрен случай нагрева полубесконечной среды импульсом тепловой мощности в виде временной ступеньки.

Выражение для температуры поверхности при постоянном значении плотности мощности нагревания и неограниченном времени нагревания, начиная с момента $t_4 = 0$, в соответствии с [5], можно найти из уравнения:

$$T = P_s \cdot r \left(2K\sqrt{\pi} \right)^{-1} \int_{r/(2\sqrt{at})}^{\infty} Z^{-2} dZ, \quad (12)$$

$$\text{где } Z = \frac{r}{2\sqrt{at_4}}.$$

Из (12) получим:

$$T_4 = \frac{P_s}{K_{T_4}} \sqrt{\frac{a_4 t_4}{\pi}}. \quad (13)$$

Подставим (11) и (13) в выражение (10):

$$\frac{T_s^{6H}}{P_s} = \left(\frac{d_1 - d_0}{K_{T_1}} + \frac{d_2}{K_{T_2}} + \frac{d_3}{K_{T_3}} + \frac{\sqrt{a_4 t_4 / \pi}}{K_{T_4}} \right). \quad (14)$$

Это выражение следует применять только при таких больших длительностях и воздействия облучения, при которых поток тепла становится близким к стационарному.

Отношение T_s^{6H}/P_s в выражении (14) равно входному тепловому сопротивлению многослойной структуры R_{ex} .

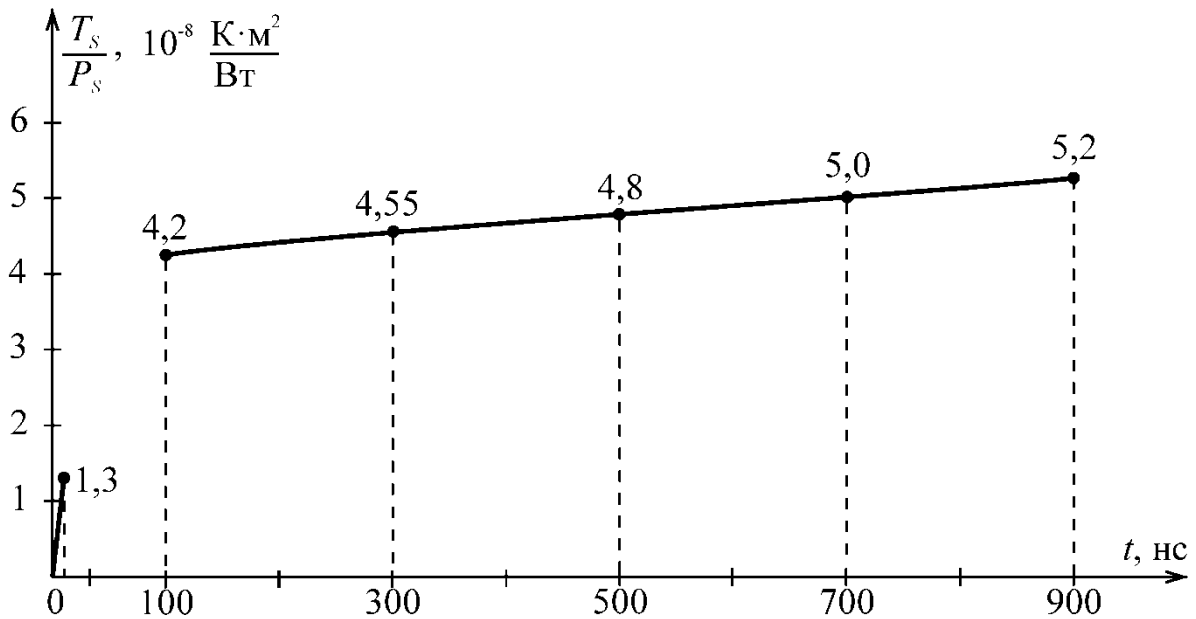


Рис. 2. Хронологическая термограмма поверхности многослойной структуры

Полученные выше при анализе результаты можно представить в виде топологических и хронологических термограмм. На рис. 2 и 3 термограммы показаны в виде зависимостей $\frac{T_s}{P_s}(t)$ и $\frac{T_s}{P_s}(x)$, где x – координата, отсчитываемая от поверхности вглубь структуры.

Левая сторона определена по выражению (9), правая – по (14). Расчеты проведены для структуры молибден – вода – плавленый кварц – медь; толщины первых трех слоев 10^{-7} м каждый, толщина меди не ограничена. Учитывая, что физические модели процессов, которым соответствуют левая и правая кривые на рис. 2, различны, стыковку кривых можно считать приемлемой.

Термограммы на рис. 3 построены с использованием уравнения (9) – для $t = 0,1$ нс и $t = 1,0$ нс, и уравнения (14) – для $t = 10$ нс и 100 нс. Из анализа термограмм очевидно, что при малых промежутках времени от начала облучения структуры величина поверхностной температуры определяется свойствами приповерхностных плёнок, при относительно больших – свойствами подложки.

Дальнейший анализ процессов, происходящих в многослойной структуре, был проведен с целью определения условий, необходимых для локальной деформации первого слоя в области падения на структуру сфокусированного лазерного луча. В качестве материала второго слоя используется легко испаряющийся материал. Использовались следующие допущения.

Увеличение температуры слоя выше температуры кипения вещества при нормальных условиях приводит к увеличению давления в «запечатанном» слое. Состояние вещества в слое близко к критическому и определяется закономерностями плотных реальных газов.

При высоких температурах давление в слое может привести к деформации соседних слоев и увеличению объема слоя. При импульсном нагревании

величина деформации может определяться как упругими свойствами вещества соседних слоев, так и их механической инерцией.

При локальном нагревании структуры произойдет «выпучивание» ее верхнего слоя. Верхний слой нагретого участка будет вести себя как мембрана, защемленная краями в холодной области, где подмембранный слой имеет свойства твердого тела. Движение мембраны определится, в основном, ее инерционными свойствами и давлением в испаряемом слое. Величину деформации мембраны определяет следующее выражение:

$$\Delta h = \frac{RT_0(1+L)\rho_2(T_0)t_0^2}{6M_2\rho_1d_1}. \quad (15)$$

Получено также следующее оценочное выражение для поглощенной структурой энергии излучения, при которой может наблюдаться упругая деформация Δh первого слоя структуры:

$$P_s \cdot t = \left(\gamma_1 d_1 + \frac{3R}{M_2} \rho_2 d_2 + \frac{1}{2} \gamma_3 d_3 \right) \Delta T + \frac{t_0^2}{8\rho_1 d_1} \left[\frac{RT_0(1+L)\rho_2(T_0)}{M_2} \right]^2. \quad (16)$$

Здесь $T_0 = \Delta T + 293K$, M_2 – молярная масса слоя 2, R – универсальная газовая постоянная, t_0 – временной промежуток от начала облучения до получения деформации, ΔT – изменение температуры поверхности структуры при лазерном облучении, L – сумма вириальных коэффициентов уравнения состояния Камерлинг-Оннеса [7, 8].

Уравнение (16) отображает ход термических и механических процессов в многослойной структуре при ее нагревании импульсом излучения в форме временной ступеньки в начальный период времени. Подстановка конкретных параметров величин, входящих в уравнение, для различных материалов и толщин плёнок порядка долей мкм показывает, что доля тепловой энергии излучения, приходящаяся на механические процессы в начале облучения, пренебрежимо мала в сравнении с долей, идущей на увеличение внутренней энергии структуры, и очень быстро увеличивается с течением времени.

В заключение можно сказать:

- Полученные аналитические выражения позволяют анализировать физические процессы в многослойной структуре на подложке, облучаемой потоком, модулированным по закону временной ступеньки, хотя и являются приближительным в связи с принятыми упрощениями задач;

- Показано, что прохождение фронта тепловой волны через слои структуры сопровождается при постоянном тепловом потоке не монотонным изменением температуры поверхности, определяемым теплофизическими параметрами слоев;

- Возникающие при прохождении фронта волны через структуру термомеханические явления могут быть усилены путем использования веществ с возможностью фазовых переходов при нагревании.

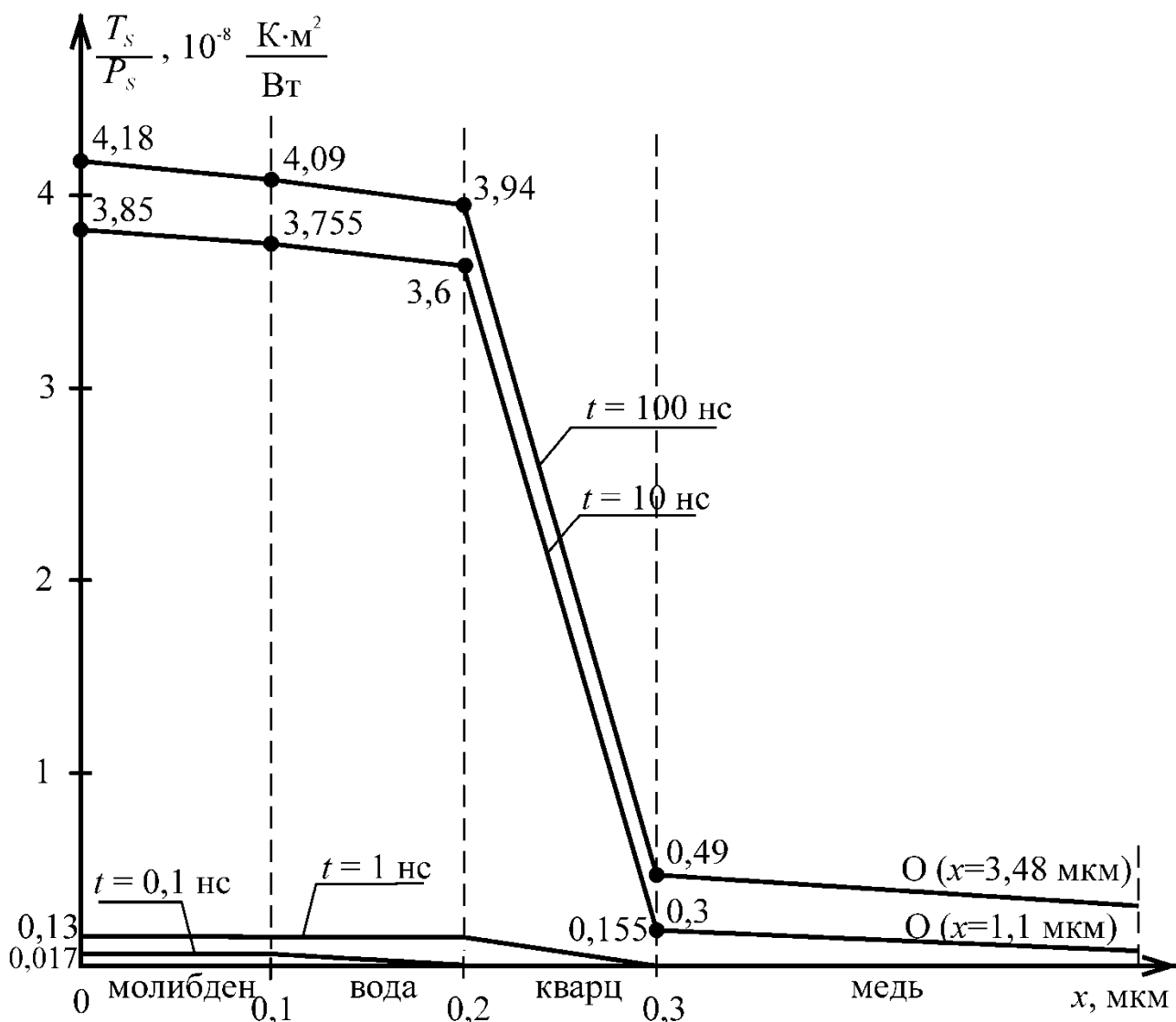


Рис. 3. Схемы топологических термограмм многослойной структуры в моменты времени $t = 0,1$ нс, $t = 1$ нс, $t = 10$ нс, $t = 100$ нс, (параметры структуры как на рис. 2)

Полученные результаты могут оказаться востребованными при неразрушающем анализе многослойных структур, при создании оптико-механических преобразователей информации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А. М. Прохоров, В. И. Конов, И. Урсу, И. Н. Михэилеску. – М.: Наука, 1988.
2. Вейко, В.П. Лазерная обработка пленочных элементов. – Л.: Машиностроение, 1986.
3. Дьюли, У. Лазерная технология и анализ материалов. – М.: Мир, 1986.
4. Чесноков, В.В. Лазерные наносекундные микротехнологии / В.В. Чесноков, Е.Ф. Резникова, Д.В. Чесноков. – Новосибирск: СГГА, 2003.
5. Камья, Ф.М. Импульсная теория теплопроводности. – М.: Энергия, 1972.

6. Действие излучения большой мощности на металлы / С.И. Анисимов, Я.А. Имас, Г.С. Романов, Ю.В. Ходыков. – М.: Наука, 1970.
7. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика: Учеб. пособие: Для вузов. В 10 т. Т. V. Статистическая физика. Ч. 1 / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц – М.: Физматлит, 2001.
8. Физические величины: Справ. / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
9. Дэниэльс, Ф. Физическая химия / Ф. Дэниэльс, Р. Альберти. – М.: Высш. шк., 1967.

© В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, 2009

УДК 536.42

В.В. Кузнецов

ИТ СО РАН, Новосибирск

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОННОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМОГО РАСПАДА МЕТАСТАБИЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

V.V. Kuznetsov

Institute of Thermophysics Siberian Branch Russian Academy of Science (IT SB
RAS)

1 Academisian Lavrentyev Av., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

THERMAL FUNDAMENTALS OF MICROELECTROMECHANICAL DEVICES BASED ON CONTROLLED DECAY OF METASTABLE LIQUID

Thermal fundamentals of microelectromechanical devices (MEMS) based on controlled decay of metastable liquid due to phase explosion or explosive evaporation is identified in the paper. A new model of explosive vaporization on the heater surface is proposed. It accounts for pressure increase near the heater surface during the bubble nucleation and growth. This pressure has strong inverse effect onto vaporization dynamics and MEMS performance.

Микроэлектронномеханические системы (МЭМС) – это технологии и устройства, объединяющие в себе микроэлектронные и микромеханические компоненты. МЭМС устройства обычно изготавливают с помощью технологии микрообработки, аналогично технологии изготовления однокристалльных интегральных микросхем. Типичные размеры микромеханических элементов лежат в диапазоне от 1 микрометра до 100 микрометров. МЭМС технологии применяются для создания разнообразных миниатюрных датчиков и систем управления, таких как акселерометры, сенсоры напряжений и давления, микрозеркала, оптические переключатели и затворы, микрокапиллярные устройства, пузырьковые принтеры. В качестве актюаторов МЭМС используют как микромеханические системы, так и устройства на основе управляемого распада метастабильной жидкости, подобные системе впрыскивания краски принтера фирмы Hewlett-Packard. Такие устройства позволяют достигать время переключения меньше 10 мксек и используются, например, в оптическом переключателе без зеркал фирмы Agilent. Одним из наиболее значительных применений МЭМС технологии является технология струйной печати. Схема актюатора пузырькового принтера фирмы Hewlett-Packard показана на рис. 1. При подаче напряжения на микронагреватель в камере принтера происходит быстрый перевод жидкости в метастабильное состояние, её распад, формирование движущего пузыря и выброс краски из камеры. Существующие

теоретические модели пузырькового распада метастабильной жидкости [1, 2] основаны на классической теории гомогенного зародышеобразования [3–5]. В работе [6] предложена двухзонная модель пузырькового распада метастабильной жидкости, позволяющая учесть увеличение давления в окрестности нагревателя при росте пузырьков в несжимаемой жидкости. В данной работе рассмотрены теплофизические основы работы МЭМС устройств на основе фазового взрыва и взрывного вскипания глубоко перегретых слоев жидкости, исследована динамика пузырькового распада при импульсном нагреве жидкости на микронагревателе, построена теория пузырькового распада жидкости в зоне глубокой метастабильности, учитывающая поле давления, наведённое растущими пузырями.

Рассмотрим гидроакустические и тепловые процессы, определяющие эффективность работы МЭМС устройства на основе управляемого распада метастабильной жидкости, показанного на рис. 1. При быстром переводе жидкости в камере МЭМС в метастабильное состояние путем подачи напряжения на нагреватель, интенсивность фазового перехода возрастает на порядки по сравнению с обычным кипением и в зависимости от числа готовых центров на поверхности нагревателя возникает переход к фазовому взрыву или взрывному вскипанию. В рамках модели [3-5] частота появления зародышей паровой фазы в окрестности нагревателя определяется работой образования критического зародыша

$$W_* = 16\pi\sigma^3 / 3(P_s - P_l)^2 (1 - \rho_v / \rho_l), \quad (1)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, P_l – давление жидкости, P_s , ρ_l , и ρ_v – давление насыщения, плотности жидкости и пара соответственно, и равна

$$J = N_1 B \exp(-G), \quad (2)$$

где $G = W_*/kT$. Здесь N_1 – число молекул в единице объёма, B – кинетический коэффициент, учитывающий динамику роста парового пузырька.

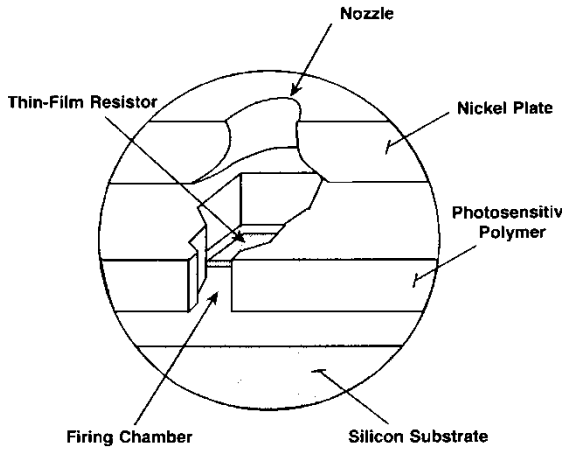


Рис. 1. Микрокамера пузырькового принтера

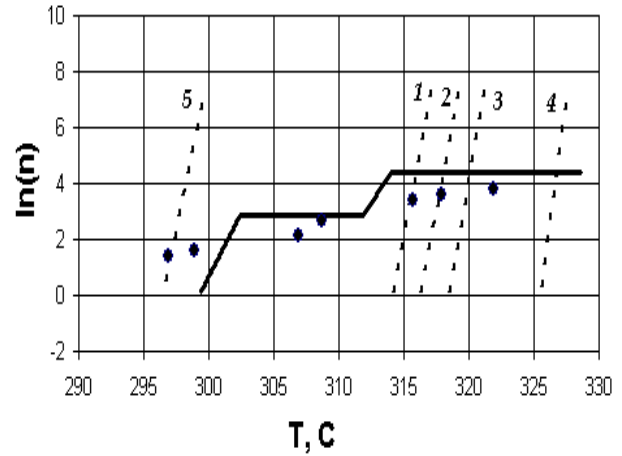


Рис. 2. Число пузырьков в зависимости от температуры нагревателя; $\psi = 1$: линии 1, 2, 3, 4 – расчёты при $P = 0,1; 1; 2; 5$ МПа соответственно; линия 5 – $\psi = 0,25$; $P = 0,1$ МПа; сплошная линия – расчёт по предлагаемой модели

Ухудшение смачивания твёрдой поверхности уменьшает работу образования критического зародыша

$$W'_* = W_* \psi(\theta), \quad (3)$$

и частота флуктуационного гетерогенного зародышеобразования по [1] определяется как:

$$J_{het} = N_1^{2/3} \frac{1 + \cos \theta}{2} \sqrt{\frac{6\sigma}{(3-b)\pi m \psi(\theta)}} \exp(-G \psi(\theta)). \quad (4)$$

Полное число пузырьков, зародившихся непосредственно на поверхности нагревателя и в объёме жидкости к моменту времени τ определяется интегралом, где учтен как гетерогенный, так и гомогенный механизм зародышеобразования:

$$n(\tau) = S_0 \int_0^\tau dt (1 - s_v(t)) \{ J_{het}(T_w(t), P_l) + \int_0^\infty dz J(T_l(t, z), P_l) \}. \quad (5)$$

Здесь S_0 – площадь поверхности нагревателя, и $s_v(t)$ есть занятая паровыми пузырьками доля поверхности, исключаемая для последующего зародышеобразования.

Зависимость числа пузырьков, возникших при подаче управляющего импульса на нагреватель, от температуры его поверхности показана на рис. 2. Точки на рис. 2 показывают измеренное число пузырьков на нагревателе 100×110 мкм для воды по данным [6]. Температура поверхности нагревателя определялась решением одномерной задачи теплопроводности для многослойного нагревателя. Линиями 1-4 показаны расчёты для гомогенного зародышеобразования при различных давлениях окружающей жидкости. Первые пузырьки возникают при меньших перегревах жидкости, чем предсказывает теория гомогенного зародышеобразования. Это связано со

значительной ролью гетерогенного зародышеобразования для воды из-за присутствия островков плохого смачивания и парогазовых зародышей на дефектах поверхности. Расчёт спонтанного гетерогенного зародышеобразования для неполно смачиваемой поверхности (линия 5) даёт более правильную температуру вскипания воды. Число пузырьков в опыте растёт с температурой нагревателя значительно медленнее, чем предсказывает теория флуктуационного зародышеобразования для постоянного давления жидкости. Например, при температуре 320 °С измеренное число пузырьков соответствует теоретическому значению для давления 2 МПа, а не 0,1 МПа как в расчете. Это показывает значительное увеличение давления в окрестности нагревателя при зарождении и росте пузырей, что необходимо учитывать при теоретическом описании пузырькового распада метастабильной жидкости.

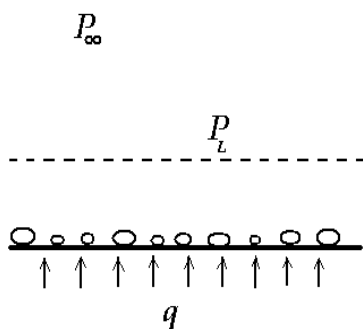


Рис. 3. Двухзонная схема роста паровых пузырьков на плоском нагревателе

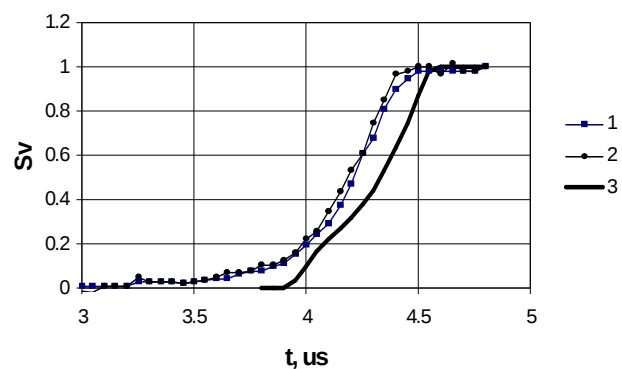


Рис. 4. Доля поверхности нагревателя, занимаемая паровыми пузырьками, 1, 2 – эксперимент, 3 – расчёт

Предлагается следующая модель самосогласованного зародышеобразования и волнового процесса на плоской поверхности нагревателя. Пусть зародышеобразование имеет место в окрестности плоского нагревателя с площадью S_0 – рис. 3. Предположим, что пузырьки локализованы на поверхности и увеличение давления в этой области обусловлено инерцией окружающей нагреватель жидкости. Зададим давление в окрестности нагревателя как P_l и давление в окружающей жидкости вдали от нагревателя как P_∞ . При спонтанном появлении пузырей происходит оттеснение жидкости от поверхности нагревателя и динамику жидкости во внешней зоне можно учесть введением фиктивного подвижного поршня, повторяющего форму нагревателя.

Давление в окрестности нагревателя, осреднённое по его поверхности, можно определить, используя расчет акустического излучения при ускоренном движении плоского поршня в сжимаемой жидкости с эффективным диаметром, соответствующим площади поверхности нагревателя [7]. Пусть $z_v(\phi)$ есть смещение жидкости на внешней границе пузырькового слоя, вызванное появлением и ростом пузырей, а $V_v(\tau)$ есть полный объём пара, накопленный к моменту времени ϕ . Тогда $z_v(\phi)$ и $V_v(\tau)$ связаны как

$$z_v(\tau) = V_v(\tau)(1 - \frac{\rho_v}{\rho_l}) / S_0. \quad (6)$$

Полное приращение объёма пара вблизи поверхности нагревателя можно представить в виде интеграла по времени от суперпозиции гомогенного и гетерогенного потока зародышей:

$$V_v(\tau) = S_0 \int_0^\tau dt \left\{ \int_0^\infty J[T(z, t), p] dz \right\} v_1(\tau - t)(1 - \tilde{S}_v(t)). \quad (7)$$

Здесь $v_1(\phi, t)$ есть объём пузырька, появившегося в момент времени t ; а $s_v(t)$ – относительная площадь поверхности нагревателя, занятая паровыми пузырьками, которая определяется неявно как:

$$s_v(\tau) = \int_0^\tau dt \left\{ \int_0^\infty J dz + J_{het} \right\} s_1(\tau, t)(1 - s_v(t)), \quad (8)$$

где $s_1(\phi, t)$ есть площадь проекции на поверхность нагревателя пузырька, зародившегося в момент времени t . Вместе с моделью роста полусферического пузырька на нагреваемой поверхности и уравнениями энергии для жидкости и пара уравнения (5–8) позволяют проводить расчёт пузырькового распада метастабильной жидкости на быстро нагреваемой поверхности в условиях, когда флуктуационное зародышеобразование является доминирующим.

При численных расчетах температура поверхности нагревателя определялась решением одномерной задачи теплопроводности для многослойного нагревателя в жидкости с учётом тепла, идущего на парообразование, которое в зависимости от текущей скорости генерации пара определялось в предположении равномерного стока тепла по поверхности нагревателя. Соотношения (5–8) совместно с уравнением теплопроводности для нагревателя и уравнениями переноса тепла в жидкости, окружающей пузырек, в микрослое под пузырьком и в паровой фазе, а также уравнением роста пузырька дают замкнутую модель самосогласованного спонтанного зародышеобразования и волнового процесса на плоском микронагревателе в условиях пузырькового распада глубоко метастабильной жидкости. В рамках данной модели был построен численный алгоритм и проведены тестовые расчёты для условий экспериментов [6]. На рис. 3 сплошной линией показан расчёт зависимости числа пузырьков от температуры поверхности нагревателя с учетом роста давления в окружающей нагреватель жидкости. Видно, что учёт взаимодействия растущих пузырьков радикально изменяет кинетику зародышеобразования, что соответствует экспериментальным данным. Наблюдается неравномерный, волнообразный характер зародышеобразования, что связано с эффектом накачки давления предшествующей волной зарождения пузырьков. На рис. 4 показано сравнение расчёта изменения относительной площади поверхности нагревателя, покрытой паровыми пузырьками, во времени с экспериментальными данными [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построенная модель пузырькового распада метастабильной жидкости является основой расчета термогидроакустических процессов в МЭМС устройствах при подаче управляющего токового импульса на микронагреватель. Она позволяет рассчитать поле давления, созданное растущими пузырьками, которое, в свою очередь, оказывает обратное влияние на зародышеобразование и рост паровых пузырьков. Результаты расчетов по данной модели хорошо соответствуют экспериментальным данным, что позволяет рекомендовать её для расчета систем управления МЭМС устройств на основе управляемого распада метастабильной жидкости.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке интеграционного проекта №54 СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. – Москва: Наука, 1972. – 240 с.
2. Asai A. // ASME J. Fluids Engineering. – 1992. - V. 114, N 4. - P. 638-641.
3. Volmer M., Weber A. // Z. Phys. Chem. – 1926. - Bd. 119, N 2. - P. 227-301.
4. Зельдович Я.Б. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1942. - Т. 12, № 11-12. - С. 525-538.
5. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей.– Л.: Наука, 1975. – 592 с.
6. Kuznetsov V.V., Vasserman E.S. // 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, Pisa, 22-25 Sept. 2004: proceedings. – paper N. ven 04.
7. Stepanishen P.R. // JASA. – 1971. - V. 49, N 5. - P. 1629-1638.

© В.В Кузнецов, 2009

УДК 621.382
Р.И. Багдугев
ОАО «Катод», Новосибирск

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ БЕЗ ИОННО-БАРЬЕРНОЙ ПЛЁНКИ

R.I. Bagduev
Katod, Inc., Novosibirsk

THIRD GENERATION ELECTRON-OPTICAL IMAGE INTENSIFIER WITHOUT ION-BARRIER FILM

The problems of long-life capacity for work of image intensifiers with microchannel plate are consideration, including photoelectrons bombardment stimulated gas evolution and possibility of creation such devices not inclusive ion-barrier film.

Электронно-оптические преобразователи (ЭОП) третьего поколения, обладающие высокой интегральной чувствительностью, имеют преимущества при регистрации слабых излучений. Однако, положительные ионы, рождающиеся в каналах микроканальной пластины (МКП) при прохождении фотоэлектронов, в результате ударов о стенки каналов МКП и о поверхность фотокатода образуют импульсы потока электронов, затрудняющие регистрацию слабых сигналов [1]. Более того, положительные ионы активных газов адсорбируются на фотокатодном слое и оказывают воздействие на его свойства.

Дополнительная адсорбция активных газов на монослой CsO в количествах, соизмеримых с монослоем, приводит к изменению положительного поверхностного потенциала. На основе теории адсорбции представлено выражение, описывающее деградацию фотокатода по мере дополнительной адсорбции на его поверхности активных газов в рабочем режиме ЭОП:

$$\frac{S_{\phi}}{S_{\phi 0}} = \left(1 - \frac{(n_i/n_e)\gamma_a N_e i \cdot t}{n_c N_{MC} E_S} \right), \quad (17)$$

где $S_{\phi 0}$ – начальная интегральная чувствительность фотокатода, А/см;

N_e – количество электронов в А·с;

N_{MC} – концентрация молекул в одном монослое;

E_S – площадь фотокатода, см²;

γ_a – коэффициент прилипания иона или молекулы;

t – время, с;

n_c – число монослоёв;

n_i/n_e – остаточное электронно-стимулированное газовыделение.

Наиболее чувствителен к адсорбции дополнительных активных газов тонкий слой с отрицательным электронным сродством (ОЭС) на поверхности арсенид-галлиевого катода. Этот слой принято считать состоящим из монослоя CsO. На рис. 1 приведены расчётные кривые зависимости чувствительности ОЭС-фотокатодов ЭОП от времени при рабочем токе $i = 4 \cdot 10^{-8}$ А при различных уровнях остаточного газовыделения МКП 18-10 после обезгаживания электронной бомбардировкой током $i = 1 \cdot 10^{-6}$ А.

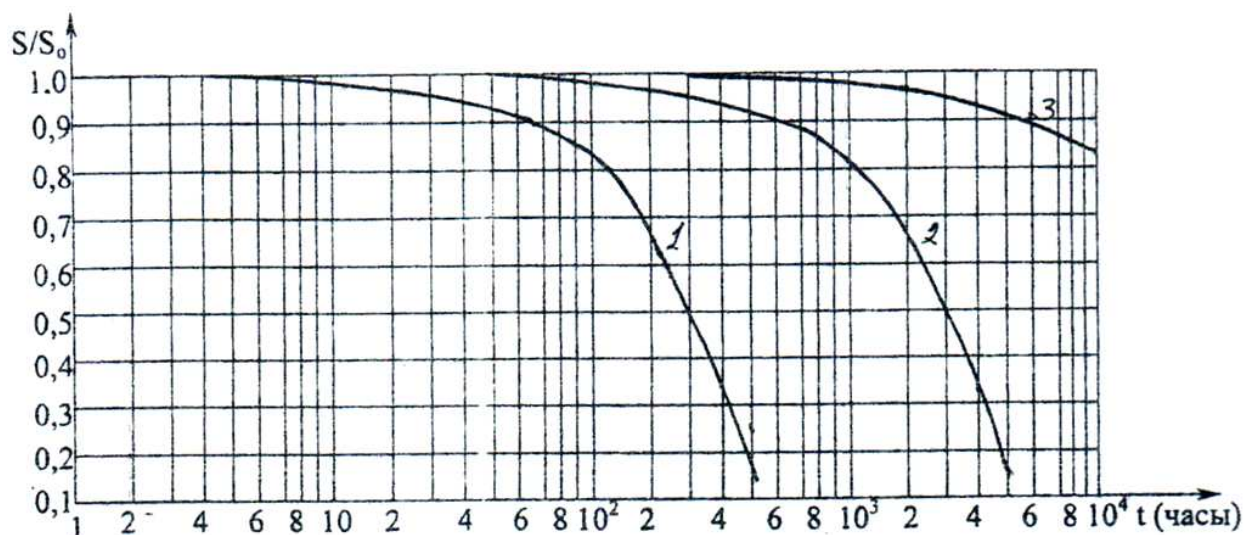


Рис. 1

Расчетное падение чувствительности ОЭС-фотокатодов ЭОП во времени при рабочем токе $i = 4 \cdot 10^{-8}$ А и при разных уровнях остаточного газовыделения микроканальных пластин после электронного обезгаживания при токе $i_{30} = 10^{-6}$ А

1 – $Q_{30} = V_{30} \times \Delta P_{30} = 6 \cdot 10^{-11}$ Па·м³/сек; 2 – $Q_{30} = V_{30} \times \Delta P_{30} = 6 \cdot 10^{-12}$ Па·м³/сек;

3 – $Q_{30} = V_{30} \times \Delta P_{30} = 6 \cdot 10^{-13}$ Па·м³/сек;

В настоящее время электронно-стимулированное газовыделение МКП остаётся проблемой в производстве ЭОП третьего поколения как в нашей стране, так и за рубежом. Поэтому в ЭОП третьего поколения продолжают применять ионно-барьерную плёнку на входе МКП.

