

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»
(ФГБОУ ВПО «СГГА»)

VIII Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2012

Международная научная конференция

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ, ТЕПЛОФИЗИКА, МИКРОТЕХНИКА,
НАНОТЕХНОЛОГИИ**

Т. 1

Сборник материалов

Новосибирск
СГГА
2012

УДК 681.2:006:62:53:001
С26

Ответственные за выпуск:

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

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

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

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

Доктор технических наук, профессор, СГГА, Новосибирск
В.В. Чесноков

Кандидат технических наук, зав. кафедрой наносистем и оплотехники,
СГГА, Новосибирск
Д.В. Чесноков

Кандидат технических наук, зам. директора
Института оптики и оптических технологий СГГА, г. Новосибирск
П.В. Петров

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр., 10–20
апреля 2012 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Специализированное
приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» :
сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГГА, 2012. – 253 с.

ISBN 978-5-87693-522-9 (т. 1)

ISBN 978-5-87693-521-2

ISBN 978-5-87693-506-9

В сборнике опубликованы материалы VIII Международного научного
конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012», представленные на
Международной научной конференции «Специализированное
приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии».

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

УДК 622

ISBN 978-5-87693-522-9 (т. 1)

ISBN 978-5-87693-521-2

ISBN 978-5-87693-506-9

© ФГБОУ ВПО «СГГА», 2012

СОДЕРЖАНИЕ

В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, Ю.А. Фесько. Методика и алгоритм определения трехмерной формы объектов на основе поляризационных термограмм	9
М.Н. Кистерева, О.К. Ушаков, В.М. Тымкул. Методика и практические результаты натурных оптико-электронных измерений линейных величин	14
Г.А. Куриленко, С.В. Савелькаев, Г.В. Григорьева. Виброзащита и прочностная надежность оптических и опто-электронных приборов	20
В.Л. Парко, Т.Н. Хацевич. Влияние воздушного промежутка между компонентами телескопических объективов на хроматизм положения изображения	26
Д.Г. Макарова. Астрономический объектив с двухспектральным полевым компенсатором	31
А.С. Курбангалиева. Двухспектральный объектив видеокамеры микро БПЛА	34
И.Г. Пальчикова, Е.С. Смирнов. Особенности количественного анализа микроизображений клеток	39
В.П. Перминов, А.Н. Соснов, Н.К. Соснова, М.М. Кузнецов. Вопросы технологии и безопасности при магнетермическом получении и применении металлов подгруппы IVa периодической системы элементов	45
Р.У. Алиев, Н.Р. Рахимов, С.Р. Алиев, Е.Ю. Кутенкова. Разработка ПОИ с внутренним инжекционным усилением тока на основе поликристаллического кремния	51
Л.Б. Воробьева. Электропроводность образцов питьевой воды разной степени чистоты	57
С.А. Бабин, Д.О. Селюнин, В.А. Лабусов. Высокоскоростные анализаторы МАЭС	62
М.П. Исаев, Н.Р. Рахимов, О.К. Ушаков. Разработка оптоэлектронного устройства для определения качества и количества бензина на основе нарушенного полного внутреннего отражения	67
А.В. Кирьянов, В.П. Кирьянов, Д.Ю. Кручинин. Повышение точности синтеза и контроля топологии фотошаблонов интегральных датчиков физических величин	74
А.М. Ковалев, Е.В. Власов. Биплановое изображение, стимулирующее аккомодацию глаза	82
В.П. Корольков, А.С. Конченко. Применение волоконного спектрофотометрического блока CHR-150 для измерения глубины рельефа бинарных фазовых синтезированных голограмм	87
Г.И. Косолапов, П.П. Добровольский, С.М. Чурилов, К.П. Ша-тунов, В.В. Быков, П.А. Алдохин. Экспериментальные исследования паразитной фоновой составляющей сигнала в матричных ИК-фотоприемных устройствах	92

С.Н. Макаров, И.С. Глебус. Разработка опорного канала когерентного лазерного дальномера	97
М.М. Кузнецов, Н.К. Соснова, А.А. Марач. Технологичность изделий современного приборостроения	103
М.М. Кузнецов, А.Н. Соснов, Н.К. Соснова. Повышение информативности непрозрачных объектов	108
М.М. Кузнецов, А.Н. Соснов, А.А. Марач. Общие положения и основные задачи отработки изделий современного приборостроения на технологичность	112
Т.В. Ларина, Б.Н. Рахимов, С.Х. Шамирзаев. Оптоэлектронный неразрушающий метод контроля усталости металлических конструкций	118
Д.Г. Макарова, В.С. Ефремов. Коррекционные свойства полевого компенсатора астрообъектива в субмиллиметровом диапазоне длин волн	123
В.И. Наливайко, А.Н. Покровский, М.А. Пономарева, О.Я. Абель, А.Н. Соснов. Использование халькогенидных материалов для решения задач современных оптических технологий.....	128
Д.М. Никулин. Испытательный стенд для измерения спектральных характеристик перестраиваемых микромеханических интерферометров Фабри-Перо	133
Н.Р. Рахимов, Т.В. Ларина, И.А. Сатволдиев. Расчет основных параметров приемников оптического излучения для создания оптрона открытого канала.....	139
А.В. Турбин, Е.О. Ульянова, П.А. Алдохин, И.И. Кремис, С.А. Вергилес. Малогабаритный тепловизионный прибор для отработки алгоритмов обработки тепловизионного изображения.....	145
Е.О. Ульянова. Принципы построения схем объективов тепловизионных приборов.....	149
О.К. Ушаков, Е.Ю. Кутенкова, А.Н. Серьезнов. Автоматический колориметр на основе оптоэлектронных преобразователей.....	153
В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, А.С. Сырнева, Д.С. Михайлова. Интерференционные газовые спектроанализаторы	159
В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, А.С. Сырнева, Д.С. Михайлова. Спектральные характеристики комбинированных спектральных устройств с интерферометром Фабри-Перо	166
С.А. Шойдин. Моделирование дифракции на объёмных телах в среде МАТЛАБ.....	175
А.Г. Паулиш. Тепловые способы регистрации терагерцового излучения на основе новых материалов.....	179
И.И. Кремис, В.Н. Федоринин, В.М. Тымкул. Разработка и исследование перспективной системы оптико-электронной обработки сигналов в тепловизорах с матричными приемниками излучения	184
А.М. Ражев. Оптические технологии с использованием импульсных УФ лазеров для микроэлектроники и медицины	191

С.Г. Губин. Исследования внутрибаллистических параметров системы обратного метания.....	197
А.И. Родионов, С.В. Савелькаев, Г.А. Сырецкий. Об электромеханике управляемых систем высших порядков	203
С.В. Савелькаев. Динамическая гравитация механических систем в диссипативных средах	207
А.А. Гиенко. Программное обеспечение для визуализации трехмерных графиков	213
А.А. Гиенко. Использование цилиндрической зеркальной поверхности для построения трехмерных изображений с возможностью их кругового рассматривания.....	218
С.С. Овчинников. Анализ шероховатости непрозрачных поверхностей методом псевдоцветового кодирования.....	223
А.В. Кошелев, А.П. Карпик, А.К. Синякин, Ю.Г. Костына, С.С. Овчинников, Ю.В. Скипа, Н.В. Заржецкая. Ослабление влияния дисперсионного расплывания импульсов в атмосфере на работу прецизионных фемтосекундных лазерных дальномеров	226
Ю.Ц. Батомункуев. Стабилизация интерференционных полос в объеме деформируемой голографической среды.....	231
А.С. Рафаилович. Сопоставление методов расчёта термодетформаций элементов охлаждаемых тепловизионных устройств	239
И.В. Касаткин. Компьютерное моделирование изображений, формируемых тепловизионными приборами.....	245
Б.В. Поллер, В.М. Клементьев, А.В. Бритвин, Ю.Д. Коломников, А.Б. Поллер. Экспериментальные параметры терагерцовых полимерных фотонно-кристаллических волноводов.....	251

CONTENTS

V.M. Tymkul, L.V. Tymkul, Yu.A. Fesko. Method and algorithm for determining the form of three-dimensional objects on the basis of polarization thermogram	9
M.N. Kistereva, O.K. Ushakov, V.M. Tymkul. Methods and practical results of actual test optical-electronic measurement of linear sizes	14
G.A. Kurylenko, S.V. Savelkaev, G.V. Grigorieva. Vibration protection and strength reliability of optical and opto-electronic devices	20
V.L. Parko, T.N. Khatsevich. The influence of air gap between components of telescopic objectives on longitudinal chromatic aberration	26
D.G. Makarova. Astronomical objective with two-spectral field equaliser	31
A.S. Kurbangalieva. Two-spectral lens of small pilotless flying machine videocamera	34
I.G. Palchikova, E.S. Smirnov. Features of the quantitative analysis of micro-images of cells	39
V.P. Perminov, A.N. Sosnov, N.K. Sosnova, M.M. Kuznetsov. Technologies and safety problems in magnesium thermal production and application of periodic table IVa subgroup metals	45
R.U. Aliyev, N.R. Rakhimov, S.R. Aliyev, E.Yu. Kutenkova. Development of optical detectors with inner injection current amplification on the basis of polysilicon	51
L.B. Vorobyeva. Electroconductivity of drinking water samples with different purity degrees	57
S.A. Babin, D.O. Selyunin, V.A. Labusov. High-speed MAES analyzers	62
M.P. Isayev, N.R. Rakhimov, O.K. Ushakov. Development of opoelectronic device for detemining the quality and quantity of petrol on the basis of the frustrated total internal reflection effect	67
A.V. Kiryanov, V.P. Kiryanov, D.Yu. Kruchinin. Accuracy enhancement for synthesis and inspection process the photomask topology of physical quantity integral sensors	74
A.M. Kovalev, E.V. Vlasov. Biplane image stimulating accomodation of the eye	82
V.P. Korolkov, A.S. Konchenko. Application of fiber spectrophotometric unit CHR-150 for measurement of profile depth of binary phase computer-synthesized holograms	87
G.I. Kosolapov, P.P. Dobrovolsky, S.M. Churilov, K.P. Shatunov, V.V. Bykov, PA. Aldokhin. Experimental researches of the parasitic background component of the signal in infrared focal plane arrays	92
S.N. Makarov, I.S. Glebus. Development of the basic channel of a coherent laser range finder	97
M.M. Kuznetsov, N.K. Sosnova, A.A. Marach. General provisions and main problems of modern instrument-making products workability tryout	103
M.M. Kuznetsov, A.N. Sosnov, N.K. Sosnova. Opaque objects information capability improvement	108

M.M. Kuznetsov, A.N. Sosnov, A.A. Marach. General provisions and main problems of modern instrument-making products workability tryout.....	112
T.V. Larina, B.N. Rakhimov, S.Kh. Shamirzayev. Optoelectronic nondestructive technique for metal structures fatigue control	118
D.G. Makarova, V.S. Efremov. Correctional properties of astronomical objective field equalizer in submillimeter waves length range	123
V.I. Nalivaiko, A.N. Pokrovsky, M.A. Ponomarev, O.Ya. Abel, A.N. Sosnov. Use of chalcogenide materials for decision of modern optical technology problems	128
D.M. Nikulin. Test bench for spectral characteristics of tunable micromechanical interferometers Fabri-Pero measurement.....	133
N.R. Rakhimov, T.V. Larina, I.A. Satvoldiyev. Calculation of optical detectors basic parameters for open-channel optron development	139
A.V. Turbin, E.O. Ulyanova, P.A. Aldohin, I.I. Kremis, S.A. Ver-giles. The compact thermal imaging device for routine of processing algorithms of thermal image	145
E.O. Ulyanova. Construction principles of lenses schemes for thermal imaging devices	149
O.K. Ushakov, E.Yu. Kutenkova, A.N. Seryoznov. Automatic colorimeter based on optoelectronic converters	153
V.V. Chesnokov, D.V. Chesnokov, A.S. Syrneva, D.S. Mihajlova. Interferential gas spectrum analyzer	159
V.V. Chesnokov, D.V. Chesnokov, A.S. Syrneva, D.S. Mihajlova. Spectral characteristics of the combined spectral devices with interferometer Fabri-Pero.....	166
S.A. Shoydin. The report presents the model experiments for light diffraction on a 3-D objects using a flat Fresnel-Kirghoff transformation.....	175
A.G. Paulish. Thermal methods for terahertz radiation detection based on metamaterials	179
I.I. Kremis, V.N. Fedorinin, V.M. Tymkul. Development and research of perspective system for optical-electronic processing of signals in thermal imager with matrix radiation receivers	184
A.M. Razhev. Optical technologies with the use of the pulsed UV lasers for microelectronics and medicine.....	191
S.G. Gubin. Research into interballistic parameters of a back throwing system	197
A.I. Rodionov, S.V. Savelkaev, G.A. Syretsky. On elektromechaniks of control models systems of higher order	203
S.V. Saelkaev. Dynamic gravity of mechanical systems in dissipatie media.....	207
A.A. Gienko. The software for visualization of the three-dimensional diagrams	213
A.A. Gienko. Use of a cylindrical mirror surface for construction of the three-dimensional images with an opportunity of their circular viewing	218
S.S. Ovchinnikov. Analysis of opaque surfaces roughness by pseudocolour coding	223

A.V. Koshelev, A.P. Karpik, A.K. Sinjakin, Yu.G. Kostina, S.S. Ovchinnikov, Yuri V. Skipa, N.V. Zarzhetskaya. Elimination of dispersion spreading influence in atmosphere on high-precision femtosecond laser ranger operation.....	226
Yu.Ts. Batomunkuev. Stabilization of the interference fringes in volume of deformed holographic medium	231
A.S. Rafailovich. Comparison of methods for calculating the thermal deformations of elements of cooled thermal imaging devices	239
I.V. Kasatkin. Computer simulation of thermal imaging devices images.....	245
B.V. Poller, V.M. Klementyev, A.V. Britvin, Yu.D. Kolomnikov, A.B. Poller. Experimental parameters of teragercovyh polymer photonic crystal waveguides	251

МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ФОРМЫ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ТЕРМОГРАММ

Василий Михайлович Тымкул

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Наносистемы и оптотехника», тел. 8 (383) 352-11-59, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

Любовь Васильевна Тымкул

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Наносистемы и оптотехника», тел. 8 (383) 352-11-59, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

Юрий Александрович Фесько

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры «Наносистемы и оптотехника», тел. 8-913-752 92-38, e-mail: y.a.fesko@gmail.com

В работе описывается алгоритм и принципы построения объемных изображений объектов по их собственному поляризованному тепловому излучению на основе двух поляризационных термограмм.

Ключевые слова: поляризация, инфракрасное излучение, поляризатор, распознавание, трехмерная форма.

METHOD AND ALGORITHM FOR DETERMINING THE FORM OF THREE-DIMENSIONAL OBJECTS ON THE BASIS OF POLARIZATION THERMOGRAM

Vasily M. Tymkul

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russian Federation, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, PhD, professor, department of «Nanosystems and optical engineering», tel. 8 (383) 352-11-59, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

Lyubov V. Tymkul

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russian Federation, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, PhD, professor, department of «Nanosystems and optical engineering», tel. 8 (383) 352-11-59, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

Yuri A. Fesko

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russian Federation, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, PhD-student, department of «Nanosystems and optical engineering», tel. 8-913-752 92-38, e-mail: y.a.fesko@gmail.com

In article describes the algorithm and the principles of three-dimensional images of objects on their own polarized thermal emission from the two polarization thermograms.

Key words: polarization, infrared radiation, polarizer, recognition, three-dimensional form.

К настоящему времени тепловизионные приборы (ТВП) широко используются в самых разных отраслях науки и техники. Область применения начинается от локализации утечек тепла строительных ограждений и заканчивается идентификацией объектов. Поскольку ТВП строят изображение на контрасте температур и различии коэффициента излучения наблюдаемых элементов в поле зрения, то в получаемых изображениях теряется однозначная информация о форме объекта в пределах равномерно нагретых областей. В виду этого определение формы объектов внутри теплового контура – это на сегодня одна из актуальных задач в области тепловидения.

В работе [1] нами рассматривался вопрос о проблеме расширения информативности канала ТВП. Поскольку информативность классических тепловых изображений недостаточна для того, чтобы однозначно можно было судить о форме объекта внутри его теплового контура, их информативность необходимо расширить (рис. 1). Это достигается за счет получения поляризационных термограмм, которые реализуются введением в оптическую систему ТВП дополнительного устройства, которое представляет собой вращающийся инфракрасный (ИК) поляризационный фильтр. В работах [2, 3] приводится описание методики определения формы объектов внутри их теплового контура на основе поляризационных термограмм.

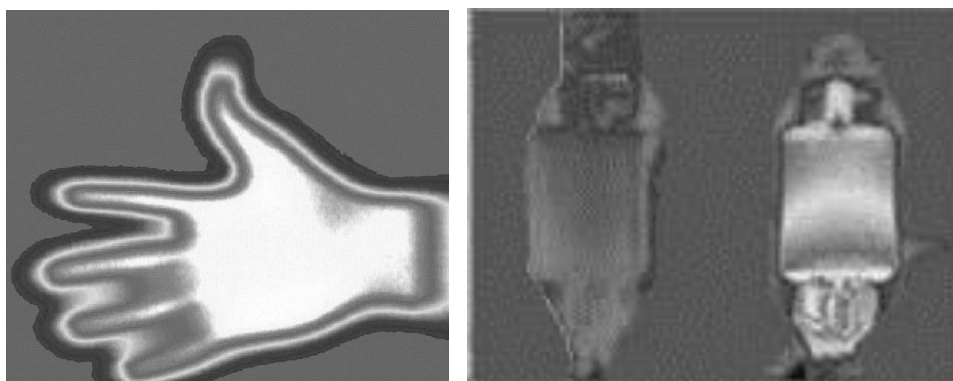


Рис. 1. Классические тепловые изображения

Для построения трехмерного изображения необходимо иметь информацию о трех координатах элементов объекта, две координаты плоскости изображения определяются номерами элементов изображения или многоэлементного фотоприемного устройства, а третья координата определяется на основе предложенной методики [2, 3].

Рассмотрим кратко предложенную методику, в основе которой производится обработка сигналов соответствующих элементов поляризационных изображений $U_1(n, l)$ и $U_2(n, l)$, полученных путем ввода в оптическую схему поляризационного фильтра и поворота вокруг оси в положение соответствующее 45 и 90 градусам азимута поляризации ИК излучения. В этом случае сигналы для каждого элемента математически описываются выражениями:

$$U_1(n,l) = U_0[1 + P(n,l)\sin 2t(n,l)\cos 2\gamma(n,l)]; \quad (1)$$

$$U_2(n,l) = U_0[1 - P(n,l)\cos 2t(n,l)\cos 2\gamma(n,l)]. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) величина U_0 равна:

$$U_0 = S \cdot \Phi \cdot \tau_o \cdot \tau_n \cdot \tau_a, \quad (3)$$

где S – чувствительность приемника излучения; τ_o , τ_n , τ_a – соответственно коэффициент пропускания оптической системы, поляризатора и слоя атмосферы между объектом и прибором; P , t , γ – степень, азимут и степень эллиптичности поляризации теплового излучения поверхности объекта; n , l – номер строки и элемента в строке исследуемых пикселей в изображении элементов поверхности объекта.

Установлено, что степень поляризации собственного оптического излучения объекта меняется в зависимости от угла ориентации участка излучающей поверхности объекта, эквивалентной площади одного чувствительного элемента приемного устройства, относительно направления её наблюдения. Эта зависимость описывается выражением [4]:

$$\psi(n,l) = \arccos[P_{\max} - P(n,l)], \quad (4)$$

где $P_{\max}$ – максимум степени поляризации теплового излучения; ψ – угол излучения (ориентации элемента поверхности объекта).

Зависимость степени поляризации излучения элемента поверхности от соответствующих видеосигналов изображения при прохождении излучения через поляризационный фильтр с азимутами поляризации 45 и 90 градусов представляется [3]:

$$P(n,l) = \frac{[U_1(n,l) - 1]}{\sqrt{2 \sin \left\{ \arctg \frac{[U_1(n,l) - 1]}{[1 - U_2(n,l)]} \right\} - [U_1(n,l) - 1]}}. \quad (5)$$

Необходимо отметить, что в указанной методике выполняется обработка двух поляризационных тепловых изображений сцены, но с различными азимутами поляризации, и одного классического теплового изображения. Как уже было отмечено выше, классические тепловые изображения явно содержат информацию о тепловом контуре объекта (рис. 1), а поскольку обрабатываются изображения одной сцены, то классическая термограмма служит основой при определении границы между контуром объекта и фоновой обстановкой.

На основе выражений (4), (5) производится расчет третьей координаты изображения. Определение третьей координаты производится в рамках контура исследуемого объекта, определенного ранее на основе классического теплового изображения. По результатам обработки выполняется построение трехмерного изображения поверхности объекта по формулам (6), (7):

$$x_n|_{z=\text{const}} = x_{n-1} + \Delta y_n \operatorname{tg} \psi_1; \quad (6)$$

$$x_l|_{y=\text{const}} = x_{l-1} + \Delta z_l \operatorname{tg} \psi_2, \quad (7)$$

где Δy_n и Δz_l – шаг сканирования вдоль координат OY и OZ ; ψ_1 , ψ_2 – проекции угла ψ на координатные плоскости XOY и XOZ .

Методика реализуется по алгоритму, который изображен на рис. 2.

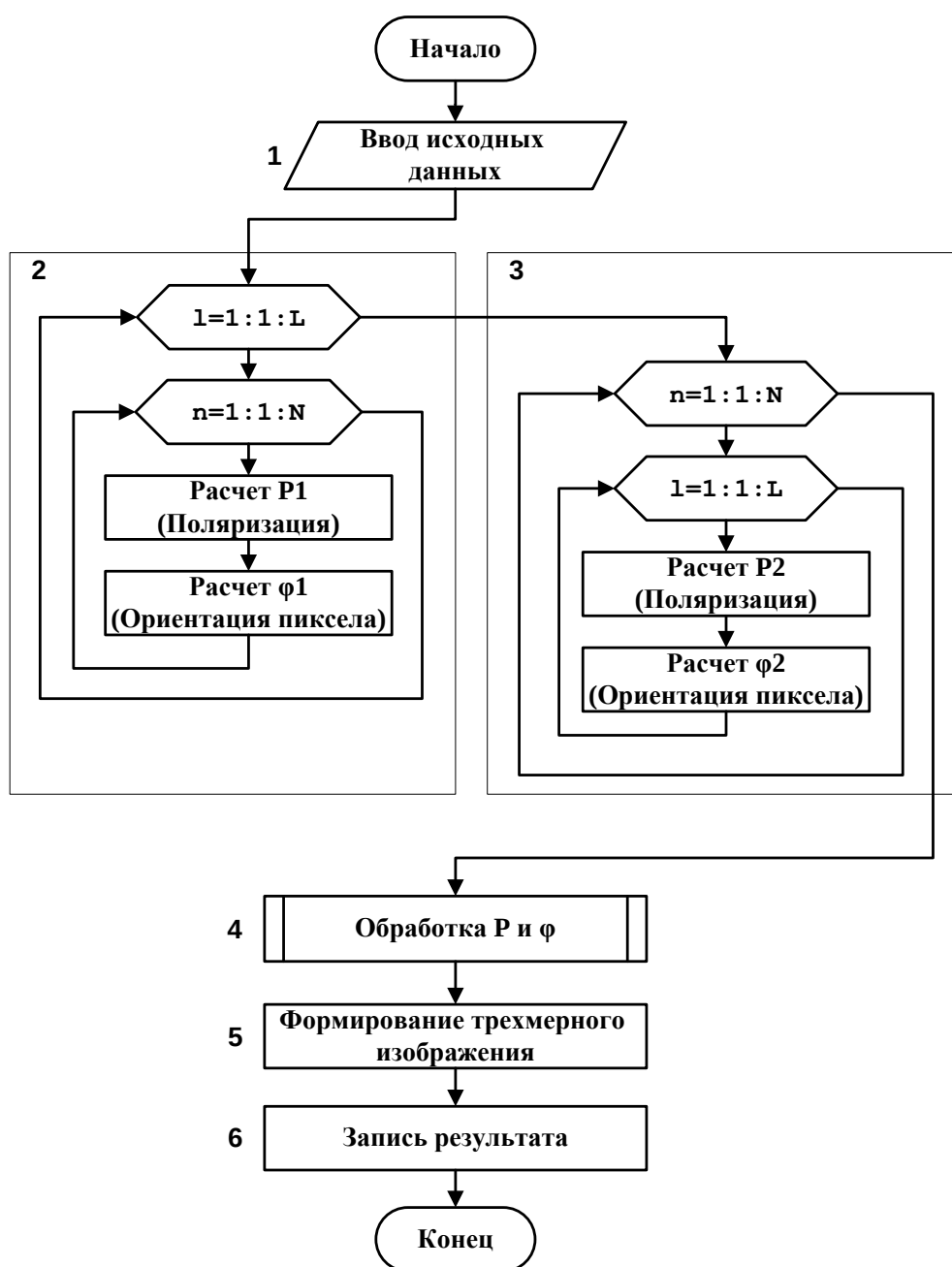


Рисунок 2 – Схема алгоритма формирования трехмерного изображения

В блоке 1 производится ввод видеосигналов U_1 и U_2 поляризационных тепловых изображений поверхности объекта. Далее видеосигналы каждого из тепловых изображений обрабатываются по приведенной выше методике в блоках 2 и 3, в которых рассчитываются параметры P и ψ по выражениям (4) и (5) для каждой из проекций угла ψ на координатные плоскости XOY и XOZ поляризационных тепловых изображений. В блоке 4 производится предварительная обработка, сопоставление полученных данных и расчет третьей координаты на основе выражений (6) и (7) для формирования объемного изображения. Блок 5 формирует конечное трехмерное изображение

для вывода его на устройство отображения (дисплей). В блоке 6 производится запись полученного результата в формате графического изображения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тымкул, В.М. Анализ способов распознавания формы трехмерных объектов [Текст] / В.М. Тымкул, Ю.А. Фесько, О.К. // Сборник трудов 21 Международной конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, ФГУП «НПО «Орион», 2010.
2. Тымкул, В.М. Математическая модель определения трехмерной формы объектов на основе двух поляризационных термограмм [текст] // Ю.А. Фесько, Л.В. Тымкул, Д.С. Шелковой.: сб. матер. VII Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2011», Т. 5., Ч. 1. – Новосибирск : СГГА, 2011. – С. 164-168.
3. Тымкул, В.М. Метод поляризационного тепловизионного распознавания трехмерной формы объектов [текст] // В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, Ю.А. Фесько, О.К. Ушаков, Вестник СГГА: научн.-технич. журн./ учредитель ГОУВПО «СГГА». – Вып. 2(13). – Новосибирск: СГГА. – 2010. – С. 74–83.
4. Пат. 2431936 РФ, МКИ H04N 5/33. Способ тепловизионного распознавания формы объектов / В.М. Тымкул, Фесько Ю.А. /РФ/. - №2010129703/09; заяв 15.07.2010; опубл. 20.10.2011, Бюл. № 29.

© В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, Ю.А. Фесько, 2012

МЕТОДИКА И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЛИНЕЙНЫХ ВЕЛИЧИН

Мария Николаевна Кистерева

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры «Наносистемы и оптотехника», тел. 8-923-246-06-44, e-mail: mary.kistereva@mail.ru

Олег Кузьмич Ушаков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры «Наносистемы и оптотехника», тел. 8 (383) 344-40-58, e-mail: inst.oot@ssga.ru

Василий Михайлович Тымкул

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Наносистемы и оптотехника», тел. 8 (383) 352-11-59, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

В работе рассмотрены методика и результаты натурных оптико-электронных измерений линейных величин с использованием статистического анализа функций распределения исследуемых величин. На основе экспериментальных измерений получена функция распределения линейной величины и приведены результаты оценки ее значений.

Ключевые слова: измерения, гистограмма, функция распределения измеренной величины, электронный тахеометр, логарифмически-нормальный закон распределения.

METHODS AND PRACTICAL RESULTS OF ACTUAL TEST OPTICAL-ELECTRONIC MEASUREMENT OF LINEAR SIZES

Maria N. Kistereva

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russian Federation, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, PhD-student, department of «Nanosystems and optical engineering», tel. 8-923-246-06-44, e-mail: mary.kistereva@mail.ru

Oleg K. Ushakov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russian Federation, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, PhD, professor, department of «Nanosystems and optical engineering», tel. 8 (383) 344-40-58, e-mail: inst.oot@ssga.ru

Vasily M. Tymkul

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russian Federation, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, PhD, professor, department of «Nanosystems and optical engineering», tel. 8 (383) 352-11-59, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

In article considered the methodology and results of actual test electro-optical measurement of linear variables using statistical analysis of the distribution functions of the studied variables. Based on experimental measurements obtained by the distribution function of the linear size, which is under the log-normal distribution and results of evaluation of its values.

Key words: measurement, the histogram of distribution function of the measured values, the electronic tacheometer, the log-normal distribution.

В работах [1,2] отмечается, что в практике анализа результатов линейных и угловых измерений очень часто имеет место отличие статистики измеряемых величин от нормального распределения Гаусса. В работе [1] приводится методика оптико-электронных измерений с использованием негауссовых функций распределения. Задача решается применительно к измерениям дальности l лазерными дальномерами.

Основные этапы методики заключаются в следующем.

Проводится измерения N значений дальности:

$$l_1, l_2, l_3, \dots, l_{N-1}, l_N.$$

При измерениях дальности регистрируются метеорологическая дальность видимости S_m в атмосфере, абсолютная влажность α , скорость ветра, давление P и температура T . По полученным данным находят среднее арифметическое значение $\bar{l}$:

$$\bar{l} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_i. \quad (1)$$

Находится также арифметическое отклонение Δl_i результатов от среднего:

$$\Delta l_i = l_i - \bar{l}. \quad (2)$$

Экспериментальное значение функции распределения измеренных величин находится на основе гистограммы значений $n(\Delta l_i)$ по формуле:

$$P(l) = \lim_{\Delta l_i \rightarrow 0} \frac{n(\Delta l_i)}{N}, \quad (3)$$

где $n(\Delta l_i)$ - число значений измеренной дальности, которые уложились в интервал $\Delta l_i = l_i - l_{i-1}$.

Следует отметить, что полученная функция $P(l)$ - экспериментальная измеренная функция распределения значений дальности. Так как суммарная погрешность лазерного дальномера (или в целом произвольной оптико-электронной системы измерительного типа) состоит из систематической (инструментальной) и случайной составляющей, то полученная функция содержит закон распределения измеряемой величины с учетом влияния постоянной и случайной составляющих погрешностей измерений.

На основе полученной функции распределения $P(l)$ оценивается математическое ожидание $M(l)$ и дисперсия $D(l)$ измеренных значений дальности:

$$M(l) = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} l \cdot P(l) dl; \quad (4)$$

$$D(l) = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} [l - M(l)]^2 \cdot P(l) dl, \quad (5)$$

где $l_{\min}$, $l_{\max}$ – минимальное и максимальное значения измеренной дальности.

Оценка результата измерений дальности проводится по формуле:

$$l_{\text{изм}} = M(l) \pm \sigma, \quad (6)$$

где $\sigma = \sqrt{D(l)}$ – среднеквадратическое отклонение (СКО) измеренных значений дальности от его математического ожидания.

Для решения поставленных задач нами проводился ряд натурных измерений значения дальности l с помощью аттестованного электронного тахеометра Topcon GTS – 236N. Для учета влияния атмосферы исследовались такие факторы, как скорость ветра, давление, влажность, температура и метеорологическая дальность видимости в атмосфере. Для этого использовались такие приборы, как психрометр аспирационный, барометр, анемометр. Все приборы прошли метрологическую поверку.

Эксперимент проводился на аттестованном учебном полигоне ФГБОУ «СГГА». Измерения проводились для трех значений дальности l в июле 2011 г. По полученным данным находили среднее арифметическое значение $\bar{l}$, арифметическое отклонение Δl_i , функцию распределения $P(l)$ измеренных значений дальности.

Основные результаты исследований по измерениям дальности $l = (96 \pm \Delta k)$ м, $l = (647 \pm \Delta k)$ м, $l = (887 \pm \Delta k)$ м, где $\Delta k = 0,1$ мм – погрешность базиса (без учета влияния внешних параметров) приведены в табл. 1-3 и рис. 1-3.

Для дальности $l = (96 \pm \Delta k)$ м результаты обработки измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты обработки экспериментальных данных для $l = (96 \pm \Delta k)$ м

Δl	Число значений	$P(l)$	Δl	Число значений	$P(l)$
-0,005	8	0,023188	0,002	1	0,002899
-0,004	40	0,115942	0,005	2	0,005797
-0,003	77	0,223188	0,006	4	0,011594
-0,002	85	0,246377	0,007	4	0,011594
-0,001	54	0,156522	0,040	7	0,02029
0,000	48	0,13913	0,041	4	0,011594
0,001	11	0,031884			

Экспериментально полученная функция распределения измеренных величин дальности $P(l)$ $l = (96 \pm \Delta k)$ м приведена на рис. 1. Здесь же приведена расчетная аппроксимация логарифмически-нормального закона статистики:

$$P(l) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln l - \overline{\ln l})^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (7)$$

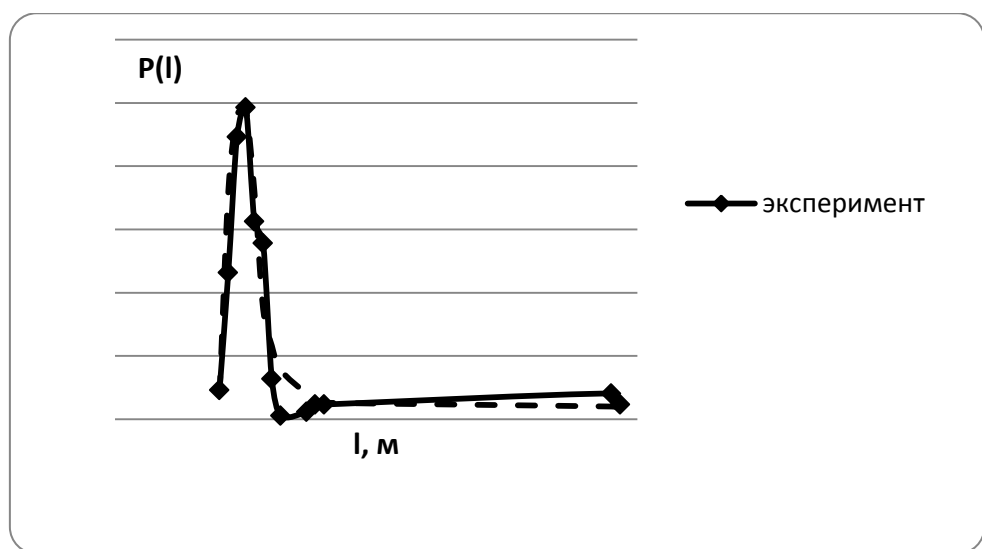


Рис. 1. Функция распределения полученных линейных величин для $l = (96 \pm \Delta k)$ м

Из полученного графика видно, что функция распределения $P(l)$ имеет ассиметричный характер, то есть отличается от нормального распределения Гаусса, а проведенная аппроксимация показывает, что она соответствует логарифмически-нормальному закону статистики.

Далее в табл. 2 и на рис. 2 приведены результаты исследований для $l = (647 \pm \Delta k)$ м.

Таблица 2. Результаты обработки экспериментальных данных для $l = (647 \pm \Delta k)$ м

Δl	Число значений	$P(l)$	Δl	Число значений	$P(l)$	Δl	Число значений	$P(l)$
-0,104	1	0,002899	-0,025	3	0,008696	0,017	4	0,011594
-0,050	1	0,002899	-0,024	5	0,014493	0,018	5	0,014493
-0,049	2	0,005797	-0,023	5	0,014493	0,019	3	0,008696
-0,047	1	0,002899	-0,022	4	0,011594	0,020	8	0,023188
-0,041	1	0,002899	-0,021	4	0,011594	0,021	12	0,034783
-0,039	2	0,005797	-0,019	6	0,017391	0,022	7	0,02029
-0,038	1	0,002899	-0,017	5	0,014493	0,023	7	0,02029
-0,037	1	0,002899	-0,013	9	0,026087	0,024	3	0,008696
-0,035	2	0,005797	-0,011	7	0,02029	0,026	6	0,017391
-0,033	2	0,005797	-0,005	11	0,031884	0,027	2	0,005797
-0,032	4	0,011594	-0,004	11	0,031884	0,028	1	0,002899
-0,031	4	0,011594	-0,003	12	0,034783	0,029	1	0,002899
-0,030	2	0,005797	0,004	11	0,031884	0,030	1	0,002899
-0,029	2	0,005797	0,009	14	0,04058	0,031	4	0,011594
-0,028	4	0,011594	0,014	6	0,017391	0,032	4	0,011594
-0,027	3	0,008696	0,015	10	0,028986	0,033	2	0,005797
-0,026	4	0,011594	0,016	9	0,026087	0,034	1	0,002899

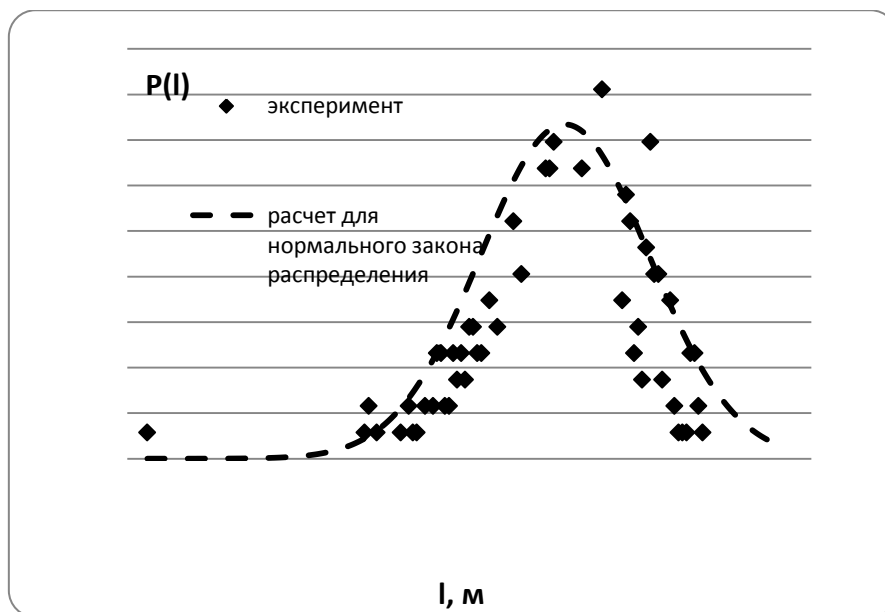


Рис. 2. Функция распределения полученных линейных величин для $l = (647 \pm \Delta k)$ м

В табл. 3 и на рис. 3 приведены результаты исследований для $l = (887 \pm \Delta k)$ м

Таблица 3. Результаты обработки экспериментальных данных для $l = (887 \pm \Delta k)$ м

Δl	Число значений	$P(l)$	Δl	Число значений	$P(l)$
-0,008	5	0,01	0,002	62	0,178161
-0,007	20	0,06	0,003	26	0,074713
-0,006	17	0,05	0,004	11	0,031609
-0,005	17	0,05	0,005	5	0,014368
-0,004	7	0,02	0,006	6	0,017241
-0,003	4	0,01	0,007	1	0,002874
-0,002	32	0,09	0,013	4	0,011494
-0,001	41	0,12	0,014	4	0,011494
0,001	61	0,18			

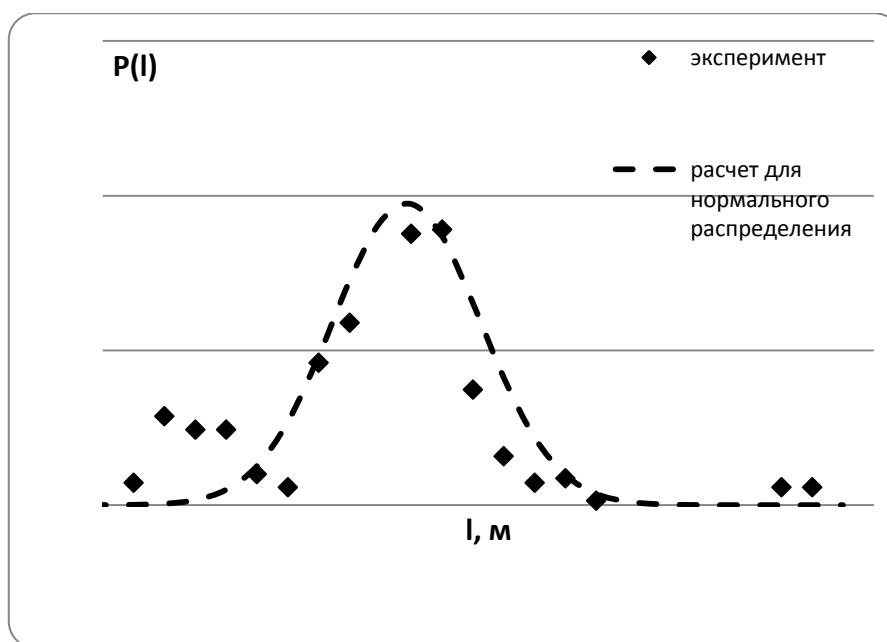


Рис. 3. Функция распределения полученных линейных величин для $l = (887 \pm \Delta k) \text{ м}$

При измерениях дальности $l \approx 96 \text{ м}$ лазерным дальномером функция распределения измеряемой величины подчиняется логарифмически нормальному закону распределения. При этом, ее отличие от закона статистики Гаусса незначительно.

С ростом дальности измеряемой величины $l \geq 600 \text{ м}$ функция распределения приближается к нормальному закону, что можно объяснить ростом вклада случайной погрешности измерений за счет влияния свойств приземных слоев атмосферы [3].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методика анализа оптико-электронных измерений с использованием статистики негауссовых функций [Текст]/ М.Н. Кистерева, О.К. Ушаков, И.В. Лесных, В.М. Тымкул//Сб. материалов междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2011. - Новосибирск: СГГА, 2011. - Т. 5, ч. 1. - С. 180-182.
2. Лесных, Н.Б. Законы распределения случайных величин в геодезии [Текст]: монография / Н.Б. Лесных. – Новосибирск: СГГА, 2005. – 129 с.
3. Зуев, В.Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере [Текст] / В.Е. Зуев. – М.: Радио и связь, 1982. – 288 с.

© М.Н. Кистерева, О.К. Ушаков, В.М. Тымкул, 2012

ВИБРОЗАЩИТА И ПРОЧНОСТНАЯ НАДЕЖНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ И ОПТО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Георгий Алексеевич Куриленко

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, кафедра специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31, e-mail: kaf.osnov@ssga.ru

Сергей Викторович Савелькаев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, кафедра специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31, e-mail: kaf.osnov@ssga.ru

Галина Витальевна Григорьева

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31, e-mail: kaf.osnov@ssga.ru

Рассмотрены способы обеспечения виброзащиты при производстве и прочностной надежности при эксплуатации оптических и опто-электронных приборов.

Ключевые слова: виброзащита, прочностная надежность, колебания.

VIBRATION PROTECTION AND STRENGTH RELIABILITY OF OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC DEVICES

George A. Kurylenko

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo, Novosibirck, 630108, professor, Doctor of Engineering, Department of special devices and technologies, tel. (383) 361-07-31, e-mail: kaf.osnov @ ssga.ru

Sergei V. Savelkaev

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo, Novosibirck, 630108, professors, Doctor of Engineering, Department of special devices and technologies, tel. (383) 361-07-31, e-mail: kaf.osnov @ ssga.ru

Galina V. Grigorieva

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo, Novosibirck, 630108, associate professor, Department of special devices and technologies, tel. (383) 361-07-31, e-mail: kaf.osnov @ ssga.ru

The methods of vibration protection ensure the production and strength reliability of optical and opto-electronic devices.

Key words: vibration protection, strength reliability, vibration.

Проблему обеспечения виброзащиты и прочностной надежности оптических и опто-электронных приборов следует рассматривать в двух аспектах.

Первый аспект – технологический, требующий виброзащиты оптических и опто-электронных приборов при их производстве от превосходящего уровня фоновой вибрации производственных и лабораторных помещений, поскольку точность операций современного технологического оборудования достигает долей микронметра.

Второй аспект - эксплуатационный, требующий обеспечения прочностной надежности оптических и опто-электронных приборов в условиях вибрационных и других воздействий при их эксплуатации.

В настоящее время разработано множество различных конструкций виброзащитных устройств, каждое из которых имеет свою область применения. Об универсальном виброзащитном устройстве пока говорить еще рано. Мы рассмотрим их некоторые конструкции, разработанные в НГТУ с участием сотрудников СГГА.

На рис. 1 показана конструкция виброзащитной платформы с упругим элементом для защиты приборов от вибраций при их производстве.

Защищаемый прибор 1 опирается на подвес 2 в виде продольно-сжатой балки (рессоры) квазиулевого жесткости и пружину 6 через гидроцилиндры 3 и 4. Полости этих гидроцилиндров соединяются каналом 10 со встроенным дросселем 9. Цилиндро-поршневые пары 3 и 4 содержат также упругие элементы 7 и 5 вспомогательного нагружения. Расчетное положение прибора (рабочую точку) устанавливают, изменяя натяг пружины 6.

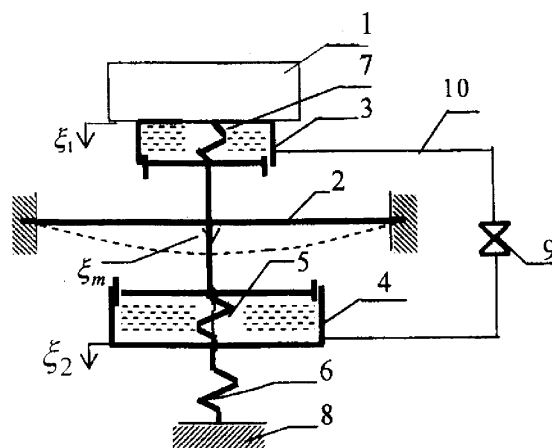


Рис. 1. Виброзащитная платформа

Платформа работает следующим образом. При увеличении, например, веса прибора 1 повышается давление в гидроцилиндре 3, и начинается переток жидкости в гидроцилиндр 4, расширяется его объем и увеличивается натяг пружины 6. Благодаря этому рабочую точку подвеса 2 (положение) можно удержать на прежнем уровне. Время перетекания жидкости при этом должно быть существенно больше периода колебаний прибора 1 на подвесе 2 и регулируется величиной проходного сечения канала дросселя 9.