Однако, при подавлении остаточного электронно-стимулированного газовыделения до определённого уровня возможно применение ЭОП третьего поколения без ионно-барьерной плёнки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берковский, А.Г. Вакуумные фотоэлектронные приборы / А.Г. Берковский, В.А. Гаванин, И.Н. Зайдель. – М.: Радио и связь, 1988.

УДК 536.24

О.В. Витовский, В.В. Кузнецов

ИТ СО РАН, Новосибирск

МИКРОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ КОНВЕРТОРЫ УГЛЕВОДОРОДОВ ДЛЯ ПИТАНИЯ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ

O.V. Vitovsky, V.V. Kuznetsov

Institute of Thermophysics SB RAS, 1 Lavrentjev Pr, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

MICROCATALYTIC CONVERTORS OF HYDROCARBONS FOR FEEDING AUTONOMOUS ELECTROCHEMICAL GENERATORS

Based on synthesis of multinuclei coordinating compound and its following thermo destruction up to high dispersed nanosized oxides, and mechanochemical methods the manycomponent nanocatalysts were obtained, which are characterized by high homogeneity of the phase composition. Synthesized catalysts were applied for production of hydrogen contained gas at methane partial oxidation, methane and methanol steam reforming, autothermal methane reforming, catalytic methane combustion and showed high efficiency. The temperature range was defined where methane reforming characterized by high hydrogen and carbon monoxide selectivity, the kinetic of elementary reaction was studied for synthesized catalysts.

ВВЕДЕНИЕ

Применение топливных элементов, использующих водород как топливо и реализующих принцип электрохимической генерации электрической энергии, кардинально изменит не только конструкцию электрогенерирующего оборудования, но и его технические параметры. В особенности это относится к локальным источникам энергии, где для топливных элементов необходима разработка компактных систем получения водорода с различной степенью чистоты. Конверсия углеводородного сырья в водород является сложным многостадийным процессом, и традиционные химические реакторы не могут быть использованы из-за их размера и сложности в управлении. Принципиальным решением проблемы компактных генераторов водорода является применение микрокаталитических конверторов углеводородов, основанных на применении наноструктурных катализаторов нового поколения, и объединяющих потоки тепла и продуктов реакций для получения высокой суммарной энергоэффективности.

Микрокаталитический конвертор углеводородов – это сборка компактных химических реакторов с каналами микронного размера, что определяет их уникальные свойства. Такие реакторы имеют ту же эффективность, что и традиционные реакторы, но при этом их размер значительно уменьшается.

Уменьшение эффективной длины переноса при уменьшении поперечного размера канала в значительной степени устраняет внешние диффузионные ограничения и позволяет проводить химические превращения при времени пребывания до 10 мсек и меньше [1–3]. Нанотехнологии позволяют создавать катализаторы для таких реакторов с оптимальными структурными и размерными характеристиками с целью повышения активности, селективности и производительности. На основе нанодизайна катализатора, покрывающего стенки микроканалов, возможно не только понижение энергии активации реакций, но и управление селективностью при изменении высоты активационных барьеров индивидуальных элементарных шагов реакций.

ПРИГОТОВЛЕНИЕ КАТАЛИЗАТОРА

Наночастицы благородных металлов с размером меньше 10 нм характеризуются повышенной поверхностной энергией, координационной ненасыщенностью и большой абсорбционной емкостью, что обусловлено соизмеримостью размера частиц с радиусом действия межатомных сил и наличием некомпенсированных химических связей в поверхностных атомах. С уменьшением размера частиц возрастает число дефектов поверхности, которые являются активными центрами реакций. Разработаны методы создания многокомпонентных наноструктур, содержащих наночастицы благородных металлов, с большой реакционной поверхностью и высокой поверхностной диффузией реагирующих компонент. На основе синтеза многоядерных координационных соединений с последующим терморазложением до высокодисперсных наноразмерных оксидов получены многокомпонентные Rh и Pt нанокатализаторы на основе $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ с высокой однородностью фазового состава. Катализаторы имеют однородную фракцию наночастиц благородных металлов и оптимальную подвижность кислорода в решетке носителя. Это позволяет избежать быстрого зауглероживания поверхности из-за термического разложения углеводородов и исключить высокую скорость окисления углеводородных фрагментов с образованием воды и двуокиси углерода. Методом оптической спектроскопии изучен фазовый состав и структура катализатора. Исследовано влияние модифицирующих добавок, таких как оксид бария и оксид лантана, которые обуславливают термостабильность, прочность и однородность поверхности катализатора. Проведено исследование фазового состава и структуры катализатора на электронном сканирующем микроскопе. Исследование проведено в проходящем свете. Типичная структура носителя (оксида алюминия) с внедренными в его кристаллическую решетку наночастицами родия представлена на рис. 1. Полученные данные по распределению размера частиц родия по размерам свидетельствуют о малом размере наночастиц, что позволяет получить большую реакционную поверхность, высокую поверхностную диффузию реагирующих компонент и продолжительность работы катализатора.

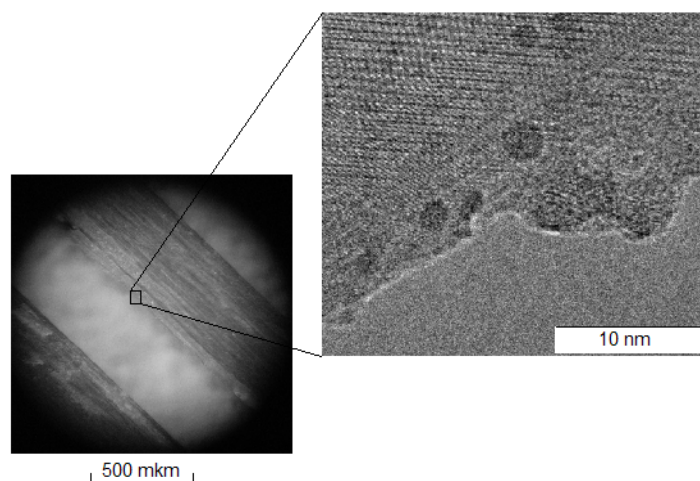


Рис. 1. Наночастицы родия (катализатора паровой конверсии метана) на стенке канала

РЕЗУЛЬТАТЫ

Синтезированные катализаторы применены для получения водородсодержащего газа при неполном окислении метана, паровой конверсии метана и метанола, автотермальной конверсии метана, каталитического горения метана и показали высокую эффективность. Определен диапазон температур, в котором процесс получения водородсодержащего газа характеризуется высокой селективностью по водороду и окиси углерода. На рис. 2 приведен состав продуктов конверсии метана на выходе микроканального реактора в зависимости от температуры внешней стенки при $GHSV = 613 \text{ Nl/g}_{\text{cat}}/\text{hr}$. Опыты проведены в диапазоне давления в реакторе от 2,8 до 3,5 бар. Химические превращения метана начинаются при температуре внешней стенки больше 700°C и концентрация метана в продуктах конверсии уменьшается с ростом температуры. Значительная конверсия метана наблюдается при температуре больше 800°C , когда возрастает доля водорода и монооксида углерода. На рис. 3 приведены зависимости конверсии метана и селективности по монооксиду углерода от температуры реактора при $GHSV = 613 \text{ Nl/g}_{\text{cat}}/\text{hr}$. Данные рис. 2 и рис. 3 показывают, что процесс химического превращения метана резко активизируется при достижении температуры реактора 770°C . Родий является одним из наиболее активных катализаторов для адсорбции, поверхностной реакции и десорбции метана и продуктов его разложения в среде паров воды. Высокое содержание водорода в выходной смеси показывает, что в данном диапазоне температур основной является реакция паровой конверсии метана. Увеличение содержания двуокси углерода в выходной смеси до температуры 830°C показывает, что в данном диапазоне температур одновременно с реакцией паровой конверсии метана и образованием монооксида углерода имеет место реакция паровой конверсии монооксида углерода с образованием двуокси углерода, хотя скорость ее протекания мала. При дальнейшем увеличении температуры внешней стенки скорость реакции паровой конверсии монооксида углерода падает, и содержание двуокси углерода в выходной смеси уменьшается.

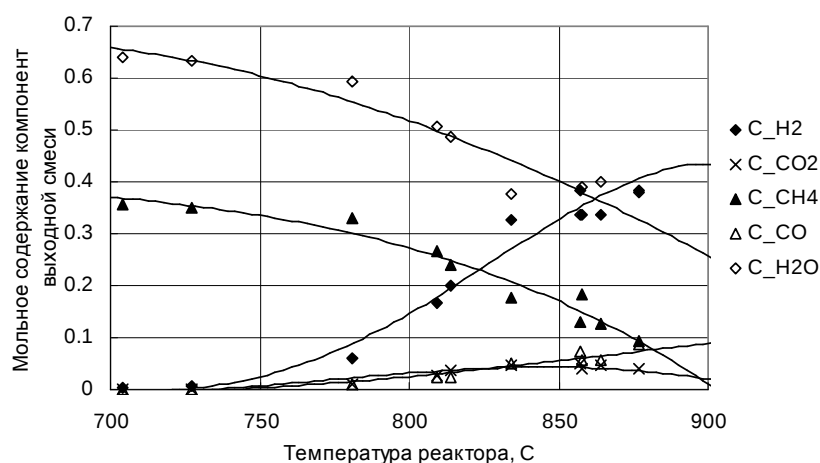


Рис. 2. Зависимость объемных концентраций компонент продуктов паровой конверсии метана от температуры реактора. $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4 = 1,77$, точки – эксперимент, линии – аппроксимация

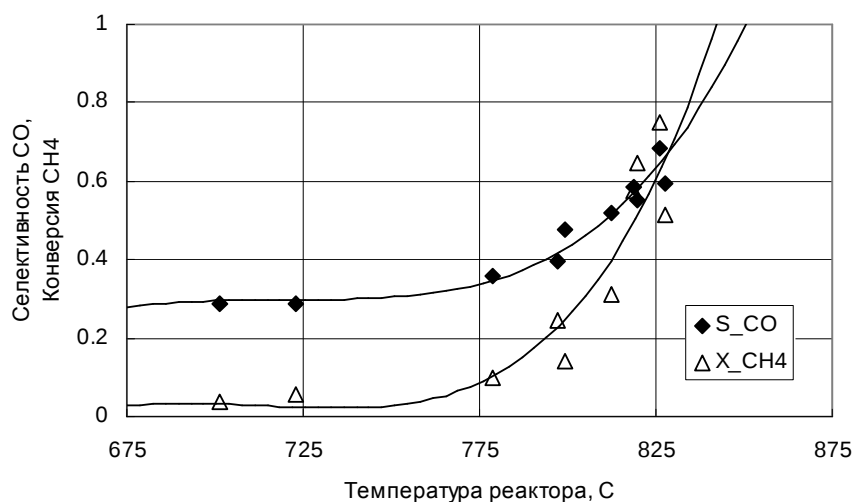


Рис. 3. Зависимость селективности монооксида углерода и конверсии метана от температуры реактора. Точки – эксперимент, линии – аппроксимация

Изучена кинетика элементарных реакций на синтезированных катализаторах. Теоретически и экспериментально получены закономерности химических превращений углеводородов в микроканальных системах при активировании реакций на нанокатализаторах, а так же данные по кинетике многостадийных реакций в условиях существенной неоднородности полей температур и концентраций компонент [4, 5]. Это позволило выделить рабочие режимы микрокаталитических конверторов углеводородов с высоким выходом водорода в условиях контролируемых тепловых и диффузионных полей.

Созданные многослойные наноструктуры показали высокую эффективность для получения водорода, они использованы для создания процессоров углеводородов блочной конструкции для питания низкотемпературных топливных элементов. Схема процессора паровой

конверсии углеводородов включает в себя микроканальные блоки испарителя воды, реактор конверсии углеводородов, реактор доочистки от окиси углерода и реактор окончательной очистки водорода. После него чистый водород с воздухом поступает в топливный элемент. Использование микроканальной архитектуры позволяет согласовать экзотермическую и эндотермическую реакции в элементах процессора и повысить его суммарную энергетическую эффективность. Предложенная конструкция процессора метана, показанная на рис. 4, позволяет получить долю водорода в сухом газе до 73 процентов в одностадийном процессе и до 87 процентов с содержанием окиси углерода меньше 1 процента при использовании микрореактора сдвига. Для повышения энергетической эффективности топливный процессор может быть объединен с топливным элементом. Анодный газ с остатком водорода дожигается в испарителе для получения тепла, необходимого для испарения воды, а катодный газ подается в конденсатор для отделения паров воды и её использования в цикле топливного процессора. Для питания высокотемпературного топливного элемента разработаны одностадийные процессоры неполного окисления (рис. 5) и автотермальной конверсии метана. Это открывает возможность производства энергоэффективных каталитических процессоров углеводородов на основе микро и нанотехнологий для питания перспективных электрогенерирующих систем.

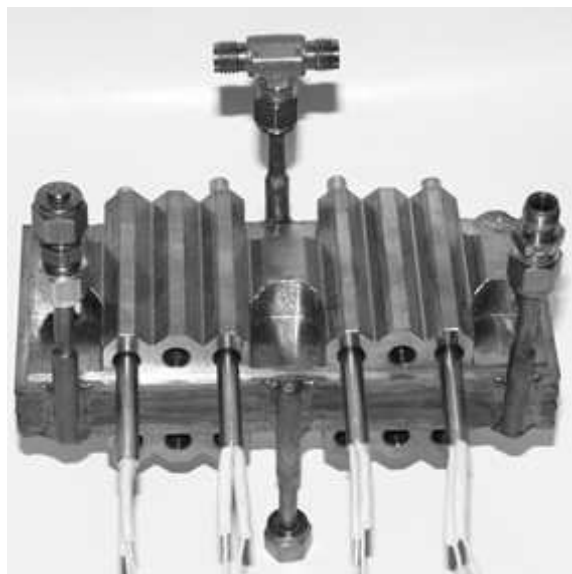


Рис. 4. Микрокаталитический конвертор паровой конверсии метана с производительностью 7,8 м³/час Н₂/л реактора



Рис. 5. Микрокаталитический конвертор неполного окисления метана с производительностью 5,5 м³/час Н₂/л реактора

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 07-08-12212-офи и интеграционного проекта № 54 СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tonkovich A.Y., Yang B., Perry S.T., Fitzgerald S.P., Wang Y. From seconds to milliseconds through tailored microchannel reactor design of a steam methane reformer // *Catalysis Today*. – 2007. – V. 120. – P. 21-29.
2. Kolb G., Hessel V. Micro-structured reactor for gas phase reaction // *Chem. Eng. Journal*. – 2004. – V. 98. – P. 1-38.
3. Aartun I., Venvik H.J., Holmen A., Pfeifer P., Gorke O., Schubert K. Temperature profiles and residence time effects during catalytic partial oxidation and oxidative steam reforming of propane in metallic microchannel reactors // *Catalysis Today*. – 2005. – V. 110. – P. 98-107.
4. Кузнецов В.В., Витовский О.В., Гасенко О.А. Экспериментальное исследование неполного окисления метана в кольцевом микроканале // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2007. – Т.14, № 2. – С. 1-7.
5. Kuznetsov V.V., Vitovsky O.V., Dimov S.V., Safonov S.A., Kozlov S.P. Hydrodynamics and Heat and Mass Transfer at Chemical Conversions in Slot Reactors // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2007. -V. 16, N. 2. – P. 99-106.

© О.В. Витовский, В.В Кузнецов, 2009

УДК 536.42

А.С. Шамирзаев

ИТ СО РАН, Новосибирск

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ В МИКРОКАНАЛЬНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРАХ / КОНДЕНСАТОРАХ

A.S. Shamirzaev

IT SB RAS, 630090 Novosibirsk, pr. Akademika Lavrentjeva, 1

HEAT TRANSFER WITH THE PHASE TRANSITIONS IN THE MICROCHANNEL STEAM GENERATORS / CONDENSERS

The upflow water boiling and condensation heat transfer experiments were performed in vertical narrow rectangular micro-channels. The stainless steel micro-channel heat sink contained 10 parallel channels having a 0,64 x 2,05 mm cross-section with typical roughness 10-15 μ . Tests were performed over a mass velocity range of 8–51 kg/m² s, heat fluxes of 30 kW/m² and 160 kW/m², vapor quality up to 0,98 and an outlet pressure of 1,1-1,2 bar.

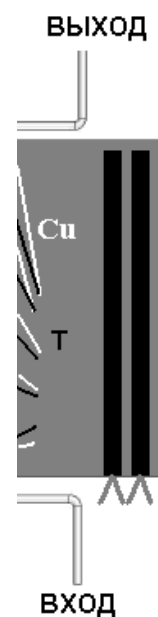
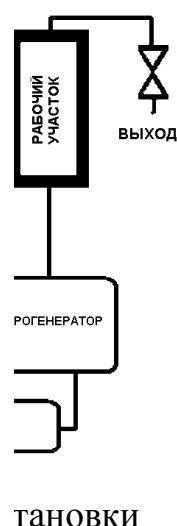
С развитием микромасштабных технологий требуется более эффективные устройства охлаждения малого размера. Эффективные технологии охлаждения необходимы, например, для высокопроизводительных электронных микросхем, для компактных теплообменников и других тепломассообменных устройств. Развитие двухфазных микроканальных технологий требует фундаментального понимания гидродинамических и тепловых особенностей при фазовых превращениях в условиях сильного влияния капиллярных сил.

Целью данной работы является исследование локальной теплоотдачи воды при кипении и конденсации в системе микроканалов в условиях малых массовых расходов в зависимости от теплового потока и паросодержания. Измерения теплоотдачи проведены в микроканальном теплообменнике из нержавеющей стали, что существенно расширяет область практического приложения полученных данных.

Экспериментальная установка и методика измерений

На рис.1 показана схема установки для исследования теплоотдачи в микроканальных теплообменниках. Дистиллированная вода из бака с постоянным давлением подаётся на контроллер расхода. Постоянное давление поддерживается при помощи азота. Контроллер расхода Bronkhorst Series L30 устанавливает расход воды в диапазоне от 0,08 кг/час до 8 кг/час и имеет класс точности 0,2. Вода с установленным массовым расходом подаётся на термостабилизирующий теплообменник, после чего направляется в парогенератор. Полученный двухфазный поток с известным паросодержанием направляется в экспериментальный участок, после чего выбрасывается.

На рис. 2 показана схема экспериментального участка, который состоит из: теплообменника из нержавеющей стали 12Х18Н9Т; 4-х нагревательных картриджей, вмонтированных в медные блоки; 2-х пластин из нержавеющей стали 12×18Н9Т для измерения теплового потока; теплоизоляции (шамота). Микроканальный теплообменник имеет общую длину 160 мм, ширину 22 мм и толщину 6,6 мм. Десять каналов шириной 0,65 мм, глубиной 2,05 мм, длиной 120 мм фрезерованы в пластине размером 160х22х4,6 мм. Расстояние между каналами составляет 1,15 мм.



часть участка

Характерный размер шероховатости обработанной поверхности составляет 10–15 мкм. Четырнадцать термопар Т типа вмонтированы на глубину 0,6 мм в 7 сечениях по длине миканалов. Термопары установлены на длинах 5 мм, 30 мм, 55 мм, 65 мм, 90 мм, 110 мм и 115 мм от начала каналов. Система миканалов закрыта крышкой из нержавеющей стали толщиной 2 мм. Во входной и выходной камере установлены отборники давления и изолированные термопары L типа.

Подвод тепла к теплообменнику осуществляется посредством медного блока с вмонтированными обогревательными картриджами. Определение локального теплового потока производится измерением температурного напора на измерительной пластине из нержавеющей стали расположенной между медным блоком и теплообменником, толщина пластины 6 мм. Температурный напор определяется термопарами Т типа заделанными на глубину 0,7 мм в 5 сечениях, на расстояниях 5 мм, 35 мм, 57,5 мм, 85 мм и 115 мм от начала миканалов. Распределение теплового потока по длине экспериментального участка

определяется линейной аппроксимацией. Для компенсации тепловых потерь система подачи тепла дублирована со стороны крышки теплообменника. Термопары L и T типов прокалиброваны совместно вплоть до температуры плавления чистого олова, погрешность измерения температуры не превышает 0,2 К. Давление во входной и выходной камерах теплообменника измеряется датчиком давления Метран-100 Ex –ДИ модель № 1151.

В опытах с измерением конденсации нагревательные элементы отключались. Снятие тепла с медных блоков производилось с помощью элементов Пельтье.

Относительная ошибка определения суммарного теплового потока по локальному тепловому потоку для установившегося режима не превышает 3 %.

В процессе эксперимента происходит непрерывный мониторинг температур в экспериментальном участке и определяется среднеквадратичное отклонение каждой температуры по пяти измерениям. Полный цикл из 5 измерений занимает 50 сек. Режим считается установившимся, когда среднеквадратичное отклонение температуры стенки не изменяется в течение десяти минут. После окончательной стабилизации параметров потока поля температур в экспериментальном участке фиксируются в течение 15 минут. После записи стабилизированных параметров тепловой поток на участке варьируется и процедура повторяется.

По данным соответствующим установившемуся режиму течения определяются локальные коэффициенты теплоотдачи как

$$h = q_{eff} / (T_{w,in} - T_{sat}), \quad (1)$$

где q_{eff} – эффективный тепловой поток, определяемый с учётом влияния эффективности ребра, T_{sat} – температура насыщения потока, $T_{w, in}$ – внутренняя температура стенки определяемая как

$$T_{w,in} = T_w - \frac{q_w \cdot L_t}{\lambda_{St}}, \quad (2)$$

где T_w – измеренная температура стенки, L_t – расстояние от термопары до поверхности канала, q_w – локальный тепловой поток, λ_{St} – теплопроводность материала стенки.

Усреднённое давление в выходной камере микроканального теплообменника соответствует температуре насыщения измеренной по термопаре, поэтому давление насыщения на выходе из экспериментального участка определялось по термопаре. Падение давления в экспериментальном участке рассчитывалось по Локкарту – Мартинелли с учётом ускорения потока за счёт фазового перехода и потерь давления на входе и выходе из микроканалов.

Результаты и обсуждения

На рис. 3 показано изменение локальных коэффициентов теплоотдачи при кипении с равновесным паросодержанием при массовом расходе 51 кг/м²с. Данные приведены для различных эффективных тепловых потоков. Данные слабо зависят от паросодержания, при паросодержании выше 0,55 наблюдалась большая нестабильность значений локальных коэффициентов теплоотдачи с дальнейшим незначительным ухудшением при паросодержании выше 0,7. Также

наблюдалась сильная флуктуация теплоотдачи в зависимости от локального теплового потока. Возможно, это связано с неустойчивостью режима течения при малых массовых расходах, как и в работе [1]. Для тепловых потоков 140–150 кВт/м² данные лежат в том же диапазоне значений что и в работе [2] для массового расхода 135 кг/м²с и в работе [1] для массового расхода 41 кг/м²с.

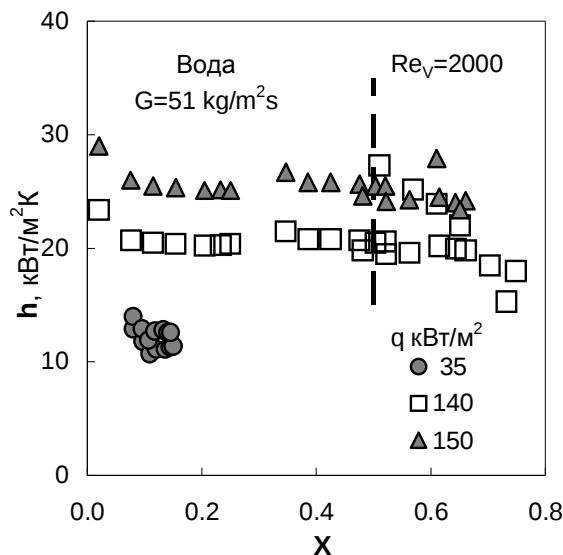


Рис. 3. Локальные коэффициенты теплоотдачи при кипении в зависимости от паросодержания при массовом расходе 51 кг/м²с

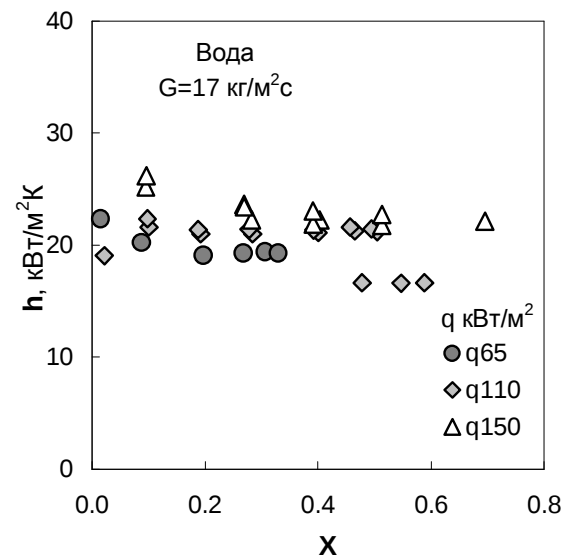


Рис. 4. Локальные коэффициенты теплоотдачи при кипении в зависимости от паросодержания при массовом расходе 17 кг/м²с.

С уменьшением теплового потока наблюдается существенное ухудшение локальных коэффициентов теплоотдачи. Это указывает на то, что преобладающим механизмом теплоотдачи является пузырьковое кипение. На рис. 4 показана зависимость локальных коэффициентов теплоотдачи при кипении от равновесного массового паросодержания при $g = 17 \text{ кг/м}^2\text{с}$ для тепловых потоков в диапазоне от 65 кВт/м² до 150 кВт/м². Измеренные коэффициенты теплоотдачи слабо зависят от теплового потока. Это указывает на смену механизма теплоотдачи. При уменьшении массового расхода преобладающим механизмом теплоотдачи становится конвективное испарение. Не наблюдается интенсификация теплоотдачи с ростом паросодержания характерного для конвективного механизма теплоотдачи при больших массовых расходах как в работе [3]. По всей видимости это связано с тем, что переход к конвективному механизму теплоотдачи связан не с переходом к кольцевому режиму течения, как при больших массовых расходах, а с уменьшением длины жидких перемычек, с уменьшением массового расхода в снарядном режиме течения.

На рис. 5 показана зависимость локальных коэффициентов теплоотдачи от равновесного массового паросодержания при конденсации в зависимости от равновесного массового паросодержания для двух массовых скоростей 8,6

кг/м²с и 17 кг/м²с. Усреднённый локальный тепловой поток через стенку микроканального теплообменника составлял 42 кВт/м², тепловой напор по длине участка изменялся от 4 до 7 градусов Цельсия. С увеличением паросодержания коэффициенты теплоотдачи увеличиваются. При массовой скорости 17 кг/м²с локальные коэффициенты теплоотдачи выше, чем при 8 кг/м²с. Увеличение массового расхода приводит к увеличению скорости потока при том же паросодержании, что в свою очередь приводит к интенсификации теплоотдачи.

В области низких паросодержаний локальные коэффициенты теплоотдачи при конденсации ниже, чем при кипении.

При снарядном режиме течения теплоотдача будет определяться испарением с поверхности длинных снарядов разделённых тонкими перемычками. В условиях существенного влияния капиллярных сил граница межфазной поверхности в снарядном режиме течения при испарении слабо зависит от скорости пара, что приводит к постоянству локальных коэффициентов теплоотдачи в зависимости от паросодержания. В режиме конденсации наблюдается сильная зависимость локальных коэффициентов теплоотдачи от скорости пара.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 07-08-12212-офи).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kosar A., Kuo C.J., Peles Y. Boiling heat transfer in rectangular microchannels with reentrant cavities // Int. J. of Heat and Mass Transfer. - 2005. - V. 48. - P. 4867-4886.
2. Qu W., Mudawar I. Flow boiling heat transfer in two-phase micro-channel heat sinks-I. Experimental investigation and assessment of correlation methods // Int. J. Heat Mass Transfer. - 2003. - V. 46. - P. 2755-2771.
3. Lee H.J., Lee S.Y. Heat transfer correlation for boiling flows in small rectangular horizontal channels with low aspect ratios // Int. J. Multiphase Flow. - 2001. - V.27. - P. 2043-2062.

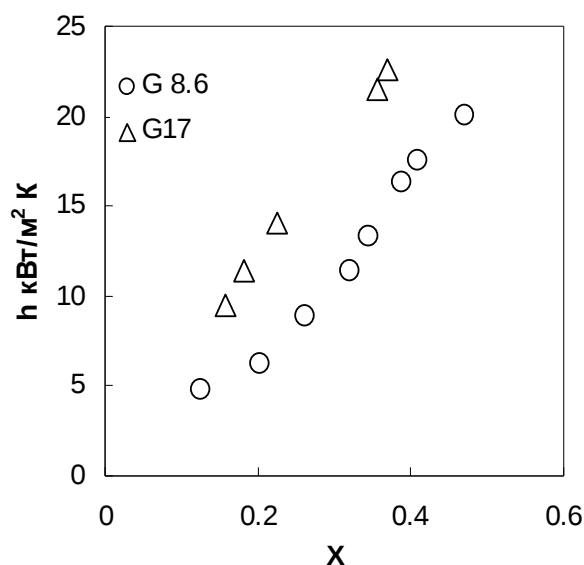


Рис. 5. Локальные коэффициенты теплоотдачи при конденсации в зависимости от паросодержания для различных массовых скоростей 8,6 кг/м²с и 17 кг/м²с

УДК 526.24

С.П. Козлов, С.А. Сафонов

ИТ СО РАН, Новосибирск

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В МИКРОКОНВЕРТОРАХ ПРИРОДНОГО ГАЗА

S.P. Kozlov, S.A. Safonov

Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Novosibirsk, pr. Akademika

Lavrentjeva, 1

NUMERICAL SIMULATION OF CHEMICAL CONVERSIONS IN MICROCHANNEL PROCESSORS OF METHANE

The numerical simulations of chemical conversions in a microchannel methane reforming reactor are performed. Mass and heat transfer limitations are considered to be negligible. Diffusion processes smooth down mole fractions field of species across the microchannel. Microchannel reactors are more effective when flows with low Reynolds numbers are used. When the less Reynolds numbers are used, the more significant diffusion processes are become, making counterflow disturbance distribution, and longitude heat conductivity is more significant in heat transfer processes.

Конверсия метана в синтез газ – одна из важнейших химических реакций, пригодная для промышленного получения водорода и дающая начало синтезу углеводородов и других технически ценных продуктов [1].

Существует три метода окислительной конверсии метана в синтез-газ:

– Паровая конверсия



– Неполное окисление кислородом



– Углекислотная конверсия



Как следует из уравнений (1-3), количественный состав образующегося синтез-газа в этих реакциях различный: так при паровой конверсии метана получается синтез-газ состава $\text{CO} : \text{H}_2 = 1 : 3$, в случае неполного окисления кислородом – смесь $1 : 2$, и углекислотная конверсия метана дает смесь $1 : 1$.

Для интенсификации процессов конверсии применяются микроканальные технологии. По сравнению с разработанными до сих пор системами микроконверторы имеют следующие преимущества и особенности: меньшие эффективные длины переноса, что в значительной степени устраняет диффузионные ограничения и ускоряет скорости реакций. Модульная природа микроконверторов позволит размещать производство водорода вблизи места его

потребления в аппаратах водородной энергетики. Малые размеры и блочная конструкция микроконверторов, снижают цену оборудования и дают возможность наращивать производительность при изменении числа блоков системы. Наиболее полно преимущества микроканальных реакторов проявляются в случае сильно экзотермических или эндотермических реакций, например, при неполном окислении метана в синтез-газ или паровой конверсии метана.

Большинство работ посвященных моделированию каталитических реакций, как правило, рассматривают упрощенные модели течения, такие как приближение пограничного слоя или поршневые модели одномерного течения, где используются эффективные коэффициенты тепло- и массо- обмена между стенкой и объемом [2]. Целью данной работы является численное, на основе полных уравнений Навье-Стокса для ламинарного многокомпонентного сжимаемого газа, исследование взаимосвязи тепловых, массообменных и других физико-химических процессов при паровой и автотермальной конверсии метана в двумерном и прямоугольном канале микрокаталитического конвертора.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Расчеты проведены для паровой конверсии метана в канале с зазором $H = 0,6$ мм для равномерной сетки с 21 узлом поперек канала при различных условиях подвода тепла к реагирующей смеси. Теплофизические величины на входе заданы так, что соответствуют следующим безразмерным параметрам: $Pr = 0,915$, $Sc = \mu/D = 0,92$ для каналов с зазором 0,6 мм.

Газовая смесь рассматривалась как один газ с некоторыми усредненными параметрами. Вязкость и теплопроводность смеси зависят от температуры и концентрации компонент и вычисляются по полуэмпирическим формулам из работ [3, 4]. Значения вязкости и теплопроводности для каждого компонента смеси определяются как полиномиальные функции температуры.

Численное моделирование двумерного течения газа и процессов переноса в щелевом микроканале при наличии химических превращений, активированных на стенках каналов, проводилось в рамках уравнений Навье – Стокса для ламинарного течения многокомпонентного сжимаемого газа. Численные методы решения полных уравнений Навье – Стокса в естественных переменных «вектор скорости – давление» приводят к нелинейным плохо обусловленным системам алгебраических уравнений, что вызывает численную осцилляцию решения при использовании прямых методов и ограничивает использование итерационных методов их решения. Исключение давления из числа независимых переменных с помощью введения функции тока и завихренности решает проблему обусловленности алгебраических систем. В данной работе система уравнений Навье – Стокса записывалась в переменных «функция тока – завихренность», и решалась конечно-разностным методом.

Функция тока - ψ используется для того чтобы заменить продольную - U и поперечную - V компоненты скорости одной функцией:

$$U = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad V = -\rho \frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (4)$$

Завихренность – ω вводится для того, чтобы исключить давление из системы уравнений. Завихренность определяется следующим образом:

$$\omega = \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}. \quad (5)$$

Тогда, с учетом уравнений (4–5) система уравнений Навье – Стокса может быть записана в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \omega = 0; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \omega \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \omega \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial (U^2 + V^2)}{\partial x} - \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial (U^2 + V^2)}{\partial y} \right) = \\ & = \frac{\partial^2}{\partial x^2} (\mu \omega) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\mu \omega) - 2 \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \mu}{\partial y} \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\partial \mu}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \mu}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial \mu}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} \right) \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Давление определяется из уравнения состояния:

$$P = \frac{\rho R_m T}{M}, \quad M = \frac{1}{\sum Y_i / M_i}. \quad (8)$$

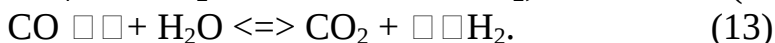
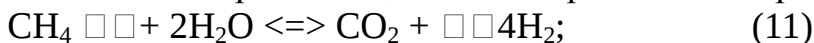
Уравнение переноса энергии:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho U h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V h)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum h_i \rho D_{im} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sum h_i \rho D_{im} \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) + \\ & + U \frac{\partial P}{\partial x} + V \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнение переноса компонент:

$$\frac{\partial(\rho U Y_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V Y_i)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_{im} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D_{im} \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right). \quad (10)$$

В качестве примера каталитической реакции протекающей в микроканале рассмотрен процесс паровой конверсии метана, который является сложным многостадийным процессом, основные реакции которого:



Для задания химической кинетики использовались следующие зависимости скоростей реакции от концентраций компонент и их температуры, взятые из работы [5]:

$$r_1 = \frac{k_1 \left(\frac{P_{\text{CH}_4} P_{\text{H}_2\text{O}}^{0.5}}{P_{\text{H}_2}^{1.25}} \right) \left(1 - \frac{P_{\text{CO}} P_{\text{H}_2}^3}{K_{p1} P_{\text{CH}_4} P_{\text{H}_2\text{O}}} \right)}{(1 + K_{\text{CO}} P_{\text{CO}} + K_{\text{H}_2} P_{\text{H}_2}^{0.5} + K_{\text{H}_2\text{O}} (P_{\text{H}_2\text{O}} / P_{\text{H}_2}))^2};$$

$$r_2 = \frac{k_2 \left(\frac{P_{CO} P_{H_2O}^{0.5}}{P_{H_2}^{0.5}} \right) \left(1 - \frac{P_{CO_2} P_{H_2}}{K_{P_2} P_{CO} P_{H_2O}} \right)}{(1 + K_{CO} P_{CO} + K_{H_2} P_{H_2}^{0.5} + K_{H_2O} (P_{H_2O} / P_{H_2}))^2} ;$$

$$r_3 = \frac{k_3 \left(\frac{P_{CH_4} P_{H_2O}}{P_{H_2}^{1.75}} \right) \left(1 - \frac{P_{CO_2} P_{H_2}^4}{K_{P_3} P_{CH_4} P_{H_2O}^2} \right)}{(1 + K_{CO} P_{CO} + K_{H_2} P_{H_2}^{0.5} + K_{H_2O} (P_{H_2O} / P_{H_2}))^2} .$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 1 представлен пример результатов расчетов. Видно, что изменение концентраций поперек канала мало. Что говорит о существенной роли диффузии, которая выравнивает поле концентраций веществ внутри каналов, вследствие чего, в микроканальных реакторах не требуется дополнительного перемешивания. Но вдоль канала изменение концентрации существенно, что говорит о высокой скорости реакций и эффективной конверсии метана в синтез газ. Полная конверсия в микроканалах происходит при малых размерах реактора. И это указывает на возможность создания компактного топливного процессора для получения водорода.

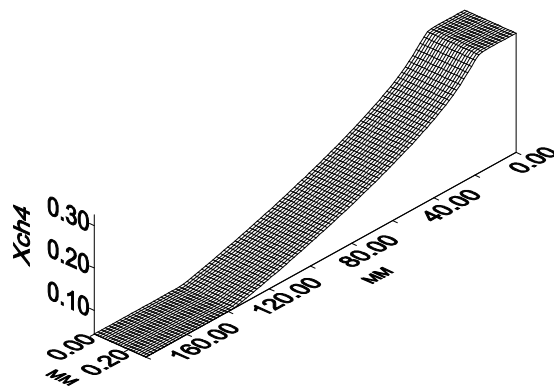


Рис. 1. Распределение мольной доли метана по длине и ширине канала $H = 0,6$ мм при плотности теплового потока 2 кВт/м^2 , $Re = 4$, $Ma = 0,00205$

– На рис. 2 представлена зависимость степени конверсии метана от плотности теплового потока подводимого к стенкам микроканала. Видно, что конверсия зависит от величины теплового потока к стенкам линейным образом. Причем при больших тепловых потоках конверсия метана заметно выше и близка к 1.

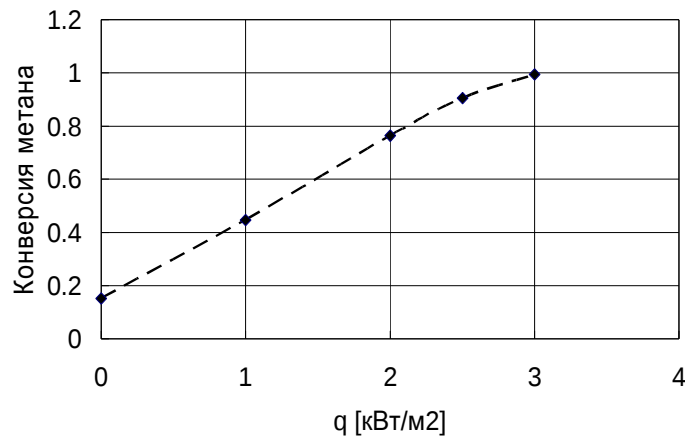


Рис. 2. Конверсия метана в канале в зависимости от подводимого теплового потока. Ширина канала 0,6 мм, длина зоны реакции 21 мм

При малых числах Рейнольдса в микроканалах существенную роль начинают играть диффузионные процессы, в результате которых продукты реакций поднимаются вверх по потоку и наблюдаются еще до начала области, покрытой катализатором. На рис. 3 приведены результаты численного расчета в прямоугольном канале. Подвод тепла в этом случае осуществляется не от внешнего источника, а путем сжигания части метана в присутствии кислорода, при этом так же достигается высокая степень конверсии метана в синтез газ. Как видно из рис. 3 наименьшая скорость сжигания метана имеет место в угле канала. На рис. 4 представлены значения отношения средних чисел Нуссельта к установившемуся числу Нуссельта для щели, полученные в результате моделирования процесса теплообмена в плоском микроканале, и сравнены с решением из [6].

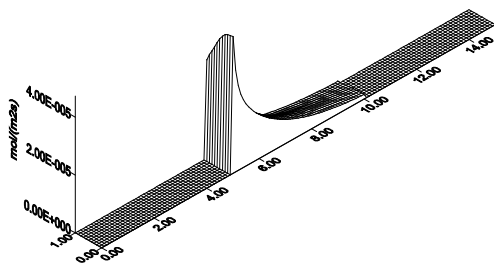


Рис. 3. Распределение скорости реакции горения кислорода на вертикальной стенке канала

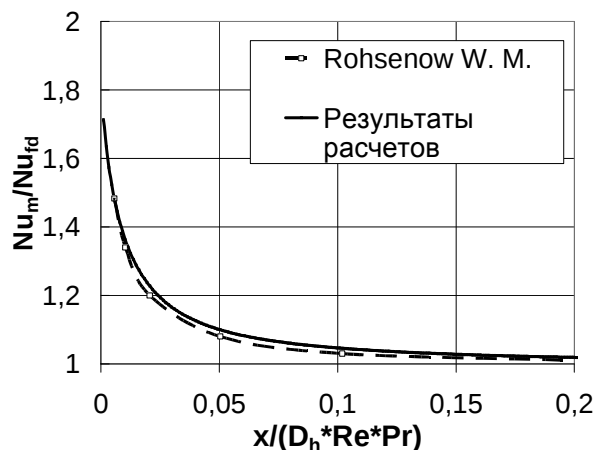


Рис. 4. Зависимость отношения среднего числа Нуссельта к установившемуся значению от приведенной длины. Сплошная линия — результаты расчетов с $Re = 9$, пунктирная линия — данные из [6]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численные расчеты паровой конверсии метана, выполненные в двумерном микроканале, показали, что паровая конверсия метана сложный многостадийный процесс в котором интенсивно происходят химические превращения в стесненных условиях, и все реакции при небольших числах Рейнольдса заканчиваются на нескольких сантиметрах вниз по потоку. В каналах с размером 0,6 мм, для рассмотренных реакций, внешние массообменные ограничения практически не проявляются, и диффузионные процессы выравнивают поле концентраций компонент поперек канала. Продольная диффузия, роль которой возрастает при малых числах Рейнольдса, приводит к тому, что окись углерода и водород наблюдаются в потоке до области, где протекают реакции.

Для достижения высокой конверсии необходим подвод тепла к стенкам микроконвертора парового риформинга, но высокие конверсии можно получить также в случае автотермальных микроконверторов, часть метана в которых сжигается в среде кислорода. В углах прямоугольного реактора наблюдаются наименьшие значения скоростей реакций.

При малых скоростях течения смеси в микроканале конверсия метана заметно выше. А это значит, что преимущества микроканальных реакторов будут наиболее полно проявляться при режимах с малыми числами Рейнольдса. При малых числах Рейнольдса существенную роль в процессах тепло и массообмена начинает играть продольная теплопроводность.

Из полученных результатов видно, что микроканальные технологии позволяют реализовать компактные, небольшого размера реакторы для проведения каталитической реакции парового риформинга метана.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-08-12212-офи).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арутюнов В.С., Крылов О.В. Окислительные превращения метана / В.С. Арутюнов, О.В. Крылов. – М.: Наука, 1998. – 361 с.
2. Hickman D.A. and Schmidt L.D. Steps in CH₄ oxidation on Pt and Rh surfaces - high-temperature reactor simulations // AIChE Journal. - 1993. - V. 39. - P. 1164-1177.
3. Mason E.A., Saxena S.C. Approximate Formula for the Thermal Conductivity of Gas Mixtures // Physics of Fluids. - 1958. - V. 1. - P. 361-369.
4. Wilke C.R. A Viscosity Equation for Gas Mixtures // J. Chem. Phys. - 1950. - V. 18. - P. 517-521.
5. Hou K., Hughes R. The kinetics of methane steam reforming over a Ni/ α -Al₂O₃ catalyst // Chemical Engineering Journal. - 2001. - V. 82. - P. 311-328.
6. Handbook of Heat Transfer Applications, Second Edition, Editors W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, E.N.Ganic. 1985.

УДК 621.1.016:536.42

И.А. Козулин, В.В. Кузнецов

ИТ СО РАН, Новосибирск

СТРУКТУРА ГАЗО-ЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ВЕРТИКАЛЬНОМ МИКРОКАНАЛЕ

I.A. Kozulin, V.V Kuznetsov

Institute of Thermophysics SB RAS

pr. Akademika Lavrentjeva, 1, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

STRUCTURE OF GAS-LIQUID FLOW IN VERTICAL MICROCHANNEL

In this work research of adiabatic gas-liquid flow H_2O/CO_2 in saturation conditions was made in channel with a diameter less than the capillary constant. The experiments were conducted in a rectangle glass channel with a cross-section size 1,75x3,8mm and length 0,7m in the range of the gas superficial velocity from 0,1 to 10 m / sec. and the liquid from 0,07 to 0,7 m/sec. The method of two-beam laser scanning was shown. For the first time was obtained statistical characteristics of the movement of liquid and gas phases in minichannel for slug, transition, churn and annular regimes. The flow pattern's map of upstream gas-liquid flow was constructed. It was shown the existence of Flicker noise in the analysis of gas-liquid flow. The experimental data were compared with existing flow pattern's map: Mishima Ishii (1984), Sorokina & Kutateladze (1946) and model of Akbar M.K, etc. (2003).

Характеристики газо-жидкостного двухфазного потока в каналах малого и сверхмалого размера играют важную роль в промышленности и технике, так как используются в охлаждающих системах различного вида оборудования. Поэтому данные исследования находят свое применение в таких системах как микроэлектроника, в компьютерах, суперкомпьютерах, мощных лазерах, медицинском оборудовании, компактных теплообменниках, в космических кораблях и спутниках.

Проведено достаточно много работ по исследованию двухфазных режимов для труб маленького диаметра Mishima&Ishii (1984) [1], Suo&Griffith (1984) [2] Akbar M.K., Plummer D.A (2003) [3] и др., но требуется дальнейшие исследования и обобщения этих работ. В данной работе рассматривается микроканал с гидравлическим диаметром $D_h=2400$ мкм, что меньше капиллярной постоянной для воды. Для таких малых каналов остается нерешенным вопрос критериального описания границ переходов между различными режимами течения, определения областей влияния капиллярных, гравитационных, инерционных и вязких сил в двухфазных течениях,

статистических характеристик газо-жидкостного течения, чему и посвящена данная работа.

Для определения параметров двухфазного потока в микроканале был собран экспериментальный участок, схема, которого приведена на рис. 1. Сжатый углекислый газ поступал из баллона (1) через регулировочный винт и датчик расхода газа (2) непосредственно в экспериментальный участок (5). Вода при этом поступала из бака (4) с водой, расположенного на высоте ~2 м, далее через винт контроля расхода жидкости, в ротаметр (3) и далее в смешивающую камеру, расположенную внизу перед экспериментальным участком, здесь происходило образование двухфазного газожидкостного потока (H_2O-CO_2) из воды и углекислого газа. Экспериментальный участок представлял собой прямоугольный канал размером 1,75x3,8 мм, собранный из 4 параллельных стеклянных пластин, длиной $L = 70$ см, склеенных между собой эпоксидным клеем. Внутри канала при изменении расхода жидкости и газа исследовались различные режимы течения двухфазного потока.

Непосредственно с экспериментального участка двухфазная жидкость откачивалась жидкостным насосом (9) и далее вновь поступала в открытый бак с водой, при этом углекислый газ уходил в атмосферу, тогда как вода циркулировала по замкнутому контуру.

Для определения режимов течения использовался метод двойного лазерного сканирования. Для осуществления этой задачи была собрана следующая схема. С лицевой стороны экспериментального участка были расположены два лазера (7) так, что свет от лазера падал перпендикулярно на исследуемый канал.

Через прозрачный участок на базе 35 мм двухфазный поток освещался лазерными лучами с диаметром светового пятна порядка размера канала. Питание лазеров осуществлялось с помощью источника напряжения ТЕС-42 (8). Интенсивность прошедшего света измерялась с помощью фотодиодов. Сигнал со светочувствительных элементов регистрировался с помощью высокоскоростной платы АЦП (Lcard L-264) с максимальной частотой опроса по всем каналам 200 kHz, и далее выводились на экран компьютера (10). С лицевой стороны канала, при помощи цифровой видеокамеры и цифрового фотоаппарата проводилась визуализация двухфазного потока, после записи режима течения в файл на компьютер проводилось также фотографирование данного режима течения.

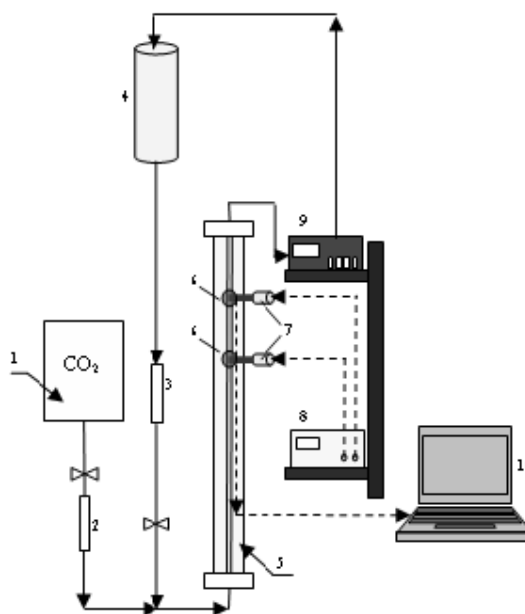


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для получения различных режимов течения восходящего газожидкостного потока ($\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$) расход жидкости и газа изменялся в диапазоне приведенных скоростей газа 0,07-10 м/с и жидкости 0,07-0,64 м/с. Для каждого отдельного эксперимента производилась запись сигнала с двух фотодиодов в течении 15÷30 сек, затем данный режим течения записывался на видео камеру и фотографировался. Запись сигналов с фотодиодов производилась в темной комнате, для исключения шума от ламп накаливания и дневного света.

Режим течения определялся как по данным визуализации, так и по характеру спектра сигнала со светочувствительных элементов. В результате проведенных экспериментов были обнаружены следующие режимы течения: снарядный, переходный, вспененный, кольцевой. Обработка сигналов с фотодиодов проводилась на 32-х разрядной плате АЦП Lcard-264. Оцифровка сигнала осуществлялась с частотой $\nu=2$ кГц в течении 15÷30 сек. Определение режима течения определялось визуально по характеру сигналов.

Пузырьково-снарядный режим течения наблюдался в течениях с приведенными скоростями в диапазоне ($J_{\text{liq}}=0,51\div0,64$ м/с, $J_{\text{gas}}=0,07\div0,84$ м/с). Важно отметить, что режим с дискретными пузырьками в трубке не наблюдался, и структура потока была больше похожа на снарядный режим, с многочисленными короткими жидкими перемычками. На рис. 2 показана временная развертка сигнала оптических датчиков и фотографии структуры потока для пузырьково-снарядного режима течения.

При увеличении приведенной скорости в диапазоне ($J_{\text{liq}}=0,07\div0,38$ м/с, $J_{\text{gas}}=0,52\div1,57$ м/с) наблюдался снарядный режим течения, при этом характерный вид сигнала показан на рис. 3. Здесь наблюдались длинные снаряды, разделенные короткой жидкой перемычкой.

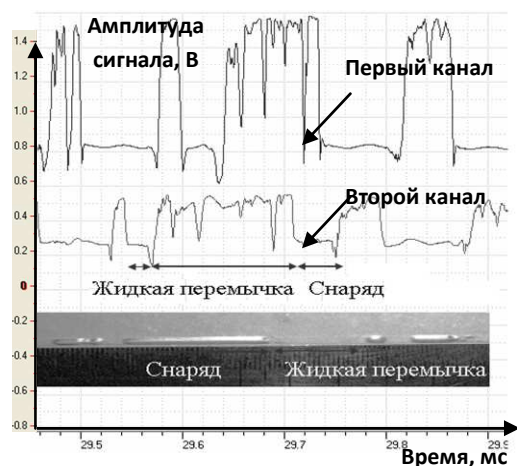


Рис. 2. Общий вид сигналов с первого и второго светодиода
 $J_{\text{liq}}=0,64$ м/с, $J_{\text{gas}}=0,07$ м/с

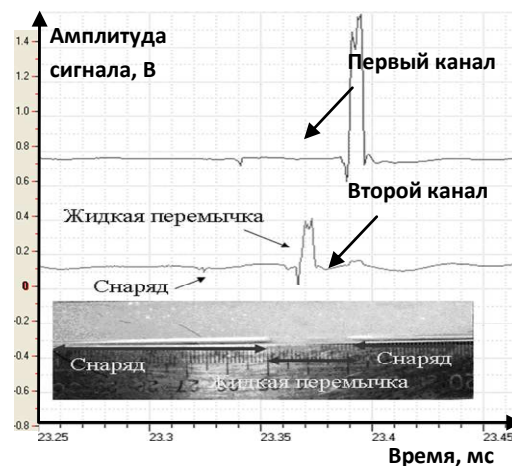


Рис. 3. Общий вид сигналов с первого и второго светодиода
 $J_{\text{liq}}=0,12$ м/с, $J_{\text{gas}}=1,18$ м/с

В диапазоне ($J_{\text{liq}}=0,08\div0,29$ м/с, $J_{\text{gas}}=1,82\div2,83$ м/с) жидкости и газа наблюдался переходный режим от снарядного к вспененному режиму. С

увеличением скорости переходный режим переходит в вспененный, когда целые снаряды наблюдались очень редко, тогда как сам снаряд разрушался, и наблюдалось нестабильное поведение жидкости. В области вспененного режима течения перемины насыщены газом и каплями жидкости. Вспененный режим наблюдался в точках с приведенными скоростями $J_{liq}=0,074$ м/с, $0,15$ м/с, $J_{gas}=2,77$ м/с, $3,05$ м/с. Поведение сигнала в вспененном режиме показано на рис. 4.

При увеличении приведенных скоростей наблюдался переход к кольцевому режиму. Характерный вид сигнала показан на рис. 5. Кольцевой режим наблюдался в диапазоне приведенных скоростей ($J_{liq} = 0,057 \div 0,27$ м/с, $J_{gas} = 3,43 \div 9,52$ м/с).

В данной работе были впервые получены статистические характеристики движения жидкой и газовой фаз в миниканале, в том числе скоростей движения фаз. Для снарядно-пузырькового режима ($J_{liq}=0,64$ м/с, $J_{gas}=0,07$ м/с) время обработки сигнала составляло 30 сек. На рис. 6а, 6б показано распределение снарядов по длинам, и распределение снарядов по скоростям, здесь же пунктирной линией отмечена суммарная скорость потока, равная сумме приведенных скоростей газа и жидкости $U_m=J_{ж}+J_{г}$.

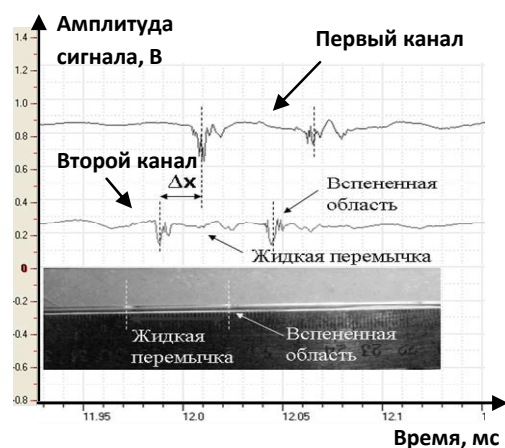


Рис. 4. Общий вид сигналов с первого и второго светодиода
 $J_{liq}=0,074$ м/с, $J_{gas}=3,05$ м/с

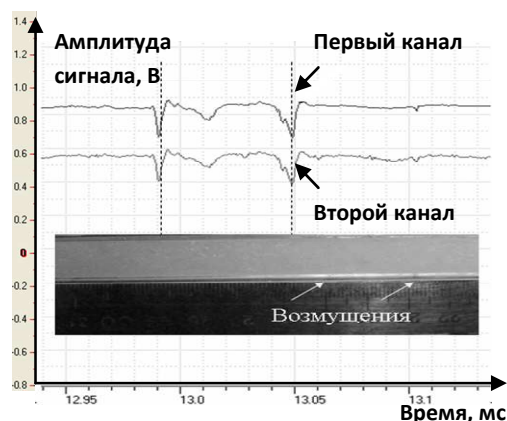


Рис. 5. Общий вид сигналов с первого и второго светодиода
 $J_{liq}=0.12$ м/с. $J_{gas}=9.52$ м/с

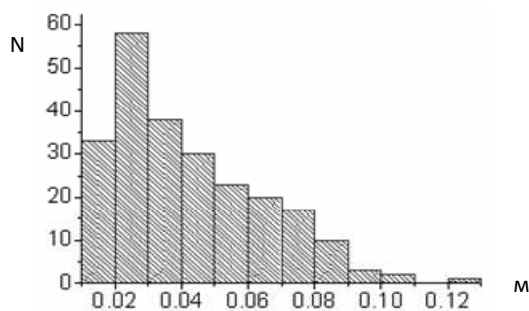


Рис. 6а. Распределение
по длинам снарядов

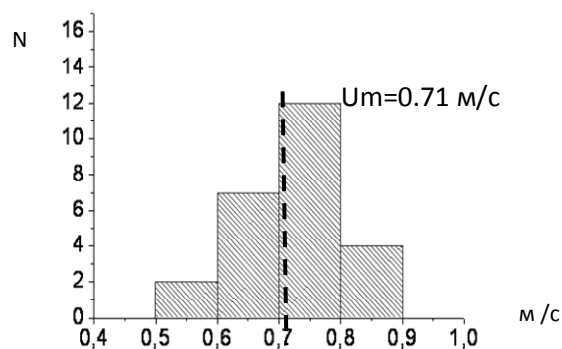


Рис. 6б. Распределение
скоростей снарядов

Для снарядного режима течения проводилась подобная процедура. На рис. 7а, 7б показано характерное статистическое распределение для снарядного режима течения ($J_{\text{liq}}=0,12$ м/с, $J_{\text{gas}}=1,18$ м/с), время обработки сигнала 27 сек. Здесь необходимо отметить, что скорость снарядов значительно превышает суммарную скорость потока.

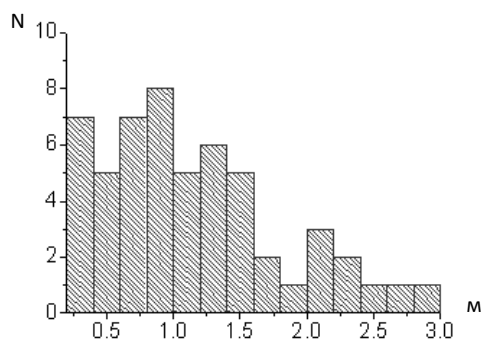


Рис. 7а. Распределение
по длинам снарядов

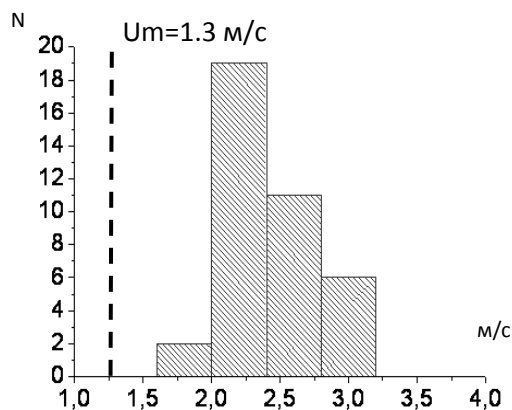


Рис. 7б. Распределение
скоростей снарядов

Обработка данных для скорости всплытия снарядов проводилась в виде $U_b = C \cdot U_m + U_b^{\text{free}}$, где U_m – сумма приведенных скоростей газа и жидкости, U_b^{free} – скорость свободного всплытия снаряда в неподвижной жидкости, U_b – скорость всплытия снаряда. Для пузырьково-снарядного, снарядного и переходного режима течения величина коэффициента C выше, чем в работе Nicklin D.J. и др. [4] (рис. 8). При анализе спектров сигналов во всех режимах течения на частоте выше 100 Гц был обнаружен фликкер-шум [5] (рис. 9).

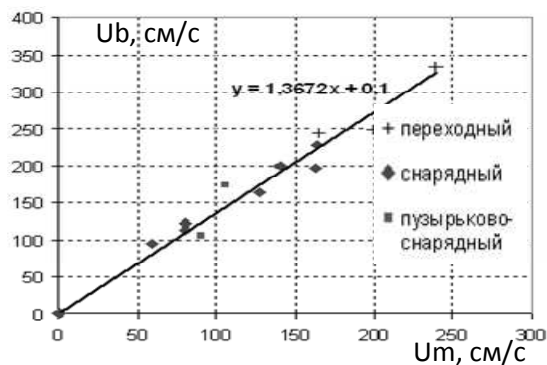


Рис. 8. Зависимость скорость всплытия пузыря от скорости смеси

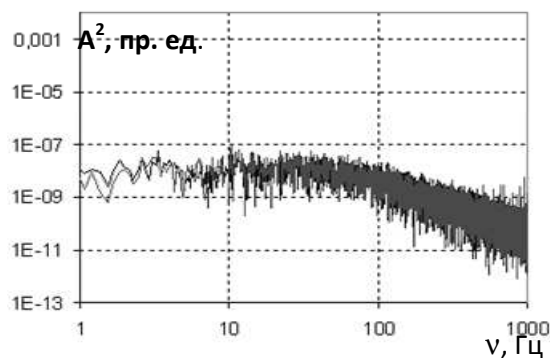


Рис. 9. Зависимость квадрата амплитуды сигнала от частоты на первом втором канале ($J_{liq} = 0,11$ м/с, $J_{gas} = 7,19$ м/с).

При сравнении режимов течения с моделями режимов течения других работ для экспериментального участка с $D_h = 2,4$ мм было показано, что наиболее оптимальной моделью для описания является модель Mishima Ishii [2] (рис. 10). Тогда как переход от снарядного к переходному режиму наиболее точно отражает модель Akbar M.K., Plummer D.A. [3] для малых каналов, а модель Сорокина и Кутателадзе [6] хорошо предсказывает пузырьковый и снарядный режимы течения.

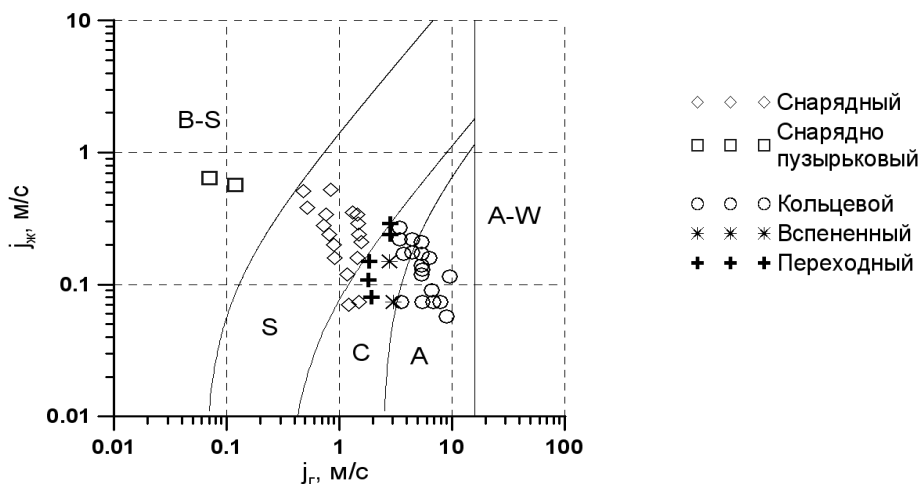


Рис. 10. Карта режимов течений. Точки эксперимента и линии расчёта по модели Mishima Ishii (1984)

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 08-08-00953а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Suo M., Griffith P. Two-phase flow in capillary tubes // J. Basic Engineering.— 1984. — P. 576-582.