В качестве обобщенной координаты выберем координату ξ_1 , отсчитываемую от положения равновесия защищаемого прибора 1 с массой m . Тогда уравнение движения прибора 1 при кинематическом возмущении основания 8 можно записать в виде

$$m\ddot{\xi}_1 = -K_1\xi_m - K_3\xi_m^3 - C_3\xi_2 - b\dot{\xi}_1 + A\sin\omega t, \quad (1)$$

где K_1 , K_3 - коэффициенты упругой жесткости рессоры 2; ξ_m - ее максимальный прогиб; A , ω - амплитуда и частота колебаний основания 8; C_3 - коэффициент жесткости пружины 6; b - коэффициент вязкого трения (на рис. 1 демпфер вязкого трения не показан); ξ_2 - перемещение цилиндра 4.

В [1] исследована работа рассмотренной выше виброзащитной платформы при различных ее параметрах на основе уравнения (1). Найдены оптимальные сочетания параметров, при которых платформа дает высокий эффект виброзащиты. При этом перестройка «рабочей точки» упругого подвеса на фактическую нагрузку выполняется автоматически.

Рассмотрим теперь конструкцию пневмодемпфера, устанавливаемого параллельно упругой подвеске и выполняющего роль диссипативного элемента для защиты прибора от вибрационных и ударных воздействий при его эксплуатации, показанную рис. 2.

Пусть шток 1 с поршнем 2 демпфера связан с защищаемым прибором, а корпус 3 демпфера 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: $P_1 > P_2$.

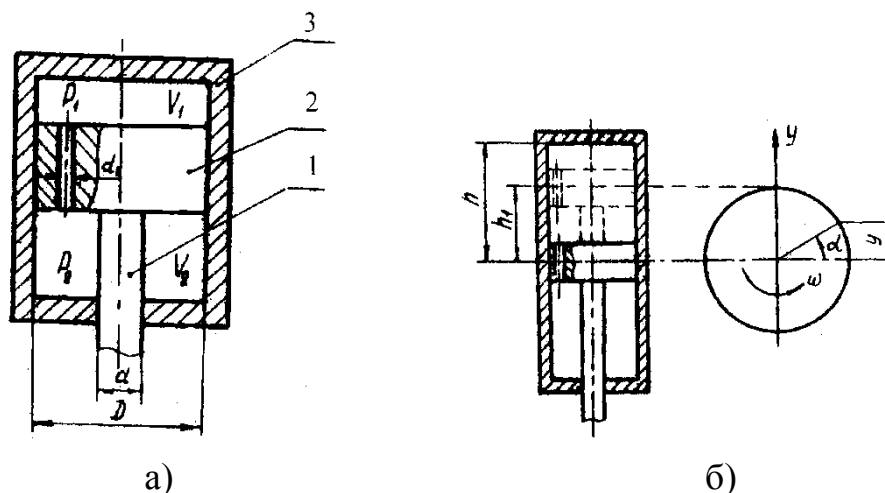


Рис. 2. Пневмодемпфер - (а) и он же в верхнем положении поршня – (б)

На шток 1 действует сила сопротивления

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

где D и d - диаметры поршня и штока.

Условие виброзащиты прибора имеет вид

$$W = W_1 - W_2 \geq W_0 \quad (3)$$

где W - фактическая энергия, поглощенная демпфером за цикл колебаний; W_1 - энергия, затраченная на торможение штока 1; W_2 - возвращенная энергия, как показано на рис. 3; W_0 - энергию, которую необходимо рассеять в демпфере за цикл

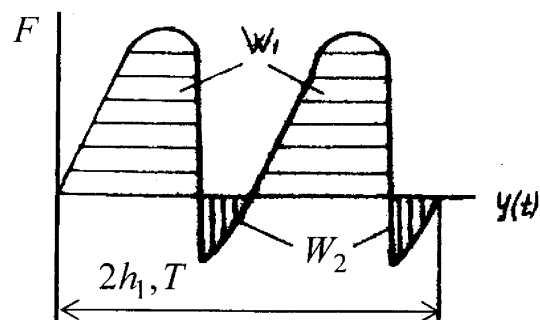


Рис. 3. Энергия, рассеиваемая в демпфере за цикл колебаний

колебаний, чтобы амплитуда колебаний не превышала некоторой допустимой величины.

Определим W_0 . Колебания прибора описываются уравнением вынужденных колебаний системы с одной степенью свободы [2]

$$m\ddot{y} + R(y, \dot{y}) + cy = P_0 \cos(\omega t + \alpha), \quad (4)$$

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

Амплитуда P_0 вынужденных колебаний в резонансе (нас будут интересовать именно условия резонанса) определяется выражением [2]

$$A = 2\pi A_0 / \psi, \quad (5)$$

где $A_0 = P_0 / c$; $\psi = W_0 / u$ - коэффициент поглощения энергии системы; $u = A^2 c / 2$ - максимальная потенциальная энергия подвески прибора.

С учетом этих обозначений из (5) получим

$$W_0 = \pi P_0 A. \quad (6)$$

Представим движение поршня 2 пневмодемпфера 1 относительно его корпуса при циклических колебаниях как вращение радиуса-вектора с угловой скоростью ω , как показано на рис. 2, б.

За начальное положение поршня примем 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-либо текущего положения на угол $d\alpha$ объем верхней полости уменьшается на величину $Sh_1 \cos \alpha \cdot d\alpha$, где $S = \pi D^2 / 4$, а нижней увеличивается на величину $S_1 h_1 \cos \alpha \cdot d\alpha$, где $S_1 = \pi(D^2 - d^2) / 4$. Первоначальное давление P_1 и объем V_1 верхней полости связаны с новым давлением P_1' и объемом V_1' (пока без учета протекания воздуха) соотношением [3]

$$P_1 V_1^n = P_1' (V_1')^n, \quad (7)$$

где n - показатель политропы.

С учетом того, что $V_1' = V_1 - S h_1 \cos \alpha \cdot d\alpha$, из (7) следует

$$P_1' = P_1 / (1 - S h_1 \cos \alpha \cdot d\alpha / V_1)^n. \quad (8)$$

Записав соотношение (7) для новых P_2' и V_2' и первоначальных P_2 и V_2 давлений и объемов нижней полости и учитывая, что $V_2' = V_2 + S_1 h_1 \cos \alpha \cdot d\alpha$, получим

$$P_2' = P_2 / (1 + S_1 h_1 \cos \alpha \cdot d\alpha / V_2)^n. \quad (9)$$

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

$$dt = d\alpha / 2\pi f, \quad (10)$$

где f - частота колебаний прибора.

За время dt из верхней полости в нижнюю протечет количество воздуха [3]

$$Q = S_0 \sqrt{\frac{2ng}{n-1}} \gamma_1' P_1' \left[\left(\frac{P_2'}{P_1'} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{P_2'}{P_1'} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] dt, \quad (11)$$

где $S_0 = \pi d_1^2 / 4$; γ_1' - удельный вес воздуха в верхней полости к концу промежутка времени dt ; $g = 980 \text{ см/с}^2$; $n = 1,4$ (для воздуха).

Учитывая Q (11), откорректируем давления P_1' и P_2' к началу следующего шага. До начала поворота радиуса-вектора вес воздуха в верхней и нижней полостях составлял

$$G_1 = \gamma_1 V_1, G_2 = \gamma_2 V_2, \quad (12)$$

где γ_1 и γ_2 - удельные веса воздуха соответственно в верхней и нижней полостях в момент времени t .

По завершению времени dt количество воздуха в обеих полостях за счет перетекания Q будет определяться выражениями:

$$G_1' = G_1 - Q, G_2' = G_2 + Q. \quad (13)$$

Соответственно изменяются и давления P_1' и P_2' в обеих полостях. Эти откорректированные давления вычисляются по формулам:

$$P_{1н} = P_1' G_1' / (G_1' + Q), P_{2н} = P_2' G_2' / (G_2' - Q). \quad (14)$$

Сила сопротивления F за время dt определяется выражением (2), где вместо P_1 и P_2 берутся их откорректированные значения $P_{1н}$ и $P_{2н}$ (14). Затем расчет повторяется для нового приращения аргумента.

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

Описанный алгоритм решения задачи реализован на компьютере. Просматривалось необходимое количество вариантов с целью оптимизации размеров демпфера в рамках заданной величины рассеяния энергии W_0 . Рассчитываемые параметры привязывались к конкретной конструкции демпфера. Так, при $W_0 = 0,86 \text{ Дж}$, $d = 3 \text{ мм}$, $h_1 = 1,87 \text{ мм}$ получены следующие параметры демпфера: $D = 23 \text{ мм}$; $h = 3 \text{ мм}$; $d_1 = 0,85 \text{ мм}$; $W = 0,946 \text{ Дж}$.

Рассмотренные виброзащитные устройства показали свою работоспособность и позволяют обеспечить виброзащиту и необходимую прочностную надежность современных прецизионных оптических и опто-электронных приборов в условиях их производства и эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Динамика пассивной вибрационной системы с обратной связью для оптического и оптоэлектронного приборостроения/А. И. Родионов, С. В. Савелькаев, Г. А. Сырецкий, Г. С. Юрьев // ГЕО-Сибирь-2010, Т. 5.: Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микроэлектроника. Ч. 1: сб. материалов VI Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2010», 19 – 29 апреля 2010 г., Новосибирск. - Новосибирск: СГГА, 2010. – С. 8 - 13.
2. Бидерман, В. Л. Прикладная теория механических колебаний. – М.: Высшая школа, 1972. – 416 с.
3. Справочник машиностроителя. Т. 2. – М.: Машиностроение, 1960. – 740 с.

© Г.А. Куриленко, С.В. Савелькаев, Г.В. Григорьева, 2012

ВЛИЯНИЕ ВОЗДУШНОГО ПРОМЕЖУТКА МЕЖДУ КОМПОНЕНТАМИ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ ОБЪЕКТИВОВ НА ХРОМАТИЗМ ПОЛОЖЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Владимир Львович Парко

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры наносистемы и оплотехника, тел. (952)926-10-33, e-mail: Vladimir-Parko@yandex.ru

Татьяна Николаевна Хацевич

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры наносистемы и оплотехника, тел. (952)938-34-93, e-mail: khtn@yandex.ru

В статье рассмотрено влияние воздушного промежутка между компонентами телескопических объективов на хроматизм положения изображения.

Ключевые слова: хроматизм положения, вторичный спектр, ахромат, апохромат.

THE INFLUENCE OF AIR GAP BETWEEN COMPONENTS OF TELESCOPIC OBJECTIVES ON LONGITUDINAL CHROMATIC ABERRATION

Vladimir L. Parko

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation, postgraduate student at the nanosystems and optical devices department of SSGA, tel. (952)926-10-33, e-mail: Vladimir-Parko@yandex.ru

Tatyana N. Khatsevich

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation, Candidate of Technical Sciences, Professor at the nanosystems and optical devices department of SSGA, tel. (952)938-34-93, e-mail: khtn@yandex.ru

The influence of air gap between components of telescopic objectives on longitudinal chromatic aberration is considered in this article.

Key words: longitudinal chromatic aberration, secondary spectrum, achromat, apochromat.

Влияние хроматических aberrаций на качество изображения и ограничение оптических характеристик объективов особенно существенно проявляется в оптических приборах, объективы которых имеют большие величины фокусных расстояний и малые угловые поля (объективы телескопических систем: астрономических телескопов, геодезических приборов, зрительных труб и т.п.). По этой причине при расчете таких объективов особое внимание уделяется устранению хроматических aberrаций вообще и хроматизма положения в частности. Авторы статьи задались целью выяснить, какое влияние оказывает воздушный промежуток между компонентами телескопического объектива на хроматизм положения системы.

Воздушный промежуток как коррекционный параметр хроматических aberrаций в оптической системе впервые использовал Христиан Гюйгенс в 1660 г. для схемы окуляра, названного впоследствии его именем. Окуляр состоит из двух далеко разнесенных друг от друга одиночных положительных линз, которые могут быть выполнены из одной марки оптического стекла. В окуляре Гюйгенса, чаще всего используемого с объективами-ахроматами микроскопов, исправлен хроматизм увеличения и одна из aberrаций – астигматизм или кома, при этом сферическая aberrация и хроматизм положения остаются неисправленными [1].

В традиционных двух- и трехлинзовых объективах телескопических систем воздушный промежуток между линзами либо отсутствует, либо имеет небольшую величину. Для коррекции aberrаций используется не сама величина воздушного промежутка, а то обстоятельство, что введение воздушного промежутка приводит к появлению дополнительного коррекционного параметра – радиуса преломляющей поверхности. И именно последний используют для лучшей коррекции комы в объективе.

Воздушный промежуток также необходим для объективов диаметром более 100 мм и для случаев, когда эксплуатация склейки не представляется возможным ввиду слишком большой разницы в коэффициентах линейного расширения склеиваемых материалов линз.

Таким образом, сложился определенный стереотип, заключающийся в том, что воздушный промежуток оказывает несущественное влияние на хроматизм положения системы, и часто на этапе предварительных расчетов им пренебрегают.

Методом дифференцирования можно вывести формулу для вычисления хроматизма положения двухкомпонентного объектива телескопической системы [2]:

$$dS' = -\left(f' \cdot (1 - d \cdot \Phi_1)\right)^2 \cdot \left(\frac{\Phi_1}{\nu_1} \cdot \left(\frac{1}{1 - \Phi_1 \cdot d}\right)^2 + \frac{\Phi_2}{\nu_2}\right), \quad (8)$$

где f' – заднее фокусное расстояние объектива;

Φ_1 – оптическая сила первого компонента;

Φ_2 – оптическая сила второго компонента;

ν_1 – коэффициент средней дисперсии материала первого компонента;

ν_2 – коэффициент средней дисперсии материала второго компонента;

d – расстояние между компонентами.

Формула (8) также позволяют рассчитать вторичный спектр системы путем замены коэффициентов средних дисперсий материалов линз коэффициентами частных дисперсий. Очевидно, что для получения ахроматической коррекции в объективе телескопической системы необходимо соблюсти условие:

$$\frac{\Phi_1}{\nu_1} \cdot \left(\frac{1}{1 - \Phi_1 \cdot d}\right)^2 + \frac{\Phi_2}{\nu_2} = 0. \quad (9)$$

В ходе исследований по формулам (8) и (9) схемы телескопических объективов-ахроматов, состоящих из двух одиночных линз, авторами было

подтверждено, что величина вторичного спектра возрастает с увеличением воздушного промежутка между ними – рис. 1. На рис. 1 по оси абсцисс отложено расстояние между линзами, отнесенное к фокусному расстоянию системы, в процентах, а по оси ординат – остаточный хроматизм оптической системы $\Delta S'$ (в данном случае – вторичный спектр), в долях от фокусного расстояния системы. Здесь и далее представлены графики для рабочего спектрального диапазона от линии C' до линии F' спектра и для марок стекол без особого хода частных дисперсий в них.

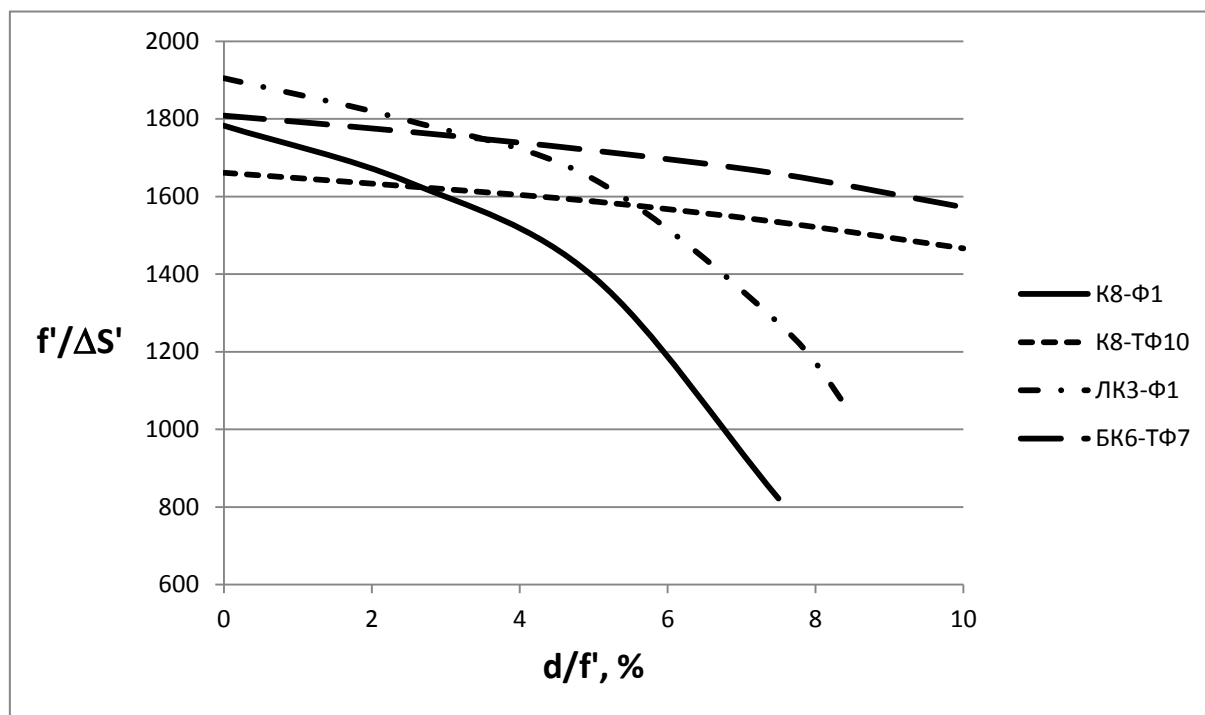


Рис. 1. Зависимость величины вторичного спектра от воздушного промежутка между компонентами двухлинзовых объективов-ахроматов

На рис. 1 для пар стекол К8-Ф1 и ЛКЗ-Ф1 графики обрываются для значений d/f' , превышающих 7 и 8 % соответственно, так как при больших значениях ахроматическая коррекция объективов с этими парами стекол не достижима. Таким образом, традиционные схемы объективов-ахроматов с малыми расстояниями между компонентами действительно оптимальны в отношении коррекции вторичного спектра.

Однако дальнейший анализ формулы (9) позволяет утверждать, что для получения апохроматической коррекции изображения достаточно ввести дополнительную линзу во второй компонент (рис. 2), причем изготовленную из того же материала что и линза первого компонента. При этом величина воздушного промежутка между компонентами объектива становится сопоставимой с фокусным расстоянием всей системы и становится действенным коррекционным параметром для устранения хроматизма [3].

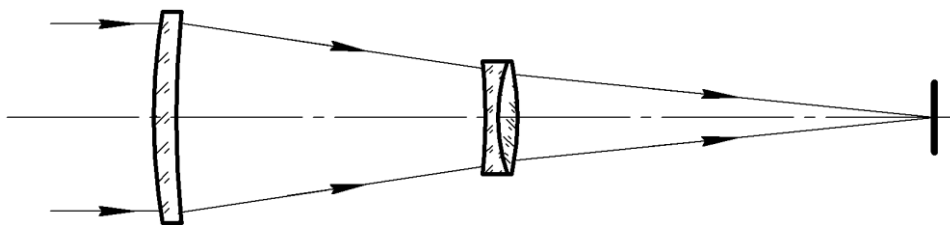


Рис. 2. Схема двухкомпонентного апохроматического объектива

Следует отметить, что апохроматической коррекции в таком телескопическом объективе можно добиться только в случаях, когда в качестве материала первой одиночной линзы используется одно из флинтовых стекол (рис. 3). Уравнение (9) позволяет рассчитать коэффициенты средней и частной дисперсий материала линзы во втором компоненте, необходимого для апохроматизации объектива на основе кронового стекла, но оптических марок стекол с такими характеристиками в настоящее время не существует [4]. Исключением является объектив на основе стекла ОК-4 с особым ходом частной дисперсии, но применение этого стекла видится экономически целесообразней в традиционной двухлинзовой схеме, нежели в рассматриваемой.

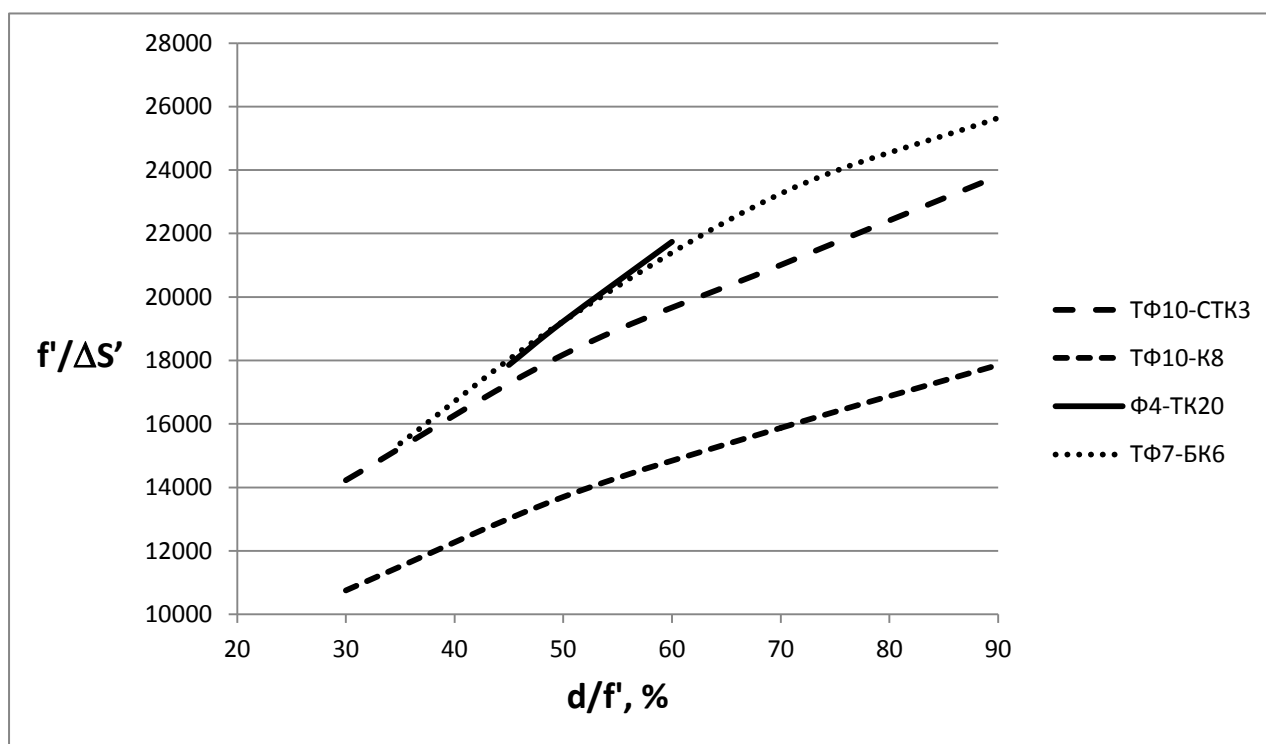


Рис. 3. Зависимость величины остаточного хроматизма от воздушного промежутка между компонентами двухкомпонентных объективов-апохроматов

Как следует из рис. 3, у двухкомпонентных объективов-апохроматов остаточный хроматизм уменьшается при увеличении воздушного промежутка между компонентами. Необходимо отметить, что в сравнении с традиционными ахроматами, остаточный хроматизм двухкомпонентных апохроматических

объективов с воздушным промежутком между компонентами составляет на порядок меньшие величины.

Таким образом, при выборе величины воздушного промежутка между компонентами двухкомпонентных объективов в совокупности с подбором двух марок стекол без особого хода частных дисперсий, возможно добиться апохроматической коррекции изображения, что подтверждается расчетами конкретных схем длиннофокусных объективов телескопических систем, выполненных авторами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Микроскопы / под ред. Н.И. Полякова. – Л.: Машиностроение, 1969. 512 с.
2. Шрёдер Г., Трайбер Х., Техническая оптика. - М.: Техносфера, 2006. 426 с.
3. Способ устранения хроматизма положения в объективах телескопических систем: сб. матер. VII Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2011». Новосибирск, 2011. Т. 5. Ч. 1. С. 15-19.
4. ГОСТ 13659-78. Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры. – Введ. 1980 – 01 – 01. – М: Изд-во стандартов, 1999. 27 с.

© В.Л. Парко, Т.Н. Хацевич, 2012

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТИВ С ДВУХСПЕКТРАЛЬНЫМ ПОЛЕВЫМ КОМПЕНСАТОРОМ

Диана Георгиевна Макарова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Новосибирск, Плахотного, 10, аспирант кафедры наносистем и оптотехники, тел. 3432211; e-mail: diana_ssga@mail.ru

В статье рассмотрена возможность использования единого полевого компенсатора астрономического объектива в визуальном и субмиллиметровом диапазонах длин волн.

Ключевые слова: показатель преломления материала, полевой компенсатор, визуальный диапазон спектра, субмиллиметровый диапазон спектра.

ASTRONOMICAL OBJECTIVE WITH TWO-SPECTRAL FIELD EQUALISER

Diana G. Makarova

Siberian State Academy of Geodesy (630108, Novosibirsk, Plahotnogo st. 10), department of Nanosystems and optical engineering, post-graduate, ph. 343-22-11; E-mail: diana_ssga@mail.ru

The opportunity of the uniform field equaliser using in astronomical objectives with visual and submillimetric ranges of lengths of waves are considered.

Key words: a parameter of refraction of a material, the field equaliser, a visual range of a spectrum, a submillimetric range of a spectrum.

В последние годы происходит интенсивное освоение терагерцевого (ТГц частот 10^{11} – 10^{13} Гц) диапазона спектра электромагнитного излучения, что соответствует диапазону длин волн от 3 до 0,03 мм. Частью ТГц диапазона является интервал длин волн от 1 до 0,1 мм, которые принято называть субмиллиметровыми.

Миллиметровая и субмиллиметровая астрономия предоставляет уникальные возможности по изучению космического пространства. Видимого света в космосе очень мало и он несет лишь малую толику информации о свойствах космических тел. Одним из главных препятствий для видимого света является пыль, которой заполнено космическое пространство. Диаметр частиц пыли сравним с длинами волн видимого света, поэтому пылинки эффективно отражают и поглощают его. Для телескопов, работающих в оптическом диапазоне, пыль является непреодолимым препятствием, скрывающим объекты наблюдения [1]. Поэтому представляется перспективным оснащать существующие оптические телескопы визуального диапазона спектра приемниками субмиллиметрового диапазона с дополнительной оптикой.

Поскольку зеркальная система телескопов всеволновая, проблемой может стать линзовый полевой компенсатор, применяемый для увеличения угла поля зрения телескопа.

В данной работе в качестве образца рассмотрим астрономический объектив, выполненный по схеме Кассегрена, Ричи-Кретьена, из архива ППП Zemax [2].

К настоящему времени для исправления поля в главном фокусе параболического зеркала в схеме Кассегрена, Ричи-Кретьена и в главном фокусе телескопа, предназначенного для работы в схеме Ричи-Кретьена, предложено большое количество различных типов корректоров, однако общей теории корректоров пока не сформулировано, и разработчиками оптики предлагаются различные конкурирующие между собой оптические устройства [3].

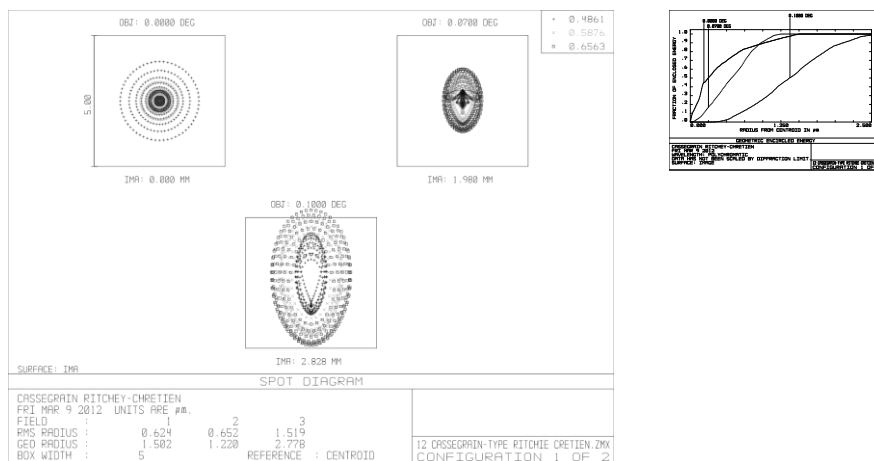
В объективе [2] в качестве компенсатора применен мениск. Поскольку данная оптическая система предлагается для работы сразу в двух диапазонах спектра – визуальном (0,486 – 0,760 мкм) и субмиллиметровом (100 – 333 мкм), то материалом полевого корректора был выбран плавленый кварц, прозрачный в этих диапазонах.

Хроматическая коррекция выполнена по известной формуле только для визуального диапазона спектра.

$$r_2 = r_1 \frac{d(n^2 - 1)}{n^2},$$

где: r_1, r_2, d – радиусы и толщина мениска; n – показатель преломления материала мениска.

Результаты расчета объектива с компенсатором из плавленого кварца для визуального и субмиллиметрового диапазонов спектра приведены на рис. 1, 2.



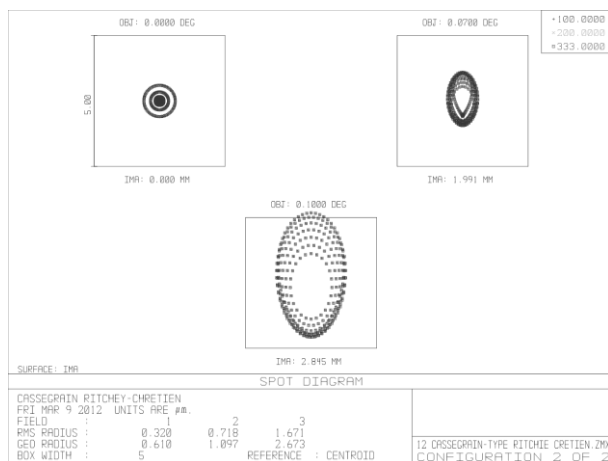
а

б

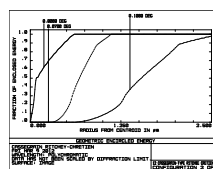
а – точечная диаграмма распределения энергии в абберационном пятне;

б – график концентрации энергии в абберационном пятне.

Рис. 1. Характеристики качества изображения объектива в визуальном диапазоне спектра



а



б

а – точечная диаграмма распределения энергии в абберационном пятне;

б – график концентрации энергии в абберационном пятне.

Рис. 2. Характеристики качества изображения объектива в субмиллиметровом диапазоне спектра

Рассчитанный объектив имеет единый полевой компенсатор для визуального и субмиллиметрового диапазонов спектра.

Фокусировка объектива обеспечивается незначительным осевым перемещением приемника излучения.

Абберационный кружок не превышает пиксель приемника излучения 5 мкм, что соответствует разрешению объектива в 0,5 угловых секунды.

Проведен расчет аналогичной схемы с полевым компенсатором из кремния для тепловизионного и субмиллиметрового диапазонов спектра.

Данное направление в телескопостроении перспективно и приведет к совершенствованию существующих телескопов наземного базирования и развитию телескопов космического базирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Whitcomb, S. E., Hildebrand, R. H., & Keene, J. Astronomical Society of the Pacific, Publications, vol. 92, Dec. 1980-Jan. 1981, p. 863-869.
2. Инструкция пользователя. [Электронный ресурс]: Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки.
3. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы. – М.: Наука, 1976.

© Д.Г. Макарова, 2012

ДВУХСПЕКТРАЛЬНЫЙ ОБЪЕКТИВ ВИДЕОКАМЕРЫ МИКРО БПЛА

Альбина Сергеевна Курбангалиева

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Новосибирск, Плеханового, 10, магистрант кафедры Наносистем и оптотехники, тел. 343-22-11, e-mail: albina_zolotaya@mail.ru

В статье рассмотрены перспективы разработки двухспектральных объективов для микро беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Предложен вариант схемного решения и результаты расчета конкретного объектива.

Ключевые слова: двухспектральных объектив, микро БПЛА.

TWO-SPECTRAL LENS OF SMALL PILOTLESS FLYING MACHINE VIDEOCAMERA

Albina Sergeevna Kurbangalieva

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Novosibirsk, Plakhotnogo 10, undergraduate, Nanosystems and optical techniques department, phone 343-22-11, e-mail: albina_zolotaya@mail.ru

The prospects of two-spectral lenses development for the small pilotless flying machines are considered. The variant of circuit decision and results of concrete lens calculation are proposed.

Key words: two-spectral a lens, the small pilotless flying machine.

В настоящее время большое внимание уделяется беспилотным летательным аппаратам, выполняющим разведывательные и исследовательские задачи. Интерес к применению беспилотной техники в системе МВД постоянно возрастает. Это обусловлено, технологическими достижениями в области совершенствования БПЛА, что способствовало распространению данных аппаратов не только в военной деле, но и в гражданской правоохранительной деятельности [1].

В последние годы в разработке БПЛА наметилось новое направление. Наряду с обычными беспилотниками начата разработка микро БПЛА, масса которые не превышает одного килограмма.

Одной из главных проблем таких микро БПЛА является разработка легкой видеокамеры, значительную весовую часть которой составляет оптическая система. Поэтому при разработке такой оптической системы необходимо учитывать количество оптических деталей и плотность материала, из которого они будут изготовлены. Снижению массы видеокамеры будет способствовать многоспектральность оптической системы, т.е. способность работы в двух и более диапазонах спектра. Оптические системы работают нормально в пределах ограниченной области спектра. Линзовые оптические системы пропускают излучение в ограниченном диапазоне длин волн, причем хорошая хроматическая коррекция изображения возможна, только для части этого диапазона. Необходимо так же, чтобы объектив работал одновременно в двух

спектральных диапазонах, а именно: визуальный (0.48-0.76мкм) диапазон и тепловизионный (3-5 мкм).

В данной работе представлены результаты расчета объектива, предназначенного для работы в широкой области спектра от 0.48 до 5 мкм, содержащей визуальный (0.48 - 0.76мкм) и тепловизионный (3 - 5 мкм) диапазоны спектра.

Интерес к разработке таких систем заключается в том, что этот прибор предназначен для замены двух оптических систем одним многоспектральным устройством, выполненным из материала прозрачного в диапазоне спектра от 0.48 до 5 мкм. Это позволяет уменьшить весогабаритные характеристики и упростить юстировку, так как не требуется совмещения двух визирных каналов и применения, специальных контрольно-юстировочных приборов для тепловизионного диапазона спектра. Из этого следует, что разработка двухспектральных зеркально-линзовых объективов из одного материала и увеличение поля зрения является актуальной задачей.

Для формулирования требований к оптической системе видеокамеры микро БПЛА необходимо иметь данные по их полезной нагрузке.

Таблица 1. Некоторые характеристики известных микро БПЛА

Наименование	Масса, кг	Полезная нагрузка, кг	Высота полета, м
«Инспектор-101» [2]	0,25	0,05; TV-камера переднего, либо планового обзора	25 - 500
«Иркут 2М» [3]	3	0,3; гиростабилизированная камера	100 - 300

Из табл.1 следует, что полезная нагрузка (видеокамера) микро БПЛА составляет примерно 1/5 – 1/10 массы всего БПЛА, т. е. 50 – 300 грамм, а масса оптической системы должна составлять 1/3 от массы полезной нагрузки.

Для разработки двухспектрального объектива микро БПЛА необходимо учитывать плотность материала оптических деталей, которая должна быть возможно более малой. Поэтому плотность, химическая и влагоустойчивость при выборе оптического материала имеет существенное значение.

В табл. 2 приведены некоторые оптические материалы (стекла, кристаллы и пластик), прозрачные в вышеуказанных диапазонах спектра с плотностью менее 3,5 г/см³.

Из табл. 2 видно, что наиболее подходящим материалом по физико-химическим свойствам, плотности и области пропускания для двухспектрального объектива видеокамеры микро-БПЛА является CaF₂.

Кроме того при расчете объектива необходимо учитывать параметры приемника оптического излучения: спектральный диапазон, размер пикселя и количество пикселей в матрице. В табл. 3 приведены параметры некоторых современных приемников излучения.

Таблица 2. Характеристики оптических материалов

Материал	$\Delta\lambda$, мкм	Химическая устойчивость	Влагоустойчивость г/100г воды	Плотность, г/см ³
SiO ₂ кр	0,4-4,5	Кислота, щелочь	Не раствор.	2,20
SiO ₂ пл	0,2-4,5	Кислота, щелочь	Не раствор	2,20
KCl	0,21-30	Щелочь, спирт, глицерин	34,7	1,98
NaCl	0,21-26	Спирт, глицерин	35,7	2,17
KBr	0,23-40	глицерин	53,48	2,75
LiF	0,12-12	Кислота	0,27	2,64
CaF ₂	0,13-12	Кислота	0,0016	3,18
MgF ₂	0,11-7,5	Кислота	0,0076	3,18

Таблица 3. Некоторые параметры матричных приемников излучения

Наименование	Спектр. диапазон, мкм	Физич. размер, мм	Размер пикселя, мкм	Кол-во пикселей, млн
Sharp RJ23Y3BA0LT [4]	0,486-0,76	6.6x8.8	1,55	12,53
Силар TVC 400 [5]	1,8-5,3	13,4x8,9	28x28	0,15
Jupiter [5]	3-5	12,8x10,2	15x15	1,3

За исходный вариант примем объектив по схеме [6]. Расчет объектива проведем по оптической программе ZEMAX и проанализируем характеристики качества изображения.

На рис. 1-3 представлена оптическая схема и результаты расчета двухспектрального объектива.

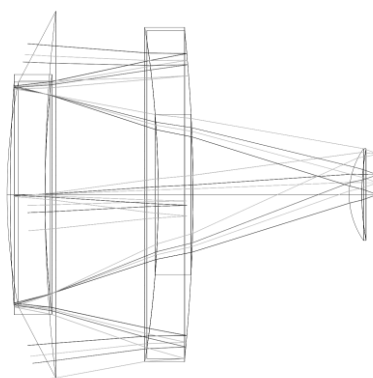
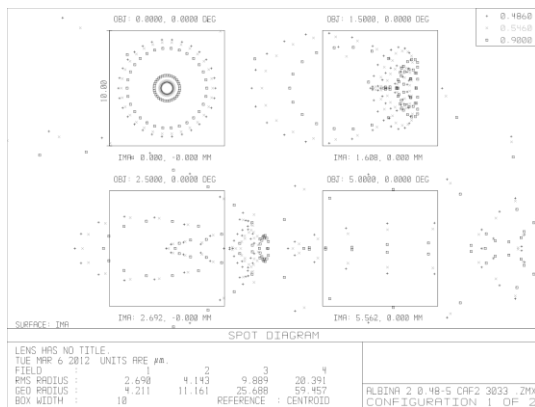
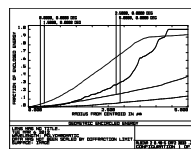


Рис. 1. Оптическая схема объектива



а

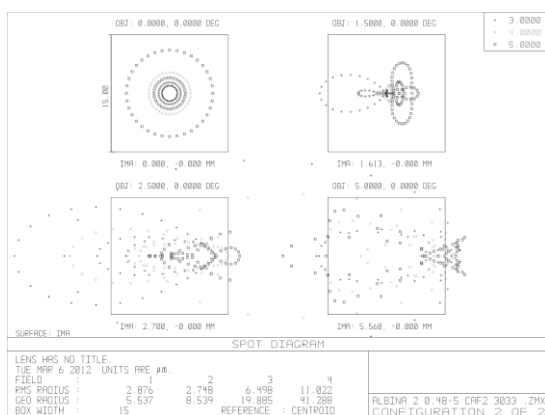


б

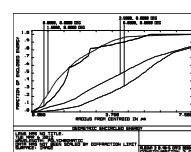
а – точечная диаграмма распределения энергии в абберационном пятне.

б – график концентрации энергии в абберационном пятне

Рис. 2. Характеристики качества изображения объектива в визуальном диапазоне спектра



а



б

а – точечная диаграмма распределения энергии в абберационном пятне.

б – график концентрации энергии в абберационном пятне

Рис. 3. Характеристики качества изображения объектива в тепловизионном диапазоне спектра 3 – 5 мкм

Результаты расчета позволяют сделать выводы:

- Качество изображения в тепловизионном диапазоне спектра хорошее и соответствует требованиям современных приемников излучения;
- Качество изображения в визуальном диапазоне спектра пока не достигает требованиям современных приемников излучения, особенно к краю поля зрения;
- Данная оптическая схема объектива может служить исходной для дальнейших разработок;
- Масса оптических деталей не превышает 90 граммов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Техноком Групп. [Электронный ресурс]/ «БПЛА».-электронные данные. - М., 2011.- Режим доступа: <http://www.tecnocom.ru/taxonomy/term/2>
2. Авиационная энциклопедия Уголок Неба [электронные ресурсы]/ «Инспектор-101».-Электронные данные.-М., 2009.- режим доступа: <http://www.airwar.ru/enc/bpla/inspektor101.html>.
3. Беспилотные летательные аппараты.[Электронные ресурсы] / «БПЛА Иркут-2М».- электронные данные.-М., 2011.-Режим доступа: <http://bp-la.ru/bpla-irkut-2m/>
4. 3D News. [электронные ресурсы]/ «Новая 12-МП1/2,3 – дюймовая CCD матрица Sharp».-Электронные данные.-М., 2009.-Режим доступа: http://www.3dnews.ru/news/novaya_12_mp_1_2_3_duimovaya_ccd_matritsa_sharp
5. Digital Camera Info. [электронный ресурс]/ «Olympus E 620».-Электронные данные.- М., 2009.-Режим доступа: <http://www.shutterbug.com/content/olympus>
6. Лаптев Е.В. Разработка многоспектральной оптической системы с двумя зеркалами Манжена. [Текст]/ГЕО-Сибирь 2011. Т. 5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, нанотехнологии. Ч. 1 :сб. матер. VII Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2011», 19-29 апреля 2011 г., Новосибирск. - Новосибирск: СГГА, 2011. - с. 171-176.

© А.С. Курбангалиева, 2012

ОСОБЕННОСТИ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА МИКРОИЗОБРАЖЕНИЙ КЛЕТОК

Ирина Георгиевна Пальчикова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, доктор технических наук, профессор, заведующая лабораторией лазерных прецизионных систем, тел. 8 (383) 306-58-74, e-mail: palchikova@tdisie.nsc.ru

Евгений Сергеевич Смирнов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, аспирант кафедры квантовой оптики, тел. (901) 45-212-41, e-mail: the-first-person@yandex.ru

Использование микроизображений, полученных с помощью светового микроскопа, для количественного анализа биологических образцов требует понимания следующего: особенностей источников света, взаимодействия света с изучаемым образцом, характеристик современной микроскопной оптики, характеристик современных электрооптических сенсоров (в частности, ПЗС и КМОП камер), а так же надлежащего использования алгоритмов для восстановления, сегментации и анализа цифровых изображений. Все эти составляющие являются обязательными, если необходимо корректно выполнить измерение «аналоговых» величин, представленных в формате цифрового изображения. В докладе рассматриваются некоторые из указанных вопросов в деталях, поскольку они существенно влияют на процесс в целом и позволяют понять его ограничения.

Ключевые слова: цитофотометрия, цифровые микроизображения, калибровка.

FEATURES OF THE QUANTITATIVE ANALYSIS OF MICRO-IMAGES OF CELLS

Irina G. Palchikova

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch RAS, 41, Russkaya str., Novosibirsk 630058, Head of Laboratory for precision laser systems, Ph.D., tel. 8 (383) 306-58-74, e-mail: palchikova@tdisie.nsc.ru

Eugene S. Smirnov

Novosibirsk State University, 2, Pirogova str., Novosibirsk 630090, graduate student, Department of quantum optics, tel. (901) 45-212-41, e-mail: the-first-person@yandex.ru

The use of micro-images for the quantitative analysis of specimens requires an understanding of the following: light sources peculiarities, the interaction of light with the studied specimen, the characteristics of modern microscope optics, the characteristics of modern electro-optical sensors (in particular, CCD and CMOS cameras), and the proper use of algorithms for the restoration, segmentation, and analysis of digital images. All of these components are necessary if one is to achieve the accurate measurement of “analog” quantities given a digital representation of an image. In this report several of these issues in detail as they provide important insights into the process in general are considered.

Key words: micro-image, microscope optics, the algorithm, measurement algorithm.

Цитофотометрическое определение количества ДНК в клетке, окрашенной по Фельгену, является одним из фундаментальных методов цитохимии и широко используется в биологии и медицине. В основе этого метода лежит стехиометрическое связывание фуксинсернистой кислоты с альдегидными группами, возникающими в результате кислотного гидролиза оснований ДНК. Дальнейшая оценка света, поглощенного окрашенными структурами, позволяет судить о содержании в них ДНК. Очевидным достоинством этого метода является возможность анализа малых групп клеток, детектируемых на препаратах *in situ*. Мы модифицировали [1] известный денситометрический метод [2], заменив фотоэмульсионное детектирование света (или фотокатодное в интегральном методе) регистрацией изображения с помощью цифровой фотоматрицы с повышенной дигитализацией.

Процедура подготовки препаратов для цитофотометрии в видимой области спектра достаточно подробно описана [2] и стандартизована. Цитофотометрическое устройство должно включать в себя: 1. обычный микроскоп, 2. цифровую камеру (со встроенным АЦП), фотоматрица которой помещается в плоскость промежуточного изображения или изображение строится на ней с помощью дополнительного объектива, 3. компьютер для накопления и обработки данных и 4. соответствующее программное обеспечение. На рис. 1 приведена фотография разработанного цитофотометрического устройства на основе микроскопа DIALUX 20 EB. Микроскоп оснащен галогенным осветителем (лампа 12В, 50 Вт) и лазерной приставкой. Для получения качественного изображения в задачах цитофотометрии достаточно использовать без`иммерсионный микрообъектив-планапохромат 40 $\times$, NA 0,5. Измерения проводились при максимально закрытых полевой и апертурной диафрагмах с использованием интерференционного светофильтра, пропускающего свет с длиной волны 551 ± 10 нм.