2. Mishima K., Ishii M. Flow regime criteria for upward two-phase flow in vertical tubes // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1984. – V. 27, №5. – P. 723-737.
3. Akbar M.K., Plummer D.A., Ghiaasiaan S.M. On gas-liquid two-phase flow regimes in microchannels // Int. J. of Multiphase Flow. – 2003. – V. 29. – P. 855-865.
4. Nicklin D.J., Davidson J.F. Paper № 4 // Two-phase Flow Symp., Inst. Mech. Engrs, London, 1962.
5. Решетников, А.В. Фликкер-шум и самоорганизованная критичность в кризисных режимах кипения / А.В. Решетников, В.Н. Скоков // ПМТФ. – 2002. – Т. 41, №1. – С. 131-136.
6. Сорокин Ю.Л. Парожидкостное течение в трубах и обобщенные координаты для его анализа / Ю.Л. Сорокин, С.С. Кутателадзе // Советское котлотурбостроение. – 1946. – №2. – С. 19-20.

© И.А Козулин, В.В. Кузнецов, 2009

УДК 535.33/.34

В.С. Айрапетян, К.А. Фесенко

СГГА, Новосибирск

РАСЧЕТНЫЕ СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ И ИХ АНАЛИЗ ДЛЯ НАИБОЛЕЕ ИЗВЕСТНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

V.S. Hayrapetyan, K.A. Fesenko

SGGA, Novosibirsk

ESTIMATED SPECTRUMS OF ABSORPTION AND THEIR ANALYSIS FOR MOST KNOWN EXPLOSIVE MATERIALS

The intensities and half-widths of an absorptional spectrums of vapours of the most known explosive materials TNT, RDX and PETN are calculated. It is shown possibility of the high sensitive remote determination (~ 1 ppm) these materials with help of the lidar, having the working lengths of the waves 6 - 8 micron.

Введение

Дистанционное детектирование паров взрывчатых веществ (ВВ) в атмосфере является актуальной задачей современности.

Большое число ВВ относится к классу летучих соединений и характеризуется высоким давлением паров, вследствие чего они могут быть обнаружены при анализе состава газовой атмосферы. Так, например, при комнатной температуре концентрация насыщенных паров типичных ВВ составляет от 10^{-10} г/см³ для тротила до 10^{-14} г/см³ для гексогена [1,2].

Дистанционное детектирование становится более привлекательным в связи с использованием террористами современных технических средств уменьшающих обнаруживаемую способность ВВ. Одним из высокочувствительных, оперативных и дистанционных методов диагностики ВВ в настоящее время считается лидарное зондирование, основанное на принципе дифференциального поглощения и рассеяния (ДПР).

Известно, что основные колебательно-вращательные полосы поглощения легально применяемых ВВ приходятся на средний ИК диапазон длин волн (6–8 мкм) [3, 4]. В этой связи роль плавно перестраиваемого в среднем ИК диапазоне длин волн ($\lambda = 5,5 - 8$ мкм) параметрического лазера неосциллометрично возрастает. Однако спектры поглощения наиболее известных ВВ, таких как **тринитротолуол (TNT)**, **гексоген (RDX)** и **тетранитрапентаэритрат (PETN)**, представляют собой достаточно узкие полосы с полушириной равной нескольким единиц см⁻¹.

В этой связи задача детектирования ВВ представляется в виде комплексной задачи состоящей из двух частей:

1. Теоретические исследования и анализ экспериментально измеренных параметров спектральных полос поглощения ($\lambda = 6 - 8$ мкм) молекул ВВ, полученных различными способами, в том числе биологическими и оптическими.

2. Разработка и реализация ИК – параметрического генератора света (ПГС) в области перестройки длины волн излучения 2,2 – 8,8 мкм, с дальнейшими исследованиями и улучшением пространственно-временных и энергетических характеристик.

Задача усложняется еще и тем, что прозрачность атмосферы в диапазоне длин волн 5,5 – 7,5 мкм практически отсутствует. Поэтому дистанционное исследование спектров ВВ нужно проводить высокомонокроматичным лазером ($\Delta\nu_{\text{изл.}} < \Delta\nu_{\text{погл.}}$) с плавной и (или) дискретной перестройкой частоты излучения в этом диапазоне, где $\Delta\nu_{\text{изл.}}$ – спектральная ширина излучения параметрического лазера, $\Delta\nu_{\text{погл.}}$ – спектральная ширина полосы поглощения исследуемой молекулы.

Исследование спектров поглощения ВВ можно проводить и косвенным способом. Практически все молекулы ВВ имеют слабые NO_2 или N_2O связи, которые при нормальных условиях испаряются, а при повышении температуры от 30 до 60 °С концентрация паров некоторых ВВ увеличивается почти на порядок. Вращательные спектры паров этих молекул имеют достаточно интенсивные изолированные линии в диапазоне длин волн 1,5–3,0 мкм, следовательно, их можно идентифицировать с помощью ИК – ПГС работающего в диапазоне 1,41–4,24 мкм. Исследования и работа относительно разработки и создания параметрического лазера среднего ИК диапазона ($\lambda = 2,2\text{--}8,8$ мкм) не завершена, работа в этом направлении продолжается.

Теоретические расчеты

В данной работе приводятся результаты вычислений интенсивностей и частот спектров поглощения наиболее известных ВВ, таких как TNT, RDX, PETN полученные на основе базы данных HITRAN [5] и экспериментально измеренных спектров, полученных масс-спектроскопическим методом.

На рис. 1, 2 и 3 приведены инфракрасные спектры поглощения паров TNT, RDX, PETN, соответственно.

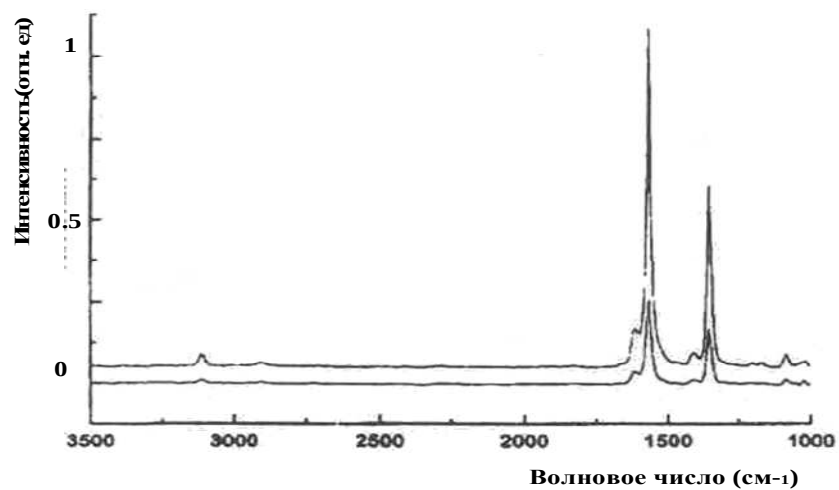


Рис. 1. ИК-спектр поглощения паров TNT при температуре 120 °С (нижняя кривая) и 140 °С (нижняя кривая)

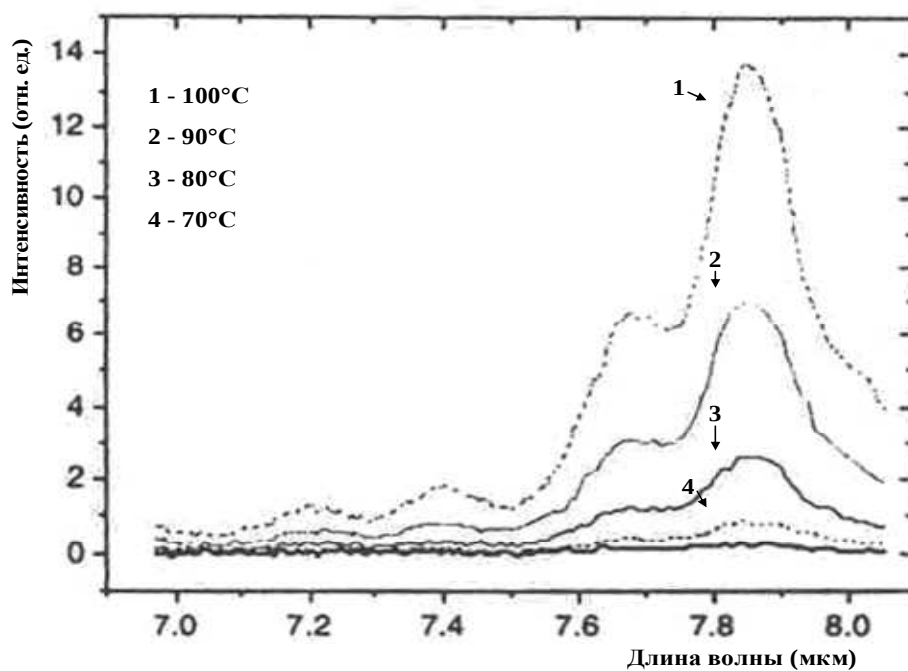


Рис. 2. ИК-спектр поглощения паров RDX при различных температурах

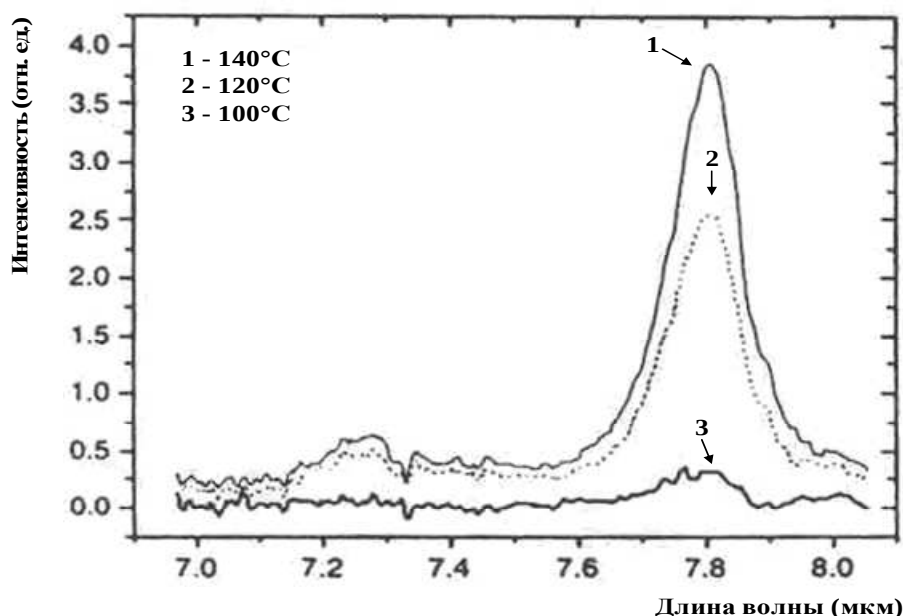


Рис. 3. Спектр поглощения паров PETN при различных температурах

Результаты вычисленных значений интенсивностей и полуширин спектров поглощения систематизированы и приведены в табл. 1.

В табл. 1 приведены следующие обозначения: T ($^{\circ}\text{C}$) – температура образца, ν_0 (cm^{-1}) – полоса поглощения ВВ, λ (μm) – длина волны, $\Delta\nu$ (cm^{-1}) – полуширина спектра поглощения, σ ($\text{cm}^2/\text{мол}$) – дифференциальное сечение поглощения, α (cm^{-1}) – коэффициент поглощения, R (м) – дальность обнаружения и C (ppm) – концентрация ВВ. При выполнении расчетов величин концентраций ВВ было использовано лидарное уравнение (1) применительно к методу ДПР.

$$N(R) = \frac{1}{2\sigma_A(\lambda_0, \lambda_1)} \left[\frac{d}{dR} \left\{ \ln \left[\frac{P(\lambda_1, R)}{P(\lambda_0, R)} \right] - \ln \left[\frac{\beta(\lambda_1, R)}{\beta(\lambda_0, R)} \right] \right\} + k(\lambda_1, R) - k(\lambda_0, R) \right], \quad (1)$$

где $\sigma_A(\lambda_0, \lambda_w) = \sigma^A(\lambda_0) - \sigma^A(\lambda_w)$ – сечение дифференциального поглощения, $N(R)$ – концентрация молекул на расстоянии R , $P(\lambda, R)$ – мощность сигнала на длине волны λ , $k(\lambda, R)$ – коэффициент ослабления на соответствующей длине волны λ , $\beta(\lambda, R)$ – объемный коэффициент обратного рассеяния на длине волны λ и расстоянии R .

Таблица 1. Расчетные и экспериментальные спектроскопические параметры некоторых молекул ВВ

ВВ	Хим. ф-ла	T , $^{\circ}\text{C}$	ν_0 , cm^{-1}	λ , μm	$\Delta\nu$, cm^{-1}	σ , $\text{cm}^2/\text{мол}$	α , cm^{-1}	R , м	C , ppm
TNT	$\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$	30	1606 1559	6,22 6,41	$17,5 \pm 0,8$	$5,1 \times 10^5$	$1,5 \times 10^{-7}$	150	7,5
RDX	$\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$	60	1272 1602	7,86 6,24	$24,9 \pm 1,2$	$7,8 \times 10^5$	$2,0 \times 10^{-10}$	200	14

PETN	$C_5H_8N_4O_{12}$	40	1279 1626	7,82 6,15	21,0±1,0	1,4x10 ⁵	1,1x10 ⁻¹⁰	200	40
Двуокись азота	NO ₂	20	2906	3.44	3,87±0,4	16,1x10 ⁵	0,7x10 ⁻¹⁰	500	1,3*
Закись азота	N ₂ O	20	6295 6192	1,588 1,615	0,4			500	3,46*

* – экспериментальное измерение.

Из лидарного уравнения легко можно найти значение энергии зондирующего лазера по формуле (2)

$$E_{L \min} \approx \frac{2 R^2 (C / \Pi)_{\min}}{\beta(\lambda_0; R) \xi(R) U(\lambda_0)} \exp\left(2 \int_0^R k(\lambda_0, R) dR\right), \quad (2)$$

где $\xi(\lambda)$ – коэффициент спектрального пропускания приемной оптической системы, $U(\lambda)$ – чувствительный к длине волны параметр системы. Учитывая, что отношение интенсивности сигнала к шуму $C/\Pi = 1,5$, и с учетом значений соответствующих параметров системы получаем минимально необходимую энергию зондирующего лазера равную 10 мДж, что является реально достижимым значением.

Таким образом, результаты проведенных расчетов показывают, что с помощью параметрического лазерного излучения можно детектировать ВВ, с концентрацией на уровне нескольких единиц ppm.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fainberg A.. Science. – 1992.– V. 255. – P. 1531.
2. Midkiff C.R. Detection characterization of explosives and explosive residue. A Review / 11th Int. ICPO INTERPOL Forensic Science Symposium. Lyons, France. – 1995.
3. Ayrapetian V.S., Hakobyan A.V, Apresyan G.M. Poghosyan E.M, Sahakyan A.H, Sargsyan K.A, Sargsyan T.K // Proc. SPIE. – 2006. – V.6160, N 2. – P.708 -713.
4. Межерис, Р. Лазерное дистанционное зондирование атмосферы / Р. Межерис. – М.:Мир.– 1987.– 548 с.
5. Rothman L.S., Gamache R.R., Tipping R.N. e.a. The HITRAN Molecular Database: edition of 1991 and 1992, JQSRT. – 1992. – V.48. – P. 469-507.

© В.С. Айрапетян, К.А. Фесенко, 2009

УДК 535.4

Д.М. Никулин, В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков
СГГА, Новосибирск

ЧЕТЫРЁХЗЕРКАЛЬНЫЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ФАБРИ-ПЕРО

D.M. Nikulin, V.V. Chesnokov, D.V. Chesnokov
SSGA, Novosibirsk, dimflint@mail.ru

4-MIRRORS MICROMECHANICAL TUNABLE FABRY-PEROT INTERFEROMETER

The present paper deals with the design of 4-mirrors micromechanical tunable Fabry-Perot interferometer, method of its control and forthcoming spectral characteristics.

В настоящее время интерференционные светофильтры находят широкое применение в физических исследованиях, измерительной и военной технике, промышленности [1, 2]. Их достоинством является простота и удобство в работе, высокая степень монохроматичности выделяемого светофильтром излучения. Дополнительные преимущества такие приборы могут получить, если будут способны перестраивать выделяемую полосу спектра, что может быть достигнуто при использовании микро- и нанотехнологий [3–5].

В представленных в данном сообщении интерференционных светофильтрах используется электрическое регулирование величины воздушного зазора между зеркалами резонатора Фабри-Перо в диапазоне, соответствующем первому порядку интерференции; в качестве зеркал применяются металлические плёнки на стеклянных подложках. Рассматриваются вопросы разработки и ожидаемые параметры перестраиваемых мультиплекс-светофильтров, в которых используется комбинация двух интерференционных светофильтров – с одним из высоких и с первым порядками интерференции.

В разрабатываемом перестраиваемом мультиплекс-светофильтре регулирование зазора между зеркалами резонатора с первым порядком интерференции обеспечивается за счет использования прямого пьезоэффекта, зазор между зеркалами второго резонатора не изменяется. За счет применения двух последовательных по ходу луча установленных светофильтров – низкого и высокого порядков – можно повысить монохроматичность выделяемого из спектра источника излучения, сохраняя ширину перестраиваемого диапазона [5]. Упрощенная схема такого светофильтра показана на рис. 1. Светофильтр первого порядка образован зеркалами 1 и 2 и воздушным зазором между ними. Светофильтр высокого порядка образован зеркалами 3 и 4 и прозрачной пластиной 5 между ними. К пьезокерамической шайбе 8 прикреплен державка

9, в которой закреплена прозрачная пластина 7 на которой нанесено зеркало 1. Важнейшей конструктивной особенностью устройства является использования между зеркалами 1 и 2 субмикронного эквидистантного [6] воздушного зазора, регулируемого в пределах $0,2 \div 0,4$ мкм и обеспечение светового диаметра 10 мм.

Управление величиной воздушного зазора пьезоэлектрическое: управляющее напряжение подается между обкладками пьезокерамической шайбы 8.

При включении напряжения пьезокерамическая шайба 8 (рисунок 1) изменяет свою толщину, зависящую от величины подаваемого напряжения. Изменение толщины можно определить выражением:

$$\Delta l = \ell d_{33} E = d_{33} U_0,$$

где d_{33} – пьезоэлектрический модуль материала пьезоэлемента, Δl – деформация по толщине пьезоэлемента, E – напряженность электрического поля в пьезоэлементе, U_0 – напряжение, подаваемое на обкладки пьезокерамической шайбы.

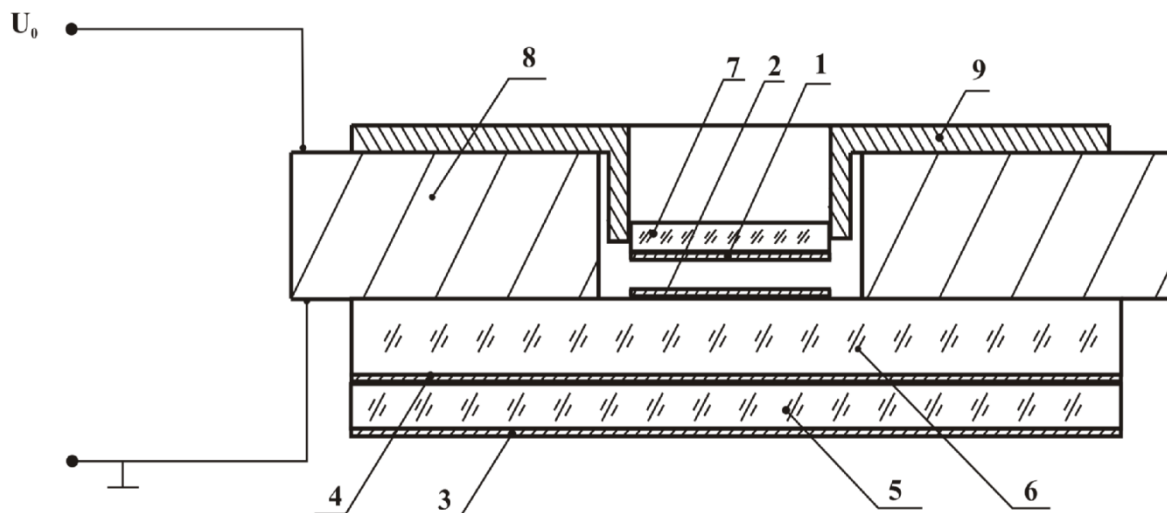


Рис. 1. Упрощенная схема перестраиваемого мультиплекс-светофильтра

Если использовать для пьезоэлемента пьезокерамику ЦТСт БС-1 $d_{33} = 500 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, то для перестройки мультиплекс-светофильтра по всему видимому диапазону спектра на $\Delta l = 0,2$ мкм, требуется напряжение до 400 В. При перестройке (путем изменения зазора между зеркалами) светофильтра с первым порядком интерференции его полоса пропускания смещается по спектру, при этом происходит выделение одной полосы дисперсии, затем другой полосы второго светофильтра, то есть, «переключение» пропускаемых светофильтром порядков интерференции. Это видно на рис. 2, где показана расчетная зависимость коэффициента пропускания светофильтра на длинах

волн, соответствующих максимуму спектральной зависимости коэффициента пропускания при заданной величине зазора. У такого светофильтра величина зазора меняется от 0,2 до 0,4 мкм, оптическая толщина между зеркалами высокого порядка составляет 2 мкм, коэффициент отражения зеркал равен 0,85, коэффициент пропускания зеркала 0,14.

Сложность в изготовлении подобных светофильтров заключается в получении субмикронного эквидистантного [6] воздушного зазора. На рисунке 3а) показан график пропускающей способности одного из светофильтров с толщиной воздушного эквидистантного зазора 1 мкм и с коэффициентом пропускания светофильтра 0,01. Для сравнения, на рисунке 3б) показан расчетный график пропускающей способности светофильтра с подобными характеристиками.

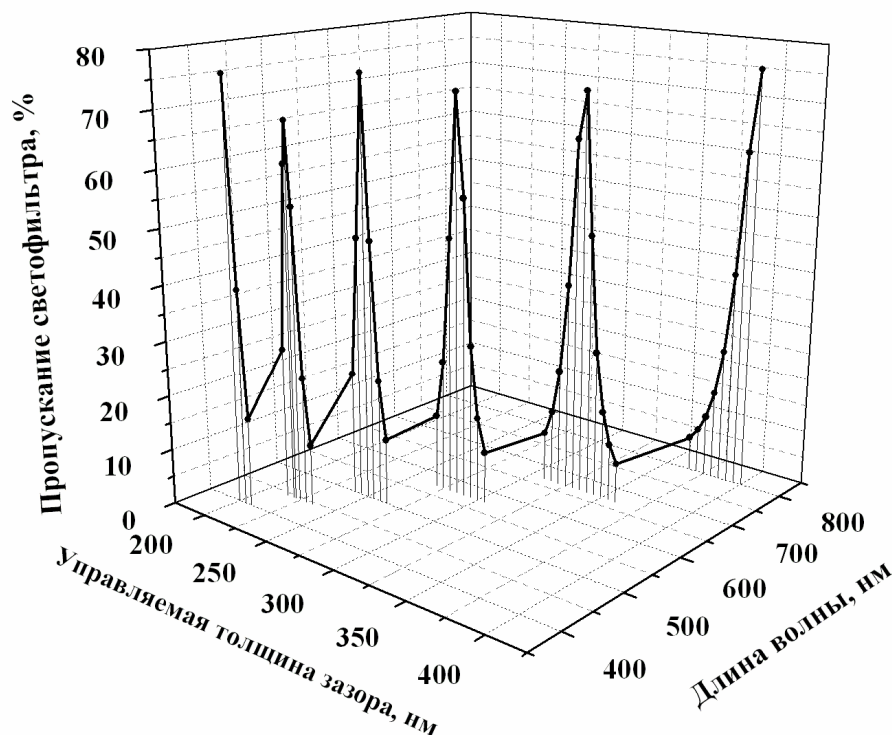


Рис. 2. Расчетный график зависимости пропускания светофильтра

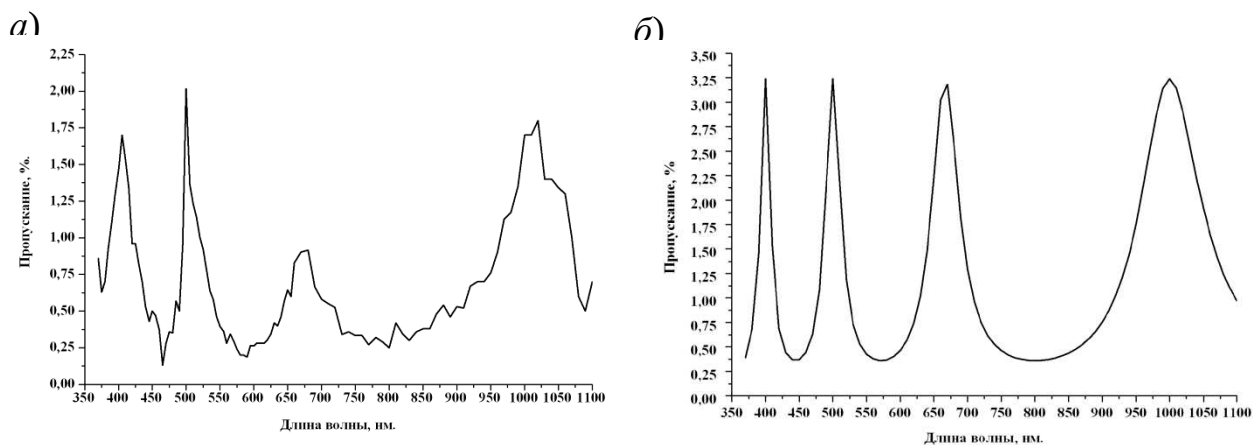


Рис. 3. Практическое (а) и теоретическое (б) пропускание светофильтра

Проведены предварительные исследования экспериментальных образцов с субмикронными эквидистантными воздушными зазорами между зеркалами резонатора с первым порядком интерференции. Отклонение от эквидистантности воздушного зазора между зеркалами резонатора с первым порядком интерференции составляло 0,09 мкм (определялось по интерференционным цветам) на световом диаметре 8 мм. При изменении зазора на 0,125 мкм происходила перестройка резонатора с пропускания синего цвета на пропускание красного.

Подобный светофильтр, по нашему мнению, может найти применение в системах экспресс-анализа химических веществ и различных промышленных жидкостей и газов, при исследованиях содержания вредных веществ в окружающей среде. Светофильтр может иметь модификации, работающие в ИК диапазоне спектра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Скоков, И.В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике / И.В. Скоков. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
2. Лебедева, В.В. Экспериментальная оптика. 3-е изд. / В.В. Лебедева. – М.: МГУ, 1994. – 265 с.
3. Исследование физических проблем нано- и микроразмерных функциональных устройств информационных оптоэлектронных систем: отчет о НИР / СГГА; рук. Чесноков В.В.; исполн. Чесноков Д.В.- Новосибирск, 2003. – 71 с. – № ГР 0199.0010326. – Инв. № 02200 1.03177 .
4. Чесноков, А.Е. Исследование оптических характеристик многослойных структур управляемого резонатора Фабри-Перо / А.Е. Чесноков // ГЕО-Сибирь 2007. Т. 4. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника. Ч. 1: сб. матер. III Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2007». – Новосибирск: СГГА, 2007. – С.167–170.
5. Чесноков, В.В. Интерференционные светофильтры с перестраиваемой полосой пропускания / В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, Д.М. Никулин // Сб. матер. IV Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2008».- Новосибирск, 2008 – Т.4., ч.1.- С. 11-16.
6. Чесноков В.В., Чесноков Д.В., Никулин Д.М., Чесноков А.Е. Способ изготовления перестраиваемого светофильтра с интерферометром Фабри-Перо / Заявка №2008130196, Россия.- Приоритет от 21.07.2008.

© Д.М. Никулин, В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, 2009

УДК 535

С.Л. Шергин, Д.В. Чесноков

СГГА, Новосибирск

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ ПАССИВНЫХ ЗАТВОРОВ

S.L. Shergin, D.V. Chesnokov

SSGA, Novosibirsk, *serkron@mail.ru*

THE TEST BENCH AND PRINCIPLES OF AN EXPERIMENTAL RESEARCH OF DINAMIC PROPERTIES OF PASSIVE OPTICAL SHUTTERS

The test bench and principles of an experimental research of dinamic properties of passive optical shutters with nanoseconds processing speed are presented.

При решении задачи защиты оптических и оптико-электронных приборов и устройств, предназначенных для наблюдения, регистрации и наведения, от поражающего действия лазерного излучения был разработан, основанный на принципах тепловой микромеханики, оптический затвор пассивного типа с временем срабатывания порядка 1 нс, имеющий многоразовый характер срабатывания и сверхмалое время релаксации.

Нами [3] выполнено теоретическое обоснование концепции построения оптического микромеханического пассивного затвора, обеспечивающего защиту приемных устройств от поражающего действия лазерного облучения высокой интенсивности и срабатывающего за счет энергии ослепляющего лазерного импульса, разработаны основы теории затворов с наносекундным быстродействием теплового принципа действия, срабатывающие при фазовых переходах вещества затвора.

В процессе проведения исследований были изготовлены макетные образцы пассивных оптических затворов с наносекундным быстродействием и проведена их экспериментальная апробация. Динамические характеристики затворов являются определяющими при оценке их функциональных возможностей, поэтому вопросам измерения времени срабатывания оптических пассивных затворов было уделено особое внимание.

Поражающее лазерное излучение, воздействуя на элементы пассивного затвора, приводит к их нагреву (вплоть до испарения) и изменению его оптических характеристик – коэффициентов отражения, поглощения и пропускания. Время срабатывания оптического пассивного затвора по расчетам составляет единицы наносекунд. Следовательно, испытательный стенд и методика измерений должны обеспечивать уже субнаносекундное временное

разрешение. Оптико-механическая схема разработанного испытательного стенда представлена на рис. 1.

На рис. 1: 1 – твердотельный лазерный излучатель на иттрий-алюминиевом гранате; длительность импульса около 5 нс, мощность в импульсе $\leq 10^8$ Вт на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм частота следования импульсов 1 – 100 Гц; 2 – удвоитель частоты, механически перемещаемый внутри корпуса излучателя; 3 – телескоп-расширитель, необходимый для уменьшения расходимости излучения лазера, линейное увеличение 10×; 4 – набор сменных светофильтров; 7 и 24 – быстродействующие регистраторы оптического излучения; 5, 8, 11, 12, 13, 25 – непрозрачные зеркала; 9 и 10 – полупрозрачные зеркала; 23 – калориметрический измеритель импульсной лазерной мощности; 6 и 18 – объективы; 20 – осветитель; 21 – бинокулярный микроскоп с увеличением 300×.

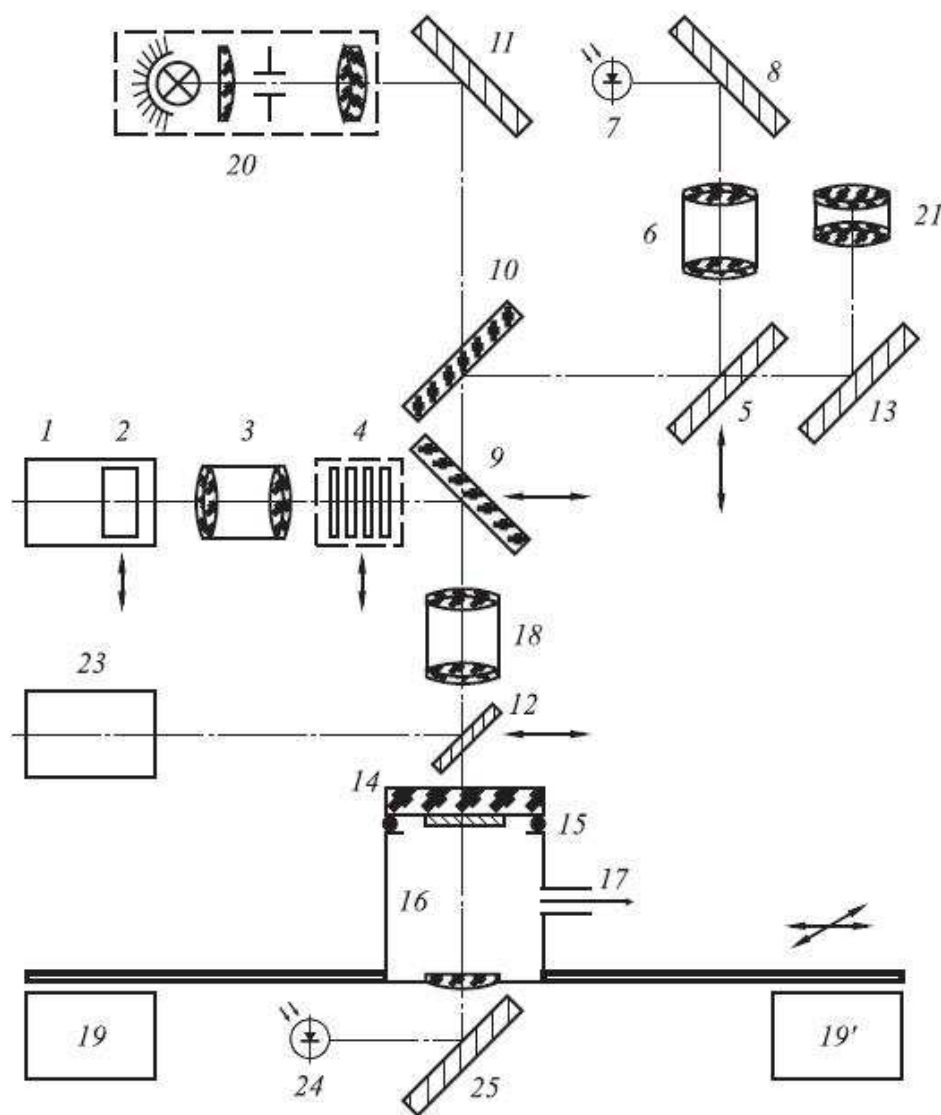


Рис. 1. Оптико-механическая схема испытательного стенда

Исследуемый образец затвора 14 прижимается герметизирующим кольцом 15 к окну вакуумированной камеры 16. Камера через патрубок 17 откачивается вакуумным насосом. Излучение фокусируется на рабочей поверхности образца

объективом 18. Камера закреплена на столике, перемещаемом по аэростатическим направляющим 19 и 19' в горизонтальной плоскости.

Для подсветки образца сверху при визуальном наблюдении служит осветитель 20. Наблюдение ведется с использованием бинокулярной головки 21.

Для измерения коэффициента отражения образцов используется фотоэлемент 7, установленный в расходящемся световом потоке после зеркала 8, объектива 6 и передвижного зеркала 5, вводимого в ход лучей при измерении коэффициента отражения. Для измерения падающей на образец энергии лазерного импульса используется калориметр 23 типа ИКТ-1Н, вводимый в ход лучей передвижным зеркалом 12.

Фотоэлемент 7 должен быть откалиброван в единицах коэффициента отражения исследуемого образца. Фототок фотоэлемента принимается за единицу, когда вместо образца под объективом 18 устанавливается эталонное зеркало с коэффициентом отражения, близким к единице.

Фотоэлемент снабжен коаксиальным 50-омным сигнальным проводом, оканчивающимся стандартным разъемом для подключения к цифровому осциллографу.

В связи со сложностью измерения временных промежутков порядка наносекунд были использованы два варианта измерения времени срабатывания затвора. Получение сравнимых результатов при реализации этих вариантов увеличивает достоверность достижения заданных параметров [1, 2].

Вариант А

Образец пассивного оптического затвора помещается под объектив измерительного стенда, лазерный излучатель переводится в режим удвоения ($\lambda = 0,53$ мкм) с частотой следования импульсов ≈ 50 с⁻¹; перемещением объектива, при контроле с помощью встроенного бинокулярного микроскопа, проводится настройка фокусировки до получения резкого изображения поверхности подложки в отраженном свете и достижения минимального размера кружка рассеяния.

После настройки фокусировки излучатель переводится в дежурный режим (без излучения), устанавливается вид работы без удвоения ($\lambda = 1,06$ мкм), устанавливается задаваемый уровень импульсной мощности излучателя (подбором поглощающего светофильтра); излучение включается на время одиночного импульса.

В момент включения излучения необходимо:

а) контролировать с помощью запоминающего осциллографа длительность импульса отраженного (фотоприёмник 7) излучения. Длительность $t_{отр}$ импульса отраженного излучения равна времени срабатывания $t_{сраб}$ затвора:

$$t_{сраб} \approx t_{отр}.$$

б) измерить длительность t_1 первого импульса лазерного излучения, прошедшего через затвор во время его срабатывания, затем длительность t_2 второго импульса излучения, прошедшего через открытый затвор, и найти их разность $\Delta t = t_2 - t_1$, которая примерно равна времени срабатывания затвора.

Вариант Б

Под объектив измерительного комплекса помещается структура из двух сложенных вместе образцов пассивного оптического затвора, переключающие плёночные покрытия которых обращены друг к другу; необходимый зазор между смежными поверхностями образцов должен составлять $\sim 5\div 10$ мкм. Подготовительные операции с настройками измерительного комплекса, а также облучение структуры проводятся аналогично варианту А.

После облучения плёночные покрытия осматриваются под микроскопом с увеличением $100\text{--}200\times$. Наличие соосных отверстий в обоих покрытиях подтверждает, что длительность времени срабатывания затвора (времени испарения покрытия) не более $1/2$ длительности импульса излучателя $t_{\text{изл}}$:

$$t_{\text{сраб}} \leq \frac{1}{2} t_{\text{изл}}.$$

Такое заключение обусловлено тем, что испарение плёнок в облучаемой структуре происходит последовательно, сначала образуется отверстие в первой по ходу плёнке, затем через образовавшееся отверстие световой поток проходит ко второй плёнке и формирует также и в ней отверстие [3].

В общем случае временное разрешение испытательного стенда будет определяться динамическими характеристиками цепочки фотодетектор – линия передачи сигнала – конечный регистратор. Каждый элемент этой цепочки должен вносить минимальные искажения в форму сигнала, но результирующая точность измерения временных характеристик будет определяться самым «грубым» элементом.

В конкретной реализации испытательного стенда в качестве фотодетекторов были применены приборы фотоэлектронного принципа действия ФК-19 с нарастанием фронта импульса 0,7 нс, что и обусловило конечную точность измерения времени срабатывания затворов. Использование лавинных фотодиодов может уменьшить погрешности до величины 50–70 пс.

Исследовательский стенд, разработанный в рамках проведения НИР «Стокер», был аттестован и признан пригодным для исследования динамических характеристик оптических пассивных затворов с наносекундным быстродействием.

Использование разработанных затворов в технике приема излучений позволит увеличить надёжность работы приёмников в условиях случайного или преднамеренного воздействия на них мощными «ослепляющими» импульсными или непрерывными потоками излучений. Проблема устойчивости приёмников к воздействию мощных излучений является актуальной как в сфере промышленности, так и в оборонной сфере.

Разработанные технологии и конструкции не имеют зарубежных и отечественных аналогов, изделия и технологии могут оказаться конкурентоспособными, в том числе, на зарубежных рынках, станут базой для дальнейших разработок и исследований в области создания новых микрооптоэлектромеханических систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панов, В.А. Справочник конструктора оптикомеханических приборов. 3-е изд / Панов, В.А. // Машиностроение. – 1980.
2. Шлишевский В.Б., Чесноков В.В., Чесноков Д.В., Никулин Д.М., Шергин С.Л. Исследование путей создания микромеханических оптических затворов с наносекундным быстродействием. Шифр «Стокер»: Отчет о НИР (промежут.) / СГГА; Рук. Шлишевский В.Б.- ГР 1604169. – Новосибирск, 2007.
3. Шлишевский В.Б., Чесноков В.В., Чесноков Д.В., Никулин Д.М., Шергин С.Л. Исследование путей создания микромеханических оптических затворов с наносекундным быстродействием. Шифр «Стокер»: Отчет о НИР (заключит.) / СГГА; Рук. Шлишевский В.Б. – ГР 1604169. – Новосибирск, 2008.

© С.Л. Шергин, Д.В. Чесноков, 2009

УДК 77.021.123

В.И. Наливайко

ИАиЭ СО РАН, Новосибирск

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ СЛОИ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ – СТРУКТУРА, ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ

V.I. Nalivaiko

Institute of Automation and Electrometry SB RAS (IAE SB RAS)

1 Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

NANOSTRUCTURED LAYERS OF HALCOGENIDE SEMICONDUCTORS – STRUCTURE, OPTICAL PROPERTIES, APPLICATION

The dynamic of photostructural transformations research in thin layers chalcogenide materials according to results received by means of X-ray analysis are presented. Dynamics of process submits to exponential dependence from temperature with energy of activation equal to $\Delta E = 0,2$ eV. The received X-ray structure research results of amorphous chalcogenide semiconductors allow to attribute thin layers to registering materials with the spatial resolution at a molecular level.

Напыление в вакууме тонких пленок халькогенидных стеклообразных полупроводников – один из способов получения наноструктурированных материалов с новыми физическими свойствами. При взаимодействии с излучением или потоками частиц в таких пленках наблюдается «гигантское» (до 10 %) изменение показателя преломления по сравнению с известными регистрирующими материалами. Поэтому пленки халькогенидных стеклообразных полупроводников являются одним из перспективных материалов для регистрации фазовых голограмм, компьютерного синтеза киноформов и изготовления фотонно-кристаллических структур.

Целью работы было развитие методики рентгеноструктурного анализа для исследования процессов трансформации структуры пленок в результате взаимодействия с излучением оптического и рентгеновского диапазонов частот.

Новизна подхода состоит в применении методов рентгеноструктурного анализа с использованием синхротронного излучения (СИ) для исследования структурных изменений в халькогенидных пленках, приводящих к изменению оптических параметров пленок [1, 2].

С помощью рентгеноструктурной методики получены новые данные о структуре напыленных тонких слоев As_2S_3 – наличие интенсивного молекулярного пика рентгеновской дифракции ($2\theta = 18^\circ$), который слабо проявляется в рентгеновских картинах массивных халькогенидных стекол,

используемых для напыления пленок. По угловому положению молекулярного пика рентгеновской дебаегранмы определены размеры молекулярных образований, составляющие 0,5–0,6 нм.

Проведено компьютерное моделирование молекулярных образований в предположении сохранения ближнего порядка на размерах одной молекулы As_2S_3 . Задача состояла в том, чтобы найти такое расположение атомов в молекулярном образовании, которое удовлетворяло бы характеру распределения интенсивности от угла дифракции, наблюдаемому экспериментальным путем.

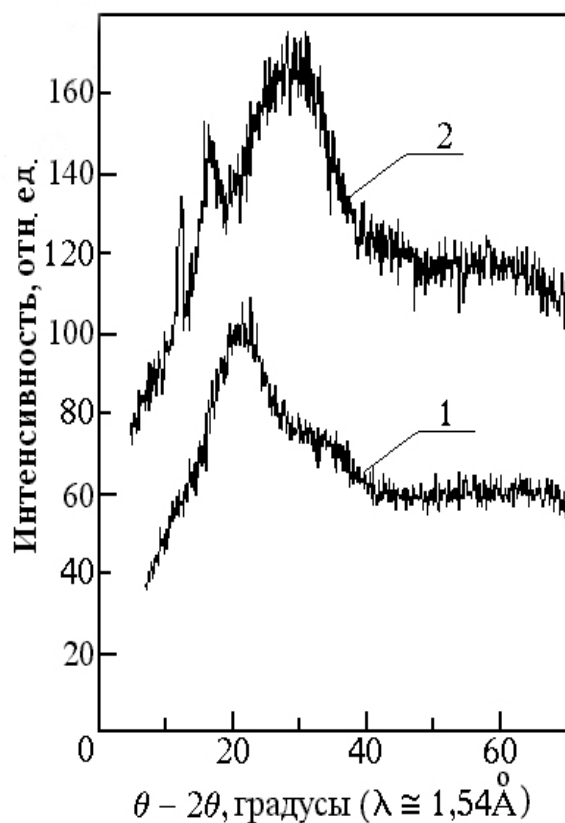


Рис. 1. Теоретическая (1) и экспериментальная (2) картины рентгеновской дифракции для пленки As_2S_3 толщиной 5 мкм, полученной термическим напылением в вакууме

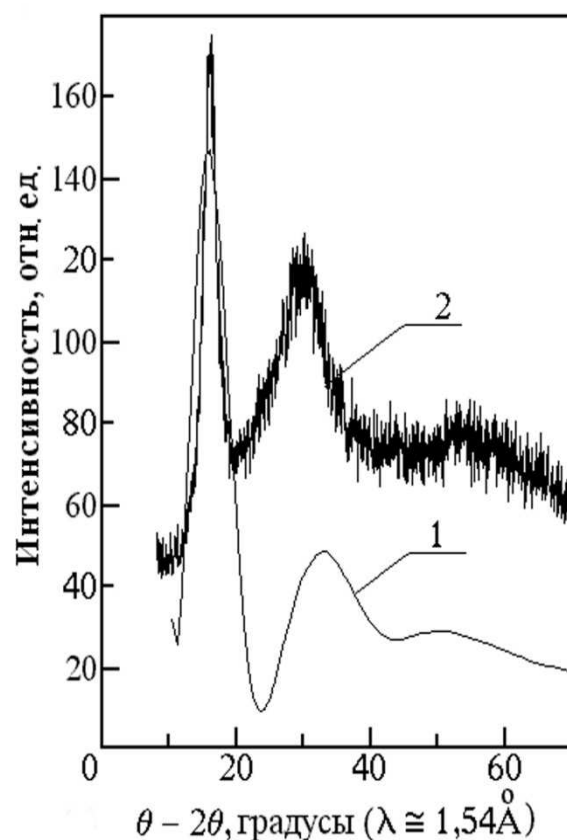


Рис. 2. Экспериментальные дифракционные картины экспонированных пленок As_2S_3 : 1 – пленка, экспонированная лазерным излучением; 2 – пленка, экспонированная СИ

Получены теоретические дифракционные картины от моделей молекулярных образований путем когерентного сложения интенсивностей от каждого атома по методу Дебая. Моделирование структуры нанообразований проводилось по следующему сценарию: между отдельными атомами сохранялись расстояния и углы как в кристалле, молекула As_2S_3 также сохраняла свои координаты как в кристалле. Расположение же двух молекул и более относительно друг друга считалось уже неупорядоченным. Транслировалась и разворачивалась одна молекула относительно другой, при

этом сравнивались расчетная картина рентгеновской дифракции с экспериментальной. В такой модели амплитуда молекулярного пика характеризует концентрацию молекулярных образований в пленке (рис. 1).

Методом сравнения теоретических (рис. 1, кривая 1) и экспериментальных (рис. 1, кривая 2) картин рентгеновской дифракции в процессе компьютерного моделирования структуры пленок установлено количество молекул в нанообразованиях (восемь молекул As_2S_3 – 40 атомов), их взаимная ориентация, а также координаты всех атомов.

Амплитуда молекулярного пика зависит от технологии термического напыления. Найдены режимы напыления пленок, при которых амплитуда молекулярного пика имеет максимальную величину.

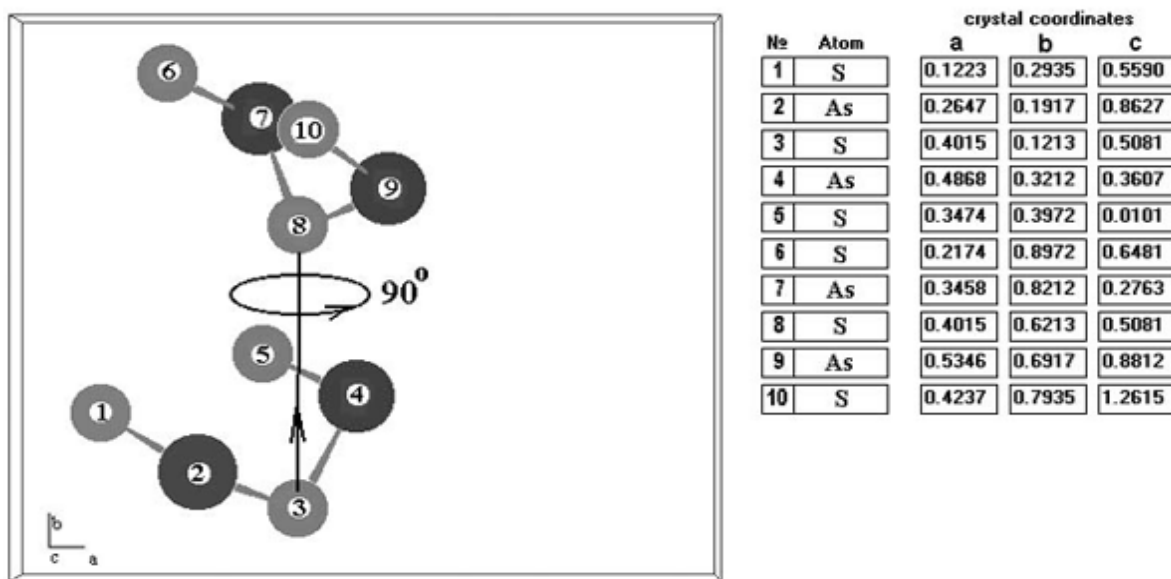


Рис. 3. Фрагмент заполнения элементарной ячейки молекулами As_2S_3 в процессе моделирования молекулярных образований

Пленки, полученные в таких оптимальных условиях, имели наибольший динамический диапазон изменения показателя преломления ($\Delta n = 0,2$ на $\Delta d = 100 \text{ нм}$). Таким образом была установлена корреляция между структурными изменениями молекулярных образований и изменением оптических констант – показателя преломления и коэффициента поглощения пленок в оптической области спектра.

Облучение пленок оптическим излучением или «белым» рентгеновским СИ в процессе формирования субмикронных фазовых рельефов приводила к уменьшению молекулярного пика на картинах рентгеновской дифракции или к полному его исчезновению при экспонировании пленок до насыщения. Это свидетельствовало о том, что увеличение показателя преломления идет в процессе модификации структуры пленок излучением по механизму уменьшения концентрации нанообразований в пленке в результате полимеризации перекрестных связей между нанообразованиями.

Для наглядности на рис. 4 представлена динамика фототрансформации структуры слоев в результате облучения оптическим и рентгеновским

излучением. Исходные напыленные плёнки имеют наноструктурированное строение с размерами кластеров 0,5–0,6 нм (рис. 4, а), концентрация которых в процессе облучения уменьшается в результате образования химических связей между кластерами.

Пленки, экспонированные до насыщения оптическим излучением, представляют по своей структуре стекла (рис 4, в) с непрерывной сеткой химических связей по Захариасену (Zachariasen). Воздействие рентгеновского излучения на структуру пленок может приводить к образованию кристаллических образований (рис. 4, с). Динамика процесса фототрансформации структуры слоев подчиняется экспоненциальной зависимости от температуры с энергией активации $\Delta E = 0,2$ эВ.

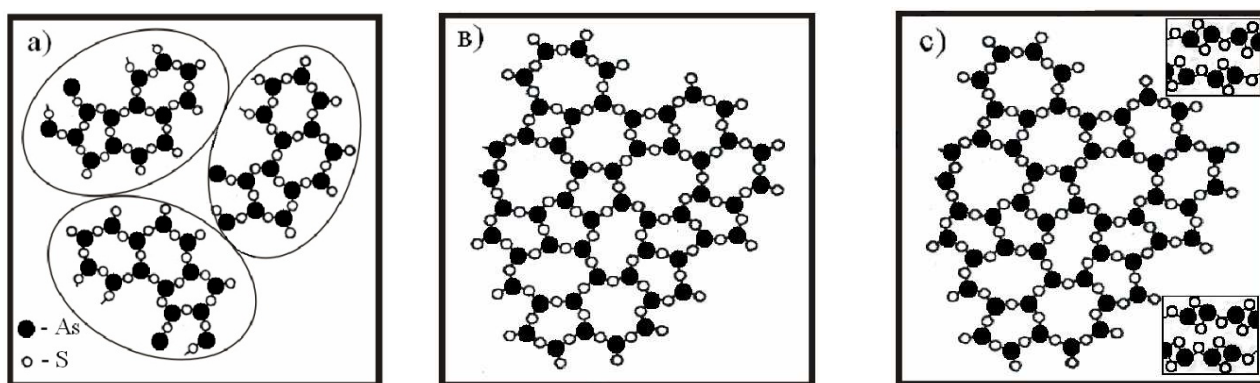


Рис. 4. Динамика фототрансформации структуры тонких слоёв As_2S_3 : а) – наноструктурированная напылённая пленка; в) – пленка, экспонированная оптическим излучением; с) – пленка, экспонированная рентгеновским СИ (вставки символизируют появление слоистых кристаллов As_2S_3)

Установленный механизм фотоструктурных изменений и размеры молекулярных образований в халькогенидных пленках позволяет отнести такие регистрирующие среды к материалам с молекулярным пространственным разрешением.

Для наноструктурированных пленок As_2S_3 с их новыми механическими свойствами (слабая химическая связь между нанообразованиями и, как следствие, повышенная пластичность) разработана технология формирования глубоких фазовых профилей методом испарения материала сфокусированным лучом лазера. Получены киноформные профили высокоэффективных (90 %) фокусирующих элементов ввода/вывода оптических пучков в планарный оптический волновод [3, 4].

Наноструктурированные халькогенидные пленки применены для изготовления голографических дифракционных решеток в спектрометре с плоским полем регистрации (рис. 5). Параметры спектрометра: спектральный диапазон – 0,4 – 0,8 мкм, радиус кривизны решеток – 225 мм, относительное отверстие 1/3, спектральное разрешение при ширине входной щели 5 мкм – 1 А, отношение сигнал/шум на спектральном расстоянии 20 А от линии $\lambda = 6328$ А – 5×10^6 , рабочее поле решеток 60 x 60 мм², средняя плотность штрихов решетки – 1200 мм⁻¹, габариты спектрометра – 250 x 135 x 100 мм³ [5].

Таким образом, с помощью представленной методики, включающей в себя рентгеноструктурный анализ и компьютерное моделирование, установлено наноструктурированное строение халькогенидных пленок As_2S_3 , при этом размеры нанообразований составляют 0,5–0,6 нм. Сделан вывод о том, что модификация структуры пленок с помощью излучения осуществляется по механизму уменьшения концентрации нанообразований в результате полимеризации перекрестных химических связей между нанообразованиями. Полученные результаты имеют фундаментальное значение для понимания строения и физических свойств наноструктурированных аморфных материалов.

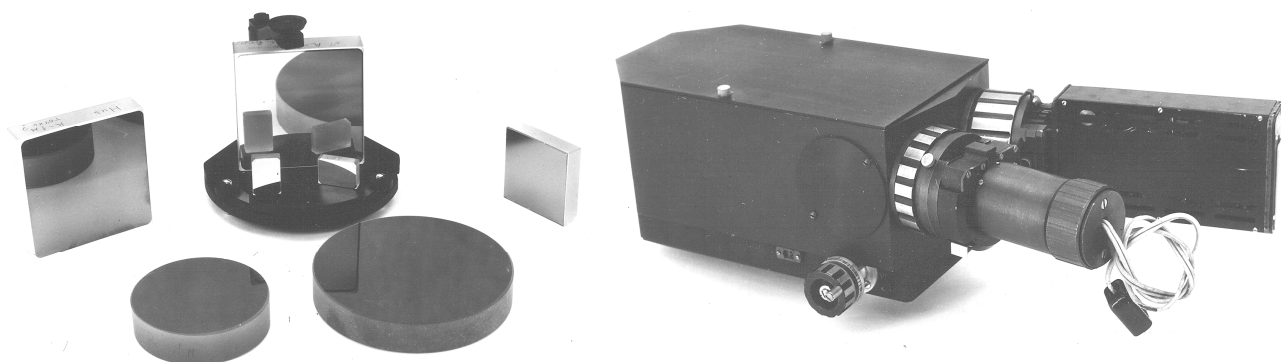


Рис. 5. Слева – вогнутые отражательные голографические решетки; справа – малогабаритный спектрометр с плоским полем фокусировки спектра и многоканальной фотодиодной регистрацией

Субнаноструктурированные халькогенидные пленки нашли применение:

- В качестве неорганических фоторезистов при изготовлении голографических дифракционных решеток с плоским полем регистрации для многоканального малогабаритного спектрометра;
- В качестве нового материала при изготовлении волноводных киноформных элементов путем лазерного гравирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nalivaiko V.I. Materials for Optical Information Recording on the Base of Subnanostructured Chalcogenide Films // Proc. of the XVI International Synchrotron Radiation Conference. – Novosibirsk, 2006. – P. 26.
2. Yurjev G.S., Korchagin M.A., Nalivaiko V.I., Kosov A.V., Semukhin B.S. Subjection of $Si_3N_4/(111)Si$, $Si_3N_4/(400)GaAs$ Layers to Synchrotron Radiation // Изв. Вузов. Физика. – 2006. - № 8. Приложение. – С. 418 – 420.
3. Nalivaiko V.I., Yuryev G.S., Sametov A.R. Laser engraving of relief in nanostructural amorphous films // Изв. Вузов. Физика. – 2006. - № 8. Приложение. – С. 536 – 537.
4. Покровский А.Н., Наливайко В.И. Лазерное гравирование рельефа испарением субнаноструктурированных халькогенидных пленок / А.Н. Покровский, В.И. Наливайко // Матер. науч.-практич. конфер. мол. уч. и студ.

НГУ и ИАиЭ СО РАН “Информационно-вычислительные системы анализа и синтеза изображений”. – Новосибирск, 2006.– С. 80 – 81.

5. Наливайко, В.И. Малогабаритный спектрометр для эмиссионного анализа потоков низкотемпературной плазмы / В.И. Наливайко, П.А. Чубаков, А.Н. Покровский, А.А. Михальченко, В.И. Кузьмин, Е.В. Картаев // Журнал “Теплофизика и аэромеханика”. – СО РАН, 2007.– Т. 14, № 2. – С. 257 – 267.

© В.И. Наливайко, 2009

УДК 535.213

В.Я. Костюченко

СГГА, Новосибирск

Д.Ю. Протасов

ИФП СО РАН, Новосибирск

ФОТОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНКАХ $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0,22$) С ПРИГРАНИЧНЫМИ ВАРИЗОННЫМИ СЛОЯМИ

V.Ya. Kostyuchenko

SSGA, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

D.Yu. Protasov

Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 13 pr. Lavrentieva, 630090, Novosibirsk, Russia

THE PHOTOELECTROMAGNETIC EFFECT IN EPITAXY FILMS $\text{P-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,22$) WITH GRADED-GAP NEAR-BORDER LAYERS

The photoelectromagnetic effect (PME) at epitaxy films MBE MCT with graded-gap near-border layers is analyzed in this work. It is shown, that dependence on magnetic field of PME can be described, having replaced investigated structure a homogeneous film and having entered effective surface recombination velocities and effective rate of surfaces generation.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время тройной раствор $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ), где x – мольное содержание Cd, является основным материалом для создания фотоприёмных устройств (ФПУ) инфракрасной (ИК) области спектра [1]. Для изготовления ФПУ с большим количеством элементов ($> 10^3 \div 10^4$) в виде п-р переходов используются преимущественно плёнки КРТ р-типа. При выборе плёнок КРТ для изготовления фотоприёмников с нужными характеристиками необходимо знать не только концентрацию и подвижность основных носителей заряда, но и рекомбинационно-диффузионные параметры материала. К этим параметрам относятся время жизни носителей заряда в объёме τ_v , подвижность неосновных носителей заряда μ_n , скорости поверхностной рекомбинации S_1 и S_2 на свободной и связанной с подложкой границе плёнки.

В ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН разработана оригинальная технология выращивания методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) плёнок КРТ со сложным профилем мольного содержания Cd на подложках GaAs ориентации (013) [2]. На границах плёнок выращиваются варизонные слои, в которых мольное содержание x увеличивается от однородной по составу центральной области структуры к её границам. Такие слои уменьшают влияние поверхностной рекомбинации на время жизни носителей заряда.

При изучении процессов рекомбинации и диффузии неосновных носителей заряда наиболее информативными являются такие эффекты, как фотопроводимость (ФП) в магнитном поле в геометрии Фойгта ($\vec{k} \perp \vec{B}$ и $\vec{k} \perp \vec{E}$, $\vec{k}$ – волновой вектор излучения) и в геометрии Фарадея ($\vec{k} \parallel \vec{B}$ и $\vec{k} \perp \vec{E}$), а также фотомагнитный эффект (ФМЭ) [2–4].

В работе приводятся результаты исследования ФМЭ на плёнках МЛЭ р-КРТ с варизонными приграничными областями. Рекомбинационные параметры плёнок, от которых зависит ФМЭ, определялись из совместного анализа ФМЭ и ФП в магнитном поле для случая рекомбинации Шокли-Рида.

Образцы и методы исследования

Исследовались две плёнки КРТ р-типа толщиной 7,2 мкм и 8,93 мкм, выращенные методом МЛЭ на подложках из GaAs ориентации (013) с варизонными приграничными областями. Значение x рабочего (среднего) слоя образцов было 0,226 и 0,223, в варизонных слоях плавно увеличивалось до 0,4÷0,6 на расстоянии 0,5÷2 мкм. Для №1 подвижность основных носителей заряда (дырок) $\mu_p = 0,052 \text{ м}^2/\text{В} \times \text{с}$, концентрация дырок $p_0 = 5,2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, подвижность неосновных электронов $\mu_e = 5,3 \text{ м}^2/\text{В} \times \text{с}$; для образца №2 $\mu_p = 0,029 \text{ м}^2/\text{В} \times \text{с}$, $p_0 = 1,23 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, $\mu_e = 6,4 \text{ м}^2/\text{В} \times \text{с}$. Образцы формировались меза-травлением в виде классической холловской структуры. Контакты на образцы наносились индием методом холодной сварки. Образец освещался ИК-светодиодом с $\lambda = 0,9 \text{ мкм}$ через отверстие в держателе. Экспериментальная установка для измерения ФМЭ описана в работе [2]. Концентрации и подвижности носителей заряда определялись по результатам измерений магнитолевых зависимостей эффекта Холла и магнитосопротивления методом «спектра подвижности» и так называемой многозонной подгонкой. Рекомбинационно-диффузионные параметры образцов находились из соответствия теоретических кривых экспериментальным данным методом наименьших квадратов совместно с численным методом нелинейной оптимизации Хука-Дживса.

Экспериментальные результаты

Принципиальная схема наблюдения ФМЭ приведена на рис. 1. Если на полупроводниковую пластину падает излучение с длиной волны, соответствующей собственному поглощению, то в тонком поверхностном слое образуется высокая концентрация неравновесных носителей заряда (электронов и дырок). Возникающий при этом градиент концентрации приводит к появлению диффузионного потока в объём образца по направлению падающего излучения. Со стороны магнитного поля, приложенного в поперечном направлении, на диффундирующие носители действует сила Лоренца, которая отклоняет потоки электронов и дырок на углы Холла Θ_p и Θ_n , соответственно. Углы Холла равны:

$$\text{tg}\Theta_p = \mu_p B \text{ и } \text{tg}\Theta_n = \mu_n B,$$

где μ_p , μ_n – подвижности дырок и электронов. Вследствие этого возникают составляющие плотности тока j_{px} и j_{nx} , направленные в одну и ту же сторону.

Если полупроводниковая пластинка не замкнута, то левый её торец будет заряжен положительно, а правый – отрицательно, в пластинке появится составляющая электрического поля E_x , а между торцами возникнет разность потенциалов. При коротком замыкании торцов пластинки в цепи возникнет ток $i_{кз}$.

Аналитические выражения, описывающие поведение неравновесного электронно-дырочного газа в скрещенных электрическом и магнитном полях, были получены из решений уравнений непрерывности и транспортных уравнений для плотности токов электронов и дырок в магнитном поле и приведены

в работе [5]. Показано [5], что в варизонной области магнитодиффузионная и градиентная компоненты ФП сравнимы по величине, однако имеют разные знаки. Следовательно, эти компоненты компенсируют друг друга и оказывают незначительное влияние на измеряемый сигнал ФМЭ.