Рис. 1. Фотография разработанного цитофотометрического устройства

Цитофотометрия ядер клеток осуществляется по следующему алгоритму [1]. Регистрируются два изображения с одинаковыми параметрами камеры, соответствующем линейному участку передаточной характеристики устройства. Для устранения «блика оптики» в микроскопе разработан контрольный объект, состоящий из микрокусочков китайской туши, заключенной в канадский

бальзам. Изображение 1 – это изображение кусочка китайской туши, размеры которого превышают размеры фотометрируемых ядер. Ядра клеток помещаются в ту же самую часть поля зрения микроскопа, в котором ранее был снят контрольный объект, и регистрируется изображение 2. На рис. 2 показаны изображения 1 и 2 и результат их совмещения.

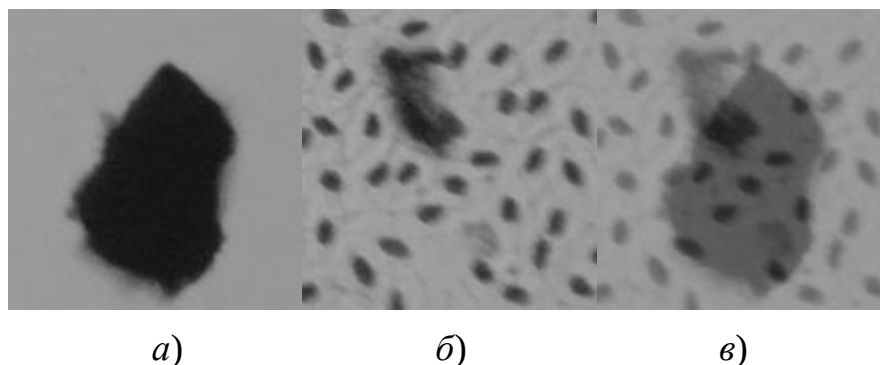


Рис. 2. Изображения китайской туши (а), клеток (б) и результат их совмещения (в).

Обработку изображений осуществляли последовательно следующим образом. Этап 1: уровни серого в изображении 1 попиксельно вычитали из уровней серого в изображении 2 фотометрируемого ядра, получая изображение 3. Этап 2: на цифровых изображениях 3 ядер с вычтенным бликом выделяли суб`имидж собственно ядра и суб`имидж прозрачного участка (изображение 4), расположенного рядом с ним. Изображение 4 использовали для определения усредненной интенсивности I_0 света, прошедшего через образец без поглощения в красителе. Интенсивность каждого пикселя суб`имиджа собственно ядра нормировали на интенсивность I_0 прошедшего непоглощенного света. Полученная таким образом цифровая матрица состоит из чисел, пропорциональных коэффициенту пропускания (τ) света участками ядра. Этап 3: оптическую плотность для каждого пикселя вычисляли по формуле $D = -\log \tau$ (согласно закону Бугера-Ламберта-Бэра). Этап 4: в качестве меры содержания ДНК в ядре использовали сумму логарифмов матрицы коэффициентов пропускания, взятую с обратным знаком.

Регистрация высококачественных изображений для последующего количественного обсчёта изображений с высокой точностью возможна лишь с применением соответствующих цифровых камер. Точность цитофотометрических измерений зависит, в частности, от линейности передаточной характеристики установки в целом. Мы разработали и провели многоступенчатую процедуру калибровки устройства. В качестве первого тестового объекта использовался аттестованный 9-ти ступенчатый ослабитель к спектрографу ИСП-51. Вторым тестовым объектом служил фотометрический клин, изготовленный из ахроматического нейтрально-серого в массе стекла. Размеры клина – 70×15 мм. Производилась последовательная регистрация цифровых изображений различных областей тестового объекта со значением

ISO равным 100, значение установки выбора баланса белого – вручную. На каждом изображении выделяется один и то же сегмент, по которому проводится усреднение значений уровней серого по всем пикселям. Строится передаточная характеристика, отражающая соотношение между значением пропускания, полученным с помощью цитометрической установки и соответствующим значением пропускания тестового объекта.

Производилось тестирование трех камер различных производителей. На рис. 3 представлена зависимость пропускания ступеней ослабителя T_1 , найденная в результате эксперимента, от величины значений пропускания T_2 , указанных в паспорте ослабителя. Точками различной формы обозначено среднее значение пропускания тестовой полоски; вертикальные отрезки отмечают среднеквадратичное отклонение. Проведенная гамма-коррекция позволила линеаризовать зависимость.

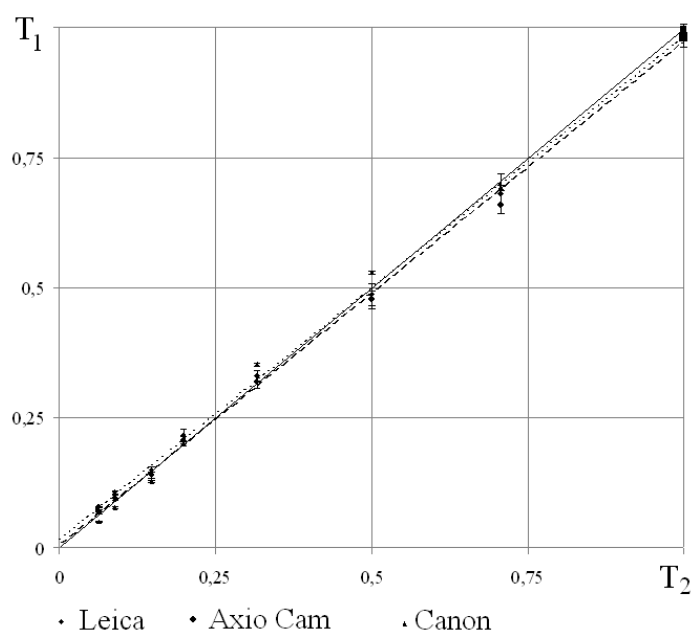


Рис. 3. Передаточные характеристики установки с тестируемыми камерами

Для построения цитометрических калибровочных зависимостей на цитофотометрической установке проведены измерения биологических тестовых препаратов. При изготовлении тестовых препаратов использовались неделящиеся ядра клеток крови нескольких видов, что позволило избежать естественного разброса содержания ДНК, связанного с фазой синтеза ДНК. Для измерения количества ДНК выбраны клетки крови четырех видов позвоночных (*Gallus domesticus*, *Danio rerio*, *Homo sapiens*, *Rana arvalis*). Точность полученных измерений сравнима с точностью данных, полученных ранее с помощью других методов цитометрии [3].

На рис. 4 представлены калибровочные зависимости, построенные с помощью различных камер с использованием биологических тестовых препаратов. Сравнивая данные на графиках 1, 2 и 3 с учетом того, что для наглядности графического представления условные единицы для значений

содержания ДНК, рассчитанные из цифровых изображений, зарегистрированных на камерах Canon EOS и Leica DFC, уменьшены в 10 раз, можно заметить, что камеры с большим динамическим диапазоном имеют более высокую чувствительность.

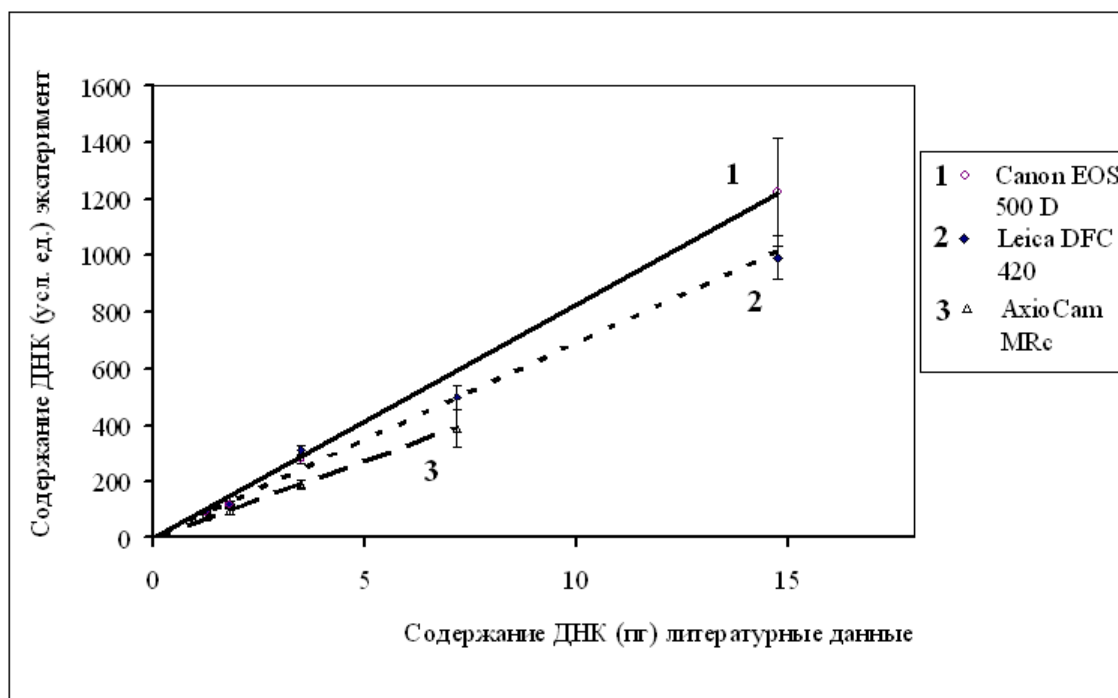


Рис. 4. Калибровочные зависимости, использующие содержание ДНК в ядрах клеток крови, полученные для различных камер. По оси абсцисс указано содержание ДНК в пГ по литературным данным, ордината – измеренное содержание ДНК в условных единицах

Проанализирован вклад различных эффектов в ошибку денситометрического метода измерений, предложен способ учета бликов оптики, найдены оптимальные параметры настройки микроскопа и камеры для денситометрических измерений. К новым результатам относится анализ влияния дифракции света в микроскопе, ограничивающей разрешающую способность оптического изображения, на точность цитометрических измерений. Согласно теории линейных систем, оптическое изображение в микроскопе есть свертка «идеального» изображения с функцией рассеяния точки прибора. Численный расчет ошибок, вносимых дифракцией, показал, что относительные погрешности могут составлять от 0,01 до 34 % в зависимости от размеров и пропускания ядра. То есть требуется разработка процедуры калибровки для устранения этой систематической ошибки. Для этих целей разработаны специальные тестовые микрообъекты, фотография которых дана на рис. 5.

Изготовленные дифракционные микроструктуры позволяют выполнить фотограмметрическую и дифракционную калибровку цитофотометрической установки, экспериментально определить функцию рассеяния точки и учесть

блики оптики в разработанном нами интегральном методе цитофотометрии, измерить передаточную характеристику (по оптической плотности) устройства и выбрать оптимальные параметры для работы камеры и настройки измерительного стенда. Тестовый объект представляет собой стеклянную пластинку, покрытую пленкой хрома. В пленке хрома нанесены шкалы и тестовые фигуры в виде кружков и квадратов. Микрометрическая шкала имеет

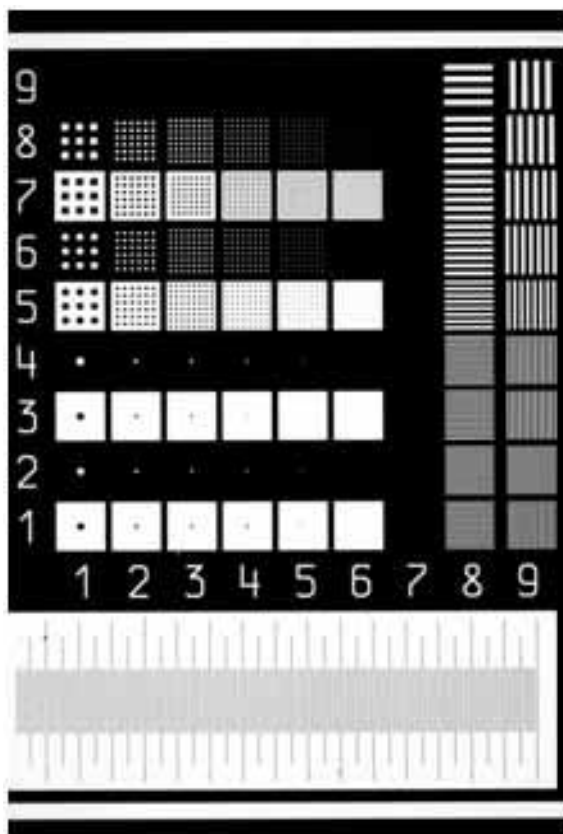


Рис. 5. Изображение тестовых объектов

длину 1 мм с ценой деления 0,01мм число делений шкалы – 100. Характерные размеры кружков (квадратов) составляют следующий ряд: 3, 5, 7, 9, 11, 22 мкм. Требуемая точность исполнения размеров – не хуже, чем 0,3 мкм. Пропускание подложек варьируется в пределах 0,1 – 0,9.

Специальное программное обеспечение разработано для отработки методики определения количественных параметров на микроскопных изображениях объектов с повышенной дигитализацией (digitization 14 bit). Результаты, полученные с помощью разработанного цитофотометрического устройства по измерению содержания ДНК в ядрах различных организмов показали, что коэффициенты вариации данных измерений составляют от 2,5% до 7%, что находится на том же уровне, что и лучшие образцы денситометрических систем, известные из зарубежных публикаций [4].

Авторы благодарят сотрудников ИМКБ за предоставленные биологические препараты. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 51 и Проекта президиума СО РАН № 41, выполняемый совместно со сторонними научными организациями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Омелянчук В.Ф. Пальчикова И.Г., Семешин В.Ф., Алексеева А.Л., Жимулев И.Ф. Интегральный метод измерения количества ДНК в клетке с использованием цифровой микрофотографии // Цитология. – 2010. – Т. 52. – № 4. – С. 349–353.
2. Агроскин Л.С., Папаян Г.В. Цитофотометрия. Аппаратура и методы анализа клеток по светопоглощению. - Л.: Наука. – 1977. – 295 с.
3. Animal Genome Size Database [Electronic resource] – Режим доступа: <http://www.genomesize.com>
4. Puech M., Giroud F. Standardisation of DNA quantitation by image analysis: quality control of instrumentation // Cytometry. – 1999. – Vol. 36. – P. 11–17.

© И.Г. Пальчикова, Е.С. Смирнов, 2012

ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ И БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ МАГНИЕТЕРМИЧЕСКОМ ПОЛУЧЕНИИ И ПРИМЕНЕНИИ МЕТАЛЛОВ ПОДГРУППЫ IVA ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ

Владислав Петрович Перминов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, тел. +7(383) 344-40-58, e-mail: kaftop@ssga.ru

Александр Николаевич Соснов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор, кафедра технологии оптического производства, тел. +7(383) 344-40-58, e-mail: kaftop@ssga.ru

Наталья Кирилловна Соснова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор, кафедра технологии оптического производства, тел. +7(383) 344-40-58, e-mail: kaftop@ssga.ru

Максим Михайлович Кузнецов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры технологии оптического производства, тел. +7(383) 344-40-58, e-mail: a9214439@yandex.ru

В статье делается попытка систематизации физико-химических свойств, областей возможного применения и негативных факторов, возникающих при магниетермическом получении и использовании титана, циркония и гафния.

Ключевые слова: магниетермия, титан, цирконий, гафний, токсичность, воспламеняемость.

TECHNOLOGIES AND SAFETY PROBLEMS IN MAGNESIUM THERMAL PRODUCTION AND APPLICATION OF PERIODIC TABLE IVA SUBGROUP METALS

Vladislav P. Perminov

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, tel. +7(383) 344-40-58, e-mail: kaftop@ssga.ru

Alexander N. Sosnov

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383) 344-40-58, e-mail: kaftop@ssga.ru

Natalya K. Sosnova

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383) 344-40-58, e-mail: kaftop@ssga.ru

Maxim M. Kuznetsov

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383) 344-40-58, e-mail: a9214439@yandex.ru

An attempt to systematize physical-and-chemical properties, application fields and negative factors, arising in magnesium thermal production and usage of titanium, zirconium and hafnium, is made.

Key words: thermal action, titanium, zirconium, hafnium, toxicity, combustibility.

Вопросы, связанные с безопасностью при получении и применении металлов, сплавов и интерметаллидов являются весьма актуальными, недостаточно изученными и представляющими блок проблем создания металлов и сплавов с заранее заданными свойствами. Для попытки решения этих вопросов полезно использовать матрицу периодической системы элементов с расположением их по подгруппам.

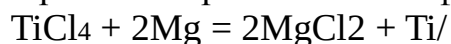
Ранее [1] нами при обсуждении общих основ теории магниетермических процессов удалось вскрыть ряд закономерностей в бинарных диаграммах состояния, а также объяснить наличие или отсутствие промежуточных соединений с позиции теории стабильных электронных конфигураций.

Можно предположить, что не только константы элементов и соединений изменяются по периодическому закону но и свойства, отвечающие за безопасность, например токсичность или воспламеняемость меняются соответственно.

В работах [2, 3] с этих позиций рассматривались щелочные и щелочноземельные металлы. Здесь же мы рассмотрим переходные металлы IVa подгруппы Ti, Zr, Hf, при получении которых магниетермический способ предпочтителен не только термодинамически, но и в связи с отсутствием промежуточных соединений (интерметаллидов) в бинарных диаграммах состояния магний-металл.

ТИТАН. В связи с малой плотностью, высокой коррозионной стойкостью, пластичностью и удельной прочностью, а так же способностью не только сохранять в условиях глубокого холода прочность, но и повышать ее при сохранении высокой пластичности, титан нашел широкое применение как основа конструкционных сплавов для авиации, космоса, химической промышленности и других направлений человеческой деятельности.

Металлический титан получают виде губки в восстановительных реакторах с нейтральной атмосферой по реакции



Затем губчатый титан переплавляют в вакуумных и дуговых печах, подвергают разливке и сортировке.

Комплексная автоматизация процесса восстановления проблематична из-за периодичности процесса и других факторов.

Усилия ученых направлены на совершенствование процесса, в частности создания непрерывного способа получения титана.

На всех переделах производства титана опасно в связи с возможными выбросами вредных газо – и парообразных веществ в атмосферу в результате аварии. При этом страдают не только рабочие, но и население, живущее поблизости.

Наиболее вероятными негативными факторами, проявляющимися при аварийных ситуациях, являются выбросы тетрахлорида титана, хлорида водорода и паров хлора. Магний, поступающий в цех в расплавленном состоянии, склонен к воспламенению с образованием клубов дыма. Температура при этом достигает 2850°C . Горящий магний при соприкосновении с водой вызывает взрыв, поэтому его засыпают обычно карналлитом.

Несоблюдение техники безопасности на производстве приводит к тому, что титановый порошок и его соединения, воздействуя на организм, вызывают профессиональную патологию.

Загрязненность воздуха пылеобразными частицами титана вызывает у работающих пневмокониоз.

Исследования показали [4, 6], что рабочие, занятые в производстве губчатого титана, подвергаются воздействию паров металлического титана, хлора, хлорида магния и других веществ в 90% случаев заболевают пылевым бронхитом. Наблюдаются нарушения терморегуляции, нервно-мышечные расстройства. ПДК для аэрозоля титана 10 мг/м^3 . Класс опасности 4. Преимущественно фиброгенного действия. ПДК для TiCl_4 1 мг/м^3 . Класс опасности 2. Требуется специальная защита кожи и глаз. Титан в виде тонкого порошка взрывоопасен и может самопроизвольно воспламеняться. Вода не прекращает горение, но, напротив, провоцирует водородный взрыв. Титан можно тушить специальной порошковой смесью или совершенно сухим песком. Эффективным может быть и тушение инертными газами, но при условии полного вытеснения воздуха из зоны горения.

Весьма опасна в пожарном отношении работа с тонким титановым порошком. Порошок надо хранить в прохладном вентилируемом помещении вдали от опасных окислительных агентов. Вентиляция должна обеспечивать недопущение концентрации пыли, при которой возможен взрыв.

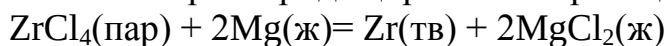
При перевозке титана в порошке его влажность должна быть не менее 20%. Металлические баки с порошком пакуют в деревянные ящики (по одному баку). Хлористый титан должен храниться без соприкосновения с воздухом и изолированным от воды и всяких источников увлажнения.

ЦИРКОНИЙ. Мировое производство циркониевых концентратов в 2006 году превысило 1 млн. т., что больше, чем выпуск всех остальных редких металлов [7]. Подавляющая часть циркониевых концентратов (85-90%) применяется в минеральной форме как неметаллическое сырье для выпуска высококачественной керамики, глазури, эмалей и т.д. Только 10-15% концентратов идет на переработку для получения металла, его сплавов, а так же для получения гафния.

Металлический цирконий, обладая небольшим сечением захвата тепловых нейтронной или как говорят, абсолютным «пропускателем» нейтронов, широко применяется в качестве оболочек топливных элементов (ТВЭЛ) и как

конструкционный материал ядерных реакторов в несущих конструкциях активной зоны. Цирконий применяют также в качестве легирующих добавок для производства специальных сталей и специальных сплавов в химическом машиностроении. Порошок циркония применяется в качестве газопоглотителя, дающего возможность поддерживать высокий вакуум в приборах.

Металлический цирконий получают главным образом магнитоермическим способом из тетрахлорида циркония по реакции



Для получения циркония высокой чистоты его рафинируют иодидным способом.

Металлический цирконий и его нерастворимые соединения при попадании в организм инертны. У рабочих циркониевого производства отмечались жалобы на боли в области сердца, слабость, головные боли. Наблюдались хронические заболевания верхних дыхательных путей, изменения в крови (снижение содержания гемоглобина) и прочие нарушения.

ПДК металлического циркония 6 мг/м³. Хотя аэрозоль металлического циркония и ZrO₂ не токсичны при работе с соединениями циркония должен проводиться весь комплекс противо пылевых мероприятий [5, 6].

Воспламенение циркония зависит от геометрии образца. Массивные куски циркония выдерживают без воспламенения очень высокие температуры.

Опилки и стружка способны самовоспламеняться при температуре несколько превышающей 500⁰С. Воспламенение стимулирует влажность окружающей среды. Мелкодисперсный порошок циркония, погруженный в воду, трудно воспламеняется, но после воспламенения горит более энергично, чем на воздухе.

Листы циркония толщиной до 6 мм самовоспламеняются при комнатной температуре в атмосфере кислорода под давлением, если их поверхность освобождена от окислов или при наличии свежего излома [8].

ГАФНИЙ. Единственный источник получения редкого элемента - гафния – циркононовые концентраты, содержащие 0,5 – 2,0% диоксида гафния. Гафний имеет важное стратегическое значение, т.к. обладает (в противоположность цирконию) свойством сильнейшего поглотителя тепловых нейтронов. Гафний широко используется как превосходный материал для регулирующих стержней атомных реакторов.

Он отличается высокой коррозионной стойкостью во всех средах и хорошими механическими свойствами. Его используют как легирующую добавку к сплавам специального назначения.

Гафний извлекают в процессе получения металлического циркония при глубокой очистке последнего от примесей. Мировое потребление гафния оценивается в 100 – 150 тонн в год (в пересчете на металл), из них 80% используется в металлической форме, остальные в форме диоксида [7].

По характеру токсического действия растворимые соединения гафния соответствуют аналогичным соединениям циркония, но сила действия соединений гафния меньше [5].

Это утверждение нуждается в проверке, т.к. зачастую в испытуемом гафнии присутствует цирконий. По окисляемости гафний также аналогичен цирконию. Прутки, слитки и другие большие образцы при нагреве не воспламеняются. Стружка и опилки легко воспламеняются. Гафний реагирует с водой, освобождая водород.

Существует возможность его взрыва, хотя при комнатной температуре процесс не идет. Однако при повышенных температурах или при горении гафния реакция между металлом и водой будет проходить быстро и сопровождаться значительным выделением водорода.

Опасность взрыва особенно вероятна при работе печей с водяным охлаждением. Необходимо предусматривать отвод образующегося водорода в безопасное место.

Губка гафния обладает большей склонностью к воспламенению, чем губка циркония.

Губка гафния, стружка, опилки или металлическая пыль воспламеняются очень легко и при горении развивается высокая температура. Однако опасность пожара или взрыва можно свести к минимуму если предпринимать определенные меры предосторожности. Например, дезактивация поверхностей металла, смачивание массы активированной губки, эффективная вентиляция и др.

Сопоставляя известные к настоящему времени физико-химические и биологические свойства металлов IVa подгруппы (Ti, Zr, Hf) можно заметить тенденцию увеличения токсичности и пожароопасности с ростом атомного номера элемента в подгруппе. Смотри таблицу.

Таблица. Кристаллическая структура и некоторые свойства металлов IVa подгруппы периодической системы элементов

Металлы	Кристаллическая структура	Периоды кристаллической решетки, А	Атомный радиус, А	Плотность, г/см ³	Температура плавления, °С	Температура кипения, °С	Коэффициент пирофорности, Q/Cp.λ*	Температура воспламенения, °С***	Предельно допустимая концентрация, мг/м ³
Ti	Гекс	a=2,9504 c=4,6833	1,46	4,51	1668	3260	1380	670	10
Zr	Гекс	a=3,2317 c=5,1476	1,6	6,51	1855	4340	1605	500	6
Hf	Гекс	a=3,1833 c=5,0422	1,59	13,31	2222	5400			0,5**

Примечания:

*- Коэффициент пирофорности, в котором Q- теплота сгорания, Cp. – удельная теплоемкость, λ – теплопроводность.

** - по данным Американских источников

***- температура воспламенения зависит от дисперсности, чистоты металла и может быть даже равна комнатной температуре

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самсонов Г.В. Магниетермия./Г.В. Самсонов, В.П. Перминов. – М.: Металлургия, 1971. - 174 с.
2. Перминов В.П. Вопросы безопасности при магниетермическом получении щелочных металлов/ Сб. матер. научно-технического конгресса СПАССИБ-БЕЗОПАСНОСТЬ-2009. 15-17 сентября 2009 г., СГГА, Новосибирск, 2009. – с. 129-132.
3. Перминов В.П. Вопросы безопасности при магниетермическом получении и использовании металлов Па подгруппы периодической системы элементов / Сб. матер. научно-технического конгресса СПАССИБ-БЕЗОПАСНОСТЬ-2010. 21-23 сентября 2010 г., СГГА, Новосибирск, 2010. - С. 173-180.
4. Тарасов А.В. Металлургия титана. – М.: Академкнига, 2003. - 327с.
5. Вредные вещества в окружающей среде. Элементы I – IV групп периодической системы и их неорганические соединения. Справ-энцикл. /Л.А. Аликбаева и др. Рос. акад. естест. наук. – Спб.: Профессионал, 2005. – 461 с.
6. Злобинский Б.М. Воспламеняемость и токсичность металлов и сплавов / Б.М. Злобинский, В.Г. Иоффе, В.Б. Злобинский. – М.: Металлургия, 1972. – 264 с.
7. Быховский Л.З и др. Цирконий и гафний России. – М:ВИМС, 2007. – 127 с.
8. Коровин С.С. Редкие элементы. Химия и технология/ С.С. Коровин, Д.В. Дробот, П.И. Федоров. – М.: МИСИС, 1999. – 463 с.
9. Рисованный В.Д. и др. Гафний в ядерной технике. - Димитровград, 1993. - 141 с.

© В.П. Перминов, А.Н. Соснов, Н.К. Соснова, М.М. Кузнецов, 2012

РАЗРАБОТКА ПОИ С ВНУТРЕННИМ ИНЖЕКЦИОННЫМ УСИЛЕНИЕМ ТОКА НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Райимжон Усмонович Алиев

Узбекистан, Андижанский государственный университет им. З.М. Бабура, доктор технических наук, профессор, 770100, ул. Университетская 129, тел. 8(374)225-05-09, факс: 8(374)222-18-63, e-mail: alievuz@rambler.ru

Неъматжон Рахимович Рахимов

ФГБОУ ВПО «СГГА», доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств и технологий, 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, тел. +7(383)344-40-58, факс +7(383)344-40-58, e-mail: n_rah@ngs.ru

Сухроб Райимжонович Алиев

ФГБОУ ВПО «СГГА», кафедра «Наносистем и оптоэлектроники», ИОиОТ, магистрант, 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, тел. +7(383)344 40 58, факс +7(383)344 40 58, e-mail: Suhrob_asr89@yahoo.com

Елена Юрьевна Кутенкова

ФГБОУ ВПО «СГГА», доцент кафедры ТОП ИОиОТ, 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, тел. +7(383)361-07-79, факс +7(383)344-40-58, e-mail: kutenkova.elena@yandex.ru

В статье рассмотрены методы разработки ПОИ с внутренним инжекционным усилением тока на основе поликристаллического кремния. Доказано, что реальная возможность, изготовления инжекционного ПОИ с коэффициентом усиления ~ 250.

Ключевые слова: приемники оптического излучения (ПОИ), поликристаллический кремний, температурная обработка, энергетические уровни.

DEVELOPMENT OF OPTICAL DETECTORS WITH INNER INJECTION CURRENT AMPLIFICATION ON THE BASIS OF POLYSILICON

Rayimjohn U. Aliyev

Ph.D., Prof., 129 Universitetskaya St, 770100 Andijan, Z.M. Babur Andijan State University, Uzbekistan, phone: 8(374)225-05-09, fax: 8(374)222-18-63, e-mail: alievuz@rambler.ru.

Neymatjohn R. Rakhimov

Ph.D., Prof., department of special devices and technologies, Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383)344-40-58, fax +7(383)344-40-58, e-mail: n_rah@ngs.ru

Sukhrob R. Aliyev

A post-graduate student, department of nanosystems and optoelectronics, Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383)344-40-58, fax +7(383)344-40-58, e-mail: Suhrob_asr89@yahoo.com.

Elena Yu. Kutenkova

Assoc. prof., department of optical production technologies, Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383)361-07-79, fax +7(383)344-40-58, e-mail: kutenkova.elena@yandex.ru.

Techniques for the development of optical detectors with inner injection current amplification on the basis of polysilicon are considered. The possibility of producing optical detectors with current amplification ~ 250 is proved.

Key words: optical detectors, polysilicon, thermal treatment, energy levels.

Полупроводниковые приемники оптического излучения (ПОИ) имеют существенные преимущества для создания оптоэлектронных датчиков существующих по классификации ПОИ, приведенной в [1]. Наиболее дешевыми и простыми по изготовлению различных конфигураций таких ПОИ, являются кремниевые фоторезисторы. Основным недостатком фоторезистора является их инерционность и нелинейности характеристики. Для повышения быстродействия ПОИ, изготовлены диодные структуры, которые можно использовать на фотодиодном или фотовентильном режиме. Такие структуры имеют высокую стабильность и большой диапазон линейности характеристик, проявляют повышенную фоточувствительность в длинноволновой области спектра. Наряду с такими преимуществами диодные ПОИ, имеют ряд недостатков, именно - большие обратные токи в отсутствии излучения, сдвиг напряжения и избыточный шум при освещении.

Для устранения этих недостатков в данной работе рассмотрена возможность разработки инжекционных ПОИ на основе структур пленочного поликристаллического кремния (ПК). Известно, что границы зерен (ГЗ) в ПК характеризуются плотностью поверхностных состояний (ПС), специфическим спектром глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне и степенью их заполнения зарядами.

Высокотемпературные обработки, являющиеся неизбежными в процессе изготовления приборов электронной техники, приводят к изменению всех трех вышеуказанных характеристик ГЗ. Авторами работы [2, 3] были исследованы процессы переноса носителей заряда в пленочных ПК структурах при формировании в них p - n -перехода методами, различающимися условиями высокотемпературных операций. В исследуемых структурах базовый n -слой с удельным сопротивлением $\rho \sim 0,1 \text{ Ом} \times \text{см}$ и толщиной 40 мкм был получен водородным восстановлением тетрахлорида кремния при температуре $T = 300^\circ\text{C}$ в вертикальном реакторе на n^+ -подложке из металлургического кремния с удельным сопротивлением $\rho \sim 0,01 \text{ Ом} \times \text{см}$. Размеры зерен в ПК подложке составляли $\geq 300 \text{ мкм}$, а выращенный n -слой повторял структуру подложки, и размеры зерен в нем колебались в пределах $300 \div 2000 \text{ мкм}$. Формирование p^+ - n -перехода осуществлялось термодиффузией бора на глубину $\sim 1,5 \text{ мкм}$ при температуре 1100°C . Уровень легирования p^+ -слоя контролировался поверхностным сопротивлением $R_s \sim 50 \pm 5 \text{ Ом/кв. см}$. На полученных структурах с размерами $5 \times 5, 2 \times 2, 1 \times 1 \text{ мм}^2$ в идентичных условиях формировали

омические контакты к n^+ - и p^+ -областям и проводили термостатированные измерения темновых вольт-амперных характеристик (ВАХ) и вольт-емкостных характеристик (ВЕХ) на частоте $f = 100$ кГц.

Из темнового ВАХ p^+-n-n^+ -структуры площадью 5×5 мм² с p - n -переходом следует, что в области смещений $20 < qU/kT < 5$ в пропускном направлении у образца имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС). Наблюдаемый эффект обусловлен, очевидно, следующим: в пленочных ПК структурах p - n -переход шунтируется дополнительным n^+ -каналом, образующимся на ГЗ за счет сегрегации примеси фосфора, которой легирован n -слой, на высокотемпературной операции создания p - n -перехода. Это происходит потому, что, во-первых, коэффициент с генерации бора в кремнии в $2 \div 3$ раза выше, чем у фосфора, и, во-вторых, коэффициент диффузии фосфора по ГЗ в $3,5 \div 3,8$ раза превышает значения, характерное для объема, т.е. внутри зерна [4].

При небольших величинах приложенного напряжения сопротивление этого канала намного меньше сопротивления p - n -перехода и ток протекает преимущественно по ГЗ. Немаловажную роль при этом играют ПС - электронные ловушки на ГЗ в n -слое. Высокотемпературная обработка приводит к увеличению степени заполнения ПС, что сопровождается увеличением объема области обеднения вплоть до размеров, сопоставимых с объемом зерна. В такой ситуации с ростом подаваемого напряжения уменьшается концентрация носителей заряда в объеме полупроводника за счет их эксклюзии, а дифференциальное сопротивление p - n -перехода возрастает.

С ростом общего тока через ПК p^+-n-n^+ -структуру сопротивление p - n -перехода уменьшается и происходит перераспределение токов, протекающих по каналу на ГЗ и через p - n -переход. Это сопровождается резким увеличением инжекции носителей заряда в n -слой, и возникающая положительная обратная связь по току создает условия роста проводимости n -слоя с увеличением тока. В результате на ВАХ исследуемой структуры образуется участок с ОДС в прямом направлении смещения.

Известны различные модели возникновения S-образной ВАХ диодных структур, основной из которых объясняет этот эффект увеличением времени жизни инжектированных носителей заряда в компенсированном глубокими примесными центрами полупроводнике. Предполагалась, что и в исследуемых структурах имела место диффузия примесей, дающих глубокие уровни, из n^+ -подложки в n -слой. Поэтому проводились измерения ВЕХ структур в диапазоне температур $77 \div 300$ К. Результаты указали на отсутствие или, по крайней мере, незначительную концентрацию глубоких примесных центров ($N_T \leq 10^{12}$ см⁻³). Обнаруженный непрерывный спектр уровней в интервале энергии $E_C - E = -0,2$ МэВ, связанный наряду с примесными уровнями и с ПС на ГЗ и комплексами дефектов на них, безусловно указывает на их возможный вклад в формирование механизма переноса носителей заряда в пленочных ПК структурах. Однако основной причиной возникновения S-образной ВАХ, по нашему мнению, является шунтирующие p - n -переход каналы на ГЗ.

Структуры с диффузионным p - n -переходом, имеющие напряжение включения $U_{BO} \leq 1,2$ В в прямом направлении освещали белым светом со стороны перехода и измеряли ВАХ в прямом и обратном направлениях при температуре окружающей среды 30°C . Образцы имели фоточувствительность в участке ВАХ $U < U_{BO}$ в прямом направлении. Однако инжекционное усиление фототока практически не наблюдалось. Для достижения этого необходима еще модуляция проводимости n -базы структуры, которая возможна только при ее высоком сопротивлении и толщине, намного превышающей диффузионную длину носителей заряда ($d \gg L$).

Возможность контролирования S -образной ВАХ позволяет создать инжекционные приборы. Поэтому представлял интерес проведение экспериментального исследования радиационно-стимулированных процессов переноса заряда в пленочных ПК $p^+ - n - n^+$ -структурах.

Для достижения этой цели использовано облучение исследуемых структур непрерывным потоком α -частиц с энергией $E = 5$ МэВ и плотностью $j = 10^7 \div 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Как показывают эксперименты, ВАХ структур резко изменяется с повышением дозы (Φ) α -облучения. Постепенное снижение прямого темнового тока в области $U < U_{BO}$ сопровождается быстрым ростом темнового напряжения включения U_{BO} при повышении дозы облучения (табл. 1), что свидетельствует о достижении условий компенсирования базы. На рис. 1 приведены прямые ветви ВАХ образца ($5 \times 5 \text{ мм}^2$), подвергнутого облучению α -частицами с дозой 10^{12} см^3 , измеренные в отсутствие освещения (кривая 1) и при освещении плотностью $P_0 \sim 100 \text{ мВт/см}^2$ (кривая 2). Фоточувствительность структуры улучшается по мере возрастания U_{BO} (табл. 1). Следовательно, возрастает коэффициент усиления фототока, определяемый как $M = I_\Phi / I_{\Phi 0}$ – отношение фототока $I_\Phi = I - I_T$ (I – полный и I_T – темновой токи) при $0 < U < U_{BO}$ к фототоку $I_{\Phi 0}$ при обратном $U \leq 0$. рост значения M с возрастанием U можно выразить приближенным соотношением Миллера для лавинного умножения фототока [2]:

$$M = A [1 - (U/U_{BO})^n] U^{-1}$$

Показатель степени n у исследуемых структур относительно невысок и составляет $0,01 \div 0,02$, что резко отличает их от лавинных фотодиодов, в которых $n \geq 1$.

Освещение структуры приводит к снижению напряжения включения от значения U_{BO} до $U_{B\Phi}$ ($U_{B\Phi}$ – напряжение включения при освещении), причем, чем больше интенсивность освещения, тем больше разница $U_{BO} - U_{B\Phi}$. Для структуры, ВАХ которой показана на рисунке $U_{BO} = 45,5$ В, а $U_{B\Phi} = 23,8$ В имеется критическое значение плотности освещенности, т.е. уровня фотогенерации G_{KP} , при котором S -фотодиод переходит от состояния “А” на включенное состояние “Б”. При снятии освещения структура стабильно остается в режиме включения. Только путем уменьшения напряжения до значения $U \leq U_{ПОР}$ можно вновь переключать ее на состояние “А”. Пороговое напряжение $U_{ПОР}$ для исследуемых структур составляет $0,6 \div 0,8$ В. Критическая плотность освещенности или G_{KP} , определяемая величиной U_{BO} составляет $200 \div 250 \text{ мВт/см}^2$ для α -облученных структур с $U_{BO} \sim 40 \div 50$ В.

Данные структуры являются так называемыми “бистабильными элементами”, управляемыми либо напряжением, либо освещением.

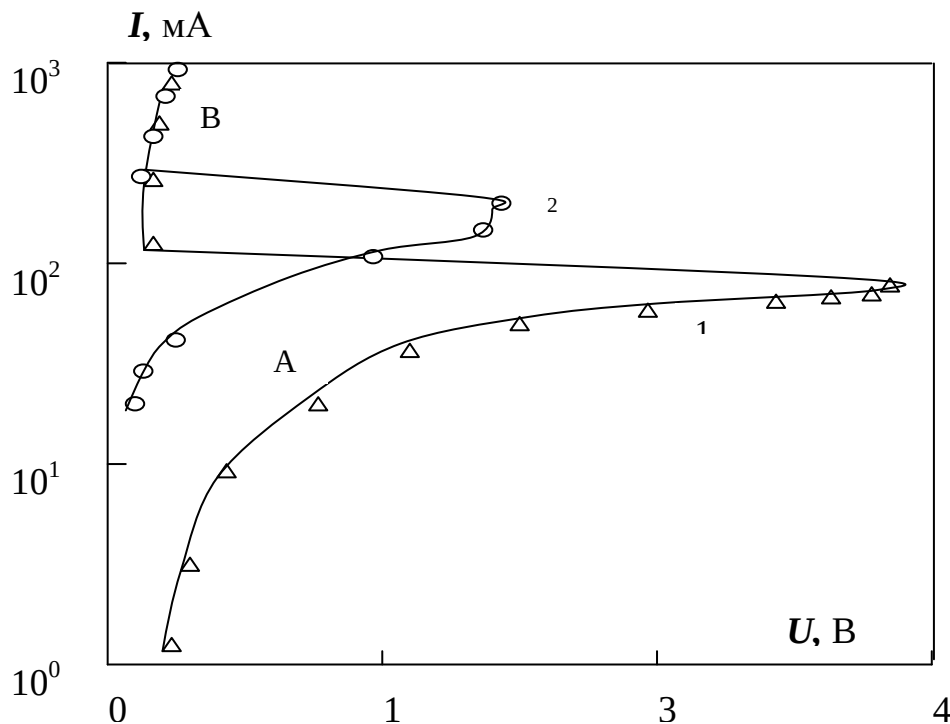


Рис. 1. ВАХ инжекционной p^+-n-n^+ -структуры без освещения (кривая 1) и ее изменение при освещении белым светом (кривая 2)

Для подтверждения механизма процесса, приводящего к описанным выше эффектам, основанного на шунтировании p - n -перехода вдоль ГЗ и компенсировании базы был проведен термоотжиг (ТО) структур в режимах, снимающих наведенные α -облучением радиационные дефекты. ТО вели при $T = 100 \div 800$ °С с продолжительностью 60 мин в вакууме. Показано, что с ростом температуры ТО от 100 до 400 °С наблюдается постепенное уменьшение U_{BO} в среднем от 45 до 24 В почти без изменения величины темнового тока включения I_{BO} . Дальнейший рост температуры ТО в диапазоне $400 \div 600$ °С приводит к резкому снижению I_{BO} почти на порядок с неоднородным изменением U_{BO} , вплоть до его возрастания до 33 В при $T=600$ °С. После ТО при $T=800$ °С исходная ВАХ с $U_{BO} \sim 1,2$ В полностью восстанавливается. Другими словами, дефекты вызванные α -облучением, приводившие n -базу в компенсированное состояние полностью могут быть сняты при ТО. Это с одной стороны подтверждает выдвигаемый механизм процесса, а с другой стороны достаточно высокой воспроизводимости технологии получения структур с S-образной ВАХ. Основные параметры одного из исследуемых p^+-n-n^+ -структур с площадью 5×5 мм² и их изменение при α -облучении ($P_0=100$ мВт/см²).

Таблица 1

$\Phi, \text{см}^{-3}$	$I_{\Phi 0}, \text{мА}$ при $U < 0$	M (макс.)	$I_T, \text{мА}$ $U = 0,3 \text{ В}$	$I_{BO}, \text{мА}$ $U = U_{BO}$	$U_{BO}, \text{В}$	$U_{B\Phi}/U_{BO}$
0	3,0	1	0,06	-	-	-
10^9	2,9	2	0,04	0,45	0,9	10
10^{10}	2,4	12	0,14	200	-	-
10^{11}	1,7	80	0,35	2,8	6	15
10^{12}	0,7	230	0,01	80	45	45
10^{13}	0,34	235	0,05	88	58	48

Таким образом, на основе ПК p^+n-n^+ -структуры на низкоомных подложках из металлического кремния имеется реальная возможность, изготовления инжекционных ПОИ с коэффициентом усиления ~ 250 . Указанные структуры могут быть использованы в качестве бистабильных элементов, фотоключа, фототиристора и как составная часть фототранзистора с одним инжекционным переходом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование кремниевых фотоэлектрических структур в качестве приемника оптического излучения / Р. У. Алиев, Н. Р. Рахимов, Э. К. Мухтаров, Е. Ю. Кутенкова / ГЕО – Сибирь – 2011: сб. материалов VII Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2011», 19 – 29 апреля 2011 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 5, ч. 1. – С. 204–211.
2. Зайнобиддинов, С. Применение поликристаллического кремния в полупроводниковой микроэлектронике и солнечной энергетике / С. Зайнобиддинов, Р. Алиев // Гелиотехника. – 1998, № 2. – С. 70–75.
3. Алиев, Р. Инжекционное усиление фототока в поликристаллических кремниевых p^+n-n^+ структурах // Физика и Техника полупроводников. – 1997. – Том. 31, № 4. – С. 425–426.
4. Муминов, Р.А. К диффузии примесей по границам зерен в поликристаллическом кремнии / Р.А. Муминов, Ф.А. Ахмедов, Т.М. Касимова // Гелиотехника. – 1985. – № 1 – С. 67–69.

© Р.У. Алиев, Н.Р. Рахимов, С.Р. Алиев, Е.Ю. Кутенкова, 2012

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ОБРАЗЦОВ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ЧИСТОТЫ

Людмила Борисовна Воробьёва

ФГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия», кандидат химических наук, профессор кафедры технологии оптического производства, 630108, Новосибирск, Плеханового 10, тел. (383) 361-07-79, e-mail: lbvorobyeva@gmail.com

В статье рассмотрена удельная электрическая проводимость образцов питьевой воды, подвергнутых предварительной обработке с целью улучшения потребительских свойств. Измерены активная и реактивная составляющие проводимости. Показана высокая чувствительность реактивной составляющей.

Ключевые слова: вода, структура, удельная электрическая проводимость.

ELECTROCONDUCTIVITY OF DRINKING WATER SAMPLES WITH DIFFERENT PURITY DEGREES

Ludmila B. Vorobyeva

«Siberian State Academy of Geodesy», professor, department of optical production technology, 630108, Novosibirsk, Plakhotnogo 10, tel. (383) 361-07-79, e-mail: lbvorobyeva@gmail.com

In article studied electrical conductivity of samples of drinking water under preprocessing to improve consumer properties. Measured active and reactive components of conductance. Reactive component shows the high sensitivity.

Key words: water, structure, conductivity.

Исследование свойств чистых систем – одна из наиболее фундаментальных и сложных проблем науки, имеющая большое теоретическое и практическое значение. Центральное место в таких работах занимают исследования молекулярной структуры жидкостей и динамики ее перестройки. Тенденция увеличения спроса и предложения столовых и лечебных вод (в том числе предназначенных для приготовления лекарственных сред, детского питания, суперчистых технологических сред), особенности технологий производства бутилированных вод — факторы, стимулирующие научные исследования в области свойств вещества воды. Исследования показали, что природная вода обладает стимулирующим действием на различные биологические объекты и даже лечебными свойствами [1].