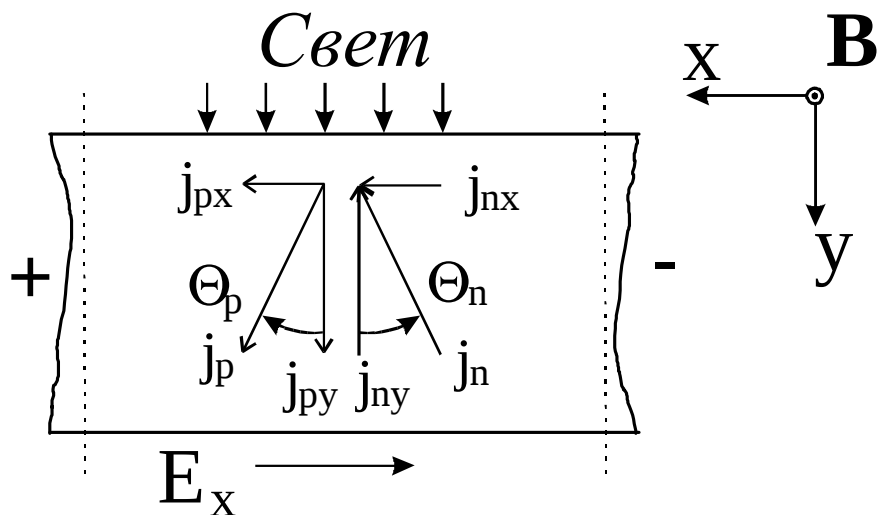


Рис. 1. Электронная j_n и дырочная j_p компоненты тока ФМЭ

На рис. 2 приведены магнитополевые зависимости сигнала ФМЭ для образца № 2. При освещении образца со стороны подложки сигнал меньше из-за поглощения излучения в материале подложки. Как видно, незначительное отличие $U_{ФМЭ}$ при освещении с разных сторон даёт основание полагать, что

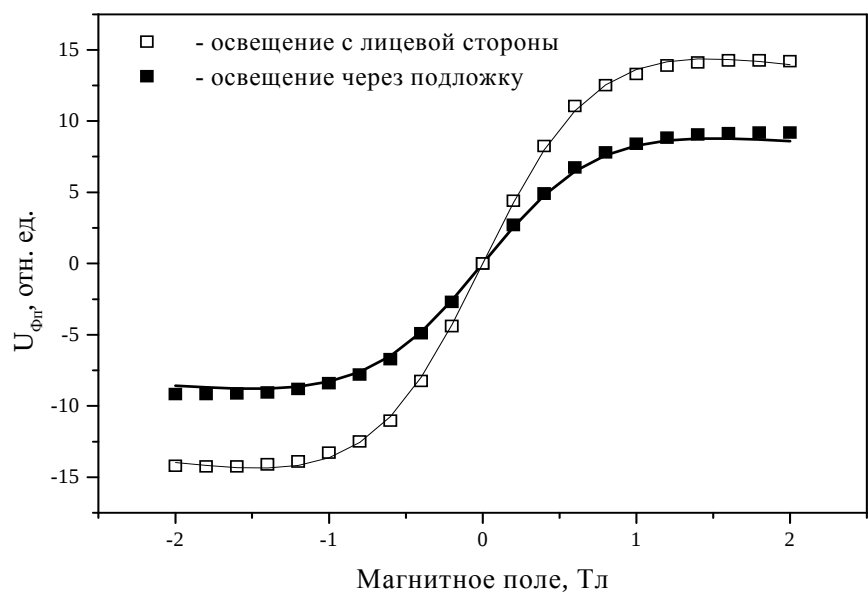


Рис. 2. Магнитополевые зависимости ФМЭ при освещении образца с разных сторон

вклады варизонных слоёв в измеряемый сигнал незначительны. Из соответствия теоретических кривых, построенных на основе аналитических выражений [5], и экспериментальных данных были определены рекомбинационно-диффузион-ные параметры структуры:

$$S_1 = 37 \pm 7 \text{ м/с};$$

$$S_2 = 38 \pm 7 \text{ м/с};$$

$$\tau_V = 10,6 \pm 0,5 \text{ нс.}$$

Заключение

В работе из анализа ФМЭ экспериментально доказано, что плёнку с варизонными приграничными слоями можно свести к однородной по составу плёнке, введя эффективный темп поверхностной генерации и эффективные скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рогальский, А. Инфракрасные детекторы/ А. Рогальский; пер. с англ. – Новосиба.: Наука, 2003. – 636 с.
2. Студеникин, С.А. Фотопроводимость гетероэпитаксиальных структур $\text{Cd}_x \text{Hg}_{1-x} \text{Te}/\text{CdTe}$ в поперечном магнитном поле / С.А. Студеникин, В.Я. Костюченко // Мат. республ. конф. тез.докл. – Львов, 1990.
3. Characterization of MBE p- $\text{Cd}_x \text{Hg}_{1-x} \text{Te}$ layers using the photoconductive effect in crossed $\vec{E} \perp \vec{B}$ fields / S.A. Studenikin, D.Yu. Protasov, V.Ya. Kostuchenko, V.S. Varavin // Material Science Engineering B.-1997.-V 44. – P. 288-291.
4. Подвижность неосновных носителей заряда в пленках p-HgCdTe / В.С. Варавин, С.А. Дворецкий, В.Я. Костюченко, В.Н. Овсяк, Д.Ю. Протасов // ФТП. – 2004. – Т. 38, № 5. – С. 532-537.
5. Протасов, Д.Ю. Эффективные темпы оптической генерации и скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда в варизонных плёночных фотоприемных структурах p-KPT МЛЭ /Д.Ю. Протасов, В.Я. Костюченко //Автометрия. – 2008. – Т. 44, № 6. – С. 103-108.

© В.Я. Костюченко, Д.Ю. Протасов, 2009

УДК 531.01

С.В. Савелькаев

СГГА, Новосибирск

ЭФФЕКТ СМЕЩЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС

S.V. Savel'kayev

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

EFFECT OF SHIFT OF THE MASS CENTER

It is shown that shift of the mass centre of mechanical system at counter rotary moving does not depend on resistance of an external medium and always is constant. This shift is zero at zero resistance.

Рассмотрим механическую систему S [1, 2], показанную на рис. 1, а. Она содержит опорное тело с массой m_1 , на котором посредством идеальных стержней с длиной R_{21} , шарнирных по отношению к этому телу m_1 , установлены два рабочих тела с массами m_2 с возможностью их синхронного встречного вращательного перемещения относительно опорного тела m_1 на угол $0 \leq \varphi_{21} \leq \pi$ с относительной скоростью $\vec{v}_{21}$.

В качестве основной системы отсчета выберем неподвижную K , а вспомогательной – собственную систему отсчета K_1 опорного тела m_1 , которая вместе с ним может совершать поступательное движение в системе отсчета K с абсолютной скоростью $\dot{x}_1$.

В качестве обобщенных координат выберем декартову координату x_1 опорного тела m_1 в системе отсчета K и полярную координату φ_{21} тел m_2 в системе отсчета K_1 .

Декартовы координаты x_2 , y_2 и скорости $\dot{x}_2$, $\dot{y}_2$ тел m_2 в системе отсчета K можно выразить в виде

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 + R_{21} \cos \varphi_{21}, & y_2 &= R_{21} \sin \varphi_{21}, \\ \dot{x}_2 &= \dot{x}_1 - \dot{\varphi}_{21} R_{21} \sin \varphi_{21}, & \dot{y}_2 &= \dot{\varphi}_{21} R_{21} \cos \varphi_{21}, \end{aligned} \quad (2)$$

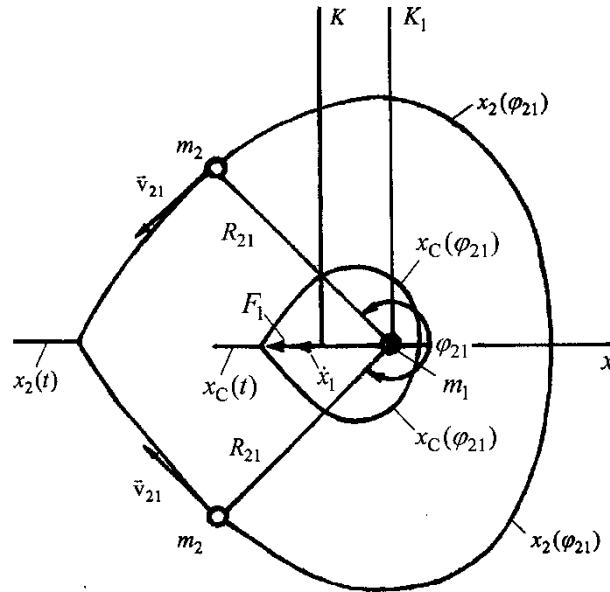
где $\dot{\varphi}_{21} = \pi/t_B$ – угловая скорость вращательного перемещения тел m_2 в системе отсчета K_1 на угол $\varphi_{21} = \pi$; t_B – его длительность.

Учитывая, что потенциальные силы в рассматриваемой механической системе S отсутствуют ее лагранжиан L можно выразить в виде

$$L = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} \tilde{m}_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2), \quad (3)$$

где $\tilde{m}_2 = 2m_2$ – удвоенная масса тел m_2 , сводящая решаемую задачу к задаче с одним рабочим телом $\tilde{m}_2$.

a)



б)

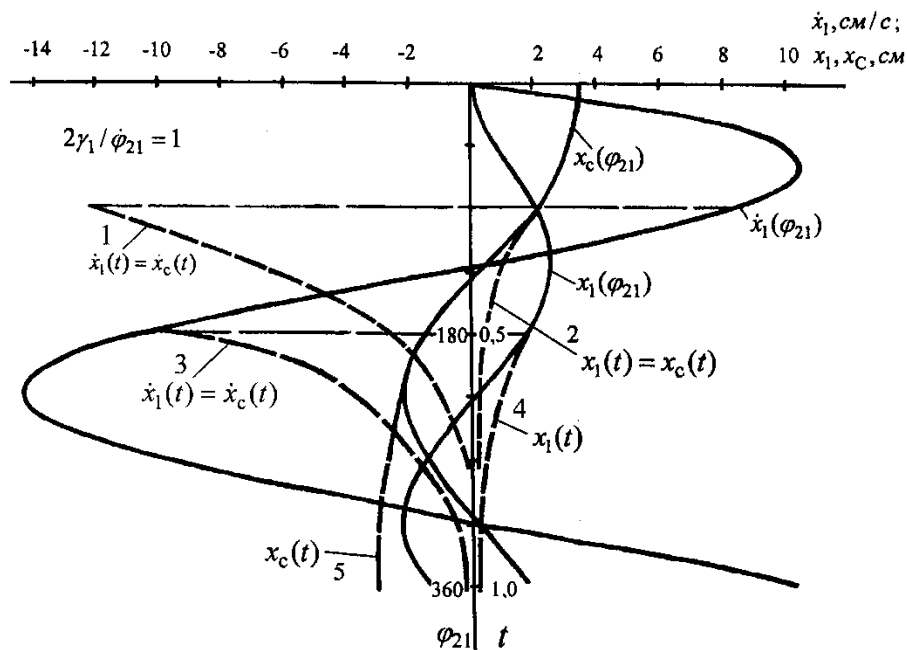


Рис. 1. Механическая система S (a) и графики положения x_1 и скорости $\dot{x}_1$ ее опорного тела m_1 , а также положения x_C ее центра O_C масс (б)

Подставив (2) в (3) получим

$$L = \frac{1}{2}(m_1 + \tilde{m}_2)\dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}\tilde{m}_2\dot{\phi}_{21}^2 R_{21}^2 + U_2. \quad (4)$$

Первое слагаемое (4) представляет собой кинетическую энергию поступательного движения рассматриваемой системы S как целого в системе отсчета K, которая при взятии частной производной $\partial L / \partial \dot{x}_1$ и дифференцировании по времени d/dt позволяет определить силу инерции

(даламберову) $\Phi_1 = (m_1 + \tilde{m}_2)\ddot{x}_1$ этой системы S, второе – кинетическую энергию вращательного перемещения тела $\tilde{m}_2$ в системе отсчета K_1 , которая при взятии частной производной $\partial L / \partial R_{21}$ позволяет определить его центробежную силу инерции (эйлерову) $\Phi_{21} = \tilde{m}_2 \dot{\varphi}_{21}^2 R_{21}$. Третье слагаемое к кинетической энергии не относится и представляет собой обобщенный корреляционный потенциал

$$U_2 = -\tilde{m}_2 \dot{x}_1 \dot{\varphi}_{21} R_{21} \sin \varphi_{21} \quad (5)$$

рассматриваемой системы S, возбуждаемый телом $\tilde{m}_2$ из-за его участия в двух взаимно влияющих движениях (сложном движении), таких как переносное (поступательное движение вместе с системой отсчета K_1 в системе отсчета K) и относительное (вращательное перемещение в системе отсчета K_1) со скоростями $\dot{x}_1$ и $v_{21} = \dot{\varphi}_{21} R_{21}$.

Запишем уравнение Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_1} = - \frac{\partial D}{\partial x_1} \quad (6)$$

рассматриваемой системы S с учетом сопротивления μ_1 внешней среды движению опорного тела m_1 .

Подставив в это уравнение лагранжиан L (4) и диссипативную функцию

$$D = \frac{1}{2} \mu_1 \dot{x}_1^2. \quad (7)$$

Получим

$$\ddot{x}_1 + 2\gamma_1 \dot{x}_1 = \frac{F_1}{m_1 + \tilde{m}_2}, \quad (8)$$

где F_1 – обобщенная сила инерции

$$F_1 = - \frac{d}{dt} \frac{\partial U_2}{\partial \dot{x}_1} = \tilde{m}_2 \dot{\varphi}_{21}^2 R_{21} \cos \varphi_{21} t, \quad (9)$$

оказывающая на рассматриваемую систему S в системе отсчета K действие эквивалентное внешнему, которому противодействует сила инерции $\Phi_1 = (m_1 + \tilde{m}_2)\ddot{x}_1$ этой системы S; $\gamma_1 = \mu_1 / [2(m_1 + \tilde{m}_2)]$ – коэффициент затухания поступательного движения опорного тела m_1 .

Согласно (9) обобщенная сила инерции F_1 является компонентой центробежной силы инерции $\Phi_{21} = \tilde{m}_2 \dot{\varphi}_{21}^2 R_{21}$ тела $\tilde{m}_2$ на ось x системы отсчета K. Ее существенным отличием от кориолисовой силы инерции является то, что она приложена не к одному телу, участвующему в двух движениях, а к системе взаимодействующих тел, одно из которых участвует в двух движениях, а другое – в одном.

Частное решение неоднородного уравнения (8) будем искать в виде

$$x_1(t) = -A_1 \cos(\dot{\varphi}_{21} t + \varepsilon), \quad (10)$$

где A_1 и ε – амплитудный и фазовый коэффициенты, последний из которых характеризует фазовый сдвиг между вращательным перемещением тел m_2 в системе отсчета K_1 и поступательным движением опорного тела m_1 в системе отсчета K .

Для определения коэффициентов A_1 и ε (10) представим уравнение (8) в комплексной форме

$$\ddot{x}_1 + 2\gamma_1 \dot{x}_1 = a \dot{\varphi}_{21}^2 \exp(i \dot{\varphi}_{21} t), \quad (11)$$

где $a = \tilde{m}_2 R_{21} / (m_1 + \tilde{m}_2)$.

Решение этого уравнения будем искать в виде

$$x_1 = -B_1 \exp(i \dot{\varphi}_{21} t). \quad (12)$$

Подставив в (12) в (11) найдем комплексную амплитуду

$$B_1 = -A_1 \exp(i \varepsilon), \quad (13)$$

где

$$A_1 = \frac{a}{\sqrt{1 + 4\gamma_1^2 / \dot{\varphi}_{21}^2}}, \varepsilon = \arctg(2\gamma_1 / \dot{\varphi}_{21}). \quad (14)$$

Далее запишем общее решение

$$x_1(t) = C_1 + C_2 \exp(-2\gamma_1 t) \quad (15)$$

однородного уравнения вида

$$\ddot{x}_1 + 2\gamma_1 \dot{x}_1 = 0. \quad (16)$$

Сумма решений (10) и (15) дает общее решение неоднородного уравнения (8)

$$x_1(t) = C_1 + C_2 \exp(-2\gamma_1 t) - A_1 \cos(\dot{\varphi}_{21} t + \varepsilon), \quad (17)$$

$$\dot{x}_1(t) = -2C_2 \gamma_1 \exp(-2\gamma_1 t) + A_1 \dot{\varphi}_{21} \sin(\dot{\varphi}_{21} t + \varepsilon).$$

Для граничных условий $x_1(t=0) = 0$ и $\dot{x}_1(t=0) = 0$ найдем:

$$C_1 = A_1 \left(\cos \varepsilon - \frac{\dot{\varphi}_{21}}{2\gamma_1} \sin \varepsilon \right), C_2 = A_1 \frac{\dot{\varphi}_{21}}{2\gamma_1} \sin \varepsilon. \quad (18)$$

Подставив (18) в (17) получим:

$$\begin{aligned} x_1(\varphi_{21}) &= A_1 \left(\cos \varepsilon - \frac{\dot{\varphi}_{21}}{2\gamma_1} \sin \varepsilon (1 - \exp(-\frac{2\gamma_1}{\dot{\varphi}_{21}} \varphi_{21})) - \cos(\varphi_{21} + \varepsilon) \right), \\ \dot{x}_1(\varphi_{21}) &= -A_1 \dot{\varphi}_{21} \left(\sin \varepsilon \exp(-\frac{2\gamma_1}{\dot{\varphi}_{21}} \varphi_{21}) - \sin(\varphi_{21} + \varepsilon) \right). \end{aligned} \quad (19)$$

Положение $x_C(\varphi_{21})$ и скорость $\dot{x}_C(\varphi_{21})$ центра O_C масс рассматриваемой системы S в системе отсчета K можно определить с учетом (2) и (19) по формулам:

$$x_C(\varphi_{21}) = \frac{m_1 x_1(\varphi_{21}) + \tilde{m}_2 x_2(\varphi_{21})}{m_1 + \tilde{m}_2}, \dot{x}_C(\varphi_{21}) = \frac{m_1 \dot{x}_1(\varphi_{21}) + \tilde{m}_2 \dot{x}_2(\varphi_{21})}{m_1 + \tilde{m}_2}. \quad (20)$$

Графики положения $x_1(\varphi_{21})$ и скорости $\dot{x}_1(\varphi_{21})$ опорного тела m_1 рассматриваемой системы S , а также положения $x_C(\varphi_{21})$ ее центра O_C масс в системе отсчета K , рассчитанные по формулам (19) и (20) для поворота тел m_2

на угол $0 \leq \varphi_{21} \leq \pi$ при $m_1 = 0,14$ кг; $\tilde{m}_2 = 0,11$ кг; $R_{21} = 7,5$ см; $t_B = 0,5$ с; $2\gamma_1 / \dot{\varphi}_{21} = 1$, показаны на рис. 1, б (сплошные линии).

Затухающее движение рассматриваемой системы S как целого совместно с ее центром масс O_C в системе отсчета K после завершения вращательного перемещения ее тел m_2 описывается уравнением (16) с решениями:

$$x_1(t) = C_1 + C_2 \exp(-2\gamma_1(t - t_1)), \quad x_C(t) = C_3 + C_2 \exp(-2\gamma_1(t - t_1)), \quad (21)$$

где t_1 – время завершения вращательного перемещения тел m_2 на угол поворота $\varphi_{21} = \dot{\varphi}_{21}t_1$, определяющее длительность $\Delta t_B = t_1$ этого перемещения.

Дифференцирование $dx_1(t)/dt$ и $dx_C(t)/dt$ (21) дает:

$$\dot{x}_1(t) = \dot{x}_C(t) = -2C_2\gamma_1 \exp(-2\gamma_1(t - t_1)). \quad (22)$$

Для определения коэффициентов $C_1 - C_3$ из решений (21) и (22) при $t = t_1$ получим:

$$x_1(t = t_1) = C_1 + C_2, \quad x_C(t = t_1) = C_3 + C_2, \quad \dot{x}_1(t = t_1) = \dot{x}_C(t = t_1) = -2C_2\gamma_1, \quad (23)$$

где

$$x_1(t = t_1) = x_1(\varphi_{21} = \dot{\varphi}_{21}t_1)$$

определяется решением (19), а

$$x_C(t = t_1) = x_C(\varphi_{21} = \dot{\varphi}_{21}t_1) -$$

формулой (20) при $\varphi_{21} = \dot{\varphi}_{21}t_1$.

Из (23) получим:

$$C_1 = x_1(t = t_1) + \dot{x}_C(t = t_1) / 2\gamma_1, \quad C_2 = -\dot{x}_C(t = t_1) / 2\gamma_1 \quad (24)$$

$$C_3 = x_C(t = t_1) + \dot{x}_C(t = t_1) / 2\gamma_1.$$

Подстановка (24) в (21) дает:

$$x_1(t) = x_1(t = t_1) + \frac{\dot{x}_C(t = t_1)}{2\gamma_1} [1 - \exp(-2\gamma_1(t - t_1))], \quad (25)$$

$$\dot{x}_1(t) = x_C(t = t_1) \exp(-2\gamma_1(t - t_1)),$$

$$x_C(t) = x_C(t = t_1) + \frac{\dot{x}_C(t = t_1)}{2\gamma_1} [1 - \exp(-2\gamma_1(t - t_1))].$$

Графики затухающего движения $x_1(t)$ и скорости $\dot{x}_1(t)$ опорного тела m_1 рассматриваемой системы S, а также затухающего движения $x_C(t)$ ее центра O_C масс в системе отсчета K, рассчитанные по формулам (25) для времени $t_1 \leq t \leq \infty$, показаны на рис. 1, б, где пунктирные кривые $\dot{x}_1(t) = \dot{x}_C(t) - 1$ и $x_1(t) = x_C(t) - 2$ даны для поворота тел m_2 на угол $\varphi_{21} = \dot{\varphi}_{21}t_1 = \pi/2$, а $\dot{x}_1(t) = \dot{x}_C(t) - 3$, $x_1(t) - 4$ и $x_C(t) - 5$ – для их поворота на угол $\varphi_{21} = \dot{\varphi}_{21}t_1 = \pi$.

Смещение Δx_1 и Δx_C опорного тела m_1 и центра O_C масс рассматриваемой системы S за интервал времени $0 \leq t \leq \infty$ можно определить по формулам:

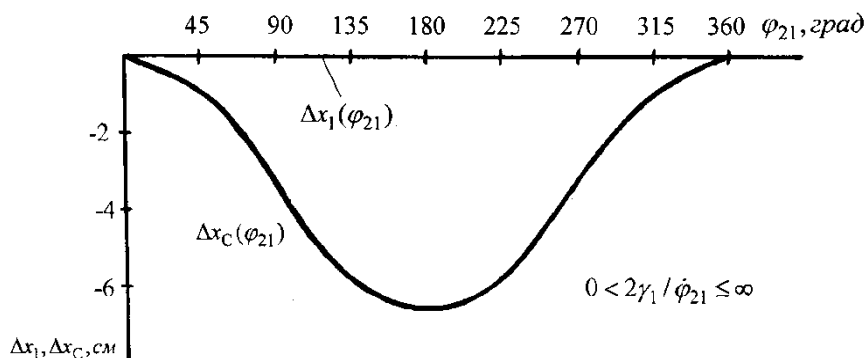
$$\Delta x_1 = x_1(t = \infty) - x_1(\varphi_{21} = 0), \quad \Delta x_C = x_C(t = \infty) - x_C(\varphi_{21} = 0), \quad (26)$$

где $x_1(\varphi_{21} = 0) = 0$ и $x_C(\varphi_{21} = 0) = a$ определяются из (19) и (20), а $x_1(t = \infty)$ и $x_C(t = \infty)$ – из (25).

Графики смещения Δx_1 и Δx_C опорного тела m_1 и центра O_C масс в системе отсчета K , рассчитанные по формулам (26) для различных поворотов тел m_2 на угол $0 \leq \varphi_{21} \leq \pi$ при $0 < 2\gamma_1 / \dot{\varphi}_{21} \leq \infty$, показаны на рис. 2.

Согласно рис. 2 важным свойством рассматриваемой системы S является то, что смещение Δx_1 и Δx_C (26) ее опорного тела m_1 и ее центра O_C масс в системе отсчета K для любого из вращательных перемещений тел m_2 на угол $0 \leq \varphi_{21} \leq \pi$ не зависит от сопротивления μ_1 внешней среды и всегда остается постоянным

$$\Delta x_1 = 0, \Delta x_C = \text{const}, \quad (27)$$



Так, например, при $\varphi_{21} = \pi$ и $0 < 2\gamma_1 / \dot{\varphi}_{21} \leq \infty$ их значения $\Delta x_1 = 0$ и $\Delta x_C = -2a$. При $2\gamma_1 / \dot{\varphi}_{21} = 0$ их значения составляют $\Delta x_1 = 2a$ и $\Delta x_C = 0$. Это эффект обусловлен тем, что положение $x_1(\varphi_{21} = \dot{\varphi}_{21}t_1)$ и скорость $\dot{x}_1(\varphi_{21} = \dot{\varphi}_{21}t_1) = \dot{x}_C(\varphi_{21} = \dot{\varphi}_{21}t_1)$ (26) рассматриваемой системы S для любых вращательных перемещений ее рабочих тел m_2 на угол $0 \leq \varphi_{21} \leq \pi$ имеют различные соответственно положительный и отрицательный знаки, как показано на рис. 1, б.

Рис. 2. Графики смещения Δx_1 и Δx_C опорного тела m_1 и центра O_C масс в системе отсчета K для поворота тел m_2 на угол $0 \leq \varphi_{21} \leq \pi$ при $0 < 2\gamma_1 / \dot{\varphi}_{21} \leq \infty$

На основе этого эффекта был разработан инерциод Савелькаева [3–5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савелькаев, С.В. Теория гравитации [Текст] / С.В. Савелькаев. – М.: МЭИ, 1993. – 108 с.
2. Савелькаев, С.В. Динамическая гравитация в диссипативных средах [Текст] / С.В. Савелькаев // М.: МЭИ, 1995. – 34 с.
3. Эксперимент Савелькаева [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mirit.ru/video/>
4. Пат. №2056524 Россия, F 03 G 3/00. Гравитационный движитель Савелькаева. – 1996.
5. Пат. №2147595 Россия, F 03 G 3/00. Гравитационный движитель Савелькаева. – 2000.

УДК 621.382

Д.Е. Уткин^{}, А.В. Латышев*

СГГА^{*}, ИФП СО РАН, Новосибирск

ФОРМИРОВАНИЕ МАССИВА НАНОСТРУКТУР МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛИТОГРАФИИ

D.E. Utkin^{}, A.V. Latyshev*

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)^{*}

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation,

Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, 63090

THE FORMING OF NANOSTRUCTURE ARRAY BY EBL METHODS

The technology of forming nanostructure array by EBL method is observed.

В данной статье обсуждается разработка методов формирования массивов наноструктур с помощью электронной литографии с целью:

- Выяснения возможности создания наноразмерных массивов структур, имеющих отрицательный наклон стенок, для применения в технологии взрывного осаждения металлов [1, 2];
- Определения основных параметров лабораторной технологии электронной литографии массивов наноструктур.

Технологии полупроводниковой электроники развиваются в направлении миниатюризации ее компонентов. Возросший в последние годы интерес к наноразмерным объектам привел к появлению новых технологий, находящихся широкое применение в науке, технике и многих других сферах деятельности. Фуллерены и нанотрубки, нанокластеры и нанопорошки, квантовые точки, наноструктурированные материалы - позволяют создавать принципиально новые устройства, такие как лазерные генераторы на квантовых точках, одноэлектронные транзисторы, сверхяркие дисплеи и т. д. [3]. Существуют два подхода к созданию наноструктур: «снизу-вверх» и «сверху-вниз» по шкале размеров [4].

Одной из наиболее перспективных технологий (подход «сверху-вниз»), является электронно-сканирующая литография, в которой экспонирование производится высокоэнергетичными электронами, обладающими малой длиной волны.

При создании структур полупроводниковой электроники методом электронной литографии обычно применяются кремниевые подложки. В нашей работе также используется кремниевая подложка. При электронной литографии распространенным является использование позитивного электронного резиста, наносимого на подложку методом центрифугирования; мы так же использовали

этот резист, а именно – РММА 950К [5]. Толщина пленки резиста на подложке измерялась с помощью эллипсометра и составила 180 нм. Экспонирование осуществлялось на электронном литографе высокого разрешения (ЭЛ) сканирующего типа Raith 150 (Германия). Отрицательный наклон стенок структур можно получить только при малых ускоряющих напряжениях катода [6], поэтому эксперименты проводились при потенциале катода 5 кВ с использованием 7,5 мкм катодной диафрагмы, размер которой выбирался, исходя из необходимости увеличения глубины резкости.

Для формирования картины в резисте с помощью программных средств Raith 150 был создан файловый тест-рисунок в GDSII формате, представляющий серию из 24-х массивов точек. Каждый из массивов содержит 6х6 точек, находящихся на расстоянии 1 мкм друг от друга; любой последующий массив отличается от предыдущего заданной дозой облучения. В процессе экспонирования в резисте формируется «скрытое» изображение, соответствующее рисунку в формате GDSII. Затем подложку с резистом подвергают химической обработке – проявляют, в слое резиста образуются отверстия. В нашем случае применялся метод жидкостно-химического удаления облученных площадей с помощью раствора метилэтилкетона и изопропилового спирта (МЭК:ИПС) в соотношении 1 : 3. Полученная маска из РММА 950К была продиагностирована с помощью ЭЛ Raith 150, используемого в режиме сканирующего электронного микроскопа. При диагностике слой резиста дополнительно экспонируется, что меняет его свойства. Этого можно избежать, если сформировать несколько одинаковых структур, («рабочие» и «тестовые») располагая их так, что бы «рабочие» не экспонировались при диагностике «тестовых». На рис. 1 и рис. 2 показано влияние этого дополнительного экспонирования.

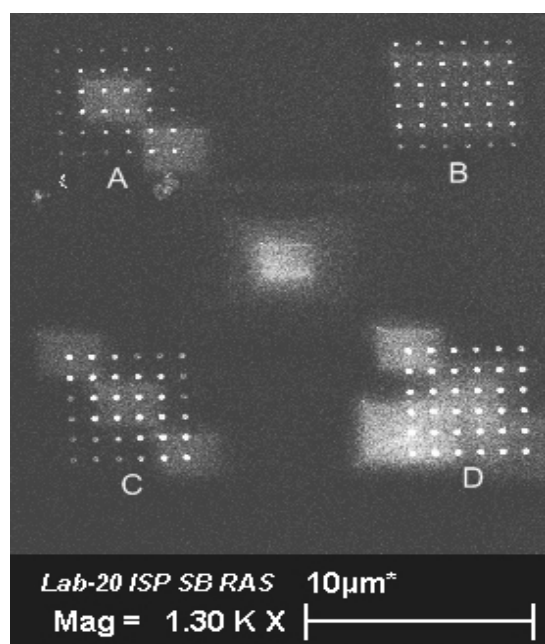


Рис. 1. «ABCD»-массивы отверстий

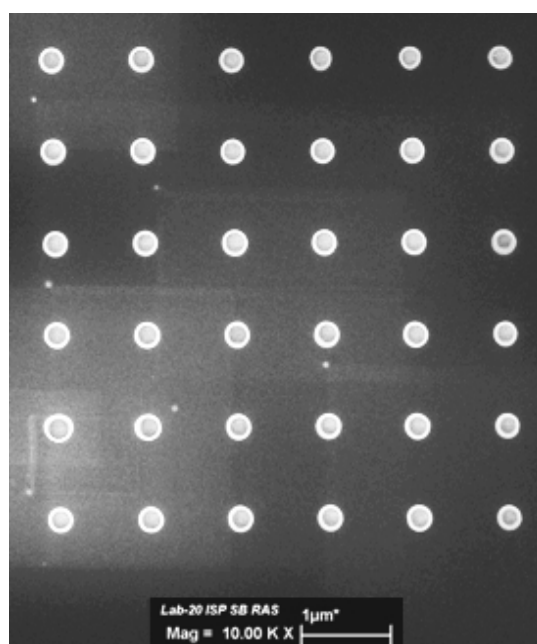


Рис. 2. Увеличенный «D-массив»

На рис. 1 изображены 4 из 24х массивов структур (ABCD): светлые кружки соответствуют точкам GDSII рисунка, а светлые прямоугольники - области дополнительной («паразитной») засветки. На рис. 2 показано увеличенное изображение правого нижнего (по рис. 1) «D-массива», на котором видны

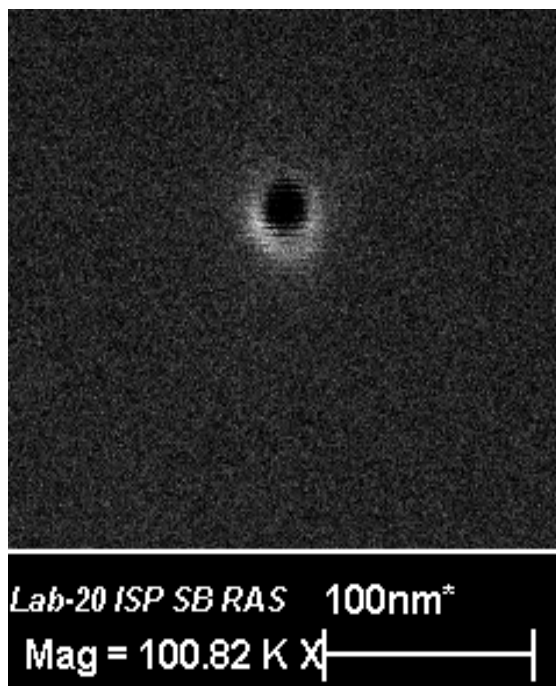


Рис. 3. Отверстие с минимальным размером

мелкие точки – области «парковки луча». «D-массив» имеет максимальную дозу экспонирования, отверстия в нем получились наиболее крупные, диаметром до 200 нм. Массив «С» отличается от массива «D» на $1/10$ дозы, поэтому имеет близкую к «D-массиву» топологию. «А» и «В» массивы также отличаются друг от друга на $1/10$ дозы, при этом имеют размеры отверстий порядка 100 нм за счет меньшей заданной дозы. Минимальный размер отверстия (которое удалось зафиксировать) составил 24 нм (рис. 3). В отличие от изображений точек на рис. 1 и рис. 2, здесь центральная часть отверстия затемнена, что объясняется малым обратным рассеянием электронов из ее центра, так как большая их часть поглощается стенками отверстия. Детектор улавливает электроны, отраженные от краев отверстия, поэтому изображение центра отверстия не контрастно.