Известная всем аномальность многочисленных свойств воды свидетельствует о том, что в жидкой воде происходит ассоциация молекул, соединение их в агрегаты, т.е. воде присуща особая первичная структура. Это принципиальное открытие было сделано Берналом и Фаулером [2]. Вода относится к «непростым» жидкостям благодаря водородным связям между молекулами, обеспечивающим уникальный тетраэдрический ближний порядок. Представления о кинетических свойствах жидкостей с позиций структурности

предложены Френкелем [3] и легли в основу всех разработанных позднее моделей. Модельное описание структурности воды обобщено в обзоре Саркисова и полученные выводы соотнесены с результатами численных экспериментов [10]. Несмотря на множество исследований, полной ясности в вопросе о структуре вещества воды еще нет. Сведения о разнообразных моделях структуры воды приведены в табл. 1.

Таблица 1. Водородные связи и структура воды

Модель структуры	Время жизни структуры, с ⁻¹	Автор/год/источник	Объясняемое свойство/метод исследования
Короткоживущие группы молекул – мерцающие кластеры. (Водородные связи непрерывно образуются и рвутся)	$10^{-10} - 10^{-11}$	Frank H.S., Wen W.Y. /1957/[4]	Высокая степень подвижности жидкой воды и ее низкая вязкость
Динамически нестабильная полимерная система	Более 10	Г.А. Домрачев и др. /1990-1995/[5]	Реакция жидкой воды на механические воздействия
Устойчивые «кванты воды», состоящие из 6 молекул. (Могут объединяться друг с другом и со «свободными» молекулами воды за счет экспонированных на поверхности водородных связей)		Tsai C.J. and K.D. Jordan /1993/[13]	6-лучевая симметрия растущих кристаллов (снежинок)
Иерархия правильных объемных «ассоциатов» (clathrates), в основе которых лежит кристаллоподобный «квант воды».	До 240	С.В. Зенин /1994-1997/[10-12]	Использованы методы рефрактометрии, протонного резонанса и жидкостной хроматографии
Разнообразные формы, включая модель гигантского икосаэдра из 1820 молекул H ₂ O		M. Chaplin /2002-2011/[8]	
Топологические цепочки и кольца из множества молекул воды - «истинные кирпичики»	Долгоживущие	Хэд-Гордон/ 2002-2006/[9]	Использован метод рентгеновской абсорбционной спектроскопии (XAS)
Гигантские гетерофазные кластеры размером до 0,1 мм		Успенская Е.В. / [1]/2007	Объясняет рассеяние монохроматического света/ использован метод дифракции в монохроматическом свете

Все приведенные выше модели структуры воды можно условно разделить на две группы: дискретные и непрерывные. Все авторы соглашаются, что часть молекул жидкой воды (примерно 30 %) находятся в свободном состоянии, около 30% не имеют упорядоченной структуры, а примерно 40% входит в состав ассоциатов и «водяных кристаллов», которые и составляют

«структурированную» воду. Это позволяет сделать вывод, что вода имеет структурно-информационное свойство – способность образовывать кластеры/клатраты/полимерные цепи. Конечно, структурное свойство характерно для любого тела, но у воды это свойство легко изменяется при любом внешнем воздействии. Если для разрыва ковалентной связи между двумя атомами в молекуле необходима энергия, эквивалентная энергии кванта УФ-или, по меньшей мере, видимого света, то такая же связь в макрообразовании или полимере может разорваться при воздействии на него даже механических колебаний. В первом случае частота колебаний соответствует величинам порядка 10^{15} Гц, во втором – килогерцам.

Если поместить в воду предельно малое количество другого вещества (даже единицы молекул) – кластеры начнут «перенимать» его электромагнитные свойства. Природа такого взаимодействия обусловлена дальними кулоновскими силами, определяющими новый вид зарядово-комплементарной связи. Изучением надмолекулярных структур веществ занимается совсем молодая наука – *супрамолекулярная химия* – раздел химии, описывающий сложные образования, которые являются результатом ассоциации двух и более химических частиц, связанных вместе межмолекулярными силами [11]. *Супрамолекулярная химия* – это химия молекулярных ансамблей и межмолекулярных связей.

Композиция свойств воды зависит как от степени ее чистоты, так и от термодинамического состояния: температуры, давления и других макропараметров. Свойствами и структурой воды – количеством свободных молекул воды в полостях клатратов и вне их, можно управлять с помощью давления, температуры, магнитного поля и т. д. Магнитная обработка воды увеличивает скорость химических процессов и кристаллизации растворенных веществ, интенсифицирует процессы адсорбции, повышает коагуляцию примесей и способствует выпадению их в осадок. Температурная активация увеличивает растворяющую способность воды и позволяет длительно удерживать в растворе аномальные количества растворенного вещества и значительно повышать кислотность. Повышением «скользкости» можно вызвать изменение «текучести» воды. Вымораживание/кипение воды, вызывает выделение солей жесткости. Кипение воды с использованием энергии сверхвысокой частоты позволяет интенсифицировать физико-химические процессы, например, в регенерационной системе космического корабля [12].

Целью данной работы является исследование влияния предыстории образца воды на её электрическую проводимость, как интегральное свойство чувствительное к концентрации/активности растворенных примесей и структуре вещества воды. Измерения выполнялись на стенде для измерения электрической проводимости жидкостей. Использовалась стеклянная цилиндрическая измерительная ячейка с медными электродами. Удельная активная электрическая проводимость и реактивная ёмкость образцов воды в ячейке измерялись компенсационным методом на рабочей частоте 1 кГц.

Чувствительность замеров электрической проводимости составляет 0,01 мкСм/см. Результаты измерения приведены в табл. 2.

Таблица 2. Электрические свойства образцов воды

Образец воды	Удельная электрическая проводимость, мкСм/м	Реактивность сопротивления, пФ
1. Водопроводная	36,30	340
2. Дистиллированная	0,63	0,3
3. Питьевая (бутилированная)	20,20	
4. Питьевая замороженная	19,30	166
5. Водопроводная замороженная	22,00	150

Ряд увеличения удельной электрической проводимости образцов воды хорошо коррелирует с повышением содержания в них примесей. Видно, что вымораживание воды (вымораживание способствует удалению трудно растворимых солей жесткости), незначительно снижает удельную электропроводность питьевой воды и существенно увеличивает электропроводность водопроводной. Наблюдаемое может быть связано как с повышением активности (концентрации) заряженных ионных частиц примесей, так и разрушением надмолекулярной структуры воды.

Измерительный стенд позволил, кроме общей удельной электрической проводимости, определить реактивную составляющую сопротивления в единицах емкости измерительной ячейки (далее реактивность) [13]. Полученные результаты показывают, что реактивная составляющая сопротивления дистиллированной воды на несколько порядков меньше, чем для всех остальных образцов. Значит, реактивность является более чувствительным показателем состояния воды. Реактивный ток (ток смещения) является следствием релаксационной поляризации и возникает в диэлектрике при наложении внешнего переменного электрического поля как результат следования диполей полярных молекул за изменением поля. Релаксационная поляризация является одним из двух слагаемых сопротивления диэлектрика (наряду с активной составляющей сопротивления) и определяет реактивный компонент сопротивления. Ионно-релаксационный вид поляризации – это неупругое смещение. К этому виду поляризации относится ориентация молекул в электрическом поле (молекулы, поворачиваясь в вязкой среде, тратят энергию на преодоление трения), ионная тепловая поляризация, обусловленная слабо связанными ионами. Представляется возможным, что ассоциаты образцов воды, вследствие ее различной предыстории, отличающиеся размерами и конфигурацией, будут определять реактивность сопротивления.

Выводы: в работе показаны различия в удельной электрической проводимости и реактивной составляющей сопротивления водопроводной воды и воды подвергнутой с целью очищения дополнительной обработке в сравнении с дистиллированной водой. Установлено, что реактивная составляющая

сопротивления более чувствительна к предыстории образца воды и изменяется у образцов от долей до сотен пикофарад. Практическая значимость полученных результатов видится в естественном желании каждого из нас использовать воду максимально приближенную по составу и структурным свойствам к природной пресной воде. Установленная в работе связь между предысторией воды, а значит и её структурой, и измеряемыми диэлектрическими параметрами, даёт возможность классифицировать воду на структурированную в большей или меньшей степени. Конечно, сравниваемые образцы воды по уровню минерализации должны соответствовать стандарту. Для бытовых замеров нет необходимости в использовании высокоточных измерительных стендов, а достаточно рядового измерителя импеданса с одной или двумя рабочими частотами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Успенская, Е.В. Изучение структуры воды на супрамолекулярном уровне для разработки новых методов стандартизации и контроля качества минеральных вод и жидких лекарственных форм [Текст] / Е.В. Успенская // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата химических наук: 15.00.02. – Москва, 2007.
2. Бернал Дж., Фаулер Р. Структура воды ионных растворов / Бернал Дж. Фаулер Р. // Успехи физических наук, 1934 - Т. 14, вып. 5.
3. Френкель, Я.И. Кинетическая теория жидкостей [Текст] / Я.И. Френкель // М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1945.
4. Frank H.S., Wen W.Y. Discuss Faraday Soc. V. 24, p. 133, 1957.
5. Домрачев, Г.А., Родыгин, Ю.Л., Селивановский, Д.А. Механохимически активированное разложение воды в жидкой фазе. / ДАН, 1993, 329(2), - С. 186-188.
6. Tsai C.J., Jordan K.D. Theoretical Study of Small Water Clusters: Low-Energy Fused Cubic Structures for $(\text{H}_2\text{O})_n$, $n=8, 12, 16$ and 20 . Journal of Physical Chemistry, 1993, 97, 5208-10.
7. Зенин, С.В. Водная среда как информационная матрица биологических процессов [Текст] / С.В. Зенин // Первый Международный симпозиум «Фундаментальные науки и альтернативная медицина». 22-25 сентября 1997 г. Тезисы докладов. - Пущино, 1997. - С. 12-13.
8. Chaplin M. Water structure and Science. [Electronic resource]/ Англ.-Режим доступа: <http://www.lsbu.ac.uk/water/index2.html>
9. Teresa Head-Gordon T., Johnson M. E. Tetrahedral structure or chains for liquid water. [Electronic resource]/ Англ.- Режим доступа: <http://www.pnas.org/cgi/content/abstract/103/21/7973>
10. Саркисов, Г.Н. Структурные модели воды [Текст] / Г.Н. Саркисов // УФН, 2006. - Т. 176, № 8, - С. 833-845.
11. Лен, Ж.-М. Супрамолекулярная химия: Концепции и перспективы [Текст] / Ж.-М. Лен // Пер. с англ.– Новосибирск: Наука, 1998.
12. Климарев, С.И. Интенсификация физико-химических процессов СВЧ-энергией в регенерационной системе жизнеобеспечения экипажа космического корабля [Текст] / С.И. Климарев // Диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – М., 2009.
13. Ахадов, Я.Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей: Справочник [Текст] / Я.Ю. Ахадов // Гос. ком. стандартов Совета Министров СССР. – М.: Изд-во стандартов, 1972.

ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ МАЭС

Сергей Александрович Бабин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Коптюга, 1, аспирант, тел. (383)333-27-79, e-mail: serg_b@vmk.iae.nsk.su

Денис Олегович Селюнин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Коптюга, 1, ведущий инженер-электроник, тел. (383)333-27-79, e-mail: denis@vmk.iae.nsk.su

Владимир Александрович Лабусов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Коптюга, 1, доктор технических наук, заведующий лабораторией, тел. (383)333-27-79, e-mail: labusov@vmk.iae.nsk.su

В статье сообщается о разработке структурной схемы для построения высокоскоростных анализаторов МАЭС, предназначенных для решения задач сцинтилляционного атомно-эмиссионного спектрального анализа. Анализаторы, построенные по этой схеме, имеют минимальное время экспозиции 3 мс при одновременном чтении до 50-ти линеек фотодиодов в сборке. Созданы анализаторы для спектрометров «СТЭ-1» и «Гранд», содержащие 4 и 12 линеек фотодиодов соответственно.

Ключевые слова: спектроскопия с временным разрешением, атомно-эмиссионный спектральный анализ, сцинтилляция, многоэлементные твердотельные детекторы.

HIGH-SPEED MAES ANALYZERS

Sergey A. Babin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Novosibirsk, prosp. ak. Koptiyuga, 1, postgraduate, tel. (383)333-27-79, e-mail: serg_b@vmk.iae.nsk.su

Denis O. Selyunin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Novosibirsk, prosp. ak. Koptiyuga, 1, lead electronics engineer, tel. (383)333-27-79, e-mail: denis @vmk.iae.nsk.su

Vladimir A. Labusov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Novosibirsk, prosp. ak. Koptiyuga, 1, doctor of technical sciences, head of laboratory, tel.(383)333-27-79, e-mail: labusov@vmk.iae.nsk.su

The functional chart of high-speed multichannel analyzers of emission spectra to meet the challenges of scintillation atomic-emission spectral analysis has been developed. Minimum exposure time of chart based analyzer is 3 ms, during simultaneous reading up to 50 photodiode arrays. The examples of such analyzers for «Grand» and «STE-1» spectrometers have been constructed.

Key words: time-resolved spectroscopy, atomic emission spectral analysis, scintillation, multi-element solid-state detectors.

Современный атомно-эмиссионный спектральный анализ (АЭС) является мощным методом для определения элементного состава вещества. При этом информация о том, какие элементы и в какой концентрации содержатся в пробе, определяется исходя из интегральных интенсивностей спектральных линий, полученных в течение всего времени возбуждения пробы [1, 2].

В ряде случаев, например, при поиске месторождений полезных ископаемых и технологических испытаниях руд, необходимо знать распределение элемента в пробе, а также форму вхождения элемента – в самородном состоянии или в молекулярном соединении он находится. Эту информацию можно получить при анализе временной развертки интенсивностей спектральных линий определяемых элементов в атомно-эмиссионном спектре, возбуждаемом при подаче мелкодисперсной пробы в плазму дуги, например, методом просыпки-вдувания. Сцинтилляции («вспышки») интенсивностей спектральных линий свидетельствуют о поступлении частиц, содержащих определяемый элемент, а их интенсивность связана с размером частиц. Корреляция по времени интенсивностей аналитических линий различных элементов свидетельствует об их совместном нахождении в частицах, что позволяет приблизиться к определению элементного состава каждой частицы.

Способ регистрации атомно-эмиссионных спектров от отдельных частичек пробы, так называемый сцинтилляционный атомно-эмиссионный спектральный анализ (САЭС), впервые был предложен в 60-х годах прошлого века [1-4]. В работах [2, 3] регистрировались сцинтилляции спектральной линии золота при помощи фотоумножителя. Количество зарегистрированных сцинтилляций связывалось с концентрацией золота в пробе. Сцинтилляции по их амплитуде или продолжительности разделялись на несколько групп, каждой из которых приписывался диаметр сферической частицы, состоящей из определяемого элемента. Способ не получил достаточного распространения в аналитической практике из-за отсутствия серийных приборов.

В настоящее время в ряде аналитических лабораторий возрос интерес к САЭС. Для проведения САЭС было решено разработать анализатор, на основе широко распространенного в АЭС многоканального анализатора эмиссионных спектров (МАЭС) [5]. Анализатор МАЭС состоит из многокристальной сборки линеек фотодиодов БЛПП-369М1 и блока электронной регистрации. Многокристальная сборка содержит до 24 линеек, а каждая линейка – 2612 фотодиодов. Блок электронной регистрации преобразует сигнал с линеек фотодиодов многокристальной сборки в цифровую форму. Сигнал с каждой из линеек оцифровывается последовательно посредством 16-битного аналого-цифрового преобразователя (АЦП). При этом минимальное время экспозиции зависит линейно от количества линеек в сборке. Так, для сборки из 24 линеек фотодиодов минимальное время экспозиции составляет около 160 мс. Однако для решения задач САЭС требуется снижение времени экспозиции до единиц миллисекунд [2].

В анализаторе МАЭС для САЭС предложено использовать параллельную схему чтения сигналов с линеек сборки – сигнал с каждой линейки

оцифровывается своим АЦП и оцифровка сигналов всех линеек сборки происходит одновременно с частотой 1 МГц [6]. Это позволяет снизить минимальное время экспозиции до 3 мс, но увеличивает объем передаваемых данных за единицу времени. В анализаторе МАЭС для спектрометра СТЭ-1 со сборкой из 4-х линеек фотодиодов скорость передачи оцифрованных данных в компьютер составляет около 60 Мбит/с, что укладывается в пропускную способность типового интерфейса анализатора МАЭС, основанного на протоколе Fast Ethernet. В варианте сцинтилляционного МАЭС для спектрометра «Гранд», регистрация спектра осуществляется двумя анализаторами МАЭС со сборками из 12 и 8 линеек фотодиодов [7]. При этом пиковый поток данных анализатора с 12-тью линейками составляет 192 Мбит/с, что превышает пропускную способность Fast Ethernet и требует использования более быстродействующего интерфейса.

В результате предложена следующая структурная схема построения высокоскоростных анализаторов МАЭС, показанная на рис. 1.

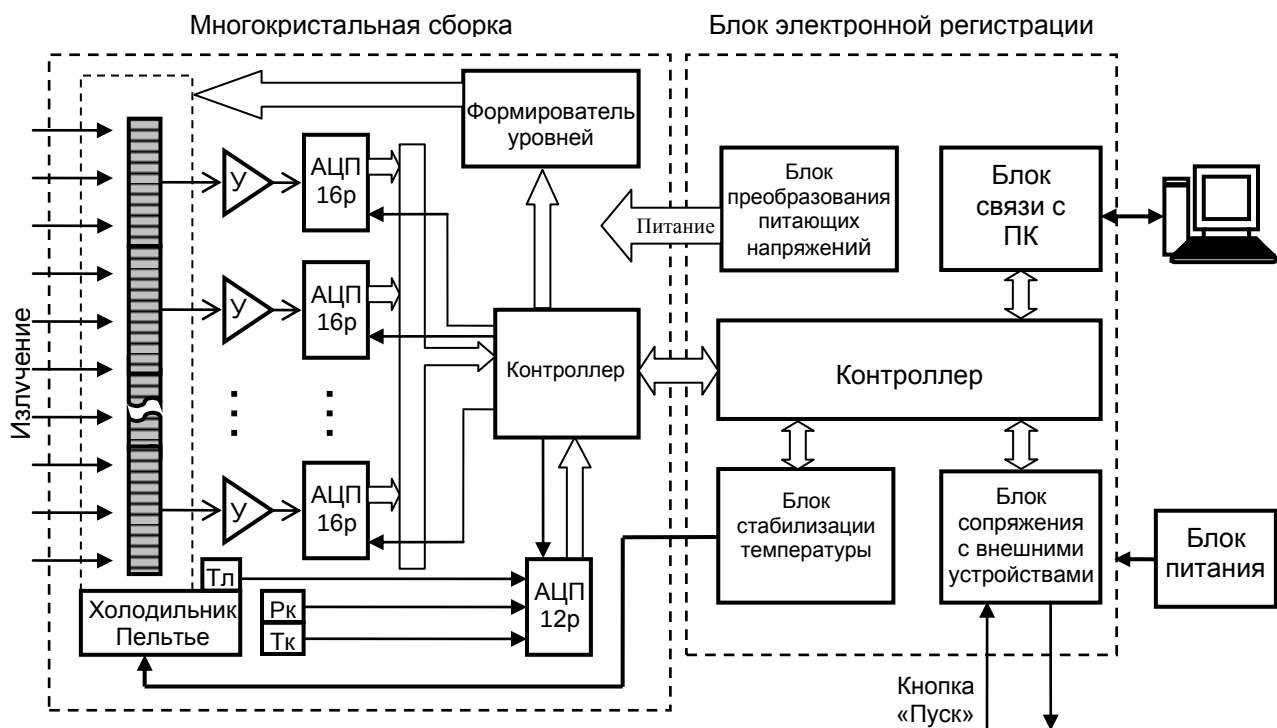


Рис. 6. Структурная схема анализатора с параллельной схемой чтения

Анализатор состоит из многокристальной сборки (МС), блока электронной регистрации (БЭР) и компьютера с программным обеспечением «Атом» для проведения атомно-эмиссионного анализа. Многокристальная сборка включает в себя линейки фотодиодов, расположенные на едином основании, охлаждаемом холодильниками Пельтье, а также электронику для считывания и оцифровки сигналов линеек. БЭР состоит из контроллера, блока связи с персональным компьютером (ПК), блока стабилизации температуры, блока сопряжения с внешними устройствами. Сигнал с каждой линейки усиливается своим усилителем и преобразуется в цифровую форму своим АЦП.

Оцифрованные данные мультиплексируются контроллером многокристальной сборки и передаются в БЭР. Помимо этого, контролер МС формирует управляющие сигналы для чтения линеек и считывает показания с датчиков давления и температуры многокристальной сборки. Контроллер БЭР формирует команды для контроллера МС, отправляет оцифрованные данные, используя блок связи с ПК, а также предоставляет данные для блока стабилизации температуры и блока сопряжения с внешними устройствами. Блок связи с ПК, используя интерфейс анализатора МАЭС, обеспечивает связь между контроллером БЭР и компьютером. Блок стабилизации температуры регулирует ток в холодильниках Пельтье в зависимости от показаний датчиков температуры. Блок сопряжения с внешними устройствами предназначен для управления шторкой входной щели, запуска источника возбуждения спектра, а также ввода в ПК сигнала запуска процесса анализа с кнопки «Пуск».

Интерфейс анализатора МАЭС выполнен на основе Gigabit Ethernet и удовлетворяет предъявляемым требованиям: пропускная способность не менее 192 Мбит/с, наличие гальванической развязки, длина кабеля связи не менее 10 метров. Тестирование показало, что максимальная скорость передачи данных из анализатора МАЭС в ПК посредством протокола UDP составляет около 950 Мбит/с. Такой интерфейс может передавать данные с 50-ти линеек фотодиодов при их параллельном чтении.

Созданы образцы высокоскоростных анализаторов МАЭС, содержащие 4 и 12 линеек фотодиодов, предназначенные для использования в составе спектрометров «СТЭ-1» [8] и «Гранд» [6] соответственно. Анализаторы обеспечивают регистрацию полного спектра с минимальным временем экспозиции 3 мс. Анализаторы используются в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск) и в Институте геохимии имени А.П. Виноградова (ИГХ СО РАН, г. Иркутск) для определения низких содержаний элементов в геологических пробах методом САЭС. Использование анализатора в ИГХ СО РАН позволило существенно снизить пределы обнаружения Au, Ag, Pt, Pd, Ru, Rh в рудах [9, 10].

В заключение отметим, созданы высокоскоростные анализаторы МАЭС с параллельным считыванием сигналов линеек фотодиодов, минимальным временем экспозиции 3 мс, способные содержать до 50-ти линеек. Анализаторы используются для проведения сцинтилляционного атомно-эмиссионного спектрального анализа порошковых проб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Русанов А.К. Основы количественного спектрального анализа руд и минералов / А.К. Русанов Изд. 2. – М.: Недра, 1978. 400 с.
2. Райхбаум Я.Д. Физические основы спектрального анализа / Я.Д. Райхбаум. – М.: Наука, 1980. – 160 с.
3. Прокопчук С.И. Сцинтилляционный спектральный анализ в геологии. – Иркутск: Сиб ГЕОХИ. 1993. – 69 с.
4. Прокопчук С.И. Прошлое, настоящее и будущее сцинтилляционного эмиссионного спектрального анализа // Сб. тезисов научного семинара "Современный атомно-эмиссионный анализ и науки о Земле". – Иркутск: ИГХ СО РАН, 2009. – С. 15-16.

5. Лабусов В.А., Попов В.И., Путьмаков А.Н., Бехтерев А.В., Селюнин Д.О. Анализаторы МАЭС и их использование в качестве систем регистрации и обработки атомно-эмиссионных спектров // Аналитика и контроль. – 2005. – Т. 9, № 2. – С. 110-115.
6. Селюнин Д.О., Бабин С.А., Лабусов В.А. Высокоскоростные анализаторы МАЭС с интерфейсом Gigabit Ethernet // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т. 78, № 1(2). – С. 39-43.
7. Лабусов В.А., Путьмаков А.Н., Зарубин И.А., Гаранин В.Г. Новые многоканальные оптические спектрометры на основе анализаторов МАЭС // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т. 78. – № 1(2). – С. 7-13.
8. Селюнин Д.О., Лабусов В.А., Гаранин В.Г., Неклюдов О.А., Бабин С.А. Анализаторы МАЭС для получения последовательности атомно-эмиссионных спектров с временем экспозиции 1 мс // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – Т. 77. – № 6. – С. 21-25.
9. Шабанова Е.В., Васильева И.Е., Кунаев А.Б., Бусько А.Е. Оценка размера частиц золота и серебра в геологических образцах с использованием сцинтилляционного атомно-эмиссионного анализа с высоким временным разрешением // Аналитика и контроль. – 2010. – Т. 14, № 4. – С. 186-200.
10. Васильева И.Е., Шабанова Е.В., Бусько А.Е., Кунаев А.Б. Методика определения содержания золота и серебра в геологических образцах с использованием сцинтилляционного атомно-эмиссионного анализа с высоким временным разрешением // Аналитика и контроль. – 2010. – Т. 14, № 4. – С. 201-213.

© С.А. Бабин, Д.О. Селюнин, В.А. Лабусов, 2012

РАЗРАБОТКА ОПТОЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА И КОЛИЧЕСТВА БЕНЗИНА НА ОСНОВЕ НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

Михаил Петрович Исаев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, инженер кафедры специальных устройств и технологий, тел. (913)777-59-28, e-mail: mihail54@mail.ru

Неъматжон Рахимович Рахимов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств и технологий, тел. (903)935-21-75, e-mail: nerah@rambler.ru

Олег Кузьмич Ушаков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры наносистем и оплотехники, тел. (383)344-40-58, e-mail: ioot@ssga.ru

В статье рассмотрены методы определения качества и измерения количества топлива, а также предложено устройство для мониторинга нефтепродуктов в топливных баках.

Ключевые слова: оптоэлектроника, бензин, детонационная стойкость, элемент НПВО, качество топлива.

DEVELOPMENT OF OPOELECTRONIC DEVICE FOR DETERMINING THE QUALITY AND QUANTITY OF PETROL ON THE BASIS OF THE FRUSTRATED TOTAL INTERNAL REFLECTION EFFECT

Mikhail P. Isayev

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plahotnogo, Novosibirsk 630108, postgraduate, engineer, department of special devices and technologies, tel. (913)777-59-28, e-mail: mihail54@mail.ru

Nematzhon R. Rakhimov

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plahotnogo, Novosibirsk 630108, doctor of technical sciences, Professor, department of special devices and technologies, tel. (903)935-21-75, e-mail: nerah@rambler.ru

Oleg K. Ushakov

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plahotnogo, Novosibirsk 630108, candidate of technical sciences, Professor, department of nanosystems and optical engineering, tel. (383)344-40-58, e-mail: ioot@ssga.

The article deals with methods for determining quality and measuring the amount of fuel, and also suggested a device for monitoring of oil in the fuel tanks.

Key words: optoelectronic, gasoline, detonation resistance, element of FTIR.

Объемы продаж некачественного автомобильного топлива в России и СНГ по различным оценкам составляют от 30 до 70% всего объема продаж.

Современные транспортные средства, оснащены электрической системой подачи и распыления топлива с компьютерным блоком управления подачи топлива, качество топлива является одним из задающих параметров для штатной работы блока управления. При несоответствии качества топлива двигатель не может работать в оптимальном режиме, нарушается управление впрыском вплоть до аварийной потери мощности. Тем самым наличие прибора для мониторинга нефтепродуктов, необходимо для эксплуатации транспортных средств.

В данной работе основной упор делается на создание простого устройства для мониторинга топлива в топливных баках, повышенной чувствительности.

Основными показателями качества топлива являются детонационная стойкость, плотность, удельное содержание серы, свинца и других канцерогенных веществ. Детонационная стойкость топлива определяет их эффективное сгорание, напрямую связанная с эксплуатационными и экологическими характеристиками транспортных средств. Сера, преимущественно в форме разнообразных соединений, входит в состав всех нефтепродуктов, ухудшает их качество, загрязняет технологическое оборудование. Увеличение содержания серы в топливе от 0,033% до 0,15% (масс.) снижает мощность двигателя на 10,5%, увеличивает расход топлива на 12%. Кроме того, сернистые соединения вызывают коррозию деталей двигателя и технологического оборудования, приводит к увеличению стоимости обслуживания. При сгорании топлив, содержащих сернистые соединения, образуется диоксид серы, крайне неблагоприятно влияющий на экологическую обстановку, поэтому в технические требования на нефтепродукты введены показатели, нормирующие общее содержание серы [1].

Главным показателем качества бензина является детонационная стойкость, контроль которой на всех заводах России производится путем сжигания с дальнейшим анализом продуктов сгорания. Основными недостатками данного метода, является длительность и непригодность для использования в транспортных средствах.

Способы анализа качества топлива можно разбить на следующие группы:

- Качественные способы определения присутствия компонентов;
- Количественные способы определения суммарного содержания различных компонентов, и вычисление по их процентному содержанию отдельных показателей качества, таких, как октановое число или содержание серы;
- Интегральные количественные способы определения показателей качества косвенными методами по корреляционным зависимостям, связывающим требуемый показатель с электромагнитными параметрами топлива.

Рассмотрим методы измерения количества топлива в баке:

- Весовой метод, непосредственное взвешивание бака с топливом с помощью тензодатчиков, которые устанавливаются в местах крепления бака;
- Гидростатический метод основан на зависимости гидростатического давления топлива от его уровня.
- Поплавковый метод заключается в измерении линейного перемещения плавающего на поверхности топлива поплавка, относительно вертикальной направляющей или углового перемещения, связанного с поплавком рычага.
- Акустический метод основан на свойстве ультразвуковых колебаний отражаться от границы раздела двух сред. Измерение уровня топлива в баке может осуществляться путем локации сверху или снизу.
- Емкостной метод основан на зависимости емкости конденсатора, расположенного в топливном баке, от уровня топлива. Емкость изменяется в связи с тем, что диэлектрическая проницаемость отличается от диэлектрической проницаемости воздуха.
- Индуктивный метод основан на зависимости индуктивности катушки, расположенной в баке, от уровня топлива. Индуктивность изменяется вследствие изменения электрических потерь в жидкости. Эти потери ощутимы в электропроводящих жидкостях, для которых и применим метод.
- Резисторный метод основан на зависимости активного сопротивления резистора, расположенного в топливном баке, от уровня топлива. Сопротивление изменяется вследствие шунтирования его топливом. Метод пригоден для измерения уровня электропроводящих жидкостей.
- Радиоволновой метод основан на зависимости от уровня жидкости положения узлов стоячей электромагнитной волны, возникающей в коаксиальной линии при сложении падающей и отраженной от измеряемого уровня волн [2].
- Оптоэлектронный метод основан на измерении интенсивности оптического излучения после их прохождения или отражения через жидкости. Основным элементом оптоэлектроники – оптрон или оптопара: полупроводниковые источники и приёмники оптического излучения (ПОИ), связанные либо электрически, либо оптически или тем и другим способом вместе.

Принцип действия оптронов любого вида основан на следующем. В источнике излучения электрический сигнал преобразуется в световой, и, после взаимодействия с объектом исследования, в фотоприемнике световой сигнал вызывает электрический отклик, несущий полезную информацию, пригодную для дальнейшей обработки. Рассмотрим вопрос выбора пары светодиод-фотоприемник для режима непрерывного измерения параметра в заданном диапазоне его изменения (режим 1) и для порогового режима (режим 2). Очевидно, что при заданной длительности и частоте следования импульсов излучения оптимальной парой светодиод-фотоприемник следует считать такую, которая обеспечивает максимально возможный выходной сигнал при сохранении надежности работы в течение длительного времени [3].

Можно предложить следующую методику согласования пары светодиод - ПОИ для режима 1:

1. В соответствии со спектральными характеристиками контролируемой среды и конкретными условиями работы системы (посторонней засветки, наводки и т.п.) выбираем тип светодиода по спектру излучения;
2. Определяется максимально-возможная мощность излучения светодиода при заданных длительности $t_{\text{имп}}$ и периоде повторения импульсов $T_{\text{и}}$;
3. С учетом диаграммы направленности излучения светодиода, расстояния от излучающей поверхности до фотоприемника, диапазона изменения оптической плотности контролируемой среды, влияния оптической системы (если таковая имеется) и площади приемной поверхности фотоприемников-претендентов определяется диапазон максимально-возможной мощности излучения $P_{\text{пр max}}$, падающего на каждый фотоприемник;
4. По полученному диапазону мощности излучения $P_{\text{пр max}}$, определяется:
Для каждого из фоторезисторов-претендентов- диапазон кратностей K или $R_{\text{св}}$ (например, $R_{\text{св min}} \div R_{\text{св max}}$);
Для фотодиодов-претендентов - диапазон фототоков $I_{\text{ф min}} \div I_{\text{ф max}}$;
5. На основании известного диапазона $R_{\text{св}}$ для каждого фоторезистора- претендента определяется $R_{\text{св.ср}} = \frac{R_{\text{св.min}} + R_{\text{св.max}}}{2}$ и соответствующие ему оптимальные сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$: по тепловым режимам (или ТУ) устанавливается допустимое напряжение питания для каждого фоторезистора;
6. Для фотодиодов-претендентов выбираются (по ТУ) максимальные рабочие напряжения и по $I_{\text{ф max}}$ определяется сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$;
7. По неизвестным $R_{\text{н}}$, $U_{\text{пит}}$, $R_{\text{т}}$, $R_{\text{св}}$, $I_{\text{ф}}$ устанавливаются выходные сигналы фотоприемников $\Delta U_{\text{вых}}$ и выбирается фотоприемник, обеспечивающий $\Delta U_{\text{вых}} = \text{max}$.

Рассмотрим способ определения максимальной мощности излучения светодиода. Известно, что мощность излучения арсенидгаллиевого светодиода:

$$P = \frac{I}{I_0} e^{\frac{R_{\text{т.ст}}(IU_0 + I^2 r)}{Q\theta_{\text{п}}}}. \quad (1)$$

Как видно из уравнения (1), мощность излучения светодиода зависит от тока и температуры р-п – перехода: рост тока увеличивает мощность излучения, рост температуры снижает ее. В соответствии с этим существует вполне определенный режим по току I и скважности Q , которому соответствует максимально возможная мощность излучения данного светодиода. Из уравнения $\partial P / \partial I = 0$ получаем условие максимума мощности излучения:

$$I_{\text{р max}} = \frac{-R_{\text{т.ст}}U_0 \pm \sqrt{R_{\text{т.ст}}^2 U_0^2 + 8R_{\text{т.ст}}r_0 Q\theta_{\text{п}}}}{4R_{\text{т.ст}}r_0}. \quad (2)$$

Определив максимально возможную мощность излучения светодиода, необходимо проверить его тепловой режим.

Основными причинами, ограничивающими мощность рассеяния светодиода, является тепловая устойчивость конструкции и деградации излучательных характеристик светодиода. Под тепловой устойчивостью следует понимать способность светодиода длительно выдерживать воздействие температуры (как в рабочем, так и в нерабочем состоянии) без существенных необратимых изменений характеристик прибора.

Очевидно, что максимально допустимая температура определяется наиболее слабым (в смысле температурного режима) узлом конструкции светодиода. Для арсенидгаллиевых светодиодов таким узлом является линза, изготовленная из специального компаунда на основе эпоксидной смолы.

Указанные причины определяют предельно допустимую температуру р-п-перехода $\theta_{\text{пред}}$.

По заданному уровню излучения $P_{\text{кон}}$ к концу срока службы рассчитывается допустимая температура окружающей среды:

$$\theta = \theta_0^x \sqrt{\frac{\tau_0}{It} \ln \frac{P_{\text{нач}}}{P_{\text{кон}}}}. \quad (3)$$

Уравнение (3) справедливо для определенной температуры окружающей среды при условии отсутствия разогрева р-п-перехода током. Если имеется существенный саморазогрев р-п-перехода ($\Delta \theta > 10^\circ\text{C}$), то температура окружающей среды устанавливается по трансцендентному уравнению

$$\ln \frac{P_{\text{нач}}}{P_{\text{кон}}} \cdot \frac{\tau_0 \theta_0^x}{It} = (\theta_{\text{окр}} + R_T W_{\text{cp}})^x. \quad (4)$$

По известным $\theta_{\text{пред}}$ и $R_{\text{т.ст}}$ определяется допустимая мощность рассеяния светодиода в статическом, либо в квазистатическом режиме:

$$\omega_{\text{дон}} = \frac{\Delta \theta_{\text{пред}}}{R_{\text{т.ст}}} = \frac{\theta_{\text{пред}} - \theta_{\text{окр}}}{R_{\text{т.ст}}}. \quad (5)$$

При аппроксимации вольтамперной характеристики светодиода уравнением $U = U_0 + I r_0$ средняя мощность, выделяемая на р-п-переходе в импульсном режиме, равна

$$\omega_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T I U dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_{\text{max}} (U_0 + I_{\text{max}} r_0) dt = \frac{1}{Q} (I_{\text{max}} U_0 + I_{\text{max}}^2 r_0). \quad (6)$$

Подставляя значения $\omega_{\text{дон}}$ из уравнения (5) в (2) и решая последнее относительно тока, получаем предельно допустимое значение импульсов тока при заданной температуре р-п-перехода и выбранной скважности Q :

$$I_{\text{дон}} = \frac{-U_0 + \sqrt{U_0^2 + 4 r_0 Q \frac{\Delta Q_{\text{пред}}}{R_{\text{т.ст}}}}}{2 r_0}, \quad (7)$$

Данное уравнение справедливо для тех значений $t_{\text{и}}$ и Q , при которых Q_{max} и Q_{min} близки к $Q_{\text{ср}}$.

Разработано устройство для мониторинга нефтепродуктов в топливных баках (рис. 1), которое работает следующим образом.

Задающий генератор 2 вырабатывает прямоугольные импульсы с частотой следования 8-10 кГц, поступающие на вход коммутатора 3, который делит их на две части. Одна часть импульсов поступает на источники излучения 4,5,6...n, а другая часть - на компенсирующий источник излучения 10. Потоки излучения от источников излучения 4, 5, 6...n фокусируются на измерительной грани призмы 1, отражаются и поступают на измерительные фотоприемники 7, 8, 9...n', где оптические сигналы преобразуется в электрические, которые поступают на входы сумматора 12 и суммируются в нем. Оптическое излучение от компенсационного источника излучения 10 поступает на компенсационный фотоприемник 11. Электрические сигналы с выхода сумматора 12 и компенсационного фотоприемника 11 поступают в блок обработки фотоэлектрического сигнала 13, где определяется отношение электрических сигналов, соответствующих компенсационному и измерительным потокам излучения, которое пропорционально оптическому параметру жидкой среды. Электрический сигнал с выхода блока обработки фотоэлектрического сигнала 13 поступает на регистрирующий прибор 14 (или ЭВМ), по показанию которого судят об оптических параметрах жидкой среды.

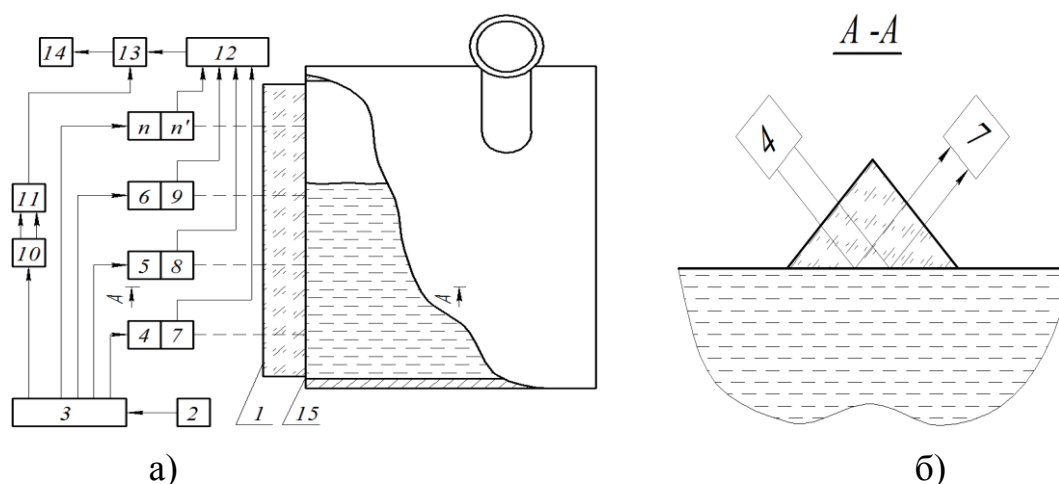


Рис. 1. Блок-схема устройства для мониторинга нефтепродуктов в топливных баках и вид датчика по сечению А-А:

1 – датчик НПВО, треугольная призма; 2 – задающий генератор; 3 – коммутатор; 4, 5, 6...n – источники излучения; 7, 8, 9...n' – измерительные фотоприемники; 10 – компенсационный источник излучения; 11 – компенсационный фотоприемник; 12 – сумматор; 13 – блок обработки фотоэлектрического сигнала; 14 – регистрирующий прибор; 15 – контролируемый объект

Предлагаемое устройство повышает точность измерения за счет многократного объемного измерения параметров контролируемой жидкости, суммирования электрических сигналов от нескольких фотоприемников. При установке датчика в вертикальном положении, можно определять уровень топлива. Датчик распознает содержание и количество в топливе таких веществ, как сера, вода и иные загрязнения. Это позволит узнать качество и количество заправляемого топлива и защитить компоненты двигателя и узлы системы

обработки выхлопных газов от возможного вредного воздействия, ухудшающего их работу, и снизить вредные выбросы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шамов, А.В. Применение ультразвука для определения октанового числа бензина/Матер. 65-ой Междунар. научно-техн. конф. Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) "Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров" Международного научного симпозиума «Автотракторостроение – 2009». Книга 3, Москва, МГТУ «МАМИ», 2009 г. – С. 166-175.
2. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества: справочник. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701с
3. Рахимов, Н.Р. Оптоэлектронные датчики на основе АФН-эффекта: монография / Н.Р. Рахимов, О.К. Ушаков. – Новосибирск: СГГА, 2010. – 218 с.
4. Заявка № 2012107359(011149) от 28.02.2012г. Российская федерация. Устройство для мониторинга жидких сред / М.П. Исаев и др.; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»

© М.П. Исаев, Н.Р. Рахимов, О.К. Ушаков, 2012

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ СИНТЕЗА И КОНТРОЛЯ ТОПОЛОГИИ ФОТОШАБЛОНОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Алексей Валерьевич Кирьянов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория лазерных прецизионных систем, тел. (383) 306-62-20, e-mail: alexey@tdisie.nsc.ru, Новосибирский государственный технический университет, 630092, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, доцент кафедры автоматики, тел. (383) 346-11-19, e-mail: oao_nips@bk.ru

Валерий Павлович Кирьянов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория интегрированных информационных систем управления, тел. (383) 333-23-87, e-mail: kiryanov@iae.nsk.su

Дмитрий Юрьевич Кручинин

ОАО «ПО «Уральский оптико-механический завод», 620100, г. Екатеринбург, ул. Восточная, 33-б, главный специалист, тел. (343) 229-80-67, e-mail: krudu@planet-a.ru

В докладе рассмотрены результаты синтеза и контроля топологии фотошаблонов интегральных датчиков давления и угла поворота, изготовленных с помощью лазерных генераторов изображений, работающих в полярной и декартовых координатах.

Ключевые слова: интегральный датчик физической величины, фотошаблон, круговое сканирование, лазерный генератор изображений.

ACCURACY ENHANCEMENT FOR SYNTHESIS AND INSPECTION PROCESS THE PHOTOMASK TOPOLOGY OF PHYSICAL QUANTITY INTEGRAL SENSORS

Alexey V. Kiryanov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 41, Russkaya str., Novosibirsk 630058, Candidate of science, researcher, Laboratory for laser precision system, tel. (383)306-62-20, e-mail: alexey@tdisie.nsc.ru, Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marksa Prospekt, Novosibirsk 630092, assistant professor, Department of automation, tel. (383) 346-11-19, e-mail: oao_nips@bk.ru.

Valeriy P. Kiryanov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Doctor of Science, lead researcher, Laboratory for Integrated Informational Control System, tel. (383)333-23-87, e-mail: kiryanov@iae.nsk.su

Dmitriy Yu. Kruchinin

JSC «Urals Optical & Mechanical Plant», 33b, Vostochnaya str., Ekaterinburg 620100, main specialist, tel. (343) 229-80-67, e-mail: krudu@planet-a.ru

The results of synthesis and inspection process of photomask topology of integral pressure and turning angle sensors are considered. They have been made using laser image generators operating in polar and Cartesian coordinates.

Keywords: integral sensor of physical quantity, photomask, circular scanning, laser image generator.

1. Введение. Интегральные датчики физических величин (ИДФВ) являются важнейшими элементами высокоточных систем управления и контроля в ракетной, космической и авиационной технике, атомной энергетике и других отраслях промышленности. К ИДФВ относятся – датчики давления, расхода, скорости вращения, ускорения, угла поворота и т.д.

Одним из основных технологических этапов производства ИДФВ является процесс изготовления прецизионных фотошаблонов (ФС) для формирования топологии чувствительного элемента (ЧЭ). Известно, что погрешности изготовления ЧЭ вносят основной вклад в результирующую погрешность ИДФВ. Поэтому создание как можно более точных ФС является актуальной проблемой технологического процесса изготовления ИДФВ.

В настоящее время для технологических операций синтеза и контроля топологии ФС ИДФВ, производители, как правило, используют технологии и оборудование, работающие в декартовой системе координат и разработанные для нужд микроэлектронной промышленности [1]. Это дорогие установки и, что следует особо отметить, в настоящее время всё технологическое оборудование для микроэлектронной промышленности России поставляется фирмами из ближнего (ГНПО «Планар», Республика Беларусь) или дальнего (Heidelberg Instruments, Германия, MEMS & Nanotechnology, США и т.д.) зарубежья.