На рис. 4 изображен график, иллюстрирующий полученную экспериментально зависимость диаметра отверстий (ось ОУ) от дозы облучения (ОХ). При этом, для требуемого диаметра отверстий близкой к оптимальной будет доза, соответствующая значению графика функции по оси ОХ.

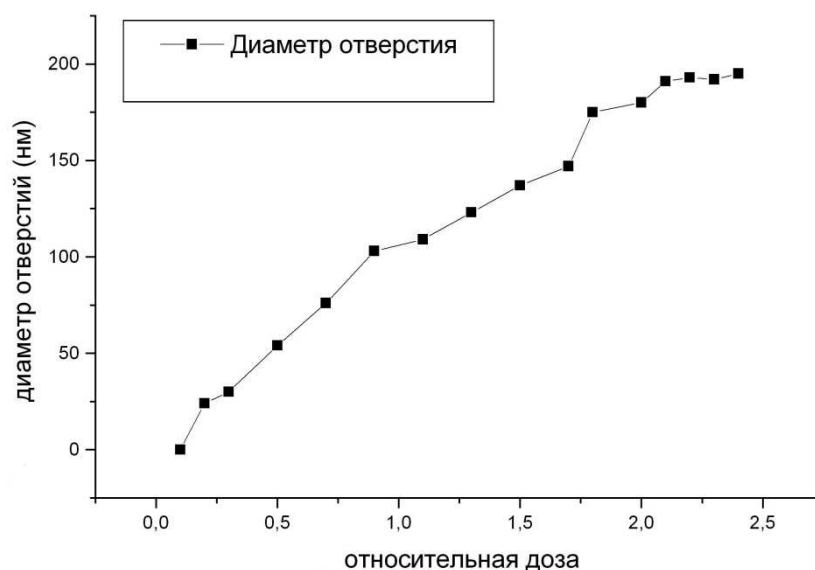


Рис. 4. График зависимости диаметра отверстия в резисте от дозы облучения

В результате проведенной работы было установлено, что на кремниевой подложке с использованием резиста РММА 950К при данных параметрах пучка возможно получить массив «точечных наноструктур» с минимальным размером до 24 нм. Фактический диаметр электронного пучка в фокусе составляет 5 нм, что свидетельствует о наличии факторов, уширяющих размер проэкспонированной области резиста. Предполагается при продолжении работы провести исследование этих факторов.

Была так же выявлена корреляция получившегося размера элементов массива с полученной ими дозой облучения, что согласуется с результатами других авторов [6].

Авторы выражают благодарность Д.А. Насимову за консультационную помощь в проведении данной работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Босый, В.И. Техника и технологии СВЧ; [Текст]/ В.И. Босый, Ф.И. Коржинский, Е. М. Семашко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2006.- № 5.
2. Борисенко, В.И. Нанoeлектроника [Текст]/ В.И. Борисенко, А. И. Воробьева. Ч. 2.- Мн.: БГУИР, 2003. – 76 с.
3. Латышев, А.В. Диагностика и литография полупроводниковых структур для нанoeлектроники [Текст] // Российские нанотехнологии.- 2008.- Т. 3, вып. 5-6.- С. 28-46.
4. Нанотехнология в ближайшем десятилетии [Текст]/ под ред. М.К. Роко, Р.С. Уильямса и П. Аливисатоса; пер. с англ. – М.: Мир, 2002.- 292 с.

5. «Nano PMMA and Copolymer», MicroChem Corp [Электронный ресурс].- Режим доступа: (http://www.microchem.com/products/pdf/PMMA_Data_Sheet.pdf), 2001.
6. Моро, У. Микролитография [Текст] Ч. 1.- М: МИР, 1990.- 605 с.

© Д.Е. Уткин, А.В. Латышев, 2009

УДК 681.7.069.2

В.Д. Бутенко, Б.Г. Гольденберг*

СГГА*, Новосибирск, ИЯФ СО РАН, Новосибирск

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЭКСПОНИРОВАНИЯ НА СТАНЦИИ РЕНТГЕНОЛИТОГРАФИИ

V.D. Butenko, B.G. Goldenberg*

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)*

Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk

DEVELOPMENT OF THE SYSTEM OF AUTOMATION OF PROCESSES OF EXHIBITION AT THE STATION OF RENTGENOLYTOGRAFY

At persen article the project of video-system for automation of the alignment in process X-ray lithography.

Цель работы: описание проекта разработки системы автоматизации процессов экспонирования на станции рентгенолитографии.

Разработка технологий формирования микроструктурированных поверхностей для прикладных исследований широко востребована в настоящее время. Оптическая промышленность, медицина (особенно офтальмология), фото-электроника и другие высокотехнологичные отрасли нуждаются в технологиях формирования микроструктур с непрерывным микрорельефом как на плоских так и на криволинейных поверхностях.

Благодаря уникальным свойствам синхротронного излучения (СИ), таким как высокая проникающая способность, минимальные дифракционные искажения, глубокая рентгеновская литография с применением СИ имеет большой потенциал для изготовления различных микроструктур с широкой областью применения.

В процессе рентгенолитографии слой рентгенорезиста толщиной в несколько сотен микрон облучается СИ через рентгеношаблон. В зависимости от типа резиста, облученные (для негативного резиста – необлученные) его части впоследствии растворяются в соответствующем растворителе и на подложке получается картина из резиста, повторяющая рисунок шаблона. Микрогальваноформовка представляет собой процесс электролитического осаждения металла в каналы микроструктуры из резиста. Таким образом, получается комплементарная резистивная структура. Отметим, что все промежуточные продукты сами по себе представляют законченные изделия и в зависимости от технических требований LIGA – метод может быть прерван на любой стадии.

Одним из направлений LIGA-технологий является создание оптических элементов, например, изготовление дифракционных линз, работающих в

высоких порядках дифракции. Такие линзы могут найти применение в офтальмологии как искусственные хрусталики глаза и объективах для камер. Линзы являются осесимметричными элементами и для их изготовления необходимо вращать мишень относительно маски [2], один из вариантов которой в форме «елки» показан на рис. 1. После проявления подложки из ПММА, экспонированной через такой шаблон получается осесимметричный структурный рельеф (справа на рис. 1) с глубиной микрорельефа до 10 мкм. Ошибки совмещения центра топологии маски с осью вращения подложки приводят к увеличению обратного ската кольцевого рельефа зон большого радиуса и искажение формы зон.

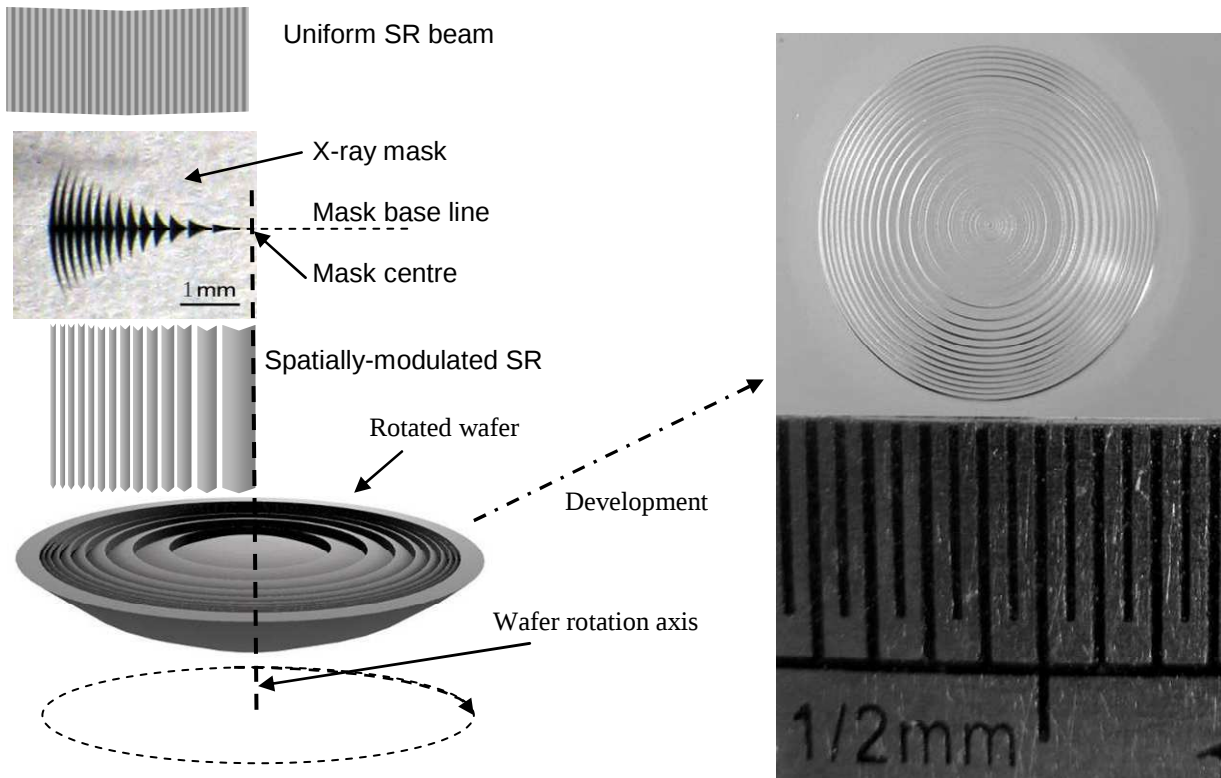


Рис. 1. Производство дифракционных линз с помощью MW-DXRL метода

Для решения проблемы минимизации искажений актуальна разработка систем визуализации совмещения в процессе рентгенолитографии, непосредственно на пучке СИ в on-line режиме.

Проблема совмещения шаблона и мишени уже решалась в рентгенолитографии, но во всех известных нам случаях совмещение шло по микроструктуре или знакам совмещения, сформированных на предыдущем этапе и только после проявления резиста [2]. В нашем случае необходимо совмещение оси вращения подложки с центром рисунка на рентгеношаблоне.

Существуют методы совмещения, основанные на экспонировании тестовых подложек при нескольких ориентациях и последующего сравнения

положения знаков совмещения.[2] Эти методы достаточно сложны в использовании.

В настоящем сообщении обсуждается следующий метод совмещения – создание визуализационной системы на основе web-камеры, расположенной в радиационном объеме станции «LIGA» на канале вывода СИ из накопителя ВЭПП-3, ИЯФ СО РАН, Новосибирск. Система позволит базировать платформу с рентгеношаблоном и платформу с подложкой относительно луча СИ с точностью не хуже 10–30 мкм при видео мониторинге в онлайн режиме. На рис. 2 схематически представлена система базирования рентгеношаблона и подложки относительно луча СИ.



Рис. 2. Схема визуализационной системы совмещения

Пучок СИ из канала 1 формирует на подложке 5 изображение рисунка рентгеношаблона 3, закрепленного на координатном столике 2. Люминофор, нанесенный на подложку 5, светится под действием излучения, полученное изображение регистрируется web-камерой 8, проходя через призму 11 и объектив 9. Камера установлена перпендикулярно оси пучка для исключения облучения web-камеры прямым пучком СИ. Пластина из свинцового стекла 10 используется для защиты оптических элементов (призма, объектив) и полупроводниковых элементов камеры 8 от СИ.

Тестовый эксперимент с использованием описанной системы был проведен на станции LIGA при работе накопителя ВЭПП-3 в стандартном режиме (энергия электронов 2 ГэВ, ток 86 мА). В виду значительной интенсивности свечения люминофоров в пучке СИ и превышения чувствительности камеры в первом эксперименте получить удовлетворительный результат снимка не удалось. Листовой полиметилметакрилат (оргстекло) под воздействием СИ слабо

люминесцирует и дает бледно-голубое свечение. Люминофор (5 на рис. 2) был заменен пластиной ПММА, толщиной 1 мм.

На рис. 3 представлены фотографии используемого тест-объекта (рентгеношаблона) и полученные фотографии излучения, проходящего через него при облучении синхротронным излучением.

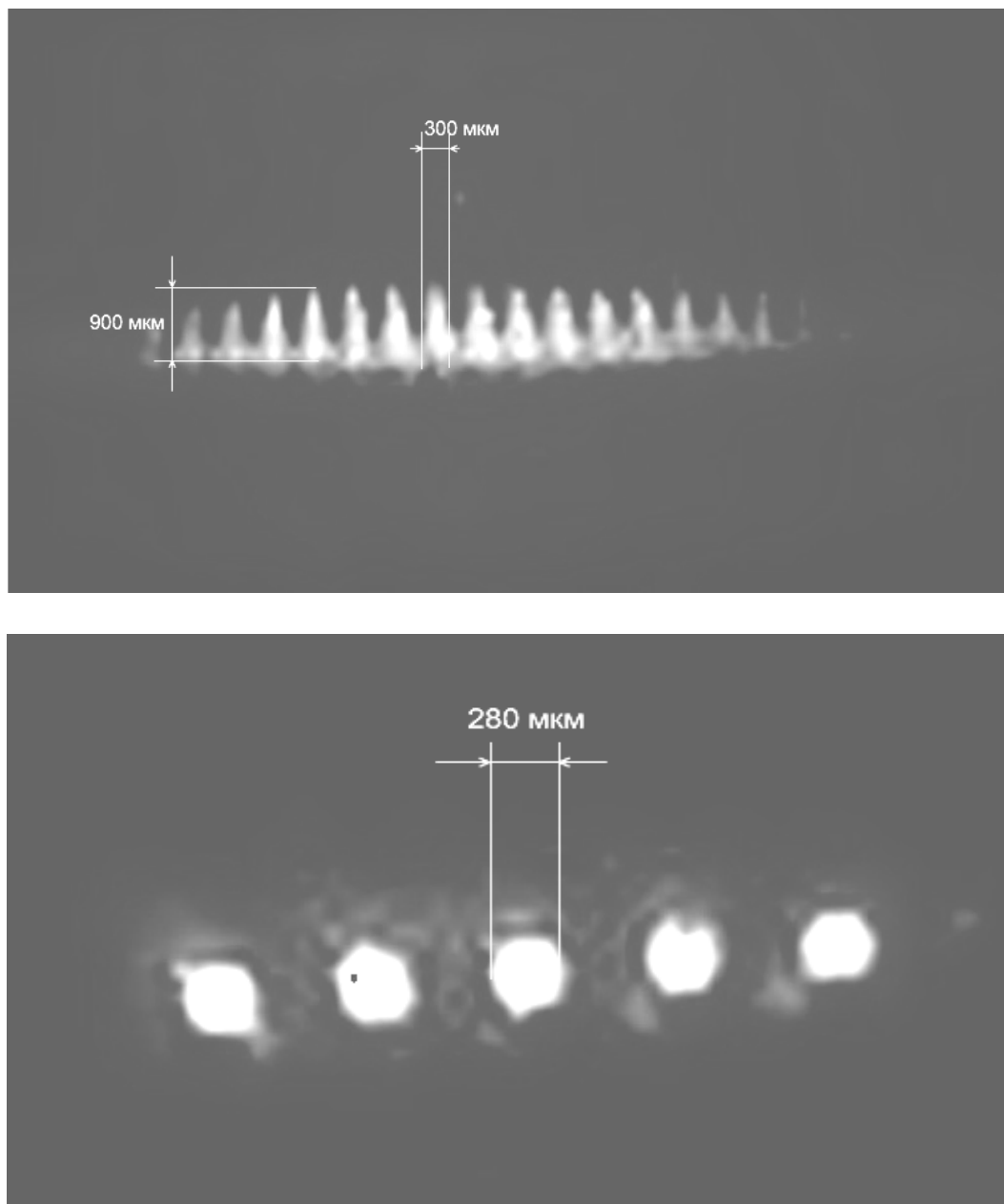


Рис. 3

Изображенные на рисунке 3 круглые области и области, в виде треугольников являются, областями засветки люминофора СИ, прошедшего через соответствующие прозрачные области на рентгеношаблоне.

В настоящем сообщении рассмотрен проект системы автоматизации совмещения при динамическом экспонировании, используемом для создания дифракционных объемных структур. Полученные первые результаты подтверждают работоспособность предложенного устройства.

Зарегистрировано изображение, формируемое после рентгеношаблона при облучении синхротронным излучением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. LIGA-технология и ее применения. Препринт / Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера; под ред. С.Б. Ли. – Новосибирск, 1992. – 27 с.
2. Goldenberg B.G., Pindyurin V.F., Ancharova U.V., Eliseev V.S., Petrova E.V., Korolkov V.P. , Nasyrov R.K., Nikanorov N.Y FABRICATION OF MICROSTRUCTURED OPTICAL ELEMENTS FOR VISIBLE LIGHT BY MEANS OF LIGA-TECHNOLOGY. // принято в печать Nucl. Inst. & Meth. A. – 2009.

©В.Д. Бутенко, Б.Г. Гольденберг, 2009

УДК 621.386.8

С.В. Пляскин^{}, Б.Г. Гольденберг*

СГГА^{}, ИЯФ СО РАН, Новосибирск*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК В LIGA-ПРОЦЕССАХ

S.V. Plyaskin^{}, B.G. Goldenberg*

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)^{}*

Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk

RESEARCH OF TECHNOLOGICAL BASES OF ADHESIVITY OF THIN FILMS IN LIGA-PROCESSES

Questions of maintenance of adhesivity of layers x-ray resists, put on substrates from carbons glasses are analyzed.

Анализируются вопросы обеспечения адгезионной прочности слоев рентгенорезистов, нанесенных на подложки из стеклоуглерода.

Целью работы является исследование процессов подготовки подложек, применяемых при изготовлении микроструктур методом рентгеновской литографии с использованием синхротронного излучения (СИ) в части улучшения адгезионных свойств металлических и резистивных слоев.

Рентгеновская литография является разновидностью оптической бесконтактной печати, в которой длина волны экспонирующего облучения лежит в диапазоне мягкого рентгеновского излучения. Основная причина разработки метода рентгеновской литографии заключалась в возможности получения высокого разрешения, высокого аспектного отношения резистивных структур и в то же время высокой производительности метода. Резистивный слой, нанесенный на подложку, облучают через специальный шаблон мягким рентгеновским излучением. После экспонирования производят обычные операции: проявление, сушку, задубливание. Характерные размеры получившихся резистивных структур в плане – от единиц до десятков микрометров, высота – от десятков до сотен микрометров.

При разработке технологии изготовления рентгеношаблона на стеклоуглеродных подложках обнаружилась плохая адгезия слоев рентгенорезиста к подложке. Использование стеклоуглерода обусловлено тем, что он является одним из немногих веществ, прозрачных для рентгеновского излучения в диапазоне длин волн от 0,5 до 3 Å, и может быть применен в качестве материала подложки рентгеношаблона.

Для обеспечения адгезии слоев материалов к поверхности подложек, как традиционно считают, необходимо образование химических связей

между атомами и молекулами слоев к поверхности подложки, прохождение взаимной диффузии веществ контактирующих материалов. Адгезия нарушается при наличии на поверхностях пыли, жировых пятен, других загрязнений [1–2].

Обнаруженная в экспериментах плохая адгезия слоев используемого резиста SU-8 к подложкам из стеклоглерида может быть связана с химической инертностью стеклоглерида. Недостаточная адгезия выявляется на этапе проявления экспонированного слоя в виде отделения участков слоя от подложки.

В настоящей работе рассматриваются указанные ниже направления поиска технологических приемов улучшения адгезии и предварительные результаты работ по этим направлениям.

А) Резистивные пленки наносятся на полированные подложки из стеклоглерида.

Б) Резистивные пленки наносятся на шлифованные подложки из стеклоглерида.

В) Перед нанесением резиста поверхность подложки покрывается металлической пленкой. Металлическая пленка необходима и сама по себе для обеспечения возможности гальванического выращивания на рентгеношаблоне металлических слоев, поглощающих рентгеновское излучение и играющих роль слоя маски. Нанесение металлической пленки проводилось магнетронным распылением в установке Edwards auto 500 system, наносились пленки меди или титана.

После проведения технологических операций качество адгезии пленок к подложкам контролировалось. В случае металлических пленок использовались протирание поверхности пленки бязью, смоченной в спирте; царапание поверхности стальной иглой с контролем под микроскопом; отрыв пленки от подложки клейкой лентой [3]. Адгезия резистивных пленок оценивалась контролем полученных после проявления резиста структур на подложках под микроскопом с увеличением 50х.

Подготовка подложек к нанесению резиста осуществлялась в несколько этапов:

- Шлифовка подложек с использованием абразивных порошков;
- Полировка подложек на установке POLI- 300;
- Отчистка подложек химическими методами (обработка поверхности включает в себя промывку в различных органических растворителях, кипячение в кислотах, отчистку в парах растворителя, кипячение в деионизованной воде);
- Металлизация подложек в установке магнетронного распыления Edwards auto 500 system.

Затем на подложку наносился методом центрифугирования на установке SPINCOATER MODEL P6700 слой рентгенорезиста SU-8 толщиной 30 мкм;

экспонирование могло проводиться или облучением через рентгеношаблон на станции экспонирования СИ, или засветкой через фотошаблон.

Экспериментальные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Экспериментальные результаты

Подложки	Количество, шт.	Качество адгезии
полированные	2	отслоение и разрушение резиста
шлифованные	2	адгезия пленки резиста хорошая
Полированные с пленкой меди	2	отслоение пленки металла, отслоение и разрушение структуры резиста
Полированные с пленкой титана	2	отслоение пленки металла, отслоение и разрушение структуры резиста
Шлифованные с пленкой меди	2	высокая прочность пленки, высокая адгезия, четкий рисунок структуры резиста
Шлифованные с пленкой титана	2	высокая прочность пленки, высокая адгезия, четкий рисунок структуры резиста

Получены следующие результаты:

– Полированные подложки: нанесенный металлический слой титана легко царапался иглой, повреждался отрывом клейкой ленты, но не повреждался при протирании бязью. Аналогичную адгезию имела пленка меди. Резистивный слой, нанесенный поверх металлического покрытия, после экспонирования и проявления отслаивался и наблюдались локальные разрушения структуры. Такие же результаты получены в случае резиста, нанесенного на подложку без металлизации;

– Шлифованные подложки: нанесенный металлический слой титана устойчив к царапанию иглой, к отрыву клейкой лентой и при протирании бязью. Аналогичные результаты показала пленка меди. Резистивный слой, нанесенный поверх металлического покрытия, после экспонирования и проявления имел хорошие адгезионные характеристики при протирании бязью и отрыве клейкой лентой. Такие же результаты испытаний у резиста, нанесенного на подложку без металлизации.

Обсуждение результатов. Как следует из вышеизложенного, приемлемые результаты по адгезии металлических и рентгенорезистивных слоев к стеклоуглеродным подложкам получены только при условии шероховатости ее поверхности. Средняя неровность поверхности составляет $\sim \pm 1-10$ мкм. Шероховатость подложки не мешает получать в слое рентгенорезиста SU-8 структуры с высоким аспектным отношением и разрешением до 5 мкм, т. к. при нанесении слоя резиста толщиной не менее 30 мкм методом

центрифугирования наружная поверхность слоя оказывается гладкой, а экспонирование слоя рентгеновским излучением проходит по всей толщине слоя равномерно. Однако, при гальваническом наращивании металлического пленочного слоя рентгеношаблона шероховатость подложки может привести к ухудшению точностных характеристик этого слоя. Поэтому разработка технологии получения структур рентгеношаблона на полированных подложках из стеклоуглерода будет продолжена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курс лекций [Электронный ресурс] / составитель А.И. Назаров.- Режим доступа: (www.kgtu.runnet.ru).
2. Смирнов, В.И. Физико-химические основы технологии электронных средств [Текст]: учебное пособие / В.И. Смирнов. - Ульяновск: УлГТУ, 2005.- 112 с.
3. Чесноков, В.В. Лазерные наносекундные микротехнологии [Текст] / Е.Ф. Резникова, Д.В. Чесноков.- Новосибирск: СГГА, 2003.-300 с.

© С.В. Пляскин, Б.Г. Гольденберг, 2009

УДК 528.2/.3

А.В. Кошелев

СГГА, Новосибирск

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В СОВРЕМЕННЫХ РАЗДЕЛАХ ФИЗИКИ

A.V. Koshelev

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

METHODICAL ASPECTS OF DEFINITION OF PROPAGATION VELOCITY OF WAVES IN MODERN PHYSICS

Phase and group velocities of waves are most frequently used in the research of physical processes and phenomena in dispersion media. The difference existing between phase velocities of ideal harmonic waves and real non-monochromatic waves comes into conflict with their physical interpretation, that sometimes brings some additional errors both in theoretical investigations and the results of physical measurements. The concepts developed at the beginning of the last century have not been properly estimated and now they need to be specified.

1. Введение

При изучении широкого круга физических явлений и выполнении высокоточных физико-технических измерений определение скоростей распространения волн различной природы в диспергирующих средах (ДС) имеет важное научное и практическое значение. Как известно, диспергирующими являются такие среды, показатель преломления которых зависит от частоты волны. Для световых волн к таким средами относятся: воздух, жидкости, стекло, для радиоволн – ионизированная плазма и т. п. Диспергирующие среды существуют для акустических, механических, электрических и многих других типов колебаний [1–6].

В современной физической литературе фазовая и групповая скорости волн в ДС и, соответственно, их показатели преломления в равной степени участвуют в количественной и качественной оценке, как самих физических явлений, так и измеряемых с их применением параметров [1, 5]. В настоящей работе рассматривается вопрос о правомочности использования понятия фазовой скорости для оценки экспериментальных данных и объяснения реальных физических процессов и явлений в ДС.

Известно, что фазовая скорость существует лишь для строго монохроматических волн на бесконечно большом интервале времени [1, 2, 5]. Однако реальные волны не удовлетворяют условию монохроматичности и

бесконечной продолжительности. К основным факторам немонохроматичности реальных волн относятся:

- Модуляция волн случайными процессами, сопровождающими генерацию волн;
- Ограничение (модуляция) по времени функцией включения и выключения;
- Дискретный характер излучений, например, в виде квантов света.

Отсюда следует вывод, что в природе идеальные гармонические (монохроматические) волны отсутствуют, следовательно, и фазовой скорости в ДС не существует. Использование фазовой скорости для реальных волн полностью оправдано лишь для недиспергирующих сред.

В учебниках физики, включая и специальную литературу по теории волн [5, 9, 12], для объяснения физических эффектов отражения и преломления волн в ДС часто используется понятия фазового показателя преломления. Иногда термин показатель преломления в ДС приводится без указания, к какой скорости он относится – к фазовой или групповой [11]. Причину этого явления автор видит в существующей противоречивости и недоопределенности изложения этих вопросов в отечественной и зарубежной литературе, что частично дезориентирует читателя. Например, уже давно в физико-технической и справочной литературе [3, 5, 7] указывается, что любые реальные волны не являются монохроматическими и распространяются в ДС только с групповой скоростью. Однако в этих же книгах при изложении теории и решении практических задач переходят к фазовым скоростям в ДС, обсуждая их как фактически существующие.

2. Общие положения

Значение фазового показателя преломления для фазовой скорости электромагнитных волн получают из решения известного волнового уравнения для электромагнитных волн (ЭМВ) [4]

$$\nabla^2 E = \frac{\mu\epsilon}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где ∇ – оператор Лапласа, t – время, E – напряженность электрического поля электромагнитной волны, μ и ϵ – магнитная и электрическая проницаемость среды, c – скорость света в вакууме.

Для однородных в пространстве и времени сред уравнение (1) имеет решение в виде идеальной гармонической волны

$$E(t) = E_1 \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где E_1 – амплитуда ЭМВ, ω – круговая частота, φ_0 – начальная фаза.

В этом случае фазовая скорость V_p гармонической ЭМВ определяется уравнением

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{n_p}, \quad (2)$$

где n_p – фазовый показатель преломления волны.

В действительности, реальные волны не являются гармоническими сигналами, а ДС неоднородны в пространстве и времени, вследствие чего волны в таких средах распространяются только с групповой скоростью [3, 6], а их направление распространения задается групповым показателем преломления. Однако эти положения, к сожалению, не получили должной оценки и применения в теории и практике распространения волн как в классической физике, так и в целом ряде смежных с ней научных и технических дисциплин [1–10].

Обычно распространение модулированных волн в ДС излагается с использованием фазовой скорости – для несущих волн и групповой скорости – для огибающих модулированных волн [1–10]. Такое положение существенно искажает как реальную физическую картину исследуемых процессов и явлений, так и интерпретацию результатов физических и технических измерений. Например, в работе [10] приводится утверждение, что фазовая скорость гауссова пучка в оптических системах больше скорости света в вакууме. В действительности и несущие волны, и переносимые ими модулирующие волны в диспергирующих средах распространяются только с групповыми скоростями, не превышающими скорость света в вакууме.

Остановимся более подробно на обосновании представления реального сигнала в виде случайно-модулированного колебания. В качестве наглядного примера рассмотрим рекордно стабилизированное излучение лазера, используемое в качестве квантового стандарта частоты [12]. В этом случае излучение лазера можно считать наиболее близким к идеальному монохроматическому излучению. Его относительная нестабильность частоты может оцениваться величиной порядка $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \cong 10^{-16}$, где $\Delta\omega$ – уход частоты, а

ω_0 – среднее значение частоты излучения за промежуток времени, устанавливаемый для кратковременной или долговременной стабильности частоты. Существующий уход частоты означает, что частота лазера $\omega(t)$ является случайной и непрерывно изменяющейся функцией, а, следовательно, излучение лазера всегда модулировано по частоте случайным процессом. Поскольку мгновенная частота излучения $\omega(t)$ определяется как производная функции фазы сигнала $\Psi(t)$ по времени $\omega(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt}$, то изменения частоты

будут приводить к фазовой модуляции по случайному закону. В свою очередь, случайные изменения фазы будут воздействовать на изменения амплитуды излучения и возникнет случайная амплитудная модуляция. Таким образом, реальная оптическая волна, даже стабилизированная, всегда модулирована одновременно по амплитуде, частоте и фазе случайными процессами и поэтому распространяется в ДС только с групповой скоростью [5, 14].

Электрическое поле излучения реального лазера $E(t)$ можно представить узкополосным (или квазимонохроматическим) случайным процессом или в упрощенном виде как квазигармоническое колебание

$$\dot{L}(t) = E_0(t) \cos[\omega(t) \cdot t + \varphi_0(t)] = \dot{L}_0(t) \cos \psi(t). \quad (3)$$

Здесь случайные функции изменения: $E_0(t)$ – амплитуды электрического поля, $\omega(t)$ – круговой частоты, $\varphi_0(t)$ – начальной фазы и $\psi(t)$ – полной фазы соответственно [5, 14].

Формула (3) не является единственной формой представления реальных квазимонохроматических волн. В ряде случаев можно пользоваться более удобной гармонической формой представления волн. Такой подход может быть использован в том случае, если оптическая волна (3) является стационарным случайным процессом, а усреднение производится, например, по постоянной времени фотоприемника во много раз превосходящей период световой волны [5, 14]. Тогда для узкополосных световых волн можно в некоторых случаях пользоваться более привычной формулой

$$\dot{L}(t) = E_0 \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0), \quad (4)$$

где $E_0 = \overline{E_0(t)}$, $\omega_0 = \overline{\omega(t)}$ и $\varphi_0 = \overline{\varphi_0(t)}$ – соответственно средние значения по времени: амплитуды, круговой частоты и фазы. При этом подразумевается, что волна (4) также распространяется в ДС с групповой скоростью, а ее характеристики получены из усредненных статистически параметров случайной волны.

Для спектрального анализа реального электрического поля $E(t)$, имеющего вид уравнения (3), воспользуемся комплексной спектральной плотностью амплитуды $S(\omega)$, полученной на достаточно большом интервале времени, с использованием преобразования Фурье

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(t) \cdot e^{-j\omega t} dt, \quad (5)$$

где $j = \sqrt{-1}$. Спектр амплитуд $S(\omega)$ характеризует непрерывное распределение амплитуд случайного процесса $E(t)$ в зависимости от частоты ω . Это означает, что изменения частоты $\omega(t)$ приводят к случайным изменениям амплитуд спектра излучения $S(\omega)$, которые малы для определенного значения частоты ω , но различны по амплитуде для каждого значения частоты ω в пределах $\omega_1 < \omega < \omega_2$ рис. 1.