В то же время, топология ИДФВ по сравнению с интегральными схемами имеет ряд специфических отличий. Прежде всего, она имеет более высокую относительную точность взаимного расположения элементов на ЧЭ датчика и характеризуется наличием большого числа произвольно ориентированных в пространстве элементов топологии. Так же отличается большими размерами самого ЧЭ. И, наконец, для неё характерна существенно меньшая насыщенность элементами топологии на единицу площади ЧЭ.

В настоящем докладе на примере интегральных датчиков давления и угла поворота анализируется перспективность использования в данных процедурах технологии растрового сканирования.

2. Использование технологии растрового сканирования для синтеза топологии фотошаблонов датчиков давления. Перспективность использования данной технологии оценивалась на примере изготовления комплекта фотошаблонов чувствительного элемента (ЧЭ) тензорезисторного тонкопленочного датчика давления. Комплект состоит из двух фотошаблонов, на которых сформирован топологический рисунок двух основных слоёв чипа: резистивного и контактного. После выполнения операций по формированию на подложке указанных слоёв получается чувствительный элемент (ЧЭ) датчика давления на основе тензомостовой схемы (рис. 1). Эффективность использования новой технологии синтеза оценивалась путём сравнения

погрешности формирования тензорезисторов, входящих в измерительные плечи моста. Снижение разброса номиналов тензорезисторов в плечах тензомоста позволяет снизить влияние технологических разбросов на аддитивную составляющую температурной погрешности тонкопленочных датчиков давления.

Анализ результатов показывает, что средняя величина разброса номиналов тензорезисторов, сформированных с помощью технологического оборудования, работающего в декартовой системе координат, составляет 19,2 Ом (2,83%). Среднее значение разброса номиналов тензорезисторов в измерительных плечах моста, сформированных с помощью технологии кругового растрового сканирования, составляет 10,9 Ом (1,7%) т.е. в 1,7 раза меньше, чем по традиционной технологии.

Оценка причин такого улучшения производилась путём анализа искажений топологии ЧЭ в сравнении с исходным чертежом.

На рис. 2 и 3 приведены фотографии фрагментов топологии ЧЭ, изготовленных по традиционной технологии и технологии растрового сканирования, соответственно. Масштаб увеличения на обеих фотографиях $150\times$. На рис. 2 стрелкой указано на одно из очевидных искажений топологии ЧЭ, приводящее к изменению размеров (а, следовательно, и сопротивления) тензорезисторов, входящих в измерительные плечи моста.

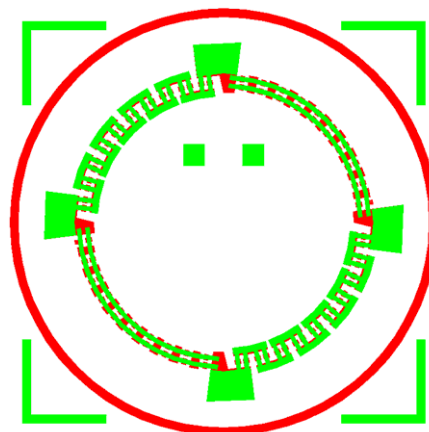


Рис. 1. Топология чувствительного элемента интегрального датчика давления

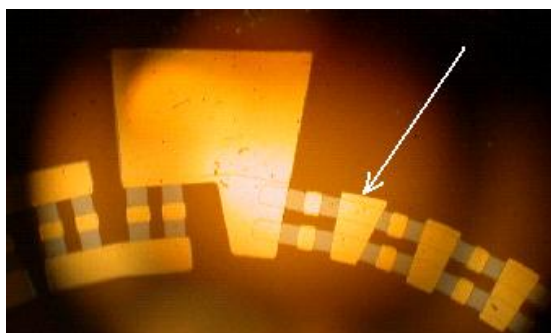


Рис. 2. Фрагмент топологии ЧЭ, изготовленного по традиционной технологии



Рис. 3. Фрагмент топологии ЧЭ, изготовленного по технологии растрового сканирования

На фрагменте топологии ЧЭ, сформированного по технологии кругового растрового сканирования (рис. 3) четко виден край элементов, искажений формы нет. Анализ процесса выполнения операций фотолитографии с использованием комплекта фотошаблонов выявил несовмещение фотошаблонов резистивного и контактного слоя на величину порядка 15 - 25 мкм, что привело

к незначительному искажению общей картины тензосхемы. Причиной такого несовмещения рисунков на разных шаблонах комплекта является неточность индивидуального масштабирования рисунков при изготовлении каждого слоя.

Таким образом, топология ЧЭ интегрального датчика давления, сформированная с применением комплекта фотошаблонов, изготовленных по технологии кругового растрового сканирования, выгодно отличается от топологии ЧЭ, сформированной с помощью генераторов изображений, работающих в декартовой системе координат.

3. Использование технологии растрового сканирования для синтеза и контроля топологии фотошаблонов датчиков угла поворота. Перспективность использования этой технологии анализировалась на примере изготовления радиального раstra с параметрами: диаметр - 90 мм, число штрихов – 6000. Данный элемент изготавливался с помощью лазерного генератора изображений, реализующего принцип кругового растрового сканирования, и двух лазерных генераторов изображений ЭМ- 5109, эксплуатируемых на предприятии «Урал-ГОИ» (С.-Петербург) и ГНПО «Планар» (Минск), работающих в декартовой системе координат. Контроль топологии фотошаблона осуществлялся с помощью установки АС-700 (ОАО «НПО «УОМЗ», г. Екатеринбург) (рис. 4).



Рис. 4. Установка АС-700 для контроля топологии фотошаблонов датчиков угла поворота

Для проведения высокоточного контроля топологии фотошаблонов датчиков угла поворота установка АС-700 позволяет достаточно легко реализовать фазо-статистический метод (ФСМ) [2]. В основе ФСМ компенсации систематической погрешности опорной шкалы лежит известный постулат, который утверждает, что для замкнутой круговой шкалы сумма погрешностей штрихов $\Delta\varphi$ равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i = 0, \quad (1)$$

Суть метода состоит в использовании n циклов измерений. После завершения измерений взаимного сдвига всех m штрихов контролируемой шкалы относительно соответствующих m штрихов референтной шкалы, контролируемую шкалу сдвигают на угол $360^\circ/n$ относительно её первоначального положения и повторяют цикл измерений. Затем контролируемую шкалу проворачивают ещё раз на угол $360^\circ/n$ и снова производят цикл измерений. Процедуру измерений повторяют n раз, пока одна шкала не провернётся относительно другой на 360° . Затем производят

обработку матрицы из $m \times n$ результатов, состоящую в построчном усреднении результатов измерений. Если измерения «привязать» к началу отсчёта контролируемой шкалы, то результат обработки будет представлять собой новый файл данных, характеризующий погрешность каждого штриха контролируемой шкалы относительно его идеального положения:

$$\Delta\varphi_i = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} \left(\Delta_{ref_i} + \Delta_{mes_{i+j}} \right) = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} \Delta_{ref_i} + \frac{1}{m} (m \cdot \Delta_{mes_i}) = \Delta_{mes_i}, \quad (2)$$

здесь $i = (1 \dots n)$ – текущий номер штриха контролируемой и референтной шкал, $j = (0 \dots m-1)$ – текущий номер сдвига во взаимном расположении шкал, Δ_{mes_i} – погрешность контролируемой шкалы, а Δ_{ref_i} – погрешность референтной шкалы.

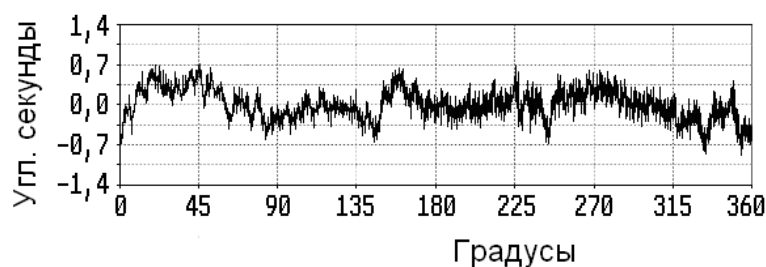


Рис. 5. Погрешность раstra, изготовленного на лазерном генераторе с круговым сканированием

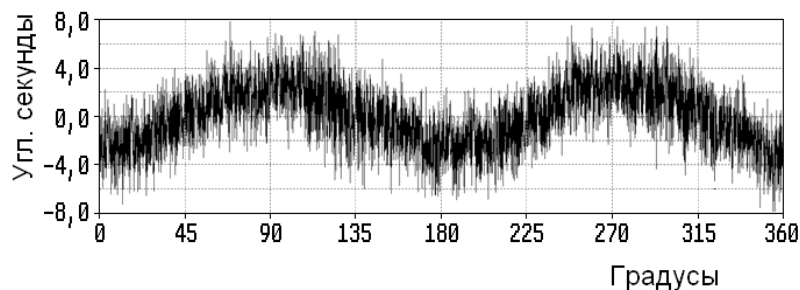


Рис. 6. Погрешность раstra, изготовленного предприятием «Урал-ГОИ» на лазерном генераторе ЭМ-5109

Вклад погрешности референтной шкалы в этом файле данных будет снижен до величины, пренебрежимо малой в сравнении с остальными компонентами погрешности. Реализация этого режима на установке АС–700 была осуществлена программной привязкой данных к началу контролируемой шкалы за счёт искусственного уширения одного штриха.

Результаты контроля представлены в виде кривых погрешности углового положения штрихов растров (рис. 5, 6, 7), соответственно [3].

Как видно из графиков, погрешность расположения штрихов раstra, изготовленного по технологии растрового сканирования, составляет $\pm 0,65''$, а погрешность расположения штрихов раstra, изготовленного по технологии микрофотонабора изображения, составляет $\pm 7,0''$ для установки «Урал-ГОИ» и $\pm 13,0''$ – для установки ГНПО «Планар».

Т.е. точность растров, синтезированных по технологии растрового сканирования, в 10 ...20 раз выше, чем точность растров, синтезированных по технологии микрофотонабора изображения. Причём основной вклад в результирующую погрешность в этой технологии, вносит вторая гармоника.

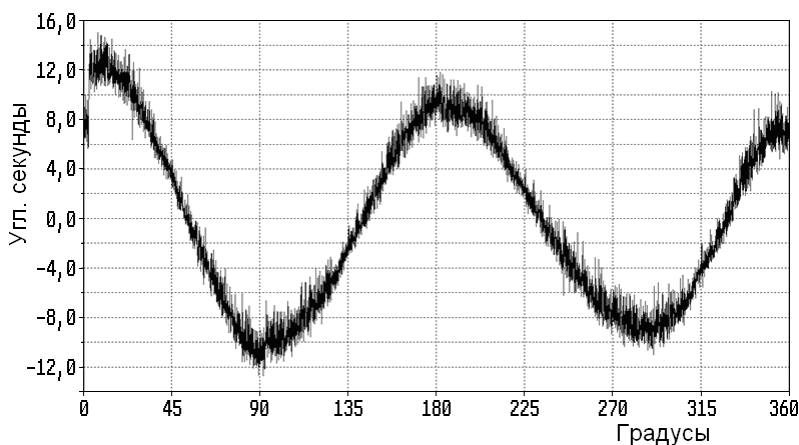


Рис. 7. Погрешность раstra, изготовленного предприятием ГНПО «Планар» на лазерном генераторе ЭМ-51

Применительно к технологическим установкам, созданных для работы в декартовых координатах и не имеющих узла вращения, происхождение второй гармоники объясняется различием параметров систем управления движением стола по X и Y координатам, которые определяют отклонения от идеальной траектории записи топологических элементов датчика.

4. Обсуждение результатов контроля топологии фотошаблонов интегральных датчиков физических величин. Как уже упоминалось ранее, фотошаблоны обоих типов ИДФВ содержат топологические элементы, расположенные в строго определённом порядке, но в широком диапазоне изменения углов наклона к классическим декартовым осям. Очень часто топологические элементы интегральных датчиков располагаются в соответствии с полярными координатами. В этих случаях траекторией движения контролирующего органа является окружность, и любые отклонения от идеальной траектории вносят методическую погрешность $\delta\varphi$, максимальное значение которой для установок со встроенным шпиндельным узлом может быть оценено следующим выражением:

$$\delta\varphi = 0.41 \cdot \frac{F}{D} + \Delta\varphi, \quad (3)$$

где F – фактор нестабильности комплекса, в первом приближении совпадающий с биениями оси ротора шпинделя, выраженный в мкм; D – диаметр идеальной траектории движения контролирующего органа,

выраженный в метрах; $\Delta\varphi$ – погрешность референтного углового датчика шпиндельного узла, выраженная в угловых секундах. Текущее значение погрешности $\delta\varphi_i$ состоит из систематической составляющей $\Delta\varphi_i$ и случайной, обусловленной флюктуациями в положениях оси вращения ротора. В измерительных установках систематическую составляющую погрешности измерений чаще всего можно свести к минимуму либо путём компенсации, либо использования фазо-статистического метода измерений [2]. Случайную составляющую можно минимизировать за счёт использования более совершенных шпиндельных узлов. В настоящее время коммерчески доступны аэростатические шпиндели с нестабильностью положения оси ротора порядка 50 нм. Тогда погрешность контроля топологии интегральных датчиков диаметром, например, 50 мм в единичном измерении будет равна 0.4". Используя алгоритм контроля топологии с накоплением и усреднением за K оборотов, случайную составляющую погрешности можно уменьшить $\sqrt{K}$ раз. Например, усредняя за 100 оборотов, можно уменьшить её до 0.04".

Для установок, работающих в декартовой системе координат, максимальное значение $\delta\varphi$ может быть оценено следующим выражением:

$$\delta\varphi = 0.41 \cdot \frac{F}{D}, \quad (4)$$

где F – фактор нестабильности комплекса чаще всего совпадает с погрешностью систем управления движением стола по X и Y координатам. Так, в [4] отмечалось, что специалистам фирмы Tamagawa Seuko (Япония) удалось уменьшить погрешность систем по обеим координатным осям до 0.1 мкм. Расчёт фактора нестабильности лазерного генератора изображений фирмы Tamagawa Seuko, выполненный по результатам измерения погрешности изготовленного на этом комплексе [3], дал следующий результат: $F = 0.109$ мкм. Считая результат настройки динамической погрешности систем управления лазерного генератора изображений фирмы Tamagawa Seuko уникальным, используем его в качестве верхнего предела возможностей генераторов данного класса. Тогда достижимая погрешность контроля топологии интегральных датчиков диаметром, например, 50 мм в единичном измерении будет равна 0.9". Т.к. движение координатного стола по криволинейной траектории с отмеченной выше точностью осуществляется с существенно меньшей скоростью, чем это реализуется в комплексах с круговым сканированием, то реализация режимов измерений с большими значениями циклов усреднения в данных комплексах весьма проблематично. Поэтому оценки потенциально достижимых погрешностей контроля для этих комплексов на уровне 0.05 - 0,1" являются наиболее оптимистическими.

5. Выводы. Проведено исследование точностных параметров синтеза тензорезисторов, входящих в измерительные плечи моста интегрального датчика давления, изготавливаемых на двух типах лазерных генераторов изображений: работающих в декартовой и полярной системе координат. Показано, что разброс номиналов тензорезисторов в измерительных плечах

моста, сформированном с помощью фотошаблонов, изготовленных по технологии кругового растрового сканирования, в 1.7 раза меньше, чем по традиционной технологии.

Проведено исследование точностных параметров изготовления радиальных растров для интегральных датчиков угла поворота. Показано, что точность растров, синтезированных по технологии растрового сканирования на порядок выше, чем точность растров, синтезированных по технологии микрофотонабора изображения.

Использование технологических и измерительных комплексов, реализующих принцип кругового растрового сканирования, может стать более эффективным средством повышения точности операций контроля и синтеза фотошаблонов интегральных датчиков физических величин по сравнению с традиционным использованием лазерных генераторов, работающих в декартовой системе координат.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Специальное технологическое оптико-механическое оборудование для производства изделий микроэлектроники «КБТЭМ – ОМО» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kb-omo.by/content/view/80/56/>
2. Portman V., Peschansky B. Phase-statistical method and device for high precise and high-efficiency angular measurements // Precision Engineering. – 2001. – Vol. 25. – P. 309.
3. Кирьянов В.П., Кирьянов А.В., Кручинин Д.Ю., Яковлев О.Б. Анализ современных технологий синтеза углоизмерительных структур для высокоточных угловых измерений // Оптический журнал. – 2007. – №12. – С. 40–49.
4. Kojima T., Kikuchi Y., Seki S., Wakiwaka H. Study on High Precision Angle Measuring Technology // The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Busan, Korea. 2004. - P. 1530–1535.

© А.В. Кирьянов, В.П. Кирьянов, Д.Ю. Кручинин, 2012

БИПЛАНОВОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ, СТИМУЛИРУЮЩЕЕ АККОМОДАЦИЮ ГЛАЗА

Аристарх Михайлович Ковалев

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, доктор технических наук, главный научный сотрудник, тел. 8 (913) 712-77-19, e-mail: amkov@ngs.ru

Евгений Владимирович Власов

Новосибирский государственный технический университет, 630064, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, аспирант; Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 625000, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (893) 134-49-38, e-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

Рассматривается 3D изображение в виде линейной комбинации двух двумерных изображений, разнесённых по глубине вдоль зрительной оси глаза. Показана потеря контрастности изображений и сигмовидная нелинейность стимулов аккомодации.

Ключевые слова: 3D изображение, стимулы аккомодации, контраст, нелинейность.

BIPLANE IMAGE STIMULATING ACCOMODATION OF THE EYE

Aristarkh M. Kovalev

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering (TDISIE), Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Russkaya street, 41, Novosibirsk, 630058, Russia Ph.D., Chief researcher, tel. 8 (913) 712-77-19, e-mail: amkov@ngs.ru

Evgenii V. Vlasov

Novosibirsk State Technical University, 630064, Novosibirsk, Karl Marx prospect, 20, graduate student; Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering (TDI SIE), Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Russkaya street, 41, Novosibirsk, 630058 Russia, Associate scientist, tel. (893) 134-49-38, e-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

The 3D image as a linear combination of the two two-dimensional images, spaced along the depth of the visual axis of the eye is considered. The loss of images contrast and a sigmoid non-linearity of accommodation stimulus have been shown.

Key words: 3D image, stimulus of accommodation, contrast, nonlinearity.

В [1-3] предложены дисплеи с добавленными стимулами аккомодации глаз, в которых изображение формируется путем линейной комбинации ограниченного числа планов-изображений, распределенных по глубине пространства. В [4] показано, что допустимые расстояния между планами зависят от аксиального распределения интенсивности, глубины фокусной области глаза, механизма аккомодации и уровня визуального дискомфорта. В [5] представлен экспериментальный образец бипланового мультифокального стереодисплея наголовного типа. Целью работы является определение

контраста и линейности по глубине трёхмерных изображений на основе анализа оптических сигналов в пространственной области.

На рис. 1 представлена схема, состоящая из модели бипланового окуляра 1 и модели глаза 2 с входным зрачком a . Окуляр содержит два плоских изображения P1 и P2, и с помощью линзы L формирует их мнимое изображение. Благодаря светоделительному кубичку S мнимые изображения P1 и P2 оказываются соосными и перпендикулярными зрительной оси OZ. Излучения элементов изображений P1, P2 фокусируются хрусталиком глаза в световые пятна изображений $p1$ и $p2$ таким образом, чтобы максимум суммарной энергии находился в районе фовеа q .

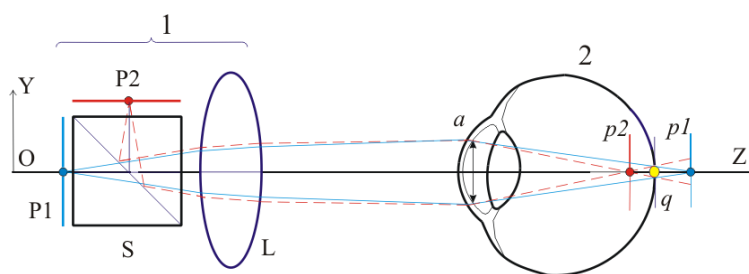


Рис. 1

Используется две схематические модели глаза: модель Гульстранда–Легранда с асферикой роговицы по Лотмару (1971) и модель Давида Атчисона (2006) [6]. Дифракционная глубина фокуса (ДГФ) оптической схемы в соответствии с [4]: с моделями Лотмара 0.28–0.38 дптр; с моделями Атчисона 0.22–0.34 дптр. Расчеты функций рассеяния здесь и далее проводились на длине волны $\lambda = 550$ нм с помощью программы оптического конструирования ZEMAX–EE фирмы Focus Software, Inc.

В области сетчатки глаза трёхмерное изображение [5] можно представить в виде линейной комбинации

$$I(x,y,z) = I(x,y) [PSFA(z - Z_n) (1 - \beta(x,y)) + PSFA(z - Z_f) \beta(x,y)], \quad (1)$$

где $I(x,y)$ – двумерное изображение сцены; $PSFA(z)$ – аксиальное распределение интенсивности; Z_n, Z_f – глубина планов P1, P2 в дптр; $\beta(x,y)$ – относительное положение точки на интервале $[Z_n Z_f]$. Изображение (1) имеет пиковые интенсивности, на которые аккомодирует глаз.

Рассмотрим изменение пиковой интенсивности для двух моделей глаза – Лотмара при зрачке $a = 2,5$ мм и Атчисона при зрачке $a = 5$ мм, для двух расстояний между планами-изображениями – 0,25 дптр и 0,5 дптр. Для исследования выберем окрестности комбинированного плана с коэффициентом $\beta(x,y)=0.5$, для которого потери контраста максимальны (рис. 2 а, б, г, д). На рисунках точечными линиями 1 обозначены нормированные функции распределения интенсивности $PSFA(z)$ от реальной физической точки, помещенной в пространство между планами P1 и P2. Сплошные линии 2 соответствуют линейной комбинации (1) при $I(x,y) = 1$. Для модели Лотмара (рис. 2 а, б) при расстоянии между планами 0,25 дптр пиковая интенсивность падает на 10%. При увеличении расстояния до 0,5 дптр – на 33%. Для модели

Атчисона (рис. 2 г, д) при расстоянии между планами 0,25 дптр пиковая интенсивность падает на 24 % , а при увеличении расстояния до 0,5 дптр – на 45%. Биплановые функции интенсивности 2 становятся немонотонными (рис. 2 г) и «двугорбыми» (рис. 2 д). Комбинированные изображения не только теряют контраст, но и уширяют аксиальное распределение интенсивностей.

На рис. 2 в и 2 е показаны «аккомодационно-частотные» функции [2], которые определяют «прохождение» пространственных частот (от 4 до 16 цикл/град) через фокус. Для модели Лотмара с расстоянием 0,5 дптр между планами P1 и P2 на пространственной частоте 16 цикл/град контраст падает на 23 % (рис. 2 в). На том же расстоянии и той же частоте падение контраста на 31 % отмечено для модели Атчисона (рис. 2 е).

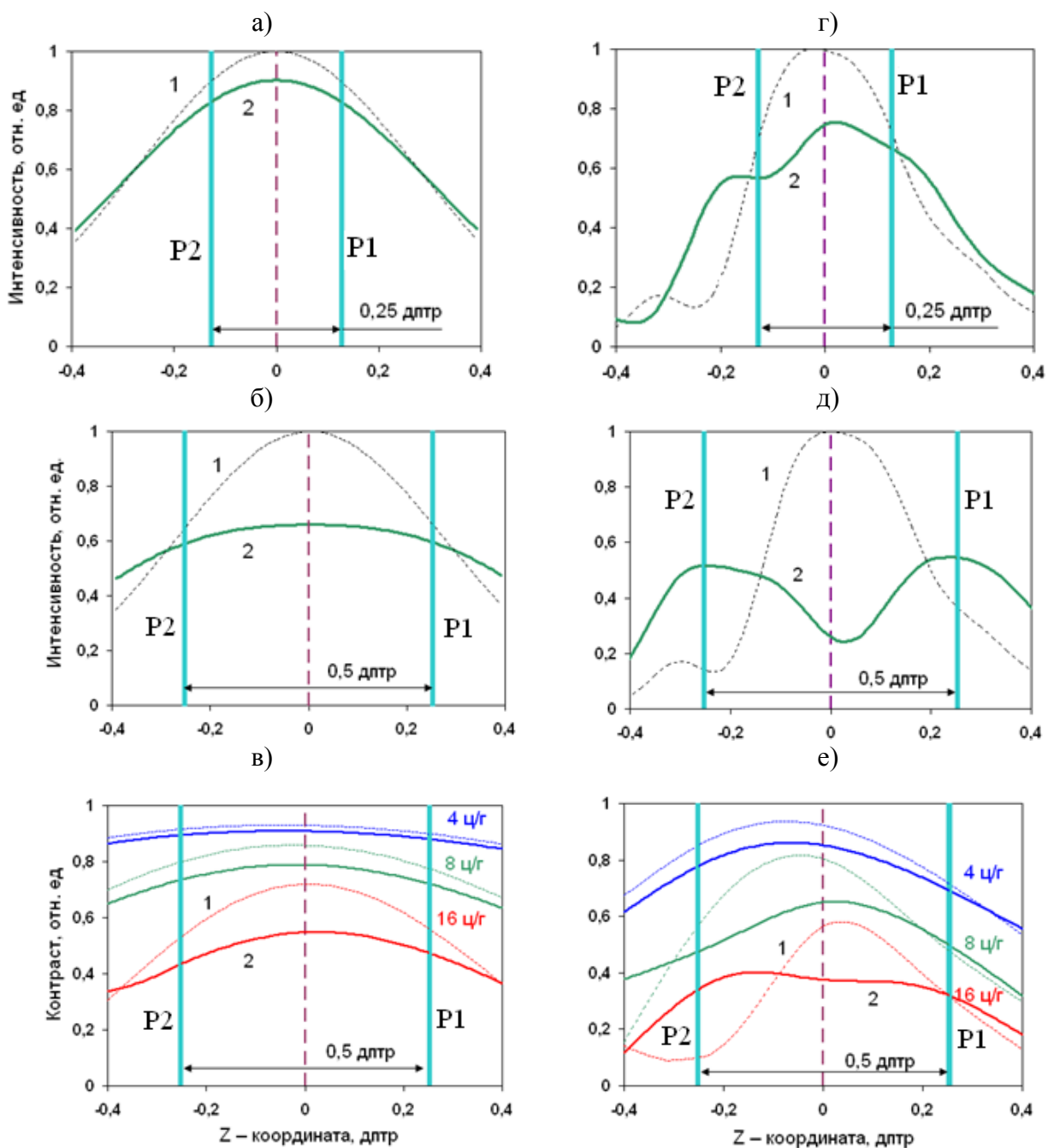


Рис. 2

Таким образом, падение контраста комбинированного изображения зависит, как от расстояния между планами-изображениями, так и от аксиального распределения интенсивности, определяющего дифракционную глубину фокуса при различных диаметрах входного зрачка и различных aberrациях оптической схемы.

Трёхмерные изображения, стимулирующие аккомодацию, представляются в виде линейной комбинации (1). Поэтому можно предположить, что аккомодация глаза будет также изменяться линейно. Но это не так.

На рис. 3 показаны зависимости положения пика интенсивности внутри интервала $[Z_n Z_f]$ от моделируемой глубины при $0 \leq \beta(x,y) \leq 1$. Рассчитаем нелинейность в виде отношения максимальной разницы δZ между пиком и величиной линейной функции аккомодации (пример показан на рис. 3 в), к величине интервала $Z_n - Z_f$ между планами-изображениями. Для модели Лотмара (рис.3 а, б) при расстоянии 0,25 дптр относительная нелинейность, или сигмоидность мала и составляет 3,6 %. При увеличении расстояния до 0,5 дптр – увеличивается до 20 %.

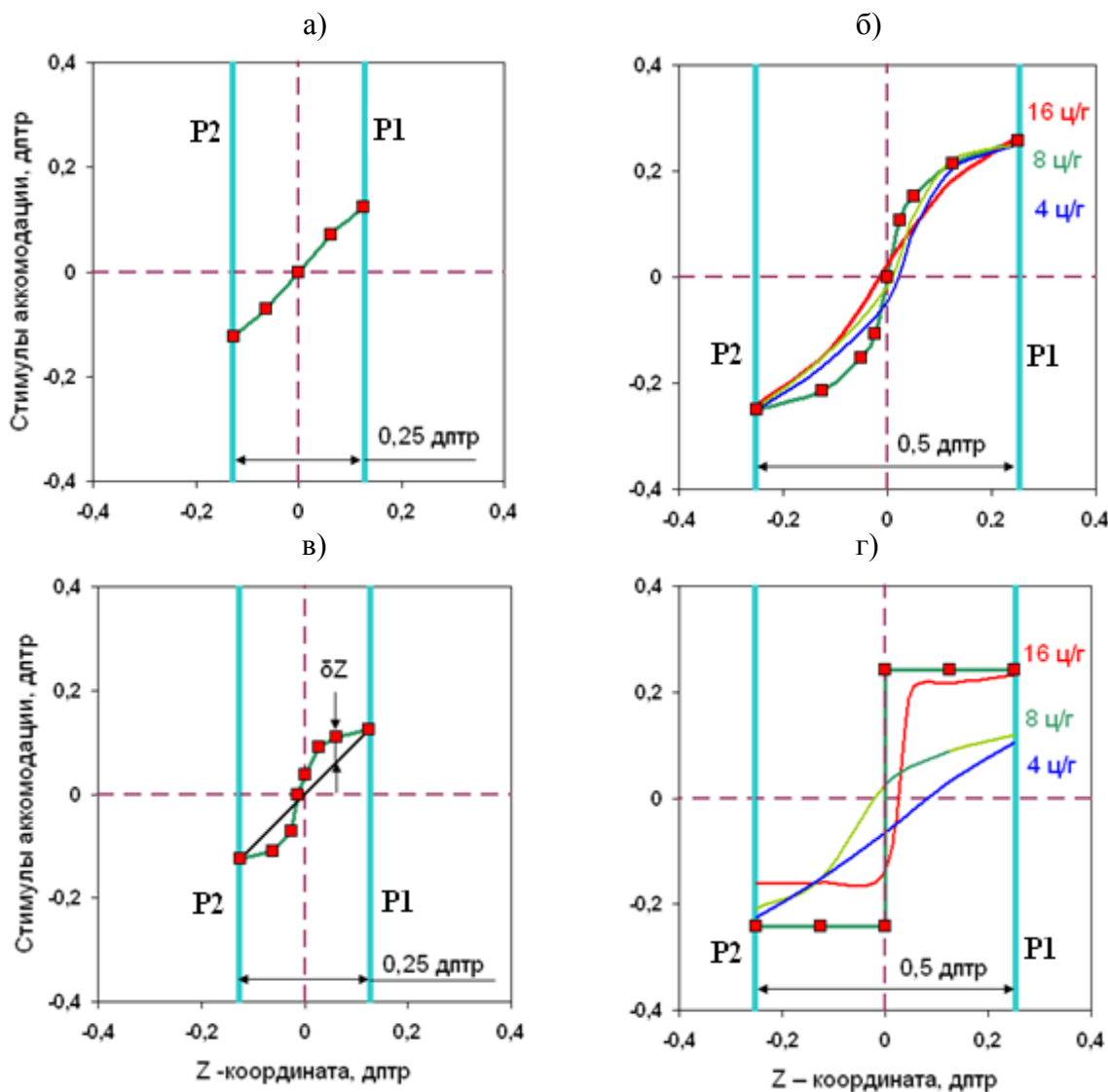


Рис. 3

Для модели Атчисона (рис. 3 в, г) при расстоянии между планами 0,25 дптр сигмоидность составляет 24,8 %. При увеличении расстояния до 0,5 дптр – достигает 50%. В последнем случае моделируемая точка перемещается скачкообразно от ближнего плана к дальнему. На рис. 3 б и 3 г добавлены результаты пространственно-частотного анализа на частотах от 4 до 16 цикл/град. Аккомодация на пик аксиальной интенсивности и на максимум частотного контраста отличаются, особенно на больших интервалах $[Z_n Z_f]$ и малых ДГФ (рис. 3 г).

В работе предложена модель трехмерного изображения в виде линейной комбинации функций аксиальной интенсивности для двух двумерных планов-изображений, разнесённых по глубине вдоль зрительной оси глаза. Получены результаты компьютерных экспериментов с моделями глаз по Лотмару и Атчисону. Показаны ощутимые потери контрастности от 10 до 45% и большие нелинейности (сигмоидности) аккомодации от 3,6 до 50%. Результаты на основе анализа сигнала в пространственной области оказались более «жёсткими» оценками потери контраста и линейности аккомодации по отношению к оценкам, полученным для сигналов в пространственно–частотной области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковалев А.М. Мультифокальный стереодисплей. Пат. 2201610 РФ // Оpubл. 27.03.2003, Бюл. № 9.
2. Akeley K., Watt S.J., Girshick A.R., Bancks M.S. A stereo display prototype with multiple focal distances // ACM Trans. Graph. – 2004. – Т. 23. – No.3. – P. 804–813.
3. Love G.D., Hoffman D.M., Hands P.J., Gao J., Kirby A.K., Bancks M.S. High-speed switchable lens enables the development of a volumetric stereoscopic display // Optics Express. – 2009. – Vol. 17. – No. 18. – P. 15716–15725.
4. Ковалев А.М. О мультифокальных дисплеях, дифракционной глубине фокуса и визуальном комфорте // Автометрия. – 2010. – Т. 46. – № 3. – С. 86–94.
5. Ковалев А.М., Кравченко Ю.Л., Хрящев С.В., Елыков Н.А., Власов Е.В., Морозов А.О. Бифокальный объёмный стереоскопический дисплей // Гео-Сибирь-2011. Т.5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии. Ч1. Сборник материалов VII Международного научного конгресса «Гео-Сибирь-2011», 19-29 апреля 2011 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2011. – С. 94-97.
6. Bakaraju R.C., Ehrmann K., Papas E., Ho A. Finite schematic eye models and their accuracy to in-vivo data // Vision Research. – 2008. – Vol. 48. – P. 1681–1694.

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКОННОГО СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОГО БЛОКА CHR-150 ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИНЫ РЕЛЬЕФА БИНАРНЫХ ФАЗОВЫХ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ

Виктор Павлович Корольков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, проспект акад. Коптюга, 1, старший научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики, тел. (383) 3333-091, e-mail: victork@iae.nsk.su

Александр Сергеевич Конченко

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, проспект акад. Коптюга, 1, инженер лаборатории дифракционной оптики, тел. (383) 3333-091, e-mail: as_konch@ngs.ru, Новосибирский государственный университет, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистрант кафедры квантовой оптики.

В статье рассмотрено применение волоконного спектрофотометрического блока CHR-150 (STIL, Франция) для измерения глубины рельефа бинарных фазовых синтезированных голограмм путем определения экстремумов спектральной зависимости дифракционной эффективности решетки в нулевом порядке на отражение.

Ключевые слова: измерение глубины микрорельефа, бинарные фазовые синтезированные голограммы, волоконный спектрофотометр, дифракционной эффективности решетки в нулевом порядке.

APPLICATION OF FIBER SPECTROPHOTOMETRIC UNIT CHR-150 FOR MEASUREMENT OF PROFILE DEPTH OF BINARY PHASE COMPUTER- SYNTHESIZED HOLOGRAMS

Victor P. Korolkov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Novosibirsk, Koptiyuga avenue 1, senior researcher of laboratory of diffractive optics, phone +7 (383) 3333-091, e-mail: victork@iae.nsk.su

Alexander S. Konchenko

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Novosibirsk, Koptiyuga avenue 1, senior researcher of laboratory of diffractive optics, phone +7 (383) 3333-091, e-mail: as_konch@ngs.ru, Novosibirsk state university, 630090, Novosibirsk, Pirogova str., 2, undergraduate of quantum physics department

Paper describes application of fiber spectrophotometric unit CHR-150 (STIL, France) for measurement of profile depth of binary phase computer-synthesized holograms by means of finding extrema of spectral dependence of zero order diffraction efficiency in reflection.

Key words: measurement of profile depth, binary phase computer-synthesized holograms, fiber spectrometer, zero order diffraction efficiency.

Изготовление бинарных фазовых синтезированных голограмм (СГ), применяемых для контроля асферических поверхностей [1], предъявляет

высокие требования к равномерности глубины бинарного рельефа по поверхности голограммы. Это вызвано необходимостью получения интерференционной картины с равномерной интенсивностью. В особенности чувствительны к равномерности глубины СГ нового типа – дифракционные нуль-линзы ФИЗО (DFNL) [2], в которых опорный волновой фронт формируется на отражение дифракционной структурой, работающей в высоком порядке дифракции. Такие структуры существенно более чувствительны к ошибкам глубины, чем структуры, работающие в первом порядке дифракции. С учетом большого разнообразия периодов и большого размера структуры СГ контроль глубины микрорельефа связан не только с существенными трудозатратами, но и практической невозможностью оперативного профилометрического контроля глубины решеток с периодом порядка нескольких микрон. Оперативный контроль глубины методом измерения относительной интенсивности всех дифракционных порядков при пропускании через структуру СГ лазерного пучка [3] также трудно реализовать в связи с тем, что период дифракционной структуры меняется от долей миллиметра до единиц микрон, что приводит соответственно к большой вариации углов между дифракционными порядками.

На наш взгляд, необходимую оперативность и точность измерения глубины микрорельефа СГ можно достичь с помощью метода, предложенного нами для сертификации отражающих калибровочных решеток [4]. Предлагаемый способ измерения глубины основан на использовании спектральных свойств отражающих фазовых бинарных решеток, работающих в высоком порядке дифракции.

Рассмотрим падение света из воздушной среды на отражающую бинарную фазовую дифракционную решетку в скалярном приближении теории дифракции. Оптическая разность хода Δl лучей, отраженных от поверхности выступов и канавок, можно выразить через глубину решетки H и угол падения α света:

$$\Delta l = \frac{2H}{\cos(\alpha)}.$$

Максимум интенсивности отраженного света в нулевом порядке дифракции наблюдается, когда Δl становится кратна длине волны. Таким образом, при данном угле падения света α и глубине H , максимум интенсивности нулевого порядка будет наблюдаться при освещении светом с волновым числом ($k=1/\lambda$), равным

$$k = \frac{m \cdot \cos(\alpha)}{2H}, \quad (1)$$

где m – количество длин волн, укладываемых в разности оптических путей. Очевидно, что зависимость интенсивности нулевого порядка дифракции будет периодической функцией волнового числа с периодом $\cos(\alpha)/2H$.

Кривая 1 на рис. 1 демонстрирует рассчитанную и экспериментально измеренную спектральные нормированные зависимости дифракционной эффективности в нулевом порядке NDE_0 для отражающей металлической

решетки глубиной 1564 нм при угле падения света 8° . Расчет проводился в рамках скалярной теории дифракции. Определив по данным такого графика разности волновых чисел соседних максимумов, мы можем вычислить среднюю глубину измеряемой решетки:

$$H = \frac{1}{N} \sum_{i=1:N} \frac{\cos \alpha}{2\Delta k_i}, \quad (2)$$

где N – количество анализируемых пар соседних максимумов.

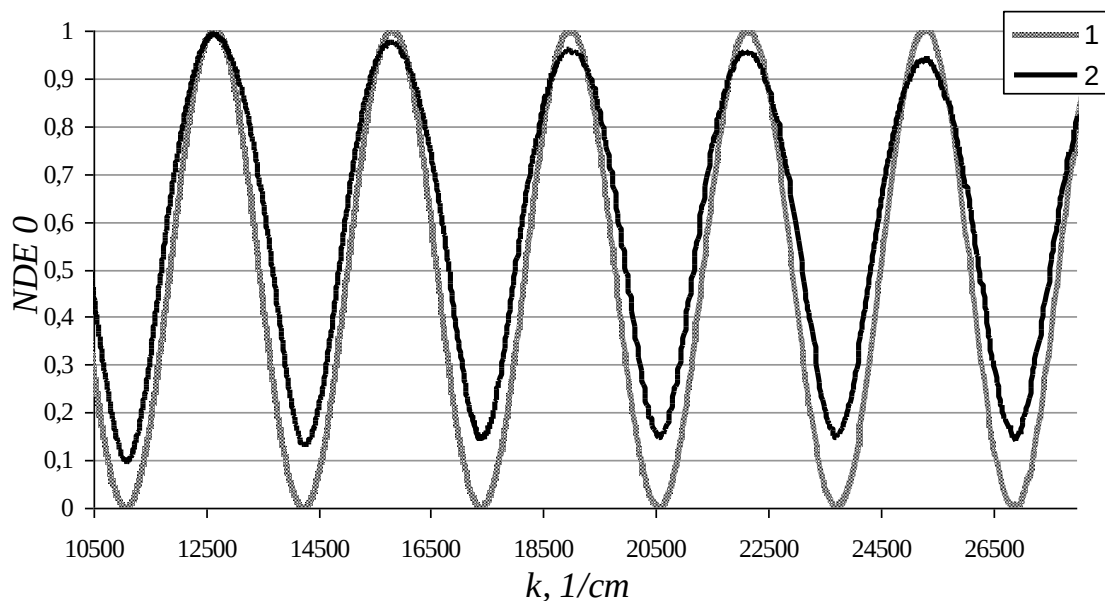


Рис. 1. Зависимость нормированной дифракционной эффективности нулевого порядка от волнового числа падающего излучения. График 1 – результат моделирования решетки с глубиной 1564 нм. График 2 – экспериментальные данные

В работе [5] показано, что скважность бинарной фазовой решетки не оказывает влияния на положение экстремумов спектральной зависимости дифракционной эффективности в нулевом порядке дифракции. Это принципиально важно для спектрофотометрического метода измерения глубины решеток. В работе [6] подробно рассмотрен вклад в погрешность измерения предложенным методом различных факторов: ошибок изготовления решеток и систематических ошибок измерительной спектрофотометрической установки. В работе [6] использовался настольный спектрофотометр UNICO-2800. Для калибровочных решеток такой спектрофотометр вполне пригоден так как поперечный размер измеряемой решетки не превышает нескольких миллиметров. В случае применения предлагаемого метода к контролю распределения глубины микроструктуры СГ, такого типа приборы не применимы, так как диаметр голограмм может достигать 200 мм. Гораздо более удобны волоконные спектрометры в паре с волоконными осветителями. Такие комплекты поставляются производителями волоконных спектрометров как приборы для измерения толщины тонких пленок на подложке с известными

оптическими постоянными. Мы использовали блок CHR-150 [7] производства фирмы STIL (Франция), в котором интегрированы спектрометр со спектральным диапазоном 450–900 нм и осветитель с галогенной лампой. Несмотря на более узкий спектральный диапазон по сравнению с обычными настольными спектрофотометрами, CHR-150 вполне подходит для поставленной задачи, так как позволяет выявлять 2 максимума и один минимум в спектре при измерении глубин более 500–700 нм, типовых для бинарных СГ. Данный блок поставляется с волоконной оптической головкой как конфокальный хроматический датчик с диапазоном измерения глубины 20 мкм и чувствительностью 10 нм. Вывод излучения из блока CHR-150 и его возврат осуществляется по одному и тому же многомодовому волокну 50/125, что существенно облегчает ввод отраженного светового пучка в нулевом порядке дифракции с фильтрацией высоких порядков. На выходе многомодового волокна мы установили 10X микрообъектив с апертурой 0.3 вместо штатной хроматической оптической головки. На выходе объектива мы сформировали сходящийся световой пучок, чтобы уменьшить освещаемую область решетки до 0.5-1 мм и обеспечить расходимость пучка от обратной стороны подложки (толщина ≥ 5 мм), достаточную для подавления спектра, сформированного не отражением, а прохождением света через дифракционную структуру. Экспериментальная установка показана на рис. 2.

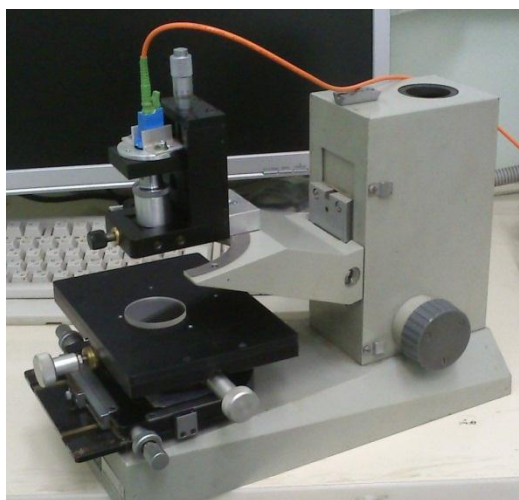


Рис. 2. Экспериментальная установка для измерения глубины рельефа бинарных фазовых СГ

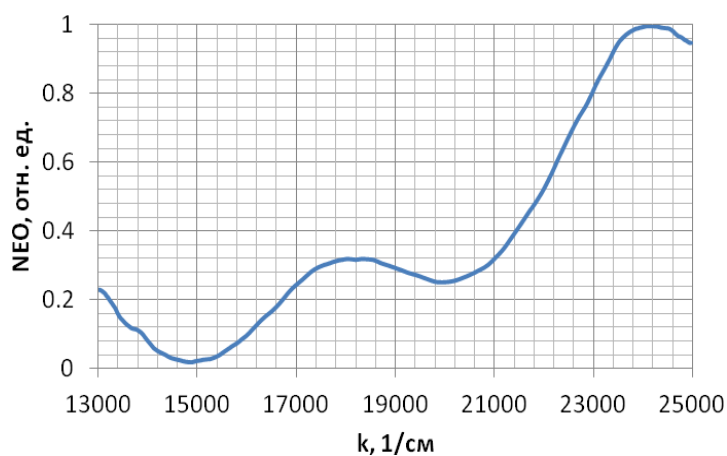


Рис. 3. Пример измеренной усредненной спектральной зависимости нормированной интенсивности нулевого порядка дифракции на отражение

Задача измерения фазовых СГ осложняется тем, что отражение кварцевой решетки в 10–20 раз меньше чем у калибровочных металлизированных решеток, которые мы измеряли ранее. Для компенсации падения интенсивности света и возрастания шумов мы увеличивали время интегрирования и число усредняемых спектров при конфигурировании спектрометра. Тем не менее, эти параметры позволяли снимать порядка 10 спектров в секунду. На рис. 3 показан

пример спектральной зависимости усредненной нормированной интенсивности нулевого порядка дифракции, вычисленной согласно следующему выражению:

$$NDE0(k) = (I_{grat} - I_{dark}) / ((I_{SiO2} - I_{dark}) / \max((I_{grat} - I_{dark}) / (I_{SiO2} - I_{dark}))),$$

где – I_{grat} – спектр измеренный от решетки, I_{SiO2} – спектр измеренный от решетки от поверхности кварца, I_{dark} – спектр темнового сигнала. Положение экстремумов определяется с приемлемой для нашей задачи точностью. Глубина рельефа, определенная по графику по рис. 3, равна 825 нм, что соответствует величине с учетом погрешности измерения, полученной на оптическом профилометре WLI (BMT, Германия).

Моторизованное сканирование голограммы с синхронным измерением спектров отражения пробного пучка с шагом порядка 1 мм в двух перпендикулярных сечениях с одновременной on-line обработкой получаемых спектров позволит детально тестировать элементы размером до 200 мм за время порядка нескольких минут практически во всем диапазоне периодов микроструктуры. Такая производительность не достижима ни одним современным профилометром.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chang Y.-C., Zhou P., and Burge J.H. Analysis of phase sensitivity for binary computer-generated holograms // Appl. Opt. – 2006. – Vol. 45. – P. 4223–4234.
2. Poleshchuk A.G., Nasyrov R.K., and Asfour J.-M. Combined computer-generated hologram for testing steep aspheric surfaces // Opt. Express. – 2009. – Vol. 17. – P. 5420–5425.
3. Кирьянов В.П., Никитин В.Г. Измерение эффективности дифракционных оптических элементов методом сканирования // Автометрия. – 2004. – Т. 40, № 5. – С. 82–93.
4. Korolkov V.P., Konchenko A.S., and Nasyrov R.K. Spectrophotometric Certification of Calibration Gratings // ACIT – Information and Communication Technology (ACIT–ICT 2010), June 15 – 18, 2010. – P. 693-005.
5. Poleshchuk A.G. Diffractive light attenuators with variable transmission // Journal of modern optics. – 1998. – 45. – № 7. – P. 1513–1522.
6. Корольков В.П., Конченко А.С. Спектрофотометрический метод измерения глубины отражательных калибровочных решеток // Автометрия. – 2012. – Т.48. – № 2. – С. 119–127.
7. Non-contact “point” sensors. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.stilsa.com/catalog2/pdf/STILSA_Initial_CCS_CHR.pdf

© В.П. Корольков, А.С. Конченко, 2012

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАЗИТНОЙ ФОНОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИГНАЛА В МАТРИЧНЫХ ИК-ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Геннадий Иванович Косолапов

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Лаврентьева, 2/1, ведущий инженер отдела моделирования оптико-электронных систем, тел.(383) 330-91-11, e-mail: gen_kos@ngs.ru

Петр Порфирьевич Добровольский

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Лаврентьева, 2/1, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела тепловидения и телевидения, тел.(383) 330-97-49, e-mail: porfir@ngs.ru

Сергей Михайлович Чурилов

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Лаврентьева, 2/1, заведующий отделом тепловидения и телевидения, тел.(383) 3309749

Константин Павлович Шатунов

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Лаврентьева, 2/1, заведующий сектором отдела тепловидения и телевидения, тел. (383) 330-97-49, e-mail: sconst@ngs.ru

Владимир Викторинович Быков

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, г. Новосибирск, Пр-т Ак. Лаврентьева, 2/1, инженер-конструктор отдела тепловидения и телевидения, тел.(383) 3309749, e-mail: wbykow@yandex.ru

Павел Алексеевич Алдохин

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Лаврентьева, 2/1, младший научный сотрудник отдела тепловидения и телевидения, тел.(383) 330-97-49, e-mail: aldosh@ngs.ru

Приведены экспериментальные данные об уровне собственной паразитной фоновой составляющей сигнала инфракрасного излучения (ИК) вызванной элементами криостата и входной оптики матричного фотоприемного устройства (МФПУ).

Ключевые слова: тепловизор, криостат, фоновый сигнал.

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE PARASITIC BACKGROUND COMPONENT OF THE SIGNAL IN INFRARED FOCAL PLANE ARRAYS

Gennady I. Kosolapov

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, leading engineer, department of modeling of optiko-electronic systems, tel.(383) 3309749, e-mail: gen_kos@ngs.ru

Peters P. Dobrovolsky

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, candidate of physical and mathematical sciences, leading research assistant, department of thermal imaging and television tel. (383) 330-97-49, e-mail: porfir@ngs.ru

Sergey M. Churilov

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, manager of department of thermal imaging and television tel.(383) 330-97-49

Konstantin 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, managing sector, department of thermal imaging and television tel.(383) 330-97-49, e-mail: sconst@ngs.ru

Vladimir V. Bykov

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, design engineer, department of thermal imaging and television tel.(383) 330-97-49, e-mail: wbykow@yandex.ru

Pavel A. Aldokhin

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, younger research assistant, department of thermal imaging and television tel.(383) 330-97-49, e-mail: aldosha@ngs.ru

Experimental data about level of own parasitic background component of infrared radiation signal caused by elements of cryostat and entrance optics of infrared thermal imaging device are presented.

Key words: thermal image device, cryostat, background signal

Тепловизоры (ТВП) на основе охлаждаемых матричных фотоприемных устройств (МФПУ) 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 [1]. В связи с этим встает задача определения влияния собственной паразитной фоновой компоненты облученности составных частей приемного тракта ТПВ.

Главным узлом охлаждаемых ТПВ является МФПУ на основе эпитаксиальных слоев твердого раствора кадмий – ртуть – теллур (КРТ) для инфракрасного диапазона (ИК), расположенное внутри криостата и работающее в режиме накопления. Оно преобразует тепловое изображение, сформированное входным объективом в плоскости МФПУ в электрический видеосигнал. При этом накапливаемые от фоточувствительных элементов (ФЧЭ) токи включают в

себя темновые токи и фототоки, которые состоят из двух компонент. Первая – сигнальная, падающая на МФПУ из объектива, вторая – фоновая, состоящая также из двух частей. Одна попадает на МФПУ из объектива, другая (паразитная) – из областей, находящихся вне его [2]. Паразитная компонента фоновой облученности (исходящая из областей, расположенных вне выходного зрачка оптической системы) является бесполезной и лишь ухудшает параметры приемника, так как ее воздействие эквивалентно повышению темнового тока фоточувствительных элементов (ФЧЭ) МФПУ [3].

Для исследования влияния и оценки уровня собственной паразитной компоненты фоновой составляющей криостата и проекционного объектива (являющегося составной частью входного объектива) ТПВ были проведены два эксперимента. В качестве экспериментального образца ТПВ был выбран макетный образец ТПВ, на основе охлаждаемого МФПУ со следующими основными характеристиками:

- Рабочий спектральный диапазон, $\Delta\lambda$, мкм 7,7..10,3;
- Размерность матрицы 320×256;
- Шаг матрицы, мкм 30;
- Время накопления, мкс 30;
- Температурное разрешение, ΔT , °K $\approx 0,05$.

Структурная схема измерительной установки, показана на рис. 1.

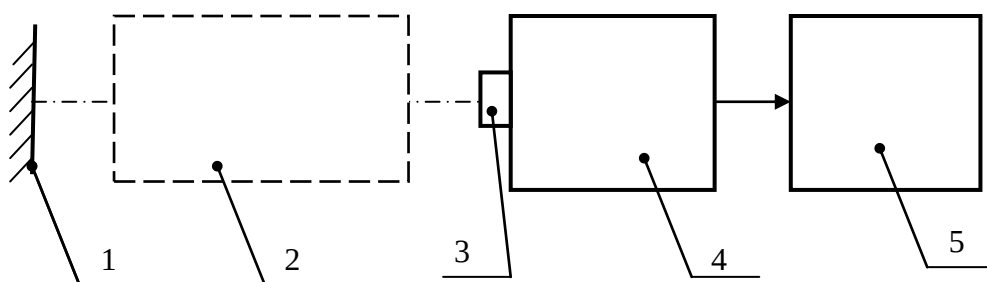


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки: 1 – зеркало; 2 – проекционный объектив; 3 – выходное окно криостата ТПВ; 4 – ТПВ; 5 – компьютер

Суть экспериментов заключалась в следующем: перед входным окном криостата ТПВ устанавливался «тест – объекты» в виде зеркала и проекционного объектива (выходной зрачок проекционного объектива совмещен с входным окном криостата) и снимались значения сигналов. Первый эксперимент заключался в следующем: перед входным окном криостата устанавливалось зеркало без проекционного объектива и проводилось три измерения уровня сигнала для разных температур зеркала и криостата ТПВ. Значения уровней сигналов и условия проведения измерений приведены в таблице.

Второй эксперимент заключался в следующем: перед входным окном криостата устанавливался проекционный объектив, перед которым, в плоскость

промежуточного изображения устанавливалось зеркало и проводилось три измерения уровня сигнала для разных температур зеркала, проекционного объектива и криостата ТПВ, точно так же, как в первом эксперименте, результаты измерений заносились в таблицу.

Таблица

№ эксперимента	№ измерения	Объект на входе	Значение сигнала			Среднее значение
			A	B	C	
1	1.	«Теплый» криостат, «теплое» зеркало (при комнатной температуре (+22°C)).	3047	3044	3049	3046
	2.	«Холодный» криостат (при температуре окружающей среды (-21°C)), «теплое» зеркало (при комнатной температуре (+22°C)).	1528	1527	1497	1517
	3.	«Холодный» криостат (при температуре окружающей среды (-21°C)), «холодное» зеркало (при температуре окружающей среды (-21°C)).	1382	1290	1257	1309
2	4.	«Теплый» криостат, «теплый» проекционный объектив и зеркало (при комнатной температуре (+22°C)).	5245	5334	5250	5276
	5.	«Холодный» криостат (при температуре окружающей среды (-21°C)), «теплый» проекционный объектив и зеркало (при комнатной температуре (+22°C)).	4149	4096	4057	4100
	6.	«Холодный» криостат (при температуре окружающей среды (-21°C)), «холодный» проекционный объектив и зеркало (при температуре окружающей среды (-21°C)).	2189	2210	2234	2211

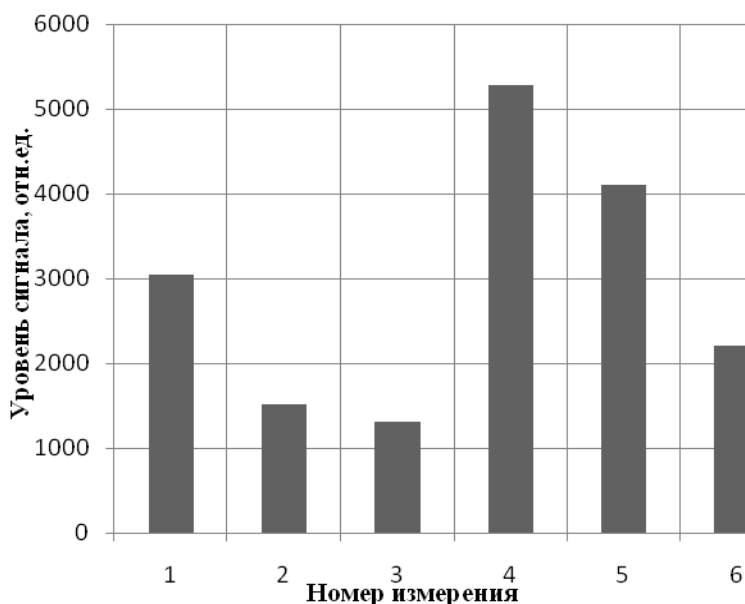


Рис. 2. Диаграмма уровней сигналов для различных комбинаций температур криостата, проекционного объектива и зеркала

На основании проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- Оценены уровни паразитных сигналов фоновой составляющей для криостата и проекционного объектива;
- Уровни сигналов при различных температурах изменяются пропорционально четвертой степени абсолютной температуры корпусов криостата и проекционного объектива;
- Требуется оптимизация конструкции криостата и проекционного объектива за счет введения отражающих и поглощающих экранов уменьшающих попадание излучения от корпусных деталей криостата и проекционного объектива на МФПУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марчишин И.В., Алдохин П.А., Косолапов Г.И., Чурилов С.М., Шатунов К.П. О возможности работы матричного $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ приемника в режиме многоимпульсного накопления сигнала, синхронизированного с лазерным излучением [текст] / Марчишин И.В. и д.р. // Сб. материалов Междунар. конгресса «ГЕО-Сибирь-2009». Т. 5. – Новосибирск: СГГА, 2009. – С. 31–35.
2. Патрашин А.И. Инфракрасное фотоприемное устройство с оптимальной диафрагмой [текст] / Патрашин А.И. // Прикладная физика. – 2011. – № 4. – С. 65–70.
3. Патрашин А.И. Теоретическое исследование фоновых облученностей ИК МФЧЭ с холодными диафрагмами заданных типов [текст] / Патрашин А.И. // Прикладная физика. – 2011. – № 3. – С. 98–106.

© Г.И. Косолапов, П.П. Добровольский, С.М. Чурилов,
К.П. Шатунов, В.В. Быков, П.А. Алдохин, 2012

РАЗРАБОТКА ОПОРНОГО КАНАЛА КОГЕРЕНТНОГО ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА

Сергей Николаевич Макаров

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, старший научный сотрудник лаборатории 2-1, тел. (383) 306-62-08, e-mail: makarovsn@tdisie.nsc.ru

Илья Сергеевич Глебус

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, инженер лаборатории 2-1, тел. (383) 306-62-08, e-mail: ilya-neo@ya.ru

В статье рассмотрена и описана интерферометрическая схема когерентного лазерного дальномера с опорным каналом; предложена схема опорного канала с обратной связью, изложено её описание. Построена математическая модель работы опорного канала; а также осуществлена настройка параметров модели и проведён анализ результатов симуляции.

Ключевые слова: лазерный дальномер, интерферометр Майкельсона, оптическое гетеродинамирование.

DEVELOPMENT OF THE BASIC CHANNEL OF A COHERENT LASER RANGE FINDER

Sergey N. Makarov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, 41, Russkaya str., Novosibirsk 630058, senior researcher, laboratory 2-1, (383) 306-62-08, e-mail: makarovsn@tdisie.nsc.ru

Ilya S. Glebus

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, 41, Russkaya str., Novosibirsk 630058, engineer, laboratory 2-1, (383) 306-62-08, e-mail: ilya-neo@ya.ru

In article the interferometric scheme of a coherent laser range finder with the basic channel is considered and described; the scheme of the basic channel with feedback is offered, its description is stated. The mathematical model of the basic channel operation is constructed; the adjustment of model parameters and the analysis of simulation results are carried out.

Key words: laser range finder, Michelson interferometer, optical heterodyning.

1. Введение

В современном производстве, строительстве и геодезии имеется потребность измерения расстояний и обмера геометрии различных крупногабаритных объектов, имеющих характерные размеры до нескольких десятков метров. Для решения данной задачи необходимо разработать лазерный дальномер – прибор, позволяющий измерять расстояния до любой поверхности бесконтактным способом.

Требования к дальномеру были выставлены потенциальными заказчиками подобной системы. Необходимый измерительный диапазон составляет от 1 до

150 метров, при точности измерения от ± 0.1 мм до ± 5 мм, в зависимости от измеряемого расстояния и типа поверхности. Скорость выполнения измерений должна быть не менее 1000 измерений в секунду. Рабочая оптическая поверхность объекта, до которого измеряются расстояния, предполагается диффузно-рассеивающей свет.

Данная работа посвящена разработке одного из функциональных узлов когерентного лазерного дальномера – его опорного канала измерения, представляющего калиброванную длину, реализованную в оптоволоконной линии задержки [1].

Основным назначением опорного канала дальномера является реализация калиброванной меры расстояния, с которой ведется сравнение измеряемого в воздухе расстояния до объекта. Такой подход позволяет компенсировать влияние различных неизвестных параметров оптической схемы когерентного лазерного дальномера на точность измерения расстояния.

2. Интерферометрическая схема измерения расстояния с использованием оптического гетеродинирования частотно-модулированного излучения

Используемая схема представляет собой интерферометр Майкельсона [2] в оптоволоконном исполнении. В качестве источника излучения используется лазер с линейно перестраиваемой длиной волны во времени.

Перестройка частоты излучения лазера во времени приводит к тому, что смешиваемые оптические излучения опорного и измерительного плеч на выходе интерферометра имеют различные оптические частоты.

Разница двух частот излучения связана с разной временной задержкой распространения света в плечах из-за разницы оптических путей. Чем больше эта задержка, тем больше становится разница оптических частот.

Из-за того, что смешиваемые оптические излучения имеют разные частоты, их регистрируемая интерферограмма на фотоприемнике будет «бежать» на некоторой частоте биений ω_b , которая равняется разнице оптических частот.

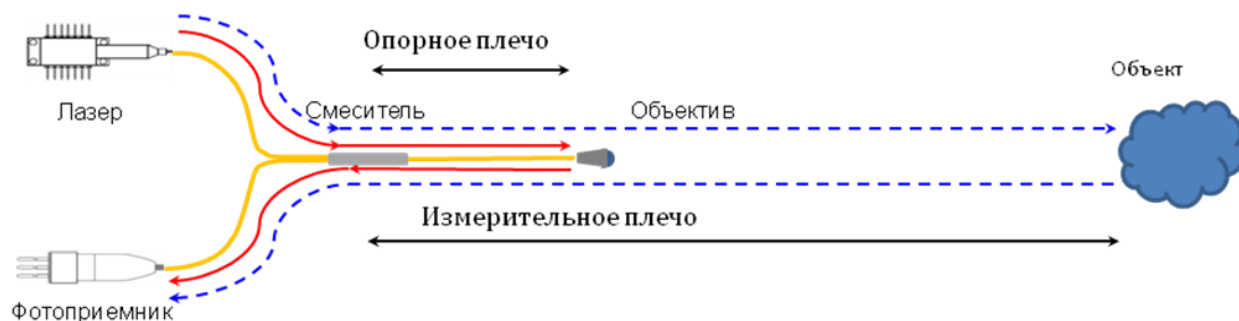
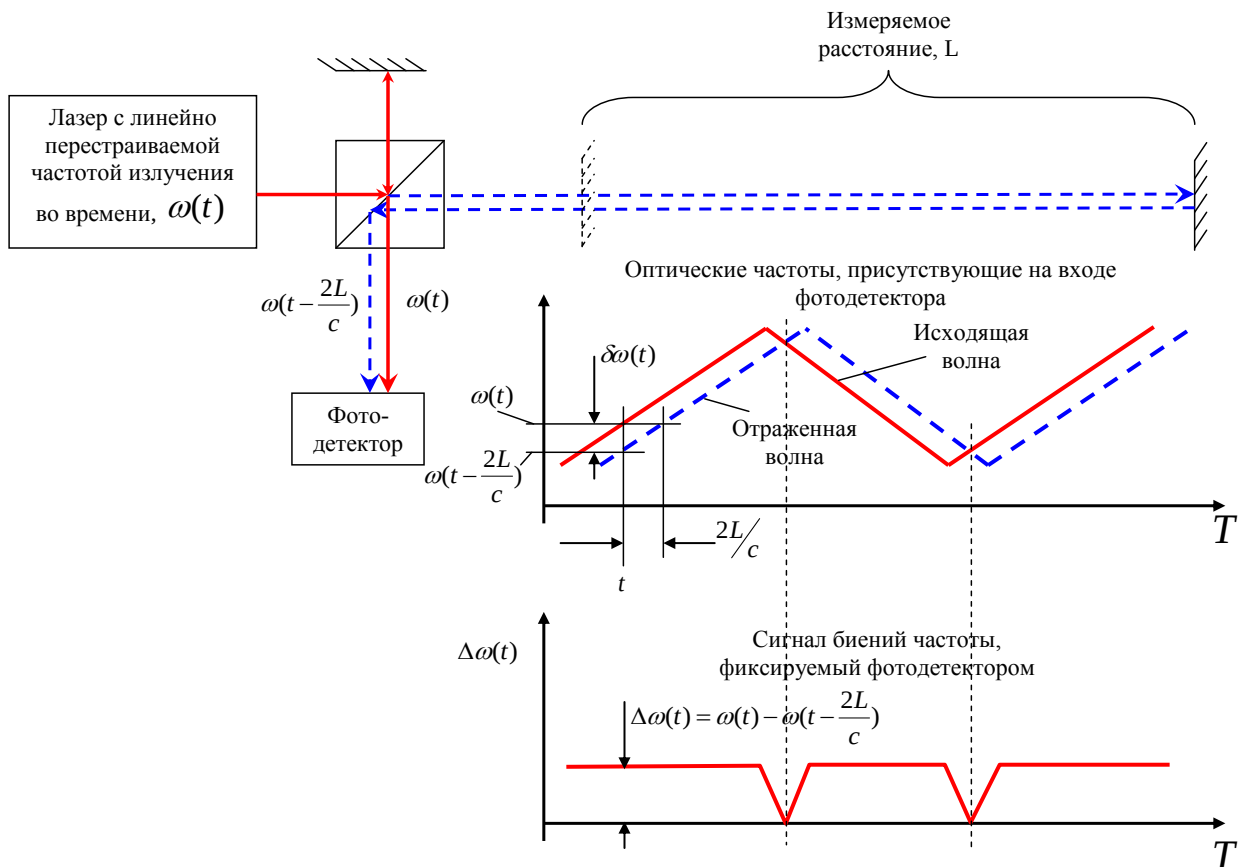


Рис. 1. Оптоволоконная реализация измерителя расстояния



РРис. 2. Частотная модуляция лазерного излучения

При кусочно-линейной модуляции частоты лазера во времени частота биений линейно связана с измеряемым расстоянием.

$$\omega_b(t) = \frac{4\Delta\omega}{c \cdot T_{\text{mod}}} \cdot L, \quad (1)$$

$$L = \frac{c \cdot T_{\text{mod}}}{4 \cdot \Delta\omega} \cdot \omega_b, \quad (2)$$

где c - скорость света; T_{mod} - период модуляции оптической частоты; $\Delta\omega$ - диапазон перестройки оптической частоты; ω_b - частота биений детектируемого сигнала; L - измеряемое расстояние.

3. Введение опорного канала в схему дальномера

Из (1) следует, что частота биений зависит не только от расстояния до объекта, но также от параметров лазера и скорости перестройки его оптической частоты. Флуктуации диапазона перестройки частоты, периода её модуляции и скорости изменения приводят к возникновению погрешности измерения расстояния. Поскольку мы не имеем точной модели лазера, то аналитически компенсировать эти погрешности затруднительно. Это означает, что нужно изменить схему дальномера так, чтобы измеряемое до объекта расстояние не зависело от этих параметров.

Новая модификация дальномера сводится к введению в его схему опорного канала (рис. 3), который представляет собой второй интерферометр с заданной

калиброванной разностью длин плеч. В качестве источника света для опорного канала используется излучение того же лазера, что и в измерительном канале. Поэтому, сигнал, полученный на фотоприёмнике опорного канала, будет осциллировать на частоте биений, соответствующей разности длин плеч опорного интерферометра, с теми же самыми характеристиками перестройки оптического излучения, что и в измерительном канале. Это дает возможность компенсировать неизвестные характеристики перестройки оптической частоты лазера.

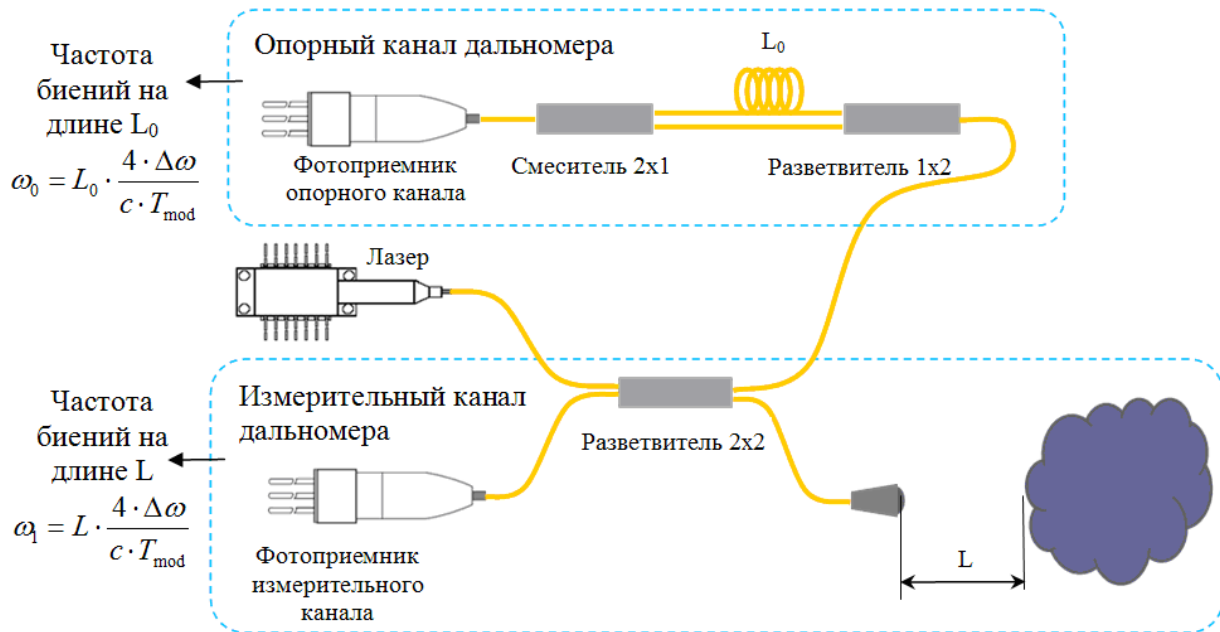


Рис. 3. Введение опорного канала в схему дальномера

Поскольку обе частоты биений интерференционных сигналов зависят от одних и тех же параметров лазера, то выполняется соотношение, не зависящее от параметров лазера, откуда легко можно найти измеряемую длину:

$$L = L_0 \frac{\omega_1}{\omega_0} \quad (3)$$

где ω_0 , ω_1 - частоты биений в опорном и измерительном каналах соответственно; L_0 - разница длин плеч опорного интерферометра.

Опорный канал дальномера был реализован аппаратно (по схеме на рис. 3). В макете был применен управляемый источник тока LD1255R (Thorlabs), DFB лазер модели FOL15DCWD (FITEЛ), фотодиод модели EPM 745 (JDSU).

Эксперимент по получению сигнала биений имел следующие параметры:

- Время линейной перестройки тока лазера: 0.283 с
- Рабочий диапазон перестройки тока лазера: 0.094...0.204 А
- Скорость нарастания тока лазера: 0.389 А/сек
- Оптическая разность хода лучей в волокне: 1 м

Полученный интерферометрический сигнал биений был оцифрован, затем вычислен его спектр, относительная ширина которого составила 52%. Значит, такую же погрешность имеет и измеряемое расстояние.

Достоинства текущей схемы: высокая чувствительность, абсолютное измерение расстояния, работа с диффузно-отражающими поверхностями, отличное подавление внешних низкочастотных засветок.

Недостаток: нестабильность частоты биений интерферометрического сигнала за время измерения, т.е. нелинейность перестройки частоты излучения лазера во времени, приводящей к нестабильному сигналу биений.

4. Схема опорного канала с обратной связью

Для повышения точности измерения расстояния необходима схема модуляции тока лазера, которая бы стабилизировала частоту биений, и минимизировала относительную ширину спектра сигнала биений.

Для реализации схемы стабилизации, было принято решение о введении в схему опорного канала обратной связи [3].

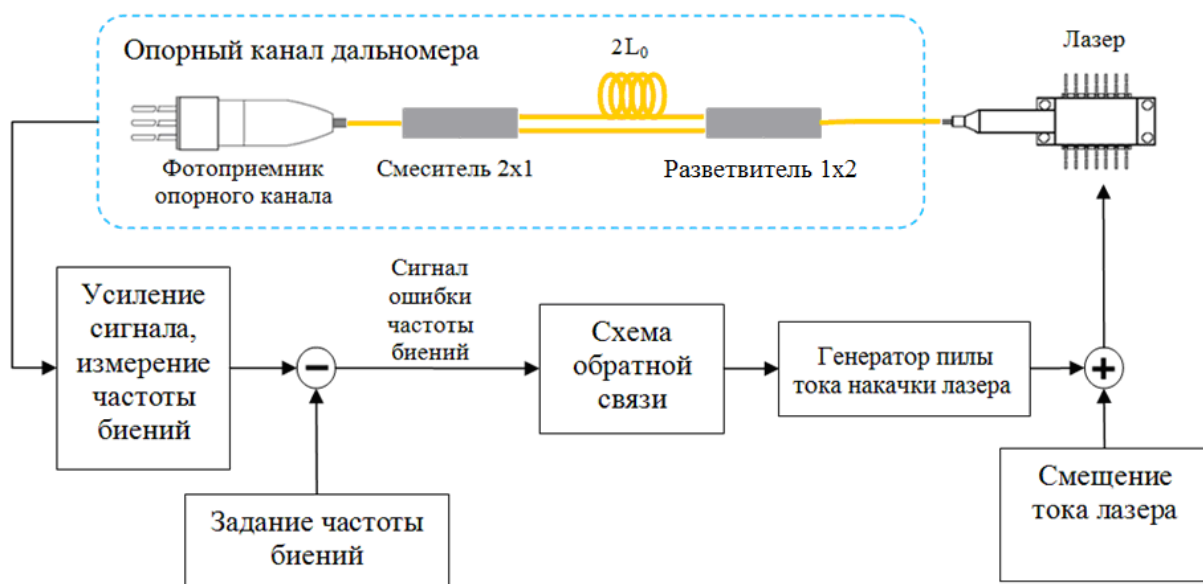


Рис. 4. Схема линейаризации модуляции оптической частоты

Работа схемы (рис. 4) описывается следующим образом:

- Сигнал биений, получаемый на фотоприемнике опорного канала усиливается, выполняется измерение его мгновенной частоты биений, которое затем сравнивается с заданной частотой биений, а отклонение в виде сигнала ошибки подается на вход схемы обратной связи.

- Схема обратной связи представляет собой PID-контроллер [4], который по сигналу ошибки частоты выдает сигнал корректировки угла наклона кривой тока накачки лазера. Угол наклона кривой преобразуется интегратором непосредственно в сигнал тока лазера.

– К сигналу тока лазера добавляется ток смещения, обеспечивающий рабочий диапазон токов лазера (пороговый ток лазерной генерации и ток выхода на рабочий режим).

– Результирующий ток приводит к тому, что лазер генерирует излучение с оптической частотой, модулированной требуемым наклоном, обеспечивающим постоянство частоты сигнала биений.

Для анализа текущей схемы, была реализована математическая модель её работы в среде Matlab Simulink. Целью, которую мы перед собой ставили, являлась настройка параметров обратной связи таким образом, чтобы:

1. Переходной процесс установления рабочего режима занимал время значительно меньшее, чем имеющийся бюджет времени для измерения расстояния длительностью в 1 мс. В течение переходного процесса мы не можем производить измерений, поскольку частота биений нестабильна.

2. После установления рабочего режима, обратная связь выполняет удержание частоты биений в опорном канале. Критерием этого может быть ширина спектра сигнала биений за время измерения порядка 1 мс.

После нескольких итераций настройки обратной связи нам удалось получить устойчивую работу, которая сходится к заданной частоте биений за время порядка 40 мкс, что намного меньше, чем время измерения частоты биений в 1 мс. Стандартное отклонение сигнала рассогласования в установившемся режиме составляет порядка 700 Гц при заданном значении частоты биений 1 МГц. Ширина спектра по порядку величины соответствует соотношению неопределенности Фурье-преобразования, ограничивающему ширину спектра $\Delta\nu \geq T_{изм}^{-1} \sim 10^3 \text{ Гц}$. Тем самым для данного времени измерения частоты в 1 мс схемой стабилизацией частоты биений достигнуто значение стабилизации $\Delta\nu \sim 10^3 \text{ Гц}$. Относительная ширина спектра стабилизированного по частоте сигнала биений составляет порядка 0,1%.

Результаты моделирования показали, что возможно создание схемы стабилизации частоты биений в опорном канале дальногомера, которые потенциально улучшат, т.е. снизят относительную ширину спектра сигнала биений в сотни раз по отношению к схеме без стабилизации частоты.

Результаты проведенной работы можно применить для дальнейшей практической программно-аппаратной реализации схемы опорного канала дальногомера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dougherty D.J., Guttierrez R.C., Dubovitsky S., Forouhar S. Semiconductor Laser Linewidth Measurements for Space Interferometry Applications // Proc. SPIE. – Vol. 3626.
2. Физическая энциклопедия. В 5-ти томах. — М.: Советская энциклопедия. Главный редактор А. М. Прохоров. 1988.
3. Хоровиц П. Хилл У. Искусство схемотехники. М.: Мир, 2003. – 704 с.
4. Ang, K.H., Chong, G.C.Y., and Li, Y. (2005). PID control system analysis, design, and technology. IEEE Trans Control Systems Tech. – 13(4).

ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ СОВРЕМЕННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Максим Михайлович Кузнецов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»; 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10; доцент кафедры технологии оптического производства; телефон (383)-361-07-79; e-mail: kaf.top@ssga.ru

Наталья Кирилловна Соснова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»; 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10; кандидат технических наук, профессор кафедры технологии оптического производства; телефон (383)-361-07-79; e-mail: kaf.top@ssga.ru

Алена Алексеевна Марач

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»; 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10; инженер кафедры технологии оптического производства; телефон (383)-361-07-79; e-mail: kaf.top@ssga.ru

Статья посвящена оценке технологичности, рассмотрена классификация и показатели технологичности конструкции изделий.

Ключевые слова: технологичность.

GENERAL PROVISIONS AND MAIN PROBLEMS OF MODERN INSTRUMENT-MAKING PRODUCTS WORKABILITY TRYOUT

Maxim M. Kuznetsov

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383) 344-40-58, e-mail: a9214439@yandex.ru

Natalya K. Sosnova

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383) 344-40-58, e-mail: kaftop@ssga.ru

Alyona A. Marach

Engineer, department of optical production technology, Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: (383)-361-07-79; e-mail: kaf.top@ssga.ru

Basic provisions and problems of products workability tryout are considered.

Key words: product workability.

Основная цель отработки конструкции на технологичность заключается в повышении производительности труда при оптимальном снижении затрат (труда, средств, материалов, времени на проектирование, подготовку производства, изготовление, технического обслуживания и ремонта) и

обеспечение прочих заданных показателей качества изделия в реальных условиях производства и эксплуатации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- Обеспечить обязательное выполнение отработки конструкции изделия на технологичность на всех стадиях проектирования, производства и эксплуатации;
- Определить показатели, которые могут быть критериями оценки технологичности конструкции;
- Выбрать наиболее рациональные методы расчета показателей технологичности конструкции;
- Определить методы отработки конструкции на технологичность различных видов изделий на всех стадиях проектирования;
- Обеспечить единство терминов и определений, используемых при рассмотрении технологичности конструкций изделия;
- Разработать методические пособия и руководящие документы по вопросам технологичности конструкций общего характера и соответственно различным видам изделий, обработки, по стадиям проектирования, производства и эксплуатации.

Для всех видов изделия при отработке конструкции на технологичность ставятся следующие задачи:

- Снижение трудоемкости изготовления изделия зависит от многих факторов, главными из которых следует считать стандартизацию, унификацию составных частей изделий и их элементов, типизацию технологических процессов изготовления, технического обслуживания и ремонта изделия;
- Стандартизация составных частей изделия» являющихся сборочными единицами (блоки, агрегаты) или деталями (крепеж, метизы и др.).

Результаты отработки конструкции изделия на технологичность определяют правила игры на производстве и задают требуемый уровень подготовки специалистов.

При решении основной задачи отработки конструкции на технологичность необходимо учитывать, что каждое изделие должно рассматриваться:

- Как объект проектирования;
- Как объект производства;
- Как объект эксплуатации.

Методика отработки конструкции детали на технологичность основана на принципах и требованиях, изложенных в [2, 4] и учитывает опыт специалистов области приборостроения.

Обязательность отработки конструкций изделий на технологичность по всем стадиям их создания и сервисного обслуживания устанавливается стандартами ЕСТПП. Количественная оценка технологичности; конструкции

основана на системе показателей технологичности, являющихся критериями технологичности.

При отработке на технологичность конструкции изделия, являющегося объектом производства, учитываются:

- Виды и методы получения заготовок;
- Виды и методы обработки;
- Виды и методы сборки;
- Виды и методы контроля и испытаний;
- Возможность использования типовых технологических процессов;
- Возможность механизации и автоматизации процессов изготовления и технологической подготовки производства;
- Условия материального обеспечения производства;
- Требуемая квалификация рабочих кадров.

Оценка технологичности конструкции изделия согласно [3, 5] основана на трех видах показателей:

- Базовые показатели технологичности, значения которых регламентированы соответствующей директивной документацией на изделие (ТЗ и пр.);
- Показатели проектируемой конструкции, достигнутые в процессе отработки конструкции на технологичность;
- Показатели уровня технологичности конструкции изделия, значения которых регламентированы соответствующей директивной документацией, обуславливающей производство (изготовление) изделия (ТУ и пр.).

Виды технологичности определяются признаками, характеризующие область проявления свойств технологичности изделия. Различают производственную и эксплуатационную виды технологичности конструкции. Производственная технологичность конструкции изделия обеспечивается за счет сокращения затрат средств и времени на конструкторскую подготовку производства (КПП); технологическую подготовку производства (ТПП); и процессы изготовления.

Эксплуатационная технологичность конструкции изделия выражена в сокращении затрат средств и времени на техническое обслуживание и ремонт изделия.

Основные факторы, на базе которых, формируются требования к технологичности конструкции изделия, характеризуются конструктивно-технологическими признаками изделия, объемом выпуска и типом производства.

Вид изделия определяет главные конструктивно - технологические признаки, обуславливающие характерные требования к технологичности конструкции.

Объем выпуска и тип производства являются главными факторами, характеризующими требования к технологичности конструкции изделия, обусловленные технологической оснащенностью производства.

Производство принято делить на единичный (в том числе опытное производство - этап проектирования изделия); серийный и массовый типы производства.

Виды изделий и принадлежность к классификационной группе устанавливаются по [1, 6].

Вид оценки - фактор, характеризующий метод сравнения вариантов конструкции и помогает обосновать выбор оптимального варианта конструкции. Оценка технологичности конструкции изделия может быть двух видов: количественная и качественная.

Виды технологичности, виды оценки и главные факторы, определяющие технологичность конструкции изделия, представлены на рис. 1.

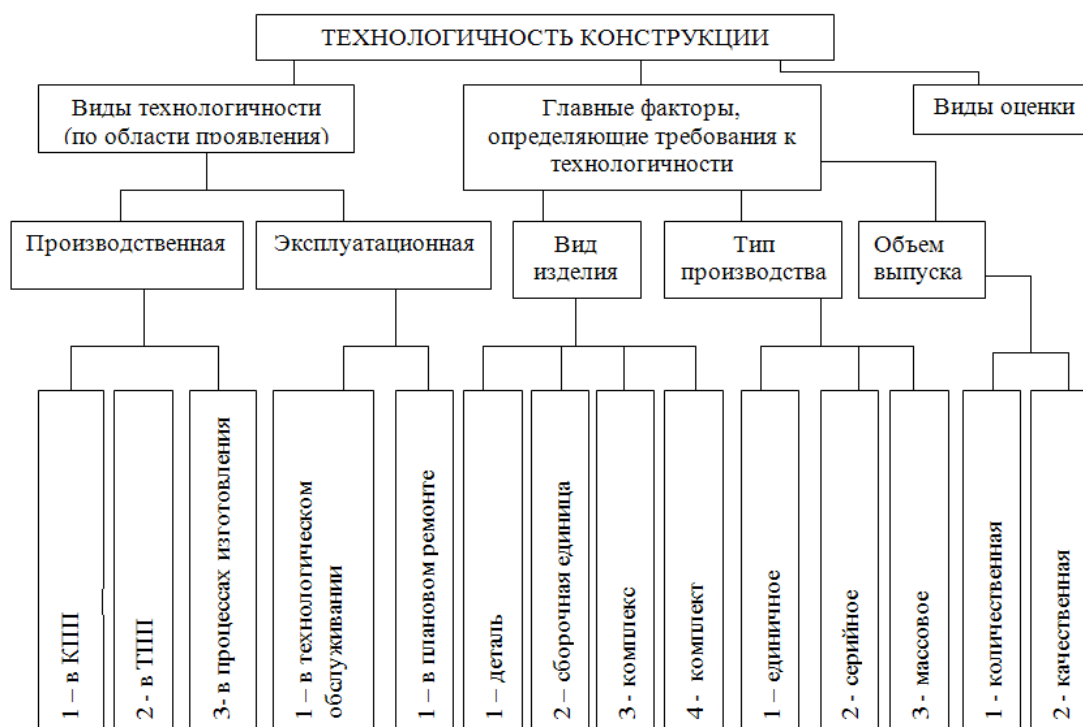


Рис. 1. Технологичность конструкции

При рассмотрении схемы следует учитывать, что технологичность заготовки в общем случае рассматривается в совокупности с конструкцией детали. Последовательность анализа конструкции изделия при выборе показателей технологичности представлена на рис. 2.

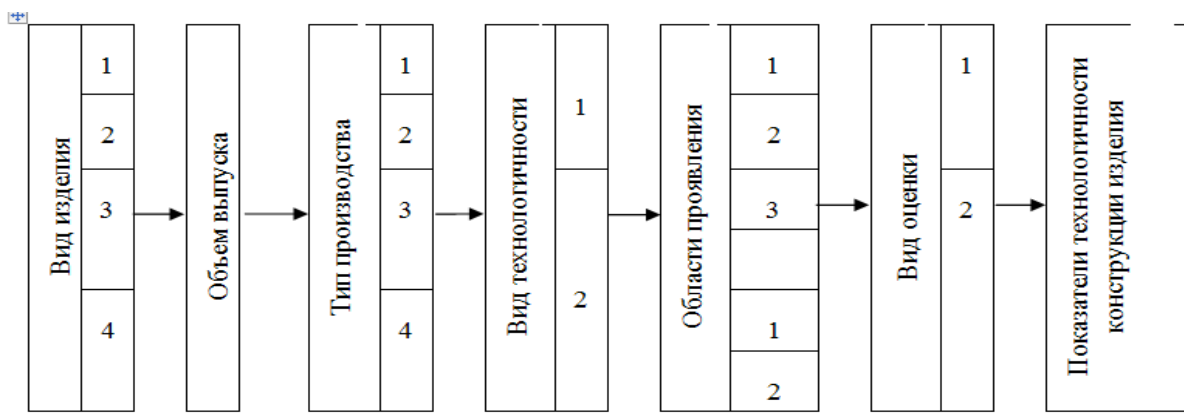


Рис. 2. Последовательность анализа конструкции при выборе показателей технологичности

Примечание.

Нумерация соответствует схеме, приведенной на рис. 1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 2.101—68 Виды изделий.
2. ГОСТ 14.201—83 Обеспечение технологичности конструкции изделия.
3. ГОСТ 14.205—83 Технологичность конструкции изделия.
4. Яновский Г.А. Методика отработки конструкций на технологичность и оценки уровня технологичности изделий машиностроения и приборостроения. - М., 1973.
5. Технологичность авиационных конструкций, пути повышения. Часть 1: Учебное пособие / И.М. Колганов, П.В. Дубровский, А. Н. Архипов. - Ульяновск: УлГТУ, 2003. - 48 с.
6. Бурбаев А.М. Оработка технологичности конструкций оптических приборов. Учебное пособие. - СПб: СПбГУИТМО, 2004. – 95 с.

© М.М. Кузнецов, Н.К. Соснова, А.А. Марач, 2012

ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ НЕПРОЗРАЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

Максим Михайлович Кузнецов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры технологии оптического производства, тел. +7(383) 344-40-58, e-mail a9214439@yandex.ru

Александр Николаевич Соснов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, кандидат технических наук, профессор кафедры технологии оптического производства, 10, тел. +7(383) 344-40-58, e-mail kaftop@ssga.ru

Наталья Кирилловна Соснова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, кандидат технических наук, профессор кафедры технологии оптического производства 10, тел. +7(383) 344-40-58, e-mail kaftop@ssga.ru

В статье рассказывается о способе повышения контраста и информативности изображений непрозрачных объектов на примере использования стандартных образцов шероховатости поверхности. Приводится сравнительный анализ предложенного способа со способом исследований непрозрачных объектов, преимущественно металлических, с помощью двойного микроскопа Линника. Предлагаемый в работе метод псевдоцветового кодирования изображений основан на том, что большая часть любой информации, в том числе результаты микроскопических исследований, оценивается визуально, а контрастная чувствительность глаза к изменениям цвета на два порядка превышает чувствительность глаза к изменениям интенсивности. Практические результаты, полученные в процессе исследований, могут быть интересны специалистам, занимающимся исследованиями в области контроля геометрических характеристик поверхностей.

Ключевые слова: шероховатость, псевдоцветовое кодирование.

OPAQUE OBJECTS INFORMATION CAPABILITY IMPROVEMENT

Maxim M. Kuznetsov

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383) 344-40-58, e-mail: a9214439@yandex.ru

Alexander N. Sosnov

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383) 344-40-58, e-mail: kaftop@ssga.ru

Natalya K. Sosnova

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383) 344-40-58, e-mail: kaftop@ssga.ru

The methods for opaque objects contrast and information capability improvement are described by the example of rough surfaces standard samples application. Comparative analysis of the offered technique with that for opaque objects (mostly metal) research by means of Linnik (double) microscope is presented. The image pseudocolour coding method, offered for the work, is based on the fact that major part of any information, including microscopic research, is estimated visually, while the eye contrast sensitivity to the colour changes is by a factor of 10^2 greater than that to the intensity changes. Practical results, received in the process of research, may be of interest to the specialists, dealing with the inspection of geometric surface characteristics.

Key words: roughness, pseudocolour coding

В соответствии с [1] требования к шероховатости поверхности должны устанавливаться, исходя из функционального назначения поверхности для обеспечения заданного качества изделий. Если в этом нет необходимости, то требования к шероховатости поверхности не устанавливаются и шероховатость этой поверхности контролироваться не должна.

Предлагаемый в работе [2] метод псевдоцветового кодирования изображений основан на том, что большая часть любой информации, в том числе результаты микроскопических исследований, оценивается визуально, а контрастная чувствительность глаза к изменениям цвета на два порядка превышает чувствительность глаза к изменениям интенсивности.