Учитывая, что реальную узкополосную оптическую волну, распространяющуюся вдоль вектора $\mathbf{r}$, через обратное преобразование Фурье можно представить следующим уравнением [4]

$$E(\mathbf{r}, t) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) \cdot \exp \left\langle -j \left\{ \omega \left(t - \frac{r}{V_g(\omega)} \right) \right\} \right\rangle d\omega, \quad (6)$$

где $V_g(\omega)$ – групповая скорость распространения спектральной составляющей с частотой ω .

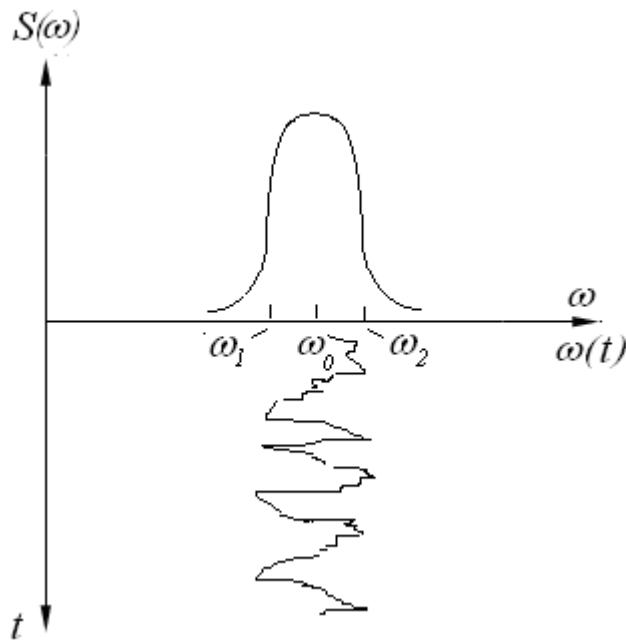


Рис. 1. Спектральная плотность электрического поля лазера $S(\omega)$ со средней частотой ω_0 при случайном изменении результирующей частоты излучения $\omega(t)$ от времени t

В данной работе принципиальным отличием от известных подходов является утверждение, что каждая спектральная составляющая реальной волны в диапазоне частот $\omega \in (\omega_1, \omega_2)$ распространяется в ДС с групповой скоростью $v_g(\omega)$, а не с фазовой, как это излагается в существующей литературе. В противном случае, можно было бы получать из случайного сигнала идеальное монохроматическое излучение. Однако это невозможно, т.к. фильтр с полосой пропускания равной нулю физически не реализуем. Спектральные составляющие $S(\omega)$ также являются модулированными по своему случайному закону для каждой конкретной частоты ω в полосе частот $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$.

Очевидно, что предлагаемый подход можно применить и к спектральной плотности реального сверхширокополосного излучения в ДС, например, фемтосекундного оптического импульса с длительностью τ_u и средней частотой оптической волны ω_0 , который будет занимать более широкий спектр $\Delta\omega_u \gg \Delta\omega$, показанный на рис. 2. Ширина спектра импульса определяется известным выражением

$$\Delta\omega_u \approx \frac{2\pi}{\tau_u}.$$

Спектральные составляющие импульса в диапазоне частот $\Delta\omega_u$ также будут распространяться с групповыми скоростями $v_g(\omega)$, как и сравнительно медленно изменяющаяся огибающая импульса.

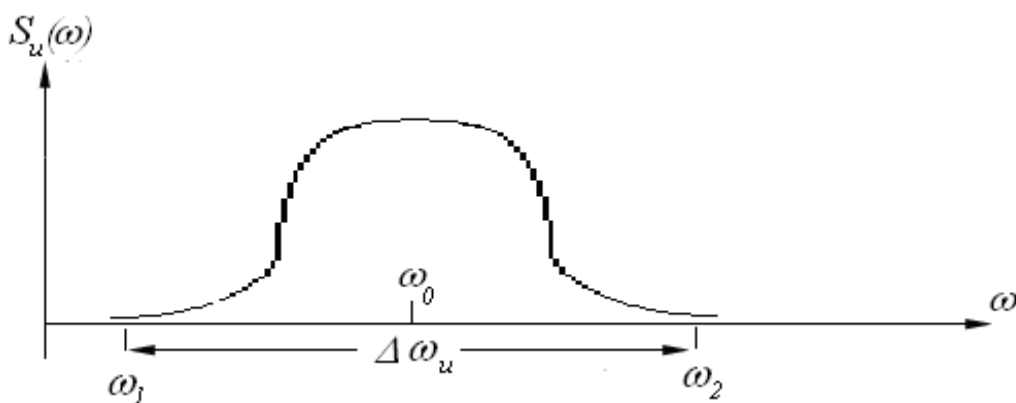


Рис. 2. Спектральная плотность одиночного сверхширокополосного оптического импульса

Приведенные выше рассуждения могут быть использованы для волн любой природы, распространяющихся в диспергирующих для них средах с групповой скоростью. Однако в данной работе предлагается учитывать два важных для практики аспекта:

- Определенная ранее экспериментально, так называемая фазовая скорость, в действительности является групповой скоростью и должна использоваться для реальных волн;
- То, что ранее называлось групповой скоростью, определенной по фазовой скорости через соотношение Рэлея в действительности является некорректным ее значением, поскольку как отмечено выше фазовой скорости для реальных волн не существует [15].

Перейдем к рассмотрению возможностей применения, предложенного автором подхода для решения конкретных задач.

3. Распространение радиоволн в ионосфере

В ионосфере наиболее наглядно проявляется физическое отсутствие фазовой скорости как реального параметра. В этом случае при использовании только групповых скоростей реальных радиоволн и их спектральных составляющих в диспергирующей ионосфере с аномальной рефракцией выявляются следующие преимущества. Отпадает необходимость объяснять, что фазовая скорость радиоволн в ионосфере «может превышать скорость света в вакууме» [6]. По этому вопросу в существующей литературе возникает парадоксальная ситуация, при которой вначале искусственно вводится понятие фазовой скорости для монохроматической радиоволны в диспергирующей среде, которой нет и быть не может. Затем утверждается, что она может распространяться со скоростью большей, чем скорость света в вакууме. Хотя известно, что любая волна переносит энергию, даже будь она монохроматической, а скорость переноса энергии не может превышать скорость света в вакууме. При этом объясняется, что с такой скоростью распространяется фаза монохроматической волны, хотя и фаза определяет конкретное значение амплитуды волны. В действительности, поскольку нет фазовой скорости, то и

нет волн, распространяющихся со скоростью большей, чем скорость света в вакууме.

Однако автор не отрицает возможности использования фазовой скорости в ДС как гипотетического параметра, применяемого для чисто теоретических исследований там, где без этого нельзя обойтись. При этом необходимо указание на теоретическую направленность вводимого параметра. Практически фазовую скорость в ДС измерить невозможно, но ее можно рассчитать, используя теоретические модели [2, 6], или вычислить по значению групповой скорости. Например, для определения фазового показателя преломления радиоволн по известному значению группового показателя преломления с помощью уравнения $n_{ph} \cdot n_g = 1$. Это может потребоваться, например, для проверки адекватности теоретически построенных моделей ДС к их реальным моделям. Однако вывод групповой скорости по теоретическим значениям фазовой скорости не является точным и на практике для этих целей пользуются результатами экспериментальных определений групповых скоростей или дисперсионными методами измерений группового среднеинтегрального показателя преломления ионосферы [18].

4. Отражение и преломление света



Рис. 3. Отражения и преломление волн на границе двух сред

В существующей литературе отражение и преломление света на границе двух ДС излагается с использованием фазовых скоростей и фазовых показателей преломления [1–10]. Рассмотрим эти вопросы с учетом реальных групповых скоростей ДС. Пусть такими средами являются воздух и стекло, где волны распространяются групповыми скоростями V_{g1} и V_{g2} . Положим, что граница двух плоских однородных ДС 1 и 2 проходит вдоль оси X, а плоская волна падает под углом θ_1 к нормали Z и разделяется на две волны: отраженную и преломленную рис. 3.

Используя известные формулы [4], запишем законы преломления и отражения в следующем виде

$$\frac{\sin \theta_1}{V_{g1}} = \frac{\sin \theta_2}{V_{g2}} = \frac{\sin \theta_0}{V_{g1}}, \quad (15)$$

где $\theta_0 = 180^\circ - \theta_1$.

Учитывая, что излучение в диспергирующих средах распространяется с групповой скоростью, то

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{V_{g1}}{V_{g2}} = \frac{n_{g2}}{n_{g1}}. \quad (16)$$

Таким образом, направления реальных волн при отражении и преломлении в диспергирующих средах определяются групповыми показателями преломления, а не фазовыми [5].

5. Распространение волнового пакета в воде

Пример некорректного использования фазовой скорости для анализа расползания во времени в диспергирующих средах волнового пакета, по мнению автора, приведен в популярном учебнике Ф. Крауффорда [6]. Речь идет о волновом пакете синусоиды рис. 4, состоящей из нескольких периодов несущей волны. Автор учебника утверждает, что «стрелка», перемещающаяся с

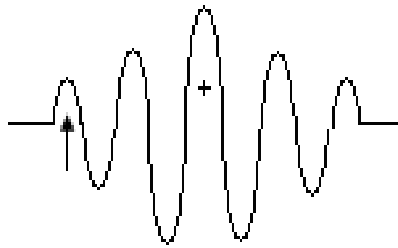


Рис. 4. Волновой пакет, возмущенной воды [6]

фазовой скоростью, следуя за точкой постоянной фазы, движется в два раза большей скоростью, чем скорость «креста», характеризующего групповую скорость гребня волны. Такой вывод содержит две неточности. Во-первых, фазовая скорость отсутствует в диспергирующей среде, т. к. это было показано выше. Во-вторых, необходимо анализировать только групповые скорости отдельных спектральных составляющих, полученных из преобразования Фурье волнового пакета. В этом случае групповая скорость отдельных составляющих спектра с длиной волны $\lambda \approx 1.7$ см может распространяться с групповой скоростью, превышающей в два раза групповую скорость переноса расползающегося гребня волны.

6. Атомная физика

Поскольку скорость квантовомеханических частиц для диспергирующих сред в представлении волн де Бройля определяется скоростью волнового пакета [6], то и как в предыдущем случае, каждая спектральная составляющая пакета будет распространяться также с групповой скоростью, а не с фазовой. Совокупность спектральных составляющих волнового пакета, полученных из преобразования Фурье (5) и распространяющихся с групповыми скоростями, в окончательном виде даст реальную скорость волнового пакета. В случае необходимости получения теоретического значения фазовой скорости v_{ph} , как и для радиоволн в ионосфере, можно воспользоваться соотношением $v_{ph} \cdot v_g = c^2$.

В определенной степени это касается и методики изложения теории излучения Вавилова – Черенкова [8], при обсуждении которой в существующей литературе используется фазовая скорость света в диспергирующей среде.

7. Заключение

Отметим, что рассмотренные выше примеры отражают далеко не полный круг задач, к которым могли бы быть применены рассматриваемые в данной работе подходы. Краткий обзор представленных в данной работе исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. В диспергирующих средах описание физических процессов распространения реальных волн должно выполняться с использованием групповых скоростей.

Любые экспериментальные измерения скоростей волн и их спектральных составляющих в диспергирующих средах, соответствуют их групповым скоростям.

В физике и технических дисциплинах понятия фазовая скорость и фазовый показатель преломления реальных волн в диспергирующих средах, как не имеющие реальной основы существования, должны быть заменены на групповую скорость и групповой показатель преломления. Фазовая скорость волн в диспергирующих средах не может быть измерена, но возможно ее вычисление и использование для теоретических целей в качестве вспомогательного параметра для идеальной гармонической волны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И. В. Курс общей физики: Волны Оптика. - М.: Астрель, 2002. - 256 с.
2. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. - М.: Наука, 2004. - 656 с.
3. Физическая энциклопедия. - М.: Советская энциклопедия. 1988. - 699 с.
4. Борн М, Вольф Э. Основы оптики. - М.: Наука, 1970. - 855 с/
5. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. - М.: Наука, 1985. - 792 с.
6. Крауфорд Ф. Берклиевский курс физики. Волны.- М.: Наука, 1984. - 432 с.
7. Ландсберг Г.С. Оптика. - М.: Физматлит, 2006. - 848 с.
8. Горелик Г.С. Колебания и волны. - М.: Физматгиз, 1959. - 486 с.
9. Дитчберн Р. Физическая оптика. - М.: Наука, 1965. - 632 с.
10. Матвеев А.Н. Оптика. - М.: Высшая школа, 1985. – 351 с.
11. Калитиевский Н.И. Волновая оптика. - М.: Высшая школа, 1995. - 463с.
12. Хаус Х. Волны и поля в оптоэлектронике. - М.: Мир, 1988. - 131 с.
13. Уизем Д. Линейные и нелинейные волны. - М.: Мир, 1977. - 622 с.
14. Reichert J et al. Opt. Commun., 172, 59 (1999).
15. Grewal S, Weil L, Andrews F, Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration (Jon Willey&Sons, Inc. 2001).
16. Бутиков Е И Оптика. - БХВ-Петербург, 2003.- 480 с.

УДК 528.2/.3

*А.В.Кошелев, А.П. Карпик, О.К. Ушаков,
В.А. Кошелев, А.К.Синякин, М.П. Савченко*
СГГА, Новосибирск

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

*A.V. Koshelev, A.P. Karpik, O.K. Ushakov,
V.A. Koshelev A.K. Sinyakin, M.P. Sawchenko*
Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)
10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

DETERMINATION OF REFRACTIVE INDEX OF EARTH ATMOSPHERE IN GEODESIC MEASUREMENTS

The paper proves that there is no phase velocity as concerns real optical waves in the dispersion atmosphere. These waves propagate with group velocity. The group refractive index is shown to be applied for processing of linear interferometer measurements, modulation laser rangefinder measurements as well as for angular measurements in geodesy, astronomy and metrology.

Фазовый и групповой показатели преломления оптических волн в атмосфере повсеместно используются в геодезии, астрономии и других областях науки и техники для учета влияния диспергирующей среды на результаты угловых и линейных измерений. В настоящее время фазовый показатель преломления атмосферы широко применяется для определения углов рефракции в геодезии, астрономии, метрологии, оптике, специальных системах наведения лазерного и оптического излучения и других областях науки и техники [1, 2].

Отдельно отметим использование фазового показателя преломления:

- В интерферометрии при измерении расстояний и в интерферометрах-рефрактометрах для определения показателя преломления среды;
- В дисперсионной угловой рефрактометрии, а также для определения поправок за рефракцию инструментальными интерференционными методами.

Групповой показатель преломления используется для определения групповой скорости распространения света в модуляционной импульсной и фазовой лазерной дальнометрии, дисперсионной рефрактометрии с использованием внешней модуляции. Поэтому уточнение правомочности используемых терминов и формул для определения показателей преломления оптических волн в атмосфере является важной и актуальной задачей.

Фазовая v_{ph} и групповая v_g скорость определяются по известным формулам

$$v_{ph} = \frac{c}{n_{ph}} \text{ и } v_g = \frac{c}{n_g}, \text{ где } c - \text{ скорость света в вакууме; } n_{ph} - \text{ фазовый, а } n_g -$$

групповой показатели преломления в диспергирующей атмосфере.

Скорость света в вакууме определена с высокой точностью и в настоящее время ее относительная погрешность оценивается величиной порядка 10^{-9} . Основной вклад в погрешность определенной скорости световых волн в диспергирующих средах, к которым относится нижний слой атмосферы – тропосфера, вносят погрешности определения соответствующих значений показателей преломления. В настоящее время существует большое количество различных точек зрения на понятия фазовой и групповой скорости, а, следовательно, и на их показатели преломления, включая и взаимнопротивоположные.

В этой работе обсуждаются понятийные и методические проблемы определения фазового и группового показателей преломления атмосферы. Поскольку методически неправильное определение значений фазовых и групповых показателей преломления приводят к систематическим искажениям угловых поправок за рефракцию и скорости распространения электромагнитных волн при измерении дальностей.

Фазовая скорость в диспергирующей среде относится к идеальной монохроматической световой волне и является скоростью перемещения амплитуды с одинаковым значением фазы. Поверхность одинаковых значений фаз определяет положение такого неэнергетического параметра, как волновой фронт, задающий угол распространения идеального излучения в диспергирующей среде. При этом считается, что рассматриваемая волна строго монохроматична и существует на временном интервале от $-\infty$ до $+\infty$. Однако любое реальное излучение, используемое для измерений, ограничено по времени, и в строгом смысле всегда немонохроматично и модулировано. Отсюда следует вывод, что в диспергирующей среде фазовой скорости не существует.

В этом случае для определения скорости переноса энергии (мощности, амплитуды) реального излучения и направления его переноса используется групповой показатель преломления, как для модулированного, так и для излучения без внешней модуляции [3]. К сожалению именно это определение групповой скорости излучения и направления его переноса не учитывается в существующих результатах определения показателей преломления, а, следовательно, и в результатах измерений с использованием реальных оптических волн.

Так, например, модуляция любого излучения осуществляется функцией включения и выключения, а также случайным процессом, обусловленным физической природой света как потока квантов, имеющих дискретный, вероятностный характер, включая воздействие других дестабилизирующих факторов, сопровождающих процесс генерации и переноса оптического излучения. Известно, что даже рекордно стабилизированное излучение лазера, например, с относительной стабильностью 10^{-16} нестабильно по частоте, а,

следовательно, оно модулировано по частоте случайным процессом. Поскольку частота определяется как производная функции фазы сигнала по времени, то будет осуществляться и фазовая модуляция по случайному закону. В свою очередь, случайные изменения фазы будут воздействовать на изменения амплитуды излучения и возникнет случайная амплитудная модуляция. Таким образом, реальная оптическая волна всегда модулирована одновременно по амплитуде, частоте и фазе [4].

Существует мнение, что воздействие этих факторов очень мало и ими можно пренебречь, особенно на стабилизированное по частоте излучение. В действительности это не так. Например, мгновенные изменения частоты оптической волны по случайному закону во времени будут относиться к непрерывному изменению текущего мгновенного значения амплитуды излучения, поэтому и будет изменяться (модулироваться) вся энергия световой волны. Из сказанного следует вывод, что любое реальное излучение (даже при отсутствии внешней модуляции) всегда модулировано случайным процессом и поэтому может распространяться в диспергирующей среде только с групповой скоростью. Лишь в не диспергирующих средах групповая скорость совпадает с фазовой скоростью.

Анализ литературных источников показывает, что в настоящее время автором основополагающих работ по определению коэффициента преломления воздуха для оптических волн является шведский ученый Эдлен (Edlen)) [1,2]. Однако в своих работах он использует лишь термин показатель преломления - «refractive index» и не дает определения, для какого показателя преломления его формулы получены фазового или группового. Исторически сложилось так, что реальную волну заменили идеальной, а полученное Эдленом значение показателя преломления получило название фазового показателя преломления (phase refractive index). Поскольку значения показателя преломления Эдлен получил из интерферометрических измерений, используя реальное излучение, то, как это показано выше излучение распространялось с групповой скоростью, а, следовательно, им был определен групповой показатель преломления (group refractive index), а не фазовый, как это принято считать в существующей литературе [5]. Не смотря на то, что в целом ряде работ, том числе геодезических, например, [6] указывалось, что для интерферометрических измерений следует использовать групповой показатель преломления, но надлежащих выводов сделано не было.

На основании этого, уточненная формула Эдлена в виде группового, а не фазового показателя преломления для стандартных условиях (температура в градусах Кельвина $T_0 = 288.15^\circ \text{K}$ ($t_0 = 15^\circ \text{C}$), давление $P_0 = 1013.25 \text{ мб}$ (760мм. рт. ст.), влажность $e_0 = 0$ «сухой воздух» и 0.03 % углекислого газа в воздухе) в форме представления Зельмейера записывается уравнением [2]:

$$(n_{0g} - 1)10^6 = 83.4213 + \frac{24060.30}{(130 - \sigma^2)} + \frac{159.97}{(38.9 - \sigma^2)}, \quad (1)$$

где $\sigma = \frac{1}{\lambda}$ – волновое число в м^{-1} , λ – длина волны в мкм.

Выражение (1) после несложных преобразований и без потери точности можно представить в форме уравнения Коши

$$(n_{g0} - 1)10^6 = 272.6129 + \frac{1.5294}{\lambda^2} + \frac{0.01367}{\lambda^4}. \quad (2)$$

В этой работе дисперсионную формулу фазового показателя преломления идеализированного монохроматического излучения для стандартных условий n_{ph0} , имеющего лишь теоретическое значение, определим в форме уравнения Коши

$$(n_{ph0} - 1) \cdot 10^6 = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}, \quad (3)$$

где A , B и C – постоянные коэффициенты.

Поскольку фазовый показатель преломления может быть получен с помощью известного уравнения Релея [6], связывающего между собой фазовый и групповой показатели преломления

$$n_{g0} = n_{ph0} - \lambda \left(\frac{dn_{ph0}}{d\lambda} \right). \quad (4)$$

После подстановки выражения (3) в формулу (4) получаем

$$(n_{g0} - 1)10^6 = A + \frac{3B}{\lambda^2} + \frac{5C}{\lambda^4},$$

или в виде уравнения (2)

$$(n_{g0} - 1)10^6 = 287.6129 + \frac{3 \cdot 0.5098}{\lambda^2} + \frac{5 \cdot 0.002734}{\lambda^4}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) определяем искомые значения коэффициентов $A=287.6129$, $B=0.5098$ и $C=0.002734$ в формуле (2), что позволяет представить фазовый показатель преломления идеализированной волны для стандартных условий в виде

$$(n_{ph0} - 1) \cdot 10^6 = 287.6129 + \frac{0.5098}{\lambda^2} + \frac{0.002734}{\lambda^4}. \quad (6)$$

Для условий отличных от стандартных групповой показатель преломления воздуха можно вычислить, используя формулы Баррелла и Сирса [7]

$$(n_g - 1) \cdot 10^6 = (n_{g0} - 1) \cdot 10^6 \frac{T_0 \cdot P}{P_0 \cdot T} - \left(17.045 - \frac{0.5572}{\lambda^2} \right) \frac{e}{T}. \quad (7)$$

Аналогичным образом, можно получить формулу идеализированного фазового показателя преломления оптических волн атмосферы

$$(n_{ph} - 1) \cdot 10^6 = (n_{ph0} - 1) \cdot 10^6 \frac{T_0 \cdot P}{P_0 \cdot T} - \left(17.045 - \frac{0.5572}{\lambda^2} \right) \frac{e}{T}. \quad (8)$$

Значение фазового показателя преломления может быть использовано для оценки искажения измерений при замене идеального фазового на реальный групповой показатель преломления.

Возникает естественный вопрос, почему для модуляционных светодальномеров с использованием ошибочных формул групповых показателей преломления [5], это расхождение не было обнаружено по

результатам линейных измерений эталонных базисов. Дело в том, что систематические искажения дальности маскировались определением приборных поправок и ошибками определения среднеинтегрального показателя преломления атмосферы [7].

ВЫВОДЫ

1. Формула Эдлена (1) , которая раньше была известна как фазовый показатель преломления, в действительности, является групповым показателем преломления для стандартных условий. Она рекомендуется к использованию в уравнении (7) для обработки интерференционных линейных измерений, выполненных интерферометрами типа Майкельсона, Вайсяля, в модуляционных импульсных и фазовых светодальномерах, а также в светодальномерах-рефрактометрах и интерферометрах-рефрактометрах.

2. Для учета угловой рефракции атмосферы в результаты угловых измерений с использованием лазеров и источников видимого излучения также рекомендуется использовать формулу (7), как это делалось и раньше, но под названием группового, а не фазового показателя преломления.

3. Формулы, которые до настоящего времени назывались групповыми показателями преломления [5] и использовались в модуляционных непрерывных и импульсных светодальномерах для этих целей непригодны, так как они получены уже из групповых показателей преломления оптических волн.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Edlen B. 1953. The Dispersion of Standart Air . J. Opt. Soc. Am, 43: 339-344.
2. Edlen B. 1966. The Refractive Index of Air. Metrologia, 2(2): 12-80.
3. Физическая энциклопедия / Под. ред. А.М. Прохорова. – М.: Советская энциклопедия, 1988.- 699 с.
4. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. – М.: Наука, 2004.
5. Камен Х. Электронные способы измерений в геодезии / Пер. с нем. – М.: Недра, 1982.- 256 с.
6. Прилепин М.Т., Голубев А.Н., Медовиков А.С. О фазовой и групповой скорости света при интерференционных методах измерения расстояний // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.- 1982. - № 4.- С. 25-31.
7. Радиогеодезические и электрооптические измерения./ Большаков В. Д., Деймлих Ф., Голубев А.Н., Васильев В.П. - М.: Недра, 1985.- 303 с.

© А.В.Кошелев, А.П. Карпик, О.К. Ушаков,
В.А. Кошелев, А.К.Синякин, М.П. Савченко, 2009

УДК 681.3.06(075.8)

Г.А. Сырецкий

СГГА, Новосибирск

МНОГОАГЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТЕХНИЧЕСКОМ ОБРАЗОВАНИИ

G.A. Syretsky

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

THE MULTIAGENT SYSTEMS IN INDUSTRY AND TECHNICAL EDUCATION

In the article to show principal conditions, which are formed multiagent-technologies and systems. Directions of development and use multiagent systems for the industrial purposes and preparation of the modern engineering staff are shown.

Интеграция различных результатов из области искусственного интеллекта, распределенных компьютерных систем и параллельных вычислений привносит ряд новых свойств и возможностей в информационные и промышленные технологии, ориентированные на решение сложнейших проблем.

В нынешних условиях на роль ведущей информационной технологии в широком круге приложений для производственной сферы [1, 2] и технического образования претендуют информационно-телекоммуникационные технологии, базирующиеся на моделях агентов [3]: многоагентных (мультиагентных) систем и интеллектуальных мультиагентных систем (распределенных интеллектуальных систем).

В настоящее время под многоагентной системой подразумевают совокупность взаимодействующих друг с другом агентов (в форме программных роботов, аппаратных либо программно-аппаратных компонентов), которые, в общем случае, могут мигрировать по распределенной разнородной сети в поисках релевантной информации (данных, знаний, процедур) и кооперироваться в процессе выработки решений, удовлетворяющих информационные и вычислительные потребности конечных пользователей (человека, программы, технического устройства).

Под термином «агент» понимают сущность, наделенную полномочиями действовать в активной информационной среде от имени другой сущности. Причем в зависимости от обстоятельств агент может обладать способностью изменения своего состояния: быть активным, пассивным либо ликвидироваться.

Наделение агента информационного пространства интеллектуальными свойствами становится весьма полезным и нужным как в тренинге

пользователя, так и при решении задач по его поручению, в сетевой навигации и процессах компьютерного мониторинга. Понятно, что подобное дозволено лишь агенту, обучившемуся привычкам и предпочтениям пользователя.

Согласно современным представлениям под интеллектуальным агентом понимают относительно автономную систему, которая способна:

- Функционировать без постороннего вмешательства. Это означает, что агент может накапливать и использовать собственные ресурсы, контролировать собственное состояние и поведение, генерировать цели (автономность);
- Стремиться к некоторым целям, вытекающим из определенных потребностей (целенаправленность);
- Воспринимать частично доступную ему информацию из внешнего мира и от других агентов (неопределенность обстановки);
- Строить на основе восприятия частичное представление внешней среды и поведения других агентов (собственное представление мира, убеждения);
- Реагировать своевременно на воспринятое изменение состояния среды функционирования и других агентов (реактивность);
- Действовать на объекты внешней среды, других агентов (действие);
- Изменять собственное состояние. Это значит, что известно значение любого параметра, характеризующее состояние агента, его критериальная и желательная оценки (желания). Требуемые состояния обычно полностью не достижимы из-за возникающих при стремлении к ним противоречий;
- Взаимодействовать с другими агентами на общепринятом языке коммуникаций (соционическое поведение);
- Нести определенные (желаемые и нежелательные) обязанности и предоставлять услуги. Они рассматриваются как набор алгоритмов, применение каждого из которых зависит от обстановки во внешней среде, информации, получаемой из нее, и достаточности агентских ресурсов (обязательства);
- Проявлять собственную инициативу (активность);
- Обучаться и адаптироваться в среде и сообществе агентов (приспособляемость);
- Самоорганизовываться, саморазвиваться и самовоспроизводиться (эволюционирование).

Взаимодействие интеллектуальных агентов может происходить с учетом решения системой единой проблемы (объединенное взаимодействие) либо на основе консенсуса (состязательное взаимодействие), вытекающего из их собственных различных интересов. В ходе работы интеллектуальный агент оценивает надежность информации, приходящей из внешнего мира, агентов и совместно принимаемых решений.

Современные интеллектуальные агенты имеют сложную многоуровневую систему управления, которая обеспечивает их совместную работу и взаимодействие с человеком. Сложность поведения таких агентов

приводит к необходимости использования нетрадиционных путей построения их систем управления.

В настоящее время предлагается обратить внимание на использование в системах управления агентов принципов организации нервной системы человека, которые выявлены современной психологией и нейрофизиологией, а также когнитивных принципов и нейрологических компонент [4].

Особое значение для поддержки работоспособности агентов в изменяющихся условиях приобретает применение в них имитатора генетической системы, обеспечивающей своевременную самоорганизацию искусственных нейросетевых систем управления.

Также перспективно применение в системах управления агентами аналога иммунной системы живых существ, которая будет следить за нормальным функционированием всех компонент как агентов, так и мультиагентной среды в целом [5].

На взгляд автора, новые перспективы использования интеллектуальных агентов открываются для исследователей и разработчиков наноматериалов, нанотехнологий и наносистем различного назначения.

Ныне применение технологий многоагентных систем в области образования проявляется при построении интеллектуальных обучающих систем, поддерживающих организацию взаимодействия разных источников знаний (например, предметных, методических и педагогических) и тем самым повышающих эффективность деятельности как обучаемых так и обучающихся. Примерами агентов подобной системы являются агенты интерфейса обучающего, интерфейса обучаемого, агенты отдельных объектов знания, агенты онтологий (персональные помощники преподавателей и обучаемых) и агенты-координаторы взаимодействий.

В докладе обсуждаются с различных точек зрения принципы построения, структуры и компоненты моделей различных агентов и современных многоагентных систем, ориентированных как на применение в промышленности, так и в техническом образовании. Кроме того, уделяется внимание программным инструментальным средствам, позволяющим разрабатывать мультиагентные системы различного назначения, в том числе работающие в виртуальных средах. Среди них обсуждается и демонстрируется инструментальная программная среда построения многоагентных систем MASDK, разработанная в Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации Российской академии наук.

На взгляд автора, в ближайшей перспективе в технических вузах и центрах переподготовки специалистов для промышленной сферы повышение эффективности деятельности преподавателей и обучаемых и накопления информации о них можно будет достичь при применении интеллектуальных мультиагентных систем электронного обучения и управления проектированием, организацией и мониторингом учебного процесса, интегрирующих инструменты и интерактивные технологии цифровых производств, виртуальных разработок, виртуальной реальности, виртуальных миров, умного пространства и биологической обратной связи [6]. Указанные технологии, обсуждаемые в

докладе, дают возможность сформировать у обучаемых в трехмерном интерактивном пространстве, создаваемом на мониторе компьютера и/или на панорамном устройстве визуализации [7], различные компетенции, ориентированные на профессиональную деятельность в промышленности (например, касающиеся проектирования изделий и технологических процессов, симуляции и оптимизации работы автоматизированного производства). Благодаря снаряжению виртуальной реальности (например использованию современных VR-очков и VR-перчаток с беспроводными каналами передачи информации) обучаемый может приобрести навыки и опыт для работы в производственной среде. Технология биологической обратной связи возможно позволит не только отслеживать, запоминать текущее психофизиологическое и эмоциональное состояние обучающихся и обучаемых, но и приводить участников учебного процесса к наперед заданному состоянию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bussman, Stefan. Multiagent Systems for Manufacturing Control. A Design Methodology / Stefan Bussman, Nicholas R. Jennings, Michael Wooldridge. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
2. Weiss, G. (Ed). Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence. — MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2000.
3. Рассел, С. Искусственный интеллект. Современный подход, 2-е изд. / С. Рассел, П. Норвинг. — М.: Вильямс, 2006.
4. Станкевич, Л.А. Когнитивные нейробиологические системы управления / Л.А.Станкевич // Проблемы нейрокибернетики (Материалы XII Международной конференции по нейрокибернетике), Ростов-на-Дону, октябрь 1999). — Ростов-на-Дону, 1999.
5. Искусственные иммунные системы / Под ред. Д. Дасгупты. — М.: Физматлит, 2006.
6. Сырецкий, Г.А. Информатика. Фундаментальный курс. Том. II. Информационные технологии и системы. Учеб. для вузов / Г.А. Сырецкий. — СПб.: БХВ-Петербург, 2007.
7. Termath, W. Virtuell-interaktives training für RWE / W. Termath, P. Mecking // IFFocus. — Magdeburg. 2007. — №2. — P.22-25.

© Г.А. Сырецкий, 2009