Используя в качестве осветителей светодиоды нами была собрана установка, оптическая схема которой представлена на рис. 1, позволившая применить выше указанные принципы и для контроля непрозрачных материалов [3]. При этом практически установлено, что оптимальным является сочетание светодиодов «синего» и «красного» цветов.

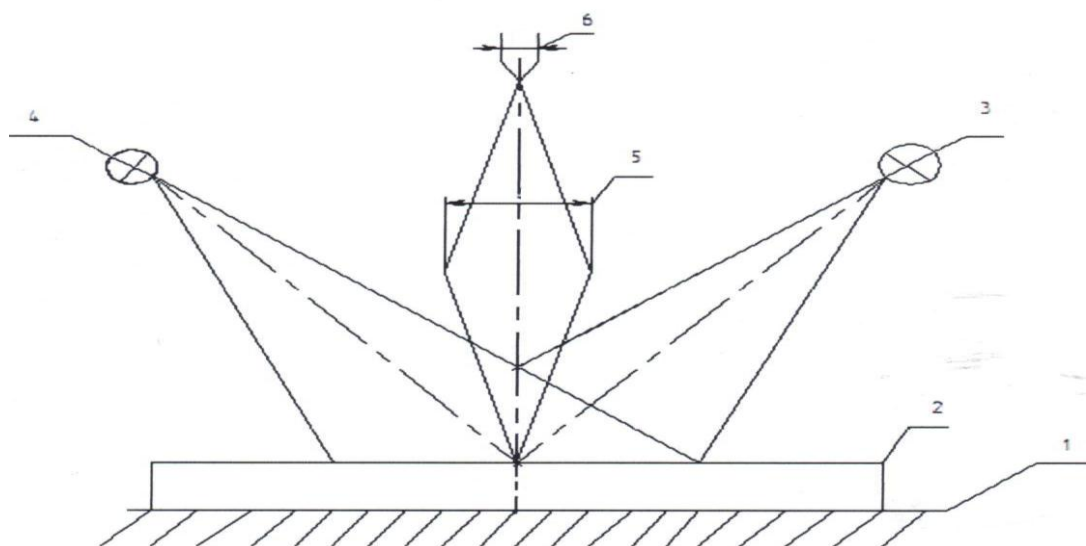
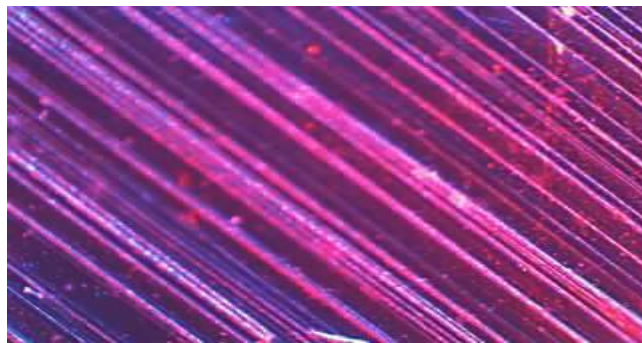
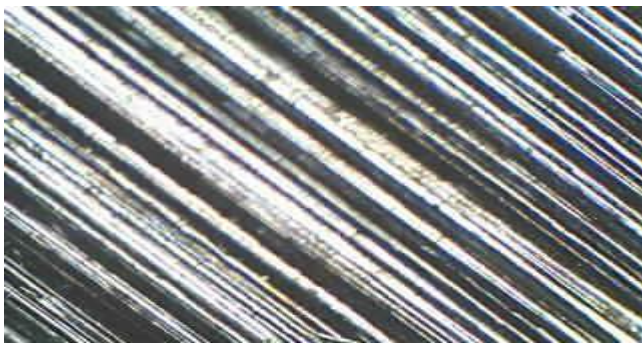
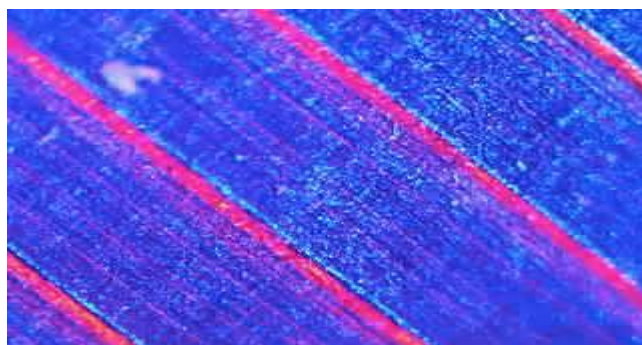
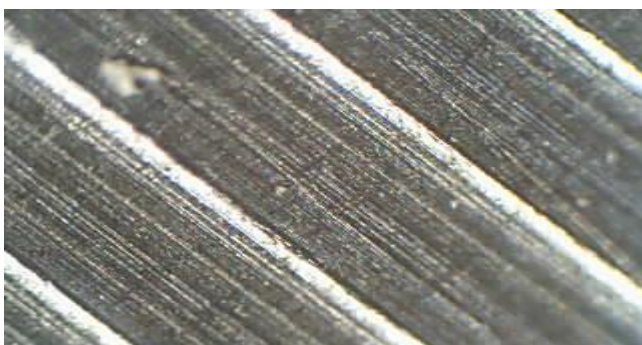


Рис. 1. Принципиальная схема установки

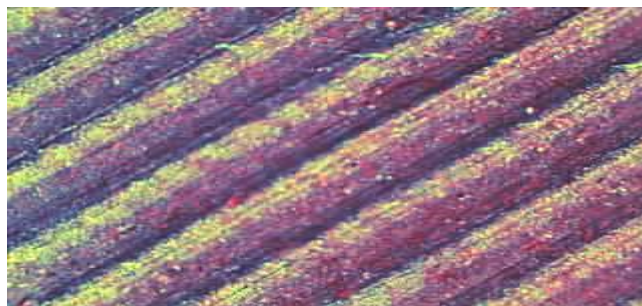
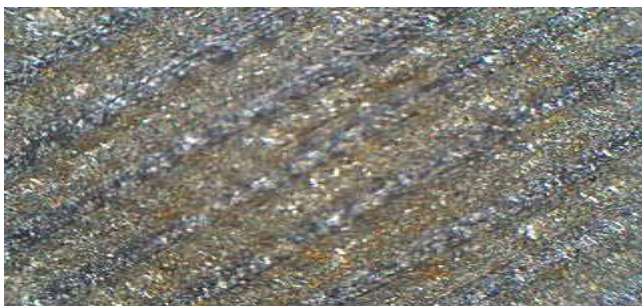
На рис. 2 представлены черно-белые и псевдоцветные изображения различных образцов шероховатости поверхности.



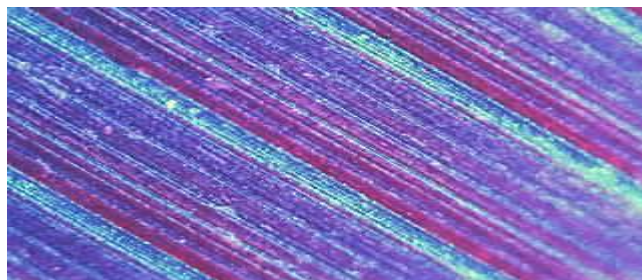
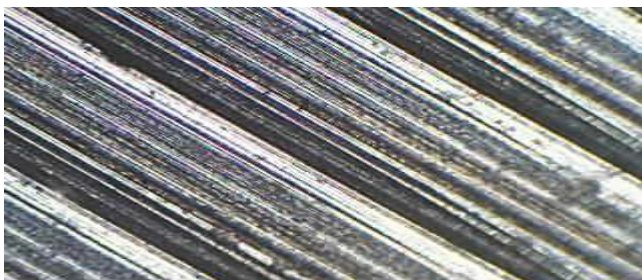
Образец шероховатости - Полирование $Ra = 0.63$



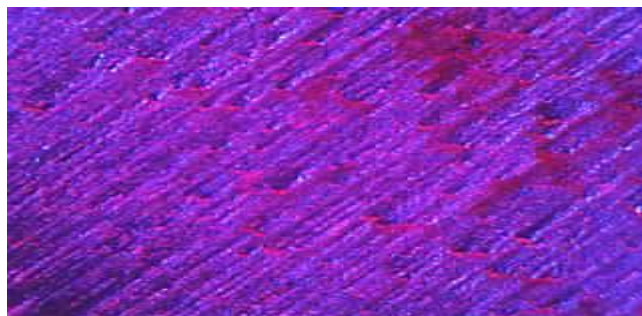
Образец шероховатости - Расточка $Ra = 5$



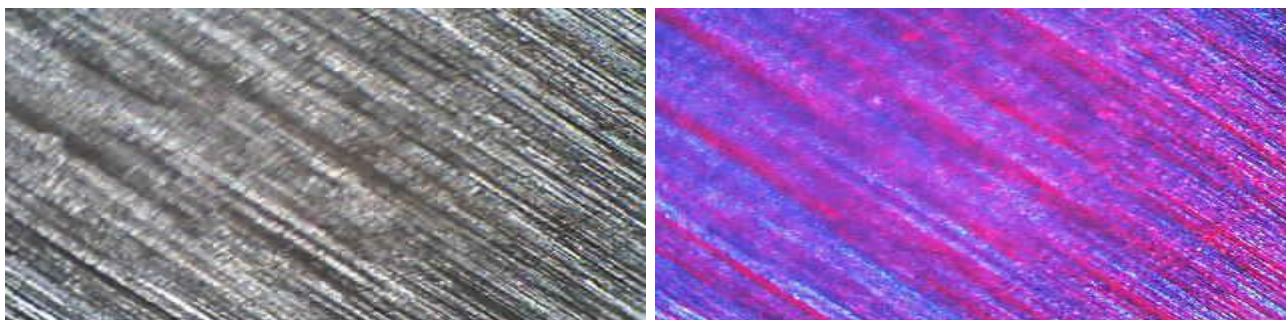
Образец шероховатости - Стругание $Ra = 2.5$



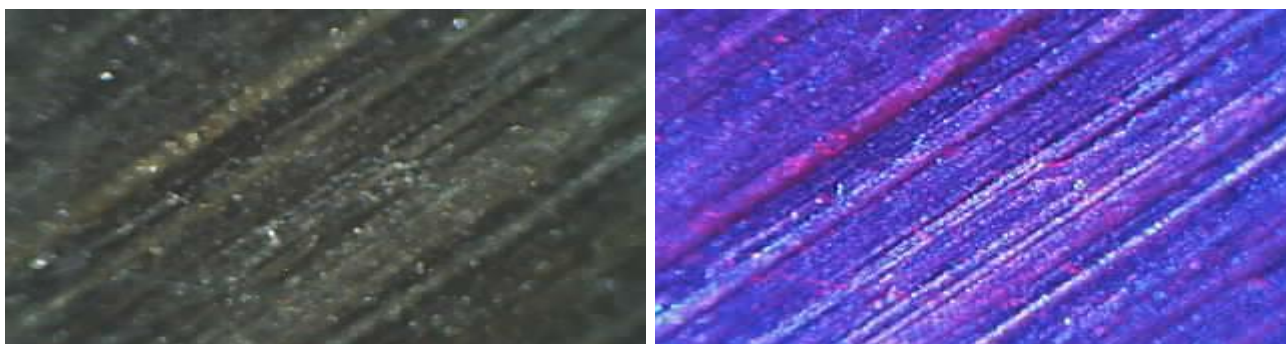
Образец шероховатости - Точение $Ra = 5$



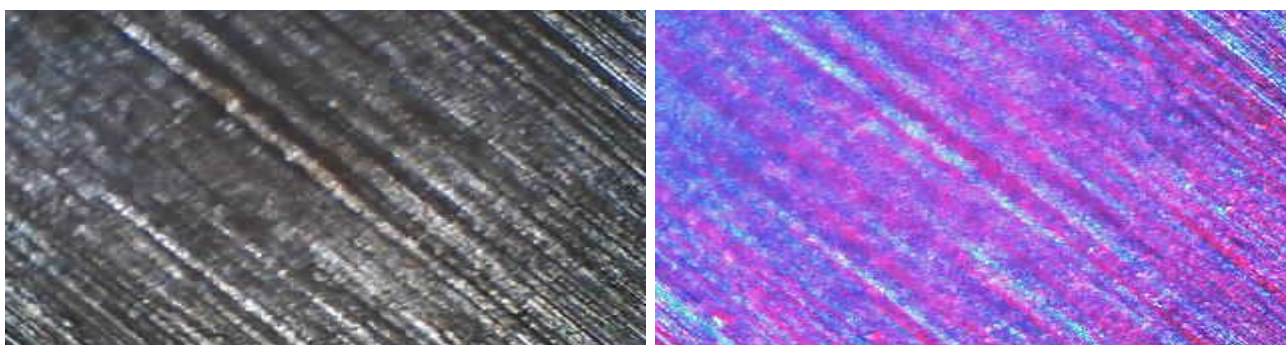
Образец шероховатости - Фрезерование цилиндрическое $Ra = 5$



Образец шероховатости - Шлифование круглое $Ra=1.25$



Образец шероховатости - Шлифование плоское $Ra=1.25$



Образец шероховатости - Шлифование внутреннее $Ra= 2.5$

Рис. 2. Черно-белые и псевдоцветные изображения различных образцов шероховатости поверхности

Вывод: предложенный в статье способ повышения контраста и информативности непрозрачных объектов (на примере образцов шероховатости) может быть использован на предприятиях и в организациях изготавливающих (эксплуатирующих) данные образцы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения.
2. Кузнецов, М.М. Повышение контраста и информативности изображений на основе спектральной и пространственно-угловой фильтрации излучения [Текст] / М.М. Кузнецов, О.К. Ушаков, В.М. Тымкул, М.Ф. Носков // Вестник СГГА. – 2010. – № 2(13). – С. 96–100.
3. Кузнецов М.М., Соснов А.Н., Соснова Н.К. Повышение контраста и информативности непрозрачных объектов// Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 1; URL: www.science-education.ru/101-5525

© М.М. Кузнецов, А.Н. Соснов, Н.К. Соснова, 2012

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ОТРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ СОВРЕМЕННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ

Максим Михайлович Кузнецов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»; 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10; доцент кафедры технологии оптического производства; тел. (383)-361-07-79; e-mail: kaf.top@ssga.ru

Александр Николаевич Соснов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»; 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10; кандидат технических наук, профессор кафедры технологии оптического производства; тел. (383)-361-07-79; e-mail: kaf.top@ssga.ru

Алена Алексеевна Марач

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»; 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10; инженер кафедры технологии оптического производства; тел. (383)-361-07-79; e-mail: kaf.top@ssga.ru

В статье рассмотрены основные положения и задачи при отработке конструкции изделия на технологичность.

Ключевые слова: отработка изделий на технологичность.

GENERAL PROVISIONS AND MAIN PROBLEMS OF MODERN INSTRUMENT- MAKING PRODUCTS WORKABILITY TRYOUT

Maxim M. Kuznetsov

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383) 344-40-58, e-mail: a9214439@yandex.ru

Aleksandr N. Sosnov

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383) 344-40-58, e-mail: kaftop@ssga.ru

Alyona A. Marach

Engineer, department of optical production technology, Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: (383)-361-07-79; e-mail: kaf.top@ssga.ru

Basic provisions and problems of products workability tryout are considered.

Key words: product workability.

Классификация показателей технологичности конструкции изделия производится по различным признакам. Иногда это приводит к разночтению и недопониманию при обмене опытом работы.

В общем случае классификацию показателей технологичности конструкций в отрасли приборостроения целесообразно проводить по следующим признакам (смотри схему 1) [1]:

- По объекту и области проявления;
- По количеству признаков технологичности;
- По области анализа;
- По способу выражения;
- По значимости;
- По системе оценки.

Второй возможный вид классификации приведен в [2, 3] и подразделяется на:

1. Показатели по объекту и области проявления делящиеся на:
 - Производственные;
 - Эксплуатационные.
2. Показатели по количеству признаков технологичности подразделяющиеся на:
 - Частные, характеризующие только один признак технологичности конструкции изделия;
 - Комплексные, характеризующие два или больше признаков – технологичности конструкции.
3. Показатели по области анализа делятся на:
 - Технические;
 - Техничко-экономические.
4. Показатели по способу выражения делятся на:
 - Абсолютные, численное значение которых характеризует один или несколько признаков технологичности конструкции изделия (например, масса изделия характеризует необходимость применения в процессе изготовления грузоподъемных средств и прочие условия производства, трудоемкость изготовления характеризует затраты времени и живого труда);
 - Относительные показатели, которые дают сравнительную характеристику технологичности конструкции проектируемого изделия. Одним из видов относительных показателей являются удельные показатели, в которых признак технологичности конструкции выражается по отношению к главному параметру изделия.
5. Показатели по значимости делятся на:
 - Основные;
 - Дополнительные.

Принадлежность показателя к основным показателям или дополнительным устанавливается в соответствии с главными определяющими факторами конструкции изделия и условий производства и эксплуатации. Практика отработки конструкции изделия на технологичность установила показатели, которые наиболее часто определяют основными (трудоемкость, уровень

технологичности конструкции по трудоемкости, технологическая себестоимость, уровень технологичности по себестоимости).

6. Показатели по системе количественной оценки делятся на базовые и на разрабатываемой конструкции, включающие «уровень технологичности».

Многие показатели технологичности, как и факторы, от которых они зависят, взаимосвязаны. Поэтому технологичность конструкции изделия следует рассматривать, как правило, комплексно. Состав показателей технологичности конструкции для каждого изделия устанавливается отраслевыми документами.

Выбор состава показателей технологичности конструкций производится применительно к конкретным изделиям.

Количественная оценка технологичности в целом или отдельно (по производственным или эксплуатационным признакам), предполагает необходимость разработки единой системы показателей, обязательной и удобной для анализа конструкции в процессе проектирования при выборе оптимального варианта.

Методика отработки конструкции на технологичность и оценка уровня технологичности конструкции изделий при помощи частных показателей (при необходимости их обобщают в комплексные) должны учитывать следующие факторы:

а) Определение частных или комплексных показателей технологичности осуществляют в принципиально различных условиях:

- До начала проектирования изделия - для определения базовых показателей технологичности, которые указывают в техническом задании;

- В процессе проектирования изделия - для сопоставления или обеспечения с базовыми показателями технологичности по составляющим предварительным признакам, выявленным на данной стадии проектирования;

- После окончания проектирования изделия – для того, чтобы определить соответствие достигнутых показателей технологичности конструкции изделия с заданными (базовыми) показателями;

- После технологической подготовки опытного производства, изготовления и доработки опытного образца (серии) изделия - это вызывает изменения в конструкции изделия и корректирование конструкторской документации, направляемой для серийного (массового) производства;

б) Состав показателей технологичности, методика и точность их определения изменяются по мере уточнения и полноты конструктивных решений.

Состав показателей и точность определения оценки возрастают на каждой стадии проектирования;

в) Конструктивные решения на стадиях технического предложения и эскизного проекта, оказывающие наибольшее значение на технологичность проектируемого изделия.

г) Частные показатели технологичности конструкции изделия имеют различную значимость (экономическую эффективность) для различных видов изделий, условий и масштабов производства.

д) Многие виды изделий представляют сложную конструкцию с большим количеством составных частей. Оценка (расчет показателей) технологичности составных частей таких изделий может потребовать больших затрат труда и времени. В процессе проектирования это повышает оперативность выводов при сравнительной оценке вариантов конструкции.



Рис. 1. Классификация показателей технологичности конструкции изделия

Поэтому номенклатура показателей технологичности и методы определения их численного значения имеют решающее значение для сокращения времени проектирования технологичных конструкций изделий.

Для сокращения объема работ и времени на оценку технологичности конструкций сборочных единиц составные части классифицируют по конструктивно-технологическим признакам, выделяя от каждой классификационной группы типового представителя. Показатели технологичности детали-представителя по определенной системе переносят с необходимой степенью точности на группы однотипных конструкций. Принципы классификации составных частей изделий могут быть полностью заимствованы у принятой классификации для разработки типовых технологических процессов.

При определении показателей технологичности по типовым представителям возможно уточнение по данным накопленного опыта и использования расчетов после окончания проектирования и составления технологического процесса, содержащего сведения о трудоемкости изготовления, техническом оснащении, типизации технологических процессов и прочих.

Вычисление показателей технологичности конструкции изделия по типовым представителям с помощью корреляционного анализа и корректирующих коэффициентов удобно для применения современной вычислительной техники.

Методы количественной оценки технологичности конструкции изделия выдвигают определенные требования к способам выражения показателей технологичности [4, 5, 6].

Пределы всех относительных частных показателей должны быть одинаковыми.

Наиболее удобно принять численные значения относительных (в том числе удельных) частных показателей технологичности в пределах

$$0 < K \leq 1.$$

В этом случае численное значение показателя может быть выражено в процентах к пределу наилучшего конструктивного решения, удовлетворяющего требованиям технологичности конструкции на 100%.

Например, если относительный показатель технологичности $K_i = a/b = 0,85$, то требование «идеальной» технологичности конструкции выполнено на 85%.

Если a — масса изделия, а b — масса материала, затраченного на изготовление, то отходы составляют 15%.

Численные значения относительных частных показателей технологичности определяются по формулам, структура которых обеспечивает установленные пределы коэффициентов.

Расчетные формулы частных относительных показателей для обеспечения условий могут иметь следующий вид:

а) $K = A/B$ при $A < B$,

где A — характеризующий фактор; B — база для сравнения.

Такое выражение имеют большинство относительных частных показателей технологичности конструкции изделия (коэффициент унификации изделий, коэффициент унификации сборочных единиц, коэффициент стандартизации изделий, удельная материалоемкость изделия, коэффициент применяемости материала и другие);

б) $K = 1 - A/B$; при $A < B$.

Такая расчетная формула относительного показателя технологичности удобна в случаях, когда A или B представляют алгебраическую сумму и необходимо обеспечить соответствие увеличения показателя улучшению технологичности;

в) $K = B/A$; $K = 1/A$ при $A > B$ или $A \geq 1$ при $B = 1$,

когда увеличению значения характеризующего фактора A соответствует уменьшение технологичности конструкции изделия (обратная зависимость). Примером может быть частный показатель шероховатости поверхности, характеризующим фактором которого является усредненный класс чистоты обработки изделия;

г) $K = 1 - 1/A$, при $A > 1$

и когда увеличению значения характеризующего фактора A соответствует понижение технологичности конструкции изделия.

Примером может быть частный показатель точности обработки изделия, характеризующим фактором которого является усредненный класс точности обработки изделия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 14.201-83. ЕСТПП. Общие правила обеспечения технологичности конструкции изделия.
2. ГОСТ 14.203-73. ЕСТПП. Правила выбора показателей технологичности конструкции сборочных единиц.
3. ГОСТ 14.204-73. ЕСТПП. Правила выбора показателей технологичности конструкций деталей.
4. Бурбаев А.М. Отработка технологичности конструкций оптических приборов. Учебное пособие. - СПб: СПбГУИТМО, 2004 - 95 с.
5. Голуб А.И. Проблемы обеспечения технологичности конструкций в машиностроении // Стандарты и качество, 1980, № 9.
6. Яновский Г.А. Методика отработки конструкций на технологичность и оценки уровня технологичности изделий машиностроения и приборостроения. - М., 1973.

© М.М., Кузнецов, А.Н. Соснов, А.А. Марач, 2012

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Татьяна Вячеславовна Ларина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»; 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры технологии оптического производства, телефон +7(383)344-40-58, факс +7(383)344-40-58, e-mail: n_rah@ngs.ru, e-mail: larina_t_v@mail.ru

Бахтиержон Нейматович Рахимов

Ташкентский университет информационных технологий, Узбекистан, 700084, Ташкент, ул. Амир Тимура, 108, аспирант кафедры устройств и систем радиосвязи, тел. (+9989) 7-461-88-13; e-mail: brah@mail.ru

Сезгир Хабибуллаевич Шамирзаев

Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз, Узбекистан, 100084, Ташкент, ул. Мавлянова, 2 б, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией полупроводниковых приборов, ФТИ АН РУз; тел. (+99871) 1354032; e-mail: shamir@uzsci.net

В статье рассмотрен оптоэлектронный неразрушающий метод контроля усталости металлических конструкций. Также предлагается оптоэлектронная система, которая состоит из датчика и электронного блока. Представляется один из вариантов выполнения датчика, изготовленный в виде полутрубчатой основы или полого полуцилиндра, в которую установлены три пары Y-образных и три обычных подводящих и шесть отводящих оптоволокон.

Ключевые слова: источники и приемники оптического излучения, оптоволокну, оптоэлектронная система, зернистость, шероховатость поверхности, дефектность, цветность.

OPTOELECTRONIC NONDESTRUCTIVE TECHNIQUE FOR METAL STRUCTURES FATIGUE CONTROL

Tatyana V. Larina

Assoc.Prof., department of optical production technology, Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383)344-40-58, fax: +7(383) 344-40-58, e-mail: larina_t_v@mail.ru

Bakhtierzhon N. Rakhimov

A post-graduate student, department of radio equipment and systems, University of Information Technologies, 108 Amir Timur, 700084 Tashkent, Uzbekistan, phone: (+9989) 7 461-88-13; e-mail: brah@mail.ru

Sezgir Kh. Shamirzayev

Ph.D., head of the laboratory, Applied-physics institute «Physics of the Sun», Uzbekistan academy of sciences, 26 Mavlyanova st., 100084, Tashkent, Uzbekistan, phone: (+99871) 135-40-32; e-mail: shamir@uzsci.net

Optoelectronic nondestructive technique for metal structures fatigue control is considered. The optoelectronic system, comprising a detector and an electronic part, is offered. One of the detector versions is presented as a semitubular base or a hollow semicylinder with three pairs of V-form-, three ordinary inlet- and six outlet optical fibres placed in it.

Key words: optical emission sources and detectors, optical fibre, optoelectronic system, granularity, surface, roughness, imperfection, chromaticity.

Контроль усталости металлических поверхностей – это одна из самых трудоемких технологических операций в машиностроении, самолетостроении и т. п., 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].

Нами предлагается оптоэлектронный неразрушающий метод контроля усталости металлических конструкций, который представляется перспективным в отношении простоты, удобства, технологичности и быстроты.

К настоящему времени разработан ряд оптоэлектронных приборов для неразрушающего контроля различных веществ и материалов [2-3].

В данной работе предлагается оптоэлектронная система для контроля усталости металлических конструкций (рис. 1).

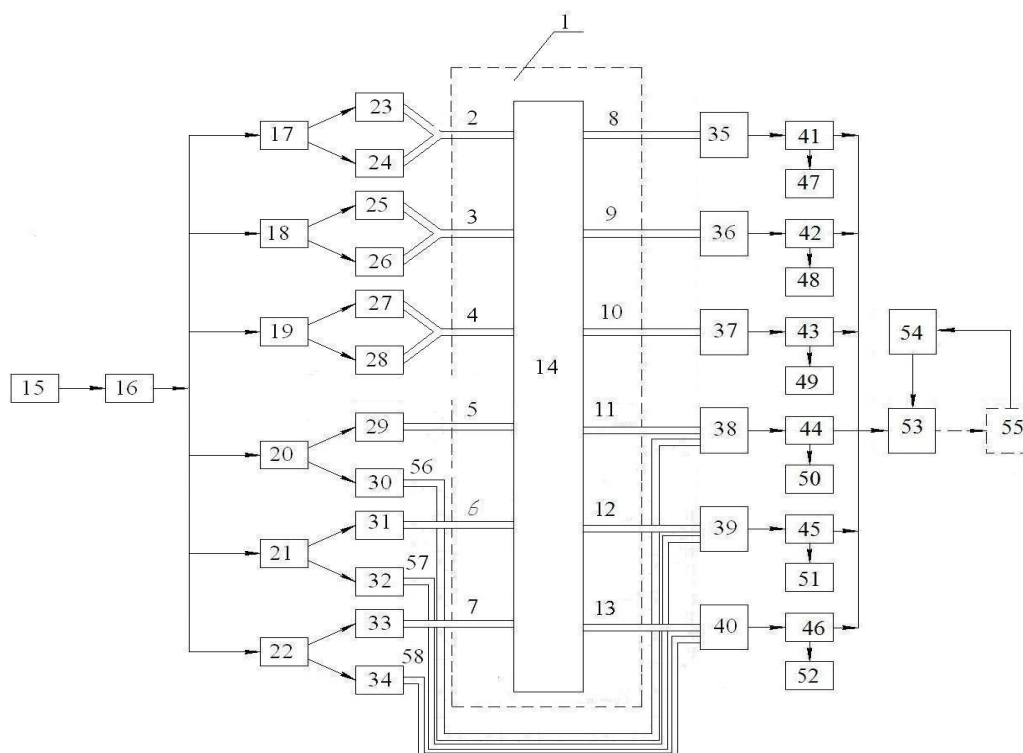


Рис. 1. Структурная схема оптоэлектронной системы для контроля усталости металлических конструкций

Оптоэлектронная система сконфигурирована следующим образом, она включает в себя разветвленную структуру, содержащую шесть самостоятельных схожих ветвей (цепочек). Каждая цепочка отвечает за контроль своего параметра металлической конструкции, например, первая, вторая и третья - за контроль цветности, четвертая - за шероховатость поверхности, пятая - за зернистость и шестая - за дефектность.

Датчик выполнен в виде полутрубчатой основы или полого полуцилиндра 1, в которую установлены три пары Y - образных 2 - 4 и три обычных 5 - 7 подводящих оптоволокон, шесть отводящих 8 - 13 оптоволокон, а три опорных оптоволокон 56 - 58 входят в состав электронного блока (рис. 2).

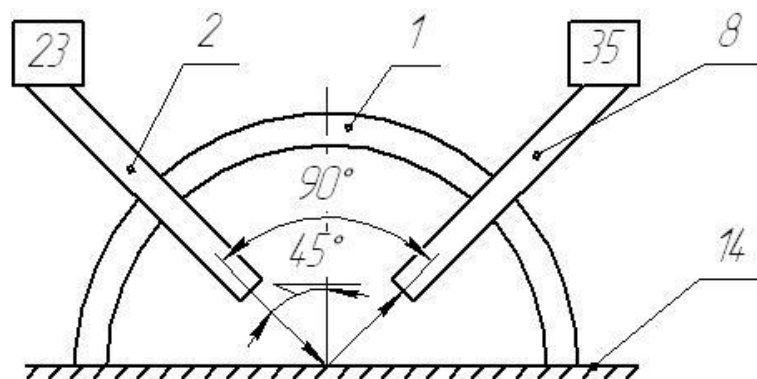


Рис. 2. Вариант выполнения датчика

Электронный блок включает в себя задающий генератор 15, коммутатор 16, шесть триггеров 17 - 22, шесть выходов которых соединены с шестью измерительными светоизлучающими диодами (СИД) 23, 25, 27, 29, 31, 33 вторые шесть выходов - с компенсационными СИД 24, 26, 28, 30, 32, 34. Все измерительные СИД соединены подводящими оптоволоконными 2 - 7 с контролируемым объектом (КО) 14, а компенсационные СИД соединены иначе. Например, СИД 24, 26 и 28 соединены через КО с соответствующими приемниками оптического излучения (ПОИ), а компенсационные СИД 30, 32 и 34 соединены с соответствующими ПОИ 38, 39 и 40 оптическими опорными волокнами 56, 57 и 58 минуя КО 14. Выходы каждого из шести ПОИ 35 - 40 подсоединены к входу соответствующего блока сравнения 41 - 46, выход каждого из которых соединен с соответствующим измерительным прибором (ИП) 47 - 52. Затем электронный блок включает в себя блок обработки оптического сигнала (БОФС) 53, ЗУ 54 и измерительную систему, например, ЭВМ - 55.

Устройство работает следующим образом. ЗГ 15 вырабатывает прямоугольные импульсы, которые подаются на вход коммутатора 16. Разделенные импульсы далее подаются на вход шести идентичных триггеров 17-22, шесть выходов которых соединены с шестью измерительными СИД 23, 25, 27, 29, 31, 33, вторые три выхода - с компенсационными СИД 24, 26, 28, 30, 32, 34, импульсы от триггеров поступают на соответствующие светодиоды.

КО (поверхность) 14 заключен в полусферу 1, по подводящим Y - образным 2 - 4 и трем традиционным 5 – 7 оптическим волокнами облучается двумя световыми потоками (измерительным и компенсационным).

Оптоволокна заключены в кольцевой кожух из мягкой резины для необходимой ориентации датчика и светоизоляции оптического канала и расположены они под углом, например 30° , относительно друг друга и симметрично относительно нормали к контролируемой поверхности в точке отражения.

При контроле цветности оптическое излучение отражается от контролируемой поверхности 14 и отводящими оптическими волокнами 8 - 10 подается на приемники оптического излучения 35 - 37, которые преобразуют оптические сигналы в электрические. Данные приемники оптического излучения, работают на длинах волн $\lambda_1 = 680$ нм $\lambda_2 = 560$ нм $\lambda_3 = 450$ нм.

Далее сигналы попадают на соответствующие блоки сравнения 41 - 43, где берется отношение двух сигналов (измерительного и компенсационного) и затем измерительной системой 47 - 49 определяются оттенки трех цветов. Процесс измерения цветности на данном этапе можно закончить.

Следующие параметры контроля, такие как шероховатость, баллы зернистости и наличие дефектов (трещин, рыхлости) измеряются иначе.

Например, сигнал в виде светового потока Φ_{04} от измерительного СИД 29 через подводящее оптоволокно 5 попадает на КО 14, и отражаясь от нее поступает за счет отводящего оптоволокна 11 на ПОИ 38. Он отвечает за шероховатость и работает на длинах волн $\lambda_4 = 860$ нм (39 – отвечает за зернистость и работает на длинах волн $\lambda_5 = 1350$ нм, 40 – отвечает за дефектность и работает на длинах волн $\lambda_6 = 2800$ нм).

На этот же ПОИ 38 подается второй сигнал от опорного канала 30 (компенсационного СИД) через оптоволокно 56, минуя КО 14, и затем оба сигнала сравниваются между собой в блоке сравнения 44. Контроль двух других параметров выполняется аналогичным образом.

Затем шесть сигналов могут поступать на БОФС 53, где сопоставляются с любым из ряда образцовых, хранящихся в запоминающем устройстве 54. Далее шесть сигналов или их отношение подаются на измерительную систему или в ЭВМ 55. При необходимости сигнал с выхода БОФС можно подать в систему автоматического контроля.

Физический механизм системы поясняется следующим образом. Например, для определения шероховатости через СИД 29 подается измерительный сигнал в виде светового потока Φ_{04} , а отраженный сигнал Φ_4 при этом равен:

$$\Phi_4 = \Phi_{04} \cdot e^{-k}, \quad (5)$$

где e – основание натурального логарифма;

k – коэффициент поглощения и рассеивания, зависящий от шероховатости.

Второй компенсационный поток Φ_{05} от СИД 30 попадает через опорное оптоволокно 56 на ПОИ 38, при этом сигнал Φ_{05} будет иметь вид:

$$\Phi_5 = \Phi_{05}. \quad (6)$$

Если начальные потоки идентичны, т.е. $\Phi_{04} \approx \Phi_{05}$, то отношение сигналов имеет вид:

$$\frac{\Phi_5}{\Phi_4} = \frac{\Phi_{05}}{\Phi_{04}} \cdot e^k. \quad (7)$$

Сигнал будет прямо пропорционален:

$$\frac{\Phi_5}{\Phi_4} = e^k. \quad (8)$$

Основной измеряемой оптической характеристикой при данном методе выступает интенсивность отраженного светового потока от поверхности КО, которая сравнивается с величиной аналогичной характеристики эталона.

На основе данного метода разработана оптоэлектронная система для контроля усталости металлических конструкций. Прибор имеет высокие технические характеристики, что делает возможным его применение в исследовательских целях: напряжение питания, В – 220; частота, Гц – 50; потребляемая мощность, Вт, не более 5; длина волны источников излучений, λ в нм – 2 800, 1 350, 860, 680, 560, 450; предел измерения цвета (ЦНТ) – 0,010Б; чувствительность (ЦНТ) – 0,01; шероховатость, Ra мкм – 80..0,63; зернистость, номер зерна (баллы) – от минус 3 до 14; дефектность (усадочная рыхлость, газовые пузыри, пустоты и трещины) – да или нет; габариты прибора, мм – 400 × 100 × 200; масса, кг, не более – 3,5.

Предлагаемое устройство повышает точность измерения, чувствительность, а также упрощает конструкцию анализатора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клюев, В. В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий / В.В. Клюев. – М.: Машиностроение, 1986. – 382 с.
2. Пат. № 2428728 Российская Федерация, МПК 51G01J 3/46. Анализатор цвета поверхности твердых материалов / Рахимов Б.Н., Ушаков О.К., Кутенкова Е.Ю., Ларина Т.В., заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия». – № 2009147534/28; заявл. 21.12.2009; опубл. 20.09.2011. Бюл. № 26. – 7 с.: 3 ил.
3. Ларина, Т. В. Исследование оптронов открытого канала для контроля качественных параметров металлических поверхностей // ГЕО-Сибирь-2011: сб. материалов VII Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2011», 19 - 29 апреля 2011 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2011. – Т. 5, ч. 1. – С. 120 – 125.

© Б.Н. Рахимов, Т.В. Ларина, С. Х. Шамирзаев, 2012

КОРРЕКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛЕВОГО КОМПЕНСАТОРА АСТРООБЪЕКТИВА В СУБМИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Диана Георгиевна Макарова

Сибирская государственная геодезическая академия (630108, Новосибирск, Плеханового, 10), аспирант кафедры Наносистем и оптоэлектроники, тел. (383)-343-22-11, e-mail: diana_ssga@mail.ru

Виктор Сергеевич Ефремов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Новосибирск, Плеханового, 10, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (383)-343-22-11, e-mail: ews49@mail.ru

В статье рассмотрены коррекционные свойства полевого компенсатора астрономического объектива в субмиллиметровом диапазоне длин волн, выполненного из оптических материалов с разными значениями показателей преломления.

Ключевые слова: показатель преломления материала, полевой компенсатор, субмиллиметровый диапазон длин волн.

CORRECTIONAL PROPERTIES OF ASTRONOMICAL OBJECTIVE FIELD EQUALIZER IN SUBMILLIMETER WAVES LENGTH RANGE

Diana G. Makarova

Siberian State Academy of Geodesy (10 Plahotnogo, Novosibirsk 630108), post-graduate student of Nanosystems and optical engineering department, tel. (383)-343-22-11, e-mail: diana_ssga@mail.ru

Victor S. Efremov

Siberian State Academy of Geodesy (10 Plahotnogo, Novosibirsk 630108), Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Nanosystems and optical engineering department, tel. (383)-343-22-11, e-mail: ews49@mail.ru

The correctional properties of astronomical objective field equalizer in submillimeter range of waves lengths, produced from optical materials with different values of refraction parameters are considered.

Key words: a parameter of material refraction, field equaliser, submillimetric range of wavelength.

В последние годы происходит интенсивное освоение терагерцового (ТГц) диапазона спектра электромагнитного излучения (10^{11} – 10^{13} Гц), что соответствует диапазону длин волн от 3 до 0,03 мм. Частью диапазона является интервал длин волн от 1 до 0,1 мм, которые принято называть субмиллиметровыми.

Увеличение характеристик оптических систем (угла поля зрения, относительного отверстия) применением только отражающих поверхностей невозможно, какой бы сложности не была их форма. Требуется применение компенсаторов с преломляющими поверхностями.

Технологии формообразования преломляющих поверхностей оптических деталей в субмиллиметровом диапазоне спектра в зависимости от выбранного материала, также могут сильно отличаться. В визуальном диапазоне – шлифование и полирование, а в субмиллиметровом диапазоне чистовое – точение, шлифование, литье под давление и другие. Таким образом, выбор оптического материала повлечет за собой выбор технологии изготовления, что в итоге скажется на себестоимости оптических деталей.

В отличие от визуального диапазона спектра, в котором показатель преломления материалов изменяется в узком интервале значений от 1,43 до 2, в субмиллиметровом диапазоне показатель преломления материалов изменяется от 1,5 до 3,4.

Рассмотрим влияние показателя преломления материала на коррекционные возможности полевого компенсатора астрообъектива, построенного по схеме Кассегрена, Ричи-Кретьена, с линзовым полевым компенсатором. Для исследования выберем объектив из архива ППП Zemax [1]. Оптическая схема приведена на рис. 1.

Для примера выберем материалы с показателями преломления, лежащими на границах и в центре интервала возможных значений показателей преломления: кремний ($n_{\lambda=200\text{мкм}} = 3,4165$), кварц ($n_{\lambda=200\text{мкм}} = 2,117$) и полиэтилен ($n_{\lambda=200\text{мкм}} = 1,5137$) [2].

Заменим радиусы преломляющих поверхностей и оптический материал полевого менискового компенсатора, сохранив его оптическую силу и толщину по оси и выполнив условие ахроматизации по известной формуле:

$$r_2 = r_1 - \frac{d(n^2 - 1)}{n^2}.$$

Параметры компенсаторов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Конструктивные параметры компенсаторов

Материал компенсатора	Радиусы	Толщина по оси	$n_{\lambda=200\text{мкм}}$	Оптическая сила
Кремний	$r_1 = -121,80$	4	3,4165	-0,000112
	$r_2 = -125,46$			
Кварц плавленый	$r_1 = -115,00$	4	2,1170	-0,000112
	$r_2 = -118,11$			
Полиэтилен	$r_1 = -81,77$	4	1,5137	-0,000112
	$r_2 = -84,02$			

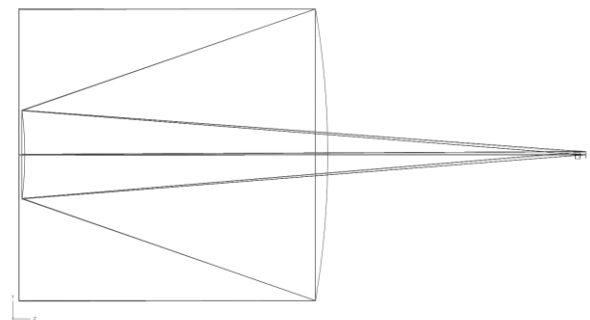
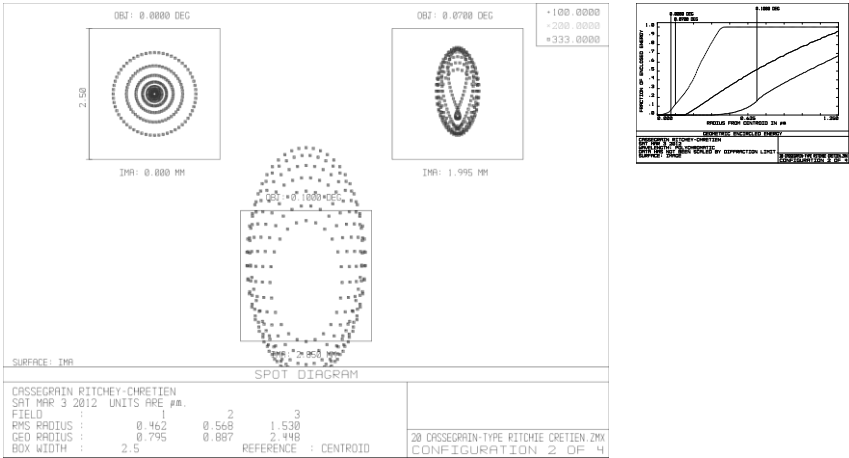


Рис. 1. Оптическая схема объектива

Астрономический объектив Кассегрена, Ричи-Кретьена с линзовым полевым компенсатором имеет: фокусное расстояние 1 620,3 мм, относительное отверстие 1 : 6,4, угол поля зрения 0,2°.

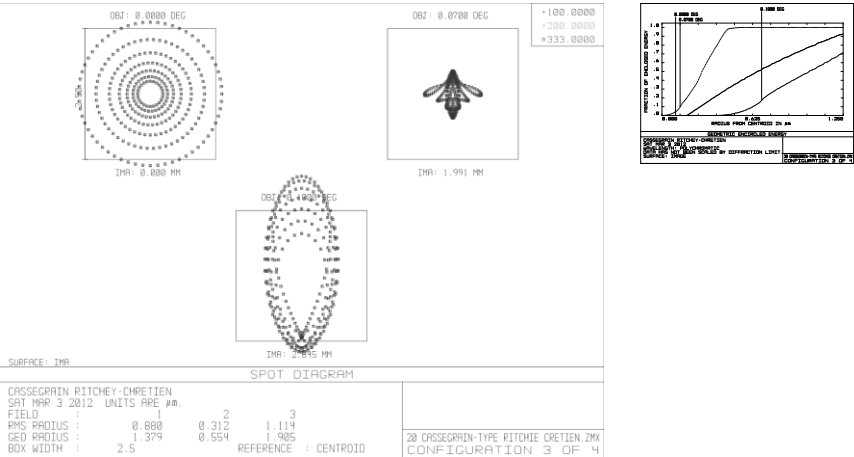
Результаты расчета объектива с компенсаторами из различных материалов приведены на рис. 2–4.



а б

а – точечная диаграмма распределения энергии в абберационном пятне;
б – график концентрации энергии в абберационном пятне

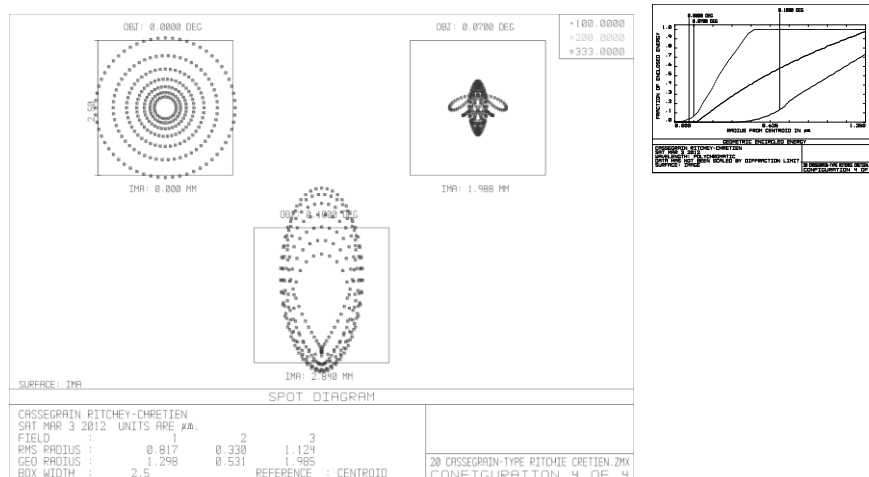
Рис. 2. Характеристики качества изображения объектива с полевым компенсатором из кремния



а б

а – точечная диаграмма распределения энергии в абберационном пятне;
б – график концентрации энергии в абберационном пятне

Рис. 3. Характеристики качества изображения объектива с полевым компенсатором из плавленого кварца



а

б

а – точечная диаграмма распределения энергии в абберационном пятне;

б – график концентрации энергии в абберационном пятне

Рис. 4. Характеристики качества изображения объектива с полевым компенсатором из полиэтилена.

Таблица 2. Абберационные коэффициенты Зейделя

Коэффициенты Зейделя по поверхностям							
№	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S _{1xp}	S _{2xp}
Зеркальная система							
1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
2	-0,055020	-0,012355	0,000128	-0,000128	0,000000	0,000000	0,000000
3	0,055019	0,012355	-0,000037	0,000328	-0,000003	0,000000	0,000000
Компенсатор из кремния							
4	-0,000283	-0,000050	-0,000009	-0,000236	-0,000043	0,000003	0,000001
5	0,000225	0,000040	0,000007	0,000229	0,000042	-0,000002	-0,000001
4-5	-0,000058	-0,000010	-0,000002	-0,000013	-0,000001	0,000001	0,000000
Σ	-0,000059	-0,000010	0,000089	0,000194	-0,000004	0,000000	0,000000
Компенсатор из кварца плавленного							
4	-0,000246	-0,000056	-0,000013	-0,000214	-0,000052	0,000004	0,000001
5	0,000168	0,000034	0,000007	0,000197	0,000041	-0,000003	-0,000001
4-5	-0,000078	-0,000022	-0,000006	-0,000017	-0,000011	0,000001	0,000000
Σ	-0,000079	-0,000023	0,000085	0,000183	-0,000014	0,000001	0,000000
Компенсатор из полиэтилена							
4	-0,000191	-0,000065	-0,000022	-0,000196	-0,000074	0,000001	0,000000
5	0,000111	0,000039	0,000013	0,000190	0,000071	-0,000001	-0,000000
4-5	-0,000080	-0,000026	-0,000009	-0,000006	-0,000003	0,000000	0,000000
Σ	-0,000081	-0,000026	0,000082	0,000193	-0,000006	0,000001	0,000000

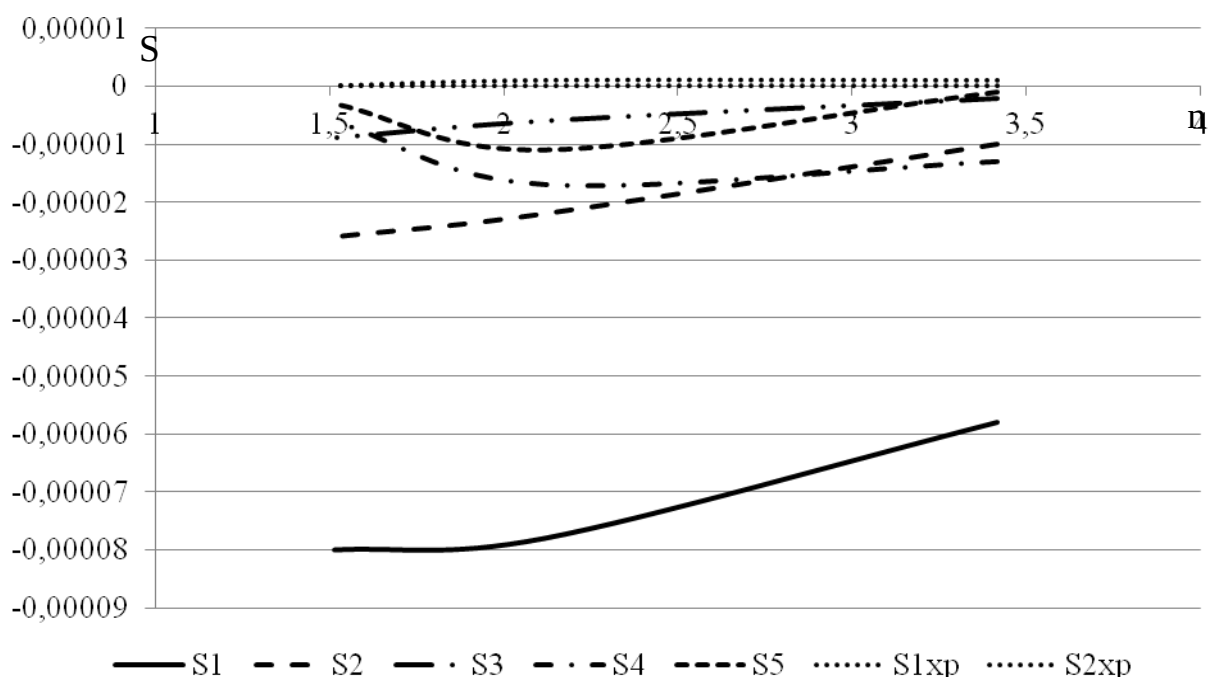


Рисунок 5 – Графики изменения коэффициентов Зейделя полевого компенсатора от величины показателя преломления материала

На основе полученных результатов можно сделать некоторые выводы:

- В субмиллиметровом диапазоне длин волн одинаковое качество изображения возможно получить с полевым компенсатором, выполненным из разных материалов с разными показателями преломления;
- Ахроматизация менискового компенсатора подтверждается практически нулевыми значениями $S1xp$ и $S2xp$;
- Большее значение показателя преломления полевого менискового компенсатора обеспечивает тот же корректирующий эффект комы и астигматизма при меньших значениях коэффициентов Зейделя $S2$ и $S3$;
- Выбор материала компенсатора, точность изготовления преломляющих поверхностей может повлечь выбор технологии формообразования поверхностей оптических деталей, применяемых в субмиллиметровом диапазоне спектра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция пользователя. [Электронный ресурс]:<[www.zemax.com /help/Manual.pdf](http://www.zemax.com/help/Manual.pdf)>
2. M. Bass, Handbook of Optics. The McGraw-Hill Companies, 1995. 1606 p.
3. E. D. Palik, Handbook of Optical Constants of Solids. Vol 1, Academic Press,

© Д.Г. Макарова, В.С. Ефремов, 2012

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СОВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Валерий Игоревич Наливайко

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Коптюга, 1, старший научный сотрудник, тел. (383)333-302-92, e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

Антон Николаевич Покровский

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Коптюга, 1, инженер-программист, тел. (383)333-30-92, e-mail: anton.pokrovsky@gmail.com

Марина Александровна Пономарева

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Коптюга, 1, инженер-программист, тел. (383)333-30-92, e-mail: maponoma@gmail.com

Олег Яковлевич Абель

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, инженер, тел. 8-913-742-88-46, e-mail: olegabel@gmail.com

Александр Николаевич Соснов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, заведующий кафедрой технологий оптического производства, тел. 8-913-903-72-29, e-mail: alegreat@yandex.ru

Представлены схемы микросканеров в качестве переключателей оптических каналов. В качестве основного элемента микросканера предложена параболическая дифракционная отражательная линза, полученная голографическим способом в тонких слоях халькогенидных материалов.

Ключевые слова: микросканер, халькогенидные материалы, парабола.

USE OF CHALKOGENIDE MATERIALS FOR DECISION OF MODERN OPTICAL TECHNOLOGY PROBLEMS

Valery I. Nalivaiko

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1 Koptug str., Novosibirsk, 630090, senior researcher, laboratory of information technology, tel. (383)333-30-92, e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

Anton N. Pokrovsky

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1 Koptug str., Novosibirsk, 630090, programming engineer, laboratory of information technology, tel. (383)333-30-92, e-mail: anton.pokrovsky@gmail.com

Marina A. Ponomareva

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1 Koptug str., Novosibirsk, 630090, programming engineer, laboratory of information technology, tel. (383)333-30-92, e-mail: maponoma@gmail.com

Oleg Ya. Abel

The Siberian state geodetic academy, 10 Plahotnogo, Novosibirsk, 630108, engineer, chair of technologies of optical production, tel. 8-913-742-88-46, e-mail: olegabel@gmail.com

Aleksandr N. Sosnov

The Siberian state geodetic academy, 10 Plahotnogo, Novosibirsk, 630108, managing chair of optical technologies, tel. (908)873-74-40, e-mail: alegreat@yandex.ru

Microscanner schemes as switches of optical channels are presented. As a basic element of microscanners the parabolic diffraction reflective lens received in the holographic way in thin layers of chalcogenide materials is suggested.

Key words: microscanner, chalcogenide materials, parabola.

Основу халькогенидных соединений составляют элементы VI группы периодической системы, а именно: S, Se и Te. Химические элементы в этих соединениях связываются друг с другом ковалентными связями, образуя кластеры размером в несколько ангстрем. Между собой кластеры удерживаются ван-дер-ваальсовыми силами. Разница между энергиями межмолекулярных взаимодействий внутри кластеров и между ними - порядка 10^2 или 10^3 раз, т.к. энергия ковалентных взаимодействий ~ 100 КДж/моль, а ван-дер-ваальсовых – $0.1 \sim 1$ КДж/моль. Этот класс материалов можно представить как условно аморфный, неоднородно упорядоченный, т.е. как некоторое промежуточное состояние вещества между аморфным и кристаллическим. Такое строение предоставляет множество возможностей по модификации материала, изменению его структуры, стехиометрии и/или состава с помощью диффузии других элементов, облучения электромагнитными волнами [1].

Халькогенидные материалы известны и ограниченно применялись десятки лет. Всплеск интереса к ним в настоящее время обусловлен развитием современных технологий в ИК диапазоне излучения, таких, например, как создание неохлаждаемых приемников для ИК области спектра и распространением использования ИК области в гражданских, коммерческих применениях.

Тонкие слои халькогенидных материалов существенно отличаются от объемных материалов более рыхлой структурой и более выраженной наноструктурированностью, что связано с условиями их получения. Наращивание толщины слоев во время напыления в вакууме происходит по “островковому” принципу, что приводит к образованию большей концентрации кластеров по сравнению с объемным стеклом. В результате поверхность слоев имеет игольчатую структуру с высотой пиков в несколько нанометров (рис. 1). Поэтому тонкие слои халькогенидных материалов, полученные напылением в вакууме, имеют динамический диапазон изменения оптических констант на порядок выше, чем объемные материалы. В частности, показатель преломления $n = 2,5$ на $\lambda = 0,63$ мкм слоев состава As_2S_3 изменяется на 10 % при экспонировании излучением до насыщения. Такие слои позволяют с помощью селективного травления в растворах или ионного травления в вакууме получать

рельефные структуры на их поверхности с очень высоким пространственным разрешением.

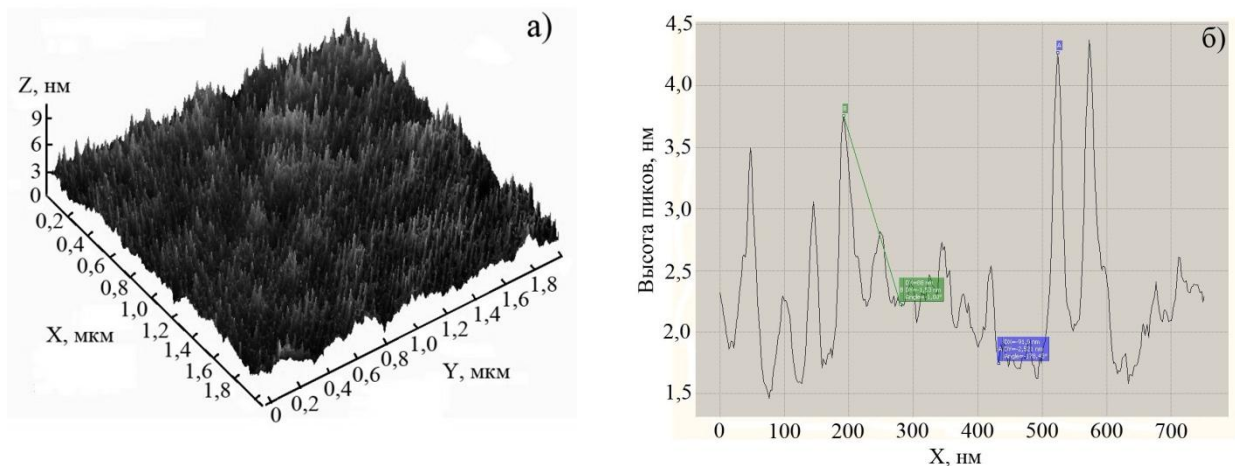


Рис. 1. Игольчатая структура поверхности слоя состава As_2S_3 на подложке из оксидного стекла, полученного термическим напылением в вакууме

В этой статье мы покажем преимущества использования технологий с применением халькогенидных слоев. Одной из распространенных областей применения являются оптические коммуникации. В качестве примера рассмотрим схемы переключателей оптоволоконных каналов.

Свет, выходящий из оптоволоконна 1, отражается от вогнутого зеркала 2, имеющего возможность линейно перемещаться на расстояние ΔL (рис. 2а). В зависимости от положения зеркала 2 отраженный свет будет фокусироваться в точках 3 или 4, отдаленных друг от друга на дистанцию, значительно превышающую расстояние ΔL , на которое мы можем перемещать отражатель.

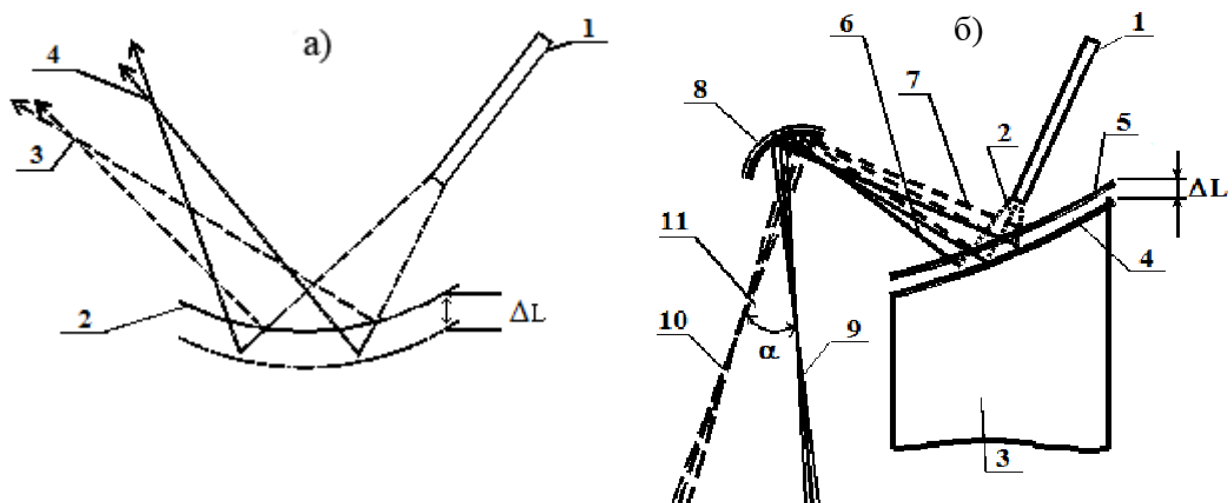


Рис. 2. Две схемы микросканеров для переключения оптоволоконных каналов:

В предложенном примере принципиально важными параметрами являются *скорость* перемещения отражателя, его *масса*, *форма* и *технологичность* изготовления.

Если требования к быстродействию должны быть определены в единицы микросекунд, то исполнительным устройством для предполагаемого перемещения могут служить пьезоактуаторы, скорости перемещения у которых зависят от частоты колебаний, так что любая закрепленная на них масса снизит их резонансную частоту и соответственно - скорость.

Что касается формы зеркала, то для компенсации астигматизма целесообразно отражать выходящий из волокна свет с помощью внеосевых парабол. Необходимость изготовления внеосевых параболических зеркал и закрепление таких отражателей на пьезоактуаторе представляется если и возможным, то дорогостоящим и не технологичным.

На практике целесообразно применять оптические схемы (рис. 2б), в которой разнесены функции фокусировки света на выходе оптоволокну 1, обладающего определенной угловой апертурой, и пространственного разделения световых потоков при различных линейных смещениях ΔL отклоняющего элемента 5. Для этого в оптическую схему может быть добавлено ещё одно зеркало 8. Можно также изготовить длиннофокусную линзу на торце волокна, используя халькогенидные слои в качестве фоторезиста. Халькогенидные слои в этом качестве обладают такими преимуществами по сравнению с полимерами, как высокие технологичность и долговечность. Технологичность халькогенидного материала в полной мере проявляется в случае формирования полутонкой линзы методом имплантации серебра (Ag). в халькогенидный слой с помощью его облучения со стороны противоположного конца волокна. Для реализации этого метода на выходной торец волокна напыляется тонкий халькогенидный слой, а сверху - пленка Ag. После индуцированной светом диффузии серебра в ХСП, не диффундированный остаток Ag удаляют в растворе HNO_3 . Такая полутонкая или градиентная тонкая линза должна быть длиннофокусной или коллимирующей, а отражающий элемент 5, сформированный по закону внеосевого параболоида для компенсации астигматизма, может иметь небольшой радиус кривизны, который будет определять чувствительность системы к угловому смещению оптического пучка.

Предлагаемое нами решение состоит в замене параболы из объемного стекла плоской дифракционной линзой. Для этого необходимо нанести на рабочую поверхность актуатора отражательную голографическую линзу из халькогенидного материала, например, состава As_2S_3 или As_2Se_3 и придать ей отражающие свойства напылением слоя алюминия (Al). Линза должна отражать определенную длину волны по закону внеосевой параболы. Масса нанесенных слоев пренебрежимо мала и не должна существенно влиять на скорость передвижения актуатора, что решает вопрос изменения резонансной частоты.

В настоящее время технология изготовления плоских дифракционных линз в халькогенидных слоях имеет достаточно широкие возможности. Халькогенидные слои позволяют получать дифракционные элементы с

максимумом интенсивности не только в первом, но и в более высоких порядках дифракции [2]. Способы получения дифракционной оптики могут быть как голографические, так и с помощью автоматизированных лазерных систем – лазерных фотопостроителей.

Исходя из условия необходимости получения короткофокусной линзы ($f = 10$ мм), нами был выбран голографический способ записи. Угол между точечными источниками лазерного излучения ($\lambda = 0,53$ мкм) составлял 60° . После экспонирования интерференционной картиной халькогенидного слоя проводилось селективное травление поверхностного рельефа. Время селективного травления выбиралось для получения максимума эффективности в первом порядке дифракции (рис. 3).

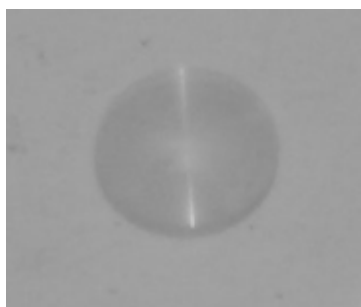


Рис. 3. Плоская внеосевая параболическая линза диаметром 5 мм в слое As_2S_3 толщиной 5 мкм

На рельефную поверхность наносился отражающий слой Al. В настоящее время проводятся измерения оптических параметров полученных дифракционных линз.

Выводы:

1. Представлены схемы оптических микросканеров, которые могут быть использованы в качестве переключателей оптоволоконных каналов.
2. Показана возможность применения халькогенидных слоев для получения плоских дифракционных внеосевых параболоидов.
3. Предложен способ изготовления плоских градиентных микролинз на торцах оптоволоконна на основе фотодиффузии Ag в халькогенидные слои.

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, July 10 – 14.- 2006. - p. 26.
2. Наливайко В.И., Покровский А.Н. Получение глубокого фазового профиля в аморфных слоях халькогенидных стеклообразных полупроводников // Сб. материалов VII Международного научного конгресса «Гео-Сибирь-2011». Том 5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии. Часть 2. СГГА. Новосибирск. - 2011. - С. 83–91.

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ФАБРИ-ПЕРО

Дмитрий Михайлович Никулин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, инженер кафедры физики, тел. +7(383)361-08-36, e-mail: dimflint@mail.ru

В статье рассматривается создание испытательного стенда для измерения оптических характеристик перестраиваемых микромеханических интерферометров Фабри-Перо.

Ключевые слова: многолучевой интерференционный оптический фильтр, интерференционные эффекты, интерферометр Фабри-Перо, дифракционная решетка.

TEST BENCH FOR SPECTRAL CHARACTERISTICS OF TUNABLE MICROMECHANICAL INTERFEROMETERS FABRI-PERO MEASUREMENT

Dmitry M. Nikulin

Engineer, department of physics, Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383)361-08-36, e-mail: dimflint@mail.ru

In article bases of the test bench for measurement of optical characteristics of tunable micromechanical interferometers Fabry-Perot.

Key words: multibeam interferential optical filter, interferential effects, interferometer Fabry-Perot, diffraction lattice.

Испытательный стенд создается для измерения оптических характеристик перестраиваемого по спектру интерферометра Фабри-Перо. Известные спектральные анализаторы типа полихроматоров позволяют проводить измерения меняющихся во времени спектров, но при исследовании многолучевых интерференционных фильтров необходимо обеспечивать дополнительные требования к излучателям, приемникам и оптической схеме спектрометра, не удовлетворяемые в стандартных приборах.

Испытательный стенд должен обеспечить измерение основных спектральных параметров перестраиваемого многолучевого интерференционного оптического фильтра в процессе его перестройки в видимом диапазоне спектра. Измеряются:

- Разрешающая способность: $\lambda / \delta\lambda \approx 10^3$;
- Прозрачность в видимом диапазоне спектра;
- Диапазон перестройки светофильтра в пределах видимого диапазона спектра;
- Зависимость значения длины волны пропускания фильтра от управляющего электрического напряжения.

Конструкция испытательного стенда для исследований в видимом диапазоне спектра показана на рис.1.

Основой оптической схемы стенда (рис. 1) является дифракционная решетка 6. Она позволяет совместно с объективом 7 развернуть в плоскости фотоприёмной матрицы 8 изображение входной щели 3 на разных длинах волн. Оптическая система содержит источник света 1 (излучающий во всем видимом диапазоне), конденсорную линзу 2, коллиматор 4 и объектив 7, образующие изображение щели в плоскости фотоприёмной матрицы. Кюветное отделение 5, предназначено для установки исследуемого перестраиваемого микромеханического интерферометра Фабри-Перо [1] или эталонного образца для калибровки стенда.

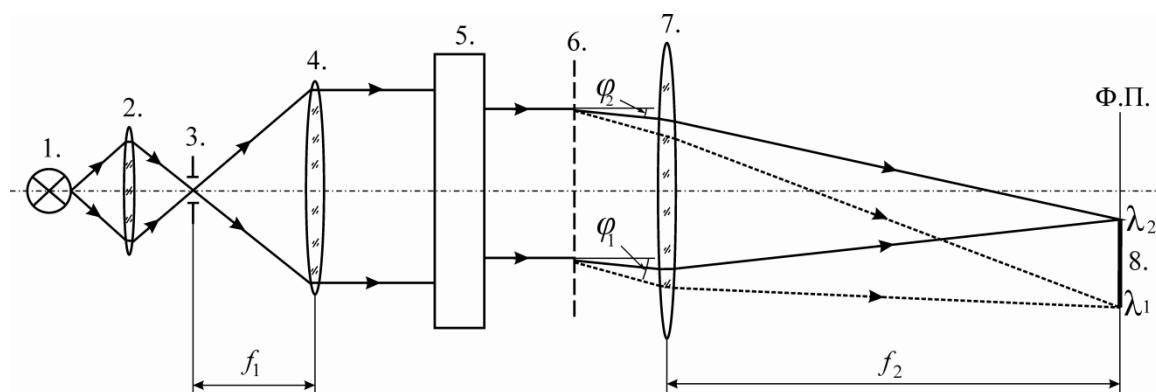


Рис. 1. Оптическая схема испытательного стенда

В отсутствие интерферометра в плоскости фотоприёмной матрицы на мониторе компьютера возникает в виде широкой полосы изображение спектра видимого света. После установки исследуемого образца интерферометра на пути излучения на мониторе наблюдается вырезанная из полосы спектра узкая полоска, ширина которой зависит от угловой дисперсии решетки, разрешающей силы дифракционной решетки, aberrаций оптики, фокусного расстояния объектива 7, ширины полосы пропускания интерферометра. При уменьшении ширины входной щели разрешающая сила испытательного стенда достигает максимального значения. Для уменьшения погрешностей при измерениях полосы пропускания интерферометра предусматривается предварительная калибровка стенда с помощью узкополосного светофильтра. При электрической перестройке положения полосы пропускания микромеханического интерферометра Фабри-Перо [1], мы будем наблюдать перемещение щели на мониторе компьютера в *on-line* режиме, и средняя длина волны полосы пропускания интерферометра измеряется по положению полосы на экране, что также требует соответствующей калибровки стенда.

Рассчитаем оптические параметры испытательного стенда.

Оптические характеристики стенда определяются параметрами диспергирующего элемента и фотоприёмной матрицы.

На пиксел матрицы размером Δl приходится полоса спектра $\Delta \lambda$, ширина которой определяется угловой дисперсией дифракционной решетки и

фокусным расстоянием объектива f_2 . Диапазон углов дифракции света на решетке в диапазоне длин волн определяется выражением $\Delta\varphi = (d\varphi/d\lambda) \cdot \Delta\lambda$. Так как $\Delta l = \Delta\varphi \cdot f_2$, то получаем:

$$\Delta l = (d\varphi/d\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot f_2. \quad (10)$$

Здесь φ - угол дифракции, f_2 - фокусное расстояние объектива, $d\varphi/d\lambda$ - дисперсия дифракционной решетки [2]:

$$d\varphi/d\lambda = \frac{m}{d \cdot \cos \varphi}, \quad (11)$$

где d - период дифракционной решетки, m - порядок спектра, $d\varphi$ - угол между лучами с длинами волн λ и $d\lambda$, а $\cos \varphi = \sqrt{1 - (\lambda_{cp}/d)^2}$. Получим из (1):

$$\Delta l = \frac{m \Delta\lambda f_2}{d \cos \varphi}. \quad (12)$$

Размер $L_{\Phi.M}$ строки фотоприёмной матрицы, содержащей N_{Π} пикселей, равен:

$$L_{\Phi.M} = \Delta l \cdot N_{\Pi} = \frac{m \Delta\lambda f_2}{d \cos \varphi} \cdot N_{\Pi}. \quad (13)$$

Так как полоса спектра, приходящаяся на длину строки матрицы, равна $\lambda_2 - \lambda_1 = \Delta\lambda \cdot N_{\Pi}$, из (4) получим: $L_{\Phi.M} = \frac{m(\lambda_2 - \lambda_1) f_2}{d \cos \varphi}$; отсюда:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{L_{\Phi.M} \cdot d \cdot \cos \varphi}{f_2 \cdot m} \quad (14)$$

Различимая разность длин волн $\delta\lambda_p$ дифрагировавших на решетке равна $\delta\lambda_p = \lambda_{cp}/R$, где λ_{cp} - средняя длина волны диапазона длин волн, R - разрешение решетки. Разрешаемой разнице длин волн соответствует область a на фотоприёмной матрице; заменим в (3) Δl на a , $\Delta\lambda$ на $\delta\lambda_p$, получим:

$$a = \frac{m \delta\lambda_p f_2}{d \cos \varphi} = \frac{m \lambda_{cp} f_2}{R d \cos \varphi}. \quad (15)$$

Учтем, что $R = m \cdot N_{\Delta.P}$, где $N_{\Delta.P} = L_{\Delta.P}/d$ - полное число штрихов дифракционной решетки, участвующих в построении дифракционной картины, $L_{\Delta.P}$ - длина рабочей области дифракционной решетки, участвующей в построении дифракционной картины. Получим:

$$a = \frac{m \lambda_{cp} f_2}{m N_{\Delta.P} d \cos \varphi} = \frac{\lambda_{cp} f_2}{L_{\Delta.P} \cdot \cos \varphi}. \quad (16)$$

Период дифракционной решетки будем находить из условия, что различимая разность длин волн $\delta\lambda_p$ дифрагировавших на решетке, соответствует области a на фотоприёмной матрице, выразим f_2 из (5) и подставим в (7):

$$d = \frac{a \cdot L_{\Delta.P} \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) \cdot m}{\lambda_{cp} \cdot L_{\Phi.M}}. \quad (17)$$

Чтобы выбрать подходящие варианты параметров дифракционной решетки и объектива, рисующего картину спектра (d и f_2), произведем необходимые расчеты. Используемая фотоприёмная матрица имеет $N_{\Pi} = 1280$, $L_{\Phi.M} = 10 \text{ мм}$. В видимом диапазоне используем первый порядок спектра $m = 1$, рабочая область дифракционной решетки равна входной диафрагме исследуемого образца (рис. 1). Исследуемые перестраиваемые микромеханические интерферометры Фабри-Перо имеют входную диафрагму диаметром 10 мм [1]. При расчетах допускаем постоянство значения, линейной дисперсии дифракционной решетки в видимом диапазоне спектра. Результаты расчетов приведены в табл. 1-2.

Таблица 1

$a = \Delta l$						
№	$\lambda_2 - \lambda_1$ нм.	d мкм.	f_2 мм.	R	$\delta\lambda$ нм	диапазон перестройки нм
1.	740-380	5	140	$2 \cdot 10^3$	0,28	360
2.	740-560	2	110	$4,5 \cdot 10^3$	0,14	180
3.	740-620	1,4	100	$7 \cdot 10^3$	0,1	120
4.	740-650	1	80	$10 \cdot 10^3$	0,07	90

Таблица 2

$a = 2 \cdot \Delta l$						
№	$\lambda_2 - \lambda_1$ нм.	d мкм.	f_2 мм.	R	$\delta\lambda$ нм	диапазон перестройки нм
1.	740-380	10	280	$1 \cdot 10^3$	0,56	360
2.	740-560	4	220	$2,5 \cdot 10^3$	0,28	180
3.	740-620	3	200	$3,5 \cdot 10^3$	0,2	120
4.	740-650	2	160	$5 \cdot 10^3$	0,14	90

В табл. 1, 2 в первой строке приведены результаты расчёта при перестройке интерферометра во всём видимом диапазоне, во второй – $1/2$, в третьей – $1/3$, в четвёртой – $1/4$ спектра.

Из табл. 1, 2. видно, что лучшей разрешающей способностью стенд будет обладать если использовать дифракционную решетку с $d = 1 \text{ мкм}$. Решетки с таким шагом изготавливаются для работы на отражение, оптическая схема измерительного стенда рассчитана для решеток, работающих на пропускание.

Рассмотрим требования к расходимости излучения, используемого при исследовании многолучевого интерферометра. При отсутствии расходимости интерференционная картина в плоскости фотоприёмной матрицы представляет собой равномерное по освещенности пятно. Расходимость излучения приводит к появлению в интерференционной картине концентрических колец с максимумами интенсивности, соответствующими направлениям в излучении,

по которым в интерферометре оптическая длина пути светового луча на данной длине волны λ_i равна целому числу K_u полуволн:

$$L_i = K_u \cdot \lambda_i / 2. \quad (18)$$

Углы θ распространения лучей, соответствующие максимумам колец интерференционной картины, определяет уравнение интерферометра Фабри-Перо:

$$2nL_H \cos \theta = m\lambda. \quad (19)$$

Здесь n - показатель преломления среды между зеркалами, L_H - расстояние между зеркалами. При падении на интерферометр не монохроматического излучения видимого спектра интерференционная картина будет цветная, причем излучение каждой данной длины волны образует в картине свое кольцо с радиусом r_λ . Для разделения излучений разных длин волн необходимо в фокальной плоскости линзы установить диафрагму в виде маски с прорезями. Наличие входной щели приводит к появлению её изображения, накладывающегося на интерференционные кольца. В результате картина в фокальной плоскости представляет собой совокупность отрезков дуг, вырезанных изображением щели из интерференционных колец.

Расходимость излучения, обеспечивающая интерференционную картину в виде равномерной засветки, получается из (10), если уравнение представить в виде:

$$2nL_H \cos \theta = m_i(\lambda_{cp} + \delta\lambda), \quad (20)$$

где $\delta\lambda = \lambda / R$.

Для центра интерференционной картины $m_0 = 0$; первое от центра кольцо соответствует номеру максимума $m_1 = 1$. Получим:

$$2nL_H \cos \theta = \lambda_{cp} + \delta\lambda = \lambda / R + \lambda_{cp}. \quad (21)$$

При малых углах $\cos \theta$ можно представить двумя членами его разложения в ряд: $\cos \theta = 1 - \theta^2 / 2$. С учетом этого представления (12) запишем в виде:

$$2nL_H (1 - \theta^2 / 2) = \lambda_{cp} + \lambda_{cp} / R. \quad (22)$$

Преобразуем уравнение относительно угла расходимости:

$$\theta = \sqrt{\frac{\lambda_{cp}}{nL_H R}}. \quad (23)$$

Если $\lambda_{cp} = 0,6 \text{ мкм}$, $n = 1$, $L_H = 0,3 \text{ мкм}$, $R = 10^3$, то $\theta = 0,045 \text{ рад}$ ($2,55^\circ$). Легко показать, что при ширине входной щели 100 мкм и фокусном расстоянии коллимирующего объектива 100 мм требуемое значение расходимости обеспечивается с «запасом».

Приведенные выше расчеты не учитывают, что изображение входной щели в плоскости фотоприёмной матрицы имеет конечные размеры. Наименьшее допустимое значение ширины изображения щели - h_2 должно быть не больше размера пиксела - $h_2 \leq \Delta l = L_{\phi, M} / N_H$. Ширину входной щели h_1 и фокусное расстояние f_1 будем находить из формулы линейного увеличения двухлинзовой оптической системы [2]:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{f_1}{f_2} \Rightarrow \frac{f_2}{L_{\Phi, M} / N_{II}} = \frac{f_1}{h_1}. \quad (24)$$

Из (15) видно, что при необходимости увеличить световой поток, падающий на матрицу, путём увеличения ширины входной щели, нужно увеличивать f_1 .

Для измерения значения спектральной полосы пропускания интерферометра, обладающего разрешением $R_{\Phi, II} \approx 10^3$, испытательный стенд должен иметь разрешающую способность не менее $1 \cdot 10^4$. Приведённые выше результаты расчётов показывают достижимость такого разрешения при использовании дифракционной решетки 1000 штр./мм с объективом с фокусным расстоянием 80 мм (диапазон перестройки 90 нм), или при использовании решетки 200 штр./мм и объектива с фокусным расстоянием порядка 700 мм (диапазон перестройки 70 нм).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никулин Д.М., Чесноков В.В., Чесноков Д.В. Четырехзеркальный микромеханический перестраиваемый интерферометр Фабри-Перо // ГЕО-Сибирь-2009. Т. 5. Оптико-физические и теплофизические исследования, микротехника и нанотехнологии. Ч. 1 : сб. матер. V Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2009», 20–24 апреля 2009 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2009. – С. 201–204.
2. Стафеев С.К., Боярский К.К., Башнина Г.Л. Основы оптики: Учебное пособие. – СПб.: Питер, 2006. – 336 с.: ил.

© Д.М. Никулин, 2012

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОПТРОНА ОТКРЫТОГО КАНАЛА

Неъматжон Рахимович Рахимов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств и технологий, телефон +7(383)344 40 58, факс +7(383)344 40 58, e-mail: n_rah@ngs.ru

Татьяна Вячеславовна Ларина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», г. Новосибирск; 630108, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры технологии оптического производства, телефон +7(383)344-40-58, факс +7(383)344-40-58, E-mail: n_rah@ngs.ru, e-mail: larina_t_v@mail.ru

Иномжон Абдусалимович Сатволдиев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», г. Новосибирск; 630108, ул. Плахотного, 10, магистр техники технологий, соискатель кафедры специальных устройств и технологии, телефон +7(383)344 40 58, факс +7(383)344 40 58, e-mail: gift.85@mail.ru

В статье рассмотрен расчет основных параметров приемников оптического излучения для создания оптрона открытого канала.

Ключевые слова: источники и приемники оптического излучения, оптрон открытого канала.

CALCULATION OF OPTICAL DETECTORS BASIC PARAMETERS FOR OPEN-CHANNEL OPTRON DEVELOPMENT

Neymatjohn R. Rakhimov

Ph.D., Prof., department of special devices and technologies, Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383)344-40-58, fax +7(383)344-40-58, e-mail: n_rah@ngs.ru

Tatyana V. Larina

Assoc.Prof., department of optical production technology, Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383)344-40-58, fax: +7(383)344-40-58, e-mail: larina_t_v@mail.ru

InomjohnA. Satvoldiyev

MS, department of special devices and technologies, Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383)344-40-58, fax +7(383)344-40-58, e-mail: gift.85@mail.ru

Calculation of optical detectors basic parameters for the open-channel optron development is considered.

Key words: optical sources and detectors, open-channel optron.

Известно, что приемник оптического излучения (ПОИ) – это датчик, предназначенный для преобразования энергии оптического излучения в электрический сигнал. Одним из основных этапов при разработке оптоэлектронных первичных преобразователей - оптронов открытого канала является выбор ПОИ – фоторезисторов, фотодиодов, фототиристор, фототранзисторов, АФН-приемников и т. д. [1].

Коэффициент использования излучения источника приемником оптического излучения:

$$K = \frac{\int_0^{\infty} \varphi_{e.\lambda}(\lambda) S_{отн}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi_{e.\lambda}(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

где $\varphi_{e.\lambda}(\lambda)$ – относительное спектральное распределение потока излучения источника; $S_{отн}(\lambda)$ – относительная спектральная характеристика чувствительности ПОИ.

Связь интегральной чувствительности ПОИ к потоку излучения со спектральной [2]:

$$S_{инт} = S_{\lambda, \max} K \quad (2)$$

где $S_{\lambda, \max}$ – максимальная спектральная чувствительность ПОИ к потоку излучения.

Максимальная спектральная чувствительность кремниевых фотозлектрических полупроводников ПОИ к потоку излучения может быть выражена формулой:

$$S_{\lambda, \max} = \frac{\eta_{\max} \cdot \lambda_m}{1,234} \cdot \frac{A}{Bm}, \quad (3)$$

где $\eta_{\max}$ – квантовая эффективность на длине волны λ_m [1]; λ_m = длина волны, на которой спектральная чувствительность ПОИ, максимальна, мкм.

Относительная спектральная чувствительность ПОИ [1] выражается формулой:

$$S_{\lambda, \text{отн}} = S_{\lambda, \text{абс}} / S_{\lambda, \max} \quad (4)$$

где $S_{\lambda, \text{абс}}$ – абсолютная спектральная чувствительность ПОИ;

$S_{\lambda, \max}$ – относительная спектральная чувствительность ПОИ.

Порог чувствительности ПОИ, в заданной полосе частот, составляет [2]:

$$\Phi_n = \frac{S_{отн}(\lambda)}{S_{I/инт}} = \frac{U_{ш}}{U_{U.инт}}, \quad (5)$$

где $U_{ш}$ – ток и напряжение шума.

Пересчитать интегральную чувствительность и пороговый поток кремниевого фотодиода ФД – 24К из световой фотометрической величины (ФМВ) в энергетическую по паспортному источнику типа "А" (ЧТ с температурой 2856 К).

По справочным данным для фотодиода ФД – 24К определяем:

1. Интегральную чувствительность $S_{v.I.инт} = 6 \text{ мА} / \text{лм} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ А} / \text{лм}$;
2. Пороговый поток $\Phi_{v.n} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ лм} / (\text{Гц})^{1/2}$.

По формуле (2) пересчитаем интегральную чувствительность фотодиода в энергетических ФМВ:

$$S_{e.I.инт.} = S_{v.I.инт} K_{\max} \kappa_{\Gamma} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 683 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} = 0,102 \frac{\text{А}}{\text{Вт}} \quad (6)$$

где по [3] определяем $\kappa_{\Gamma} = 2,5 \cdot 10^{-2}$ для ЧТ с температурой $T_{\text{ЧТ}} = 2856 \text{ К}$.

В свою очередь пересчитаем пороговый поток фотодиода:

$$\Phi_{e.n} = \Phi_{v.n} \frac{1}{683 \cdot \kappa_{\Gamma}} = \frac{5 \cdot 10^{-8}}{683 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2}} \approx 3 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Вт}}{\sqrt{\text{Гц}}} \quad (7)$$

Ответ: интегральная чувствительность фотодиода ФД – 24К равна $S_{e.I.инт} = 0,102 \text{ А} / \text{Вт}$, а его пороговый поток равен $\Phi_{e.n} \approx 3 \cdot 10^{-9} \text{ Вт} / (\text{Гц})^{1/2}$.

При использовании оптоэлектронных первичных измерительных преобразователей (ПИП) - оптронов открытого канала (СИД и ПОИ) в безлинзовых оптоэлектронных схемах в качестве источника анализирующего излучения выбранный полупроводниковый ПОИ должен удовлетворять следующим условиям:

- а) Максимальное спектральное согласование по чувствительности спектров излучения;
- б) Высокое быстродействие и интегральная чувствительность;
- в) Приём ПОИ до 95 % доли излучения после взаимодействия излучения с контролируемым объектом (КО).

Первое условие обеспечивается выбором полупроводникового материала для ПОИ, спектральная характеристика которого максимально перекрывает спектры излучения СИД.

Спектральная чувствительность S_{λ} определяется, как отношение выходного сигнала ПОИ (напряжение dU или ток dI) к вызвавшему это изменение монохроматическому потоку:

$$S_{\lambda} = \frac{dU}{d\Phi_{\lambda}} \text{ или } S_{\lambda} = \frac{dI}{d\Phi_{\lambda}} \quad (8)$$

Второе условие сводится к выбору ПОИ по времени, которое в три – четыре раза меньше длительности импульса излучения.

Интегральная чувствительность S_U или S_I - отношение изменения выходного сигнала ПОИ к вызвавшему это изменение интегральному (немонохроматическому) потоку излучения $d\Phi_e$ или световому потоку $d\Phi_v$ от СИД с определённым спектральным составом:

$$S_U = \frac{dU}{d\Phi} \text{ или } S_I = \frac{dI}{d\Phi} \quad (9)$$

ПОИ, работающие в видимой части спектра, калибруют по лампам накаливания: источники типа «А» (цветовая температура $T_{\text{ц}} = 2856 \text{ К}$), типа

«В» ($T_{ц} = 4800 \text{ K}$) или «С» ($T_{ц} = 6500 \text{ K}$) [3]. ПОИ со спектральной чувствительностью в ближней ИК-области (чаще всего неохлаждаемые), калибруют по черному телу с температурой $T = 573 \text{ K}$. Охлаждаемые ПОИ предназначенные для работы в ближней и средней ИК-области, калибруют по черному телу с температурой $T = 373 \text{ K}$. В зависимости от инерционности ПОИ при его калибровке применяют различные частоты модуляции потока излучения.

Для выполнения третьего условия, прежде всего, необходимы сведения о законе распределения излучения СИД после взаимодействия с контролируемым объектом.

Закон распределения излучения после взаимодействия с контролируемым объектом проще определить экспериментально. Для этого была разработана экспериментальная установка, позволяющая определять распределения излучения СИД после взаимодействия с КО (рис. 1 и 2).

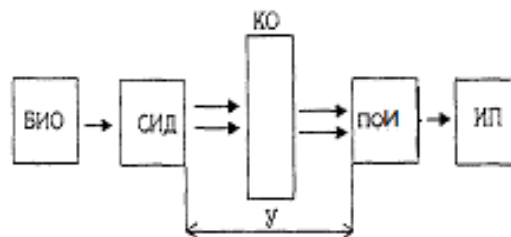
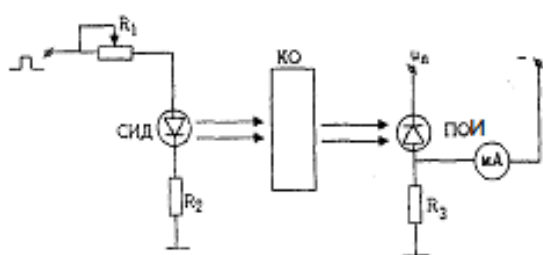


Рис. 1. Электрическая схема экспериментальной установки

Рис. 2. Структурная схема установки

На рис. 3, а показан график распределения прошедших потоков через КО, на рис. 3, б - график распределения прошедших потоков без КО.

Из рис. 2 видно, что с уменьшением y - расстояния между СИД и ПОИ увеличивается величина фотоэлектрического сигнала, т. е. расчетный суммарный световой поток, и меньшая часть не попадает на ПОИ.

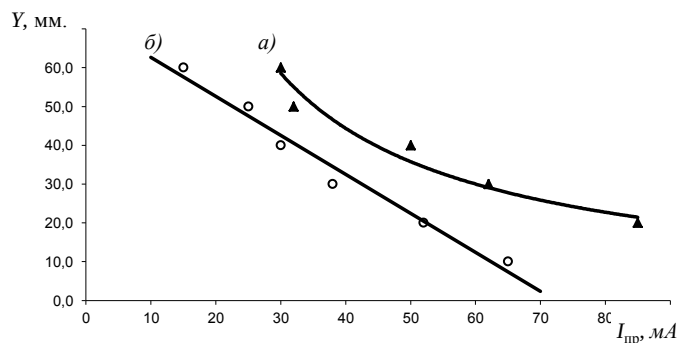


Рис. 3. График распределения прошедших потоков а) через КО (кювета с нефтепродуктами), б) без КО

Если считать, что источник излучения – СИД является точечным, то регистрируемый на расстоянии x от оси симметрии световой поток может быть описан зависимостью:

$$\Phi = \frac{\Phi_0 e^{\frac{km\sqrt{y^2+x^2}}{y}}}{y^2 + x^2}, \quad (10)$$

где: Φ_0 - поток излучения СИД проходящие через КО; k - коэффициент поглощения; m - масса вещества.

Коэффициент k может принимать любые значения и не влияет на характер распространения излучения после прохождения через материал. То же самое относится к массе. Распределение излучения зависит от геометрических параметров и структуры контролируемого материала. Видно, что на измеряемом участке материал распределен равномерно. Для разработки измерительных ПИП следует определить какими размерами должна обладать светочувствительная поверхность ПОИ, чтобы на ее поверхность падало 95 % всего прошедшего светового потока. Для упрощения примем, что $km = 1$.

Если светочувствительная поверхность является кругом (что справедливо для большинства ПОИ) с радиусом R и ее центр расположен на одной оси с точечным источником излучения, то воспринимаемый световой поток может быть выражен интегралом.

$$\Phi = \int_0^x \frac{2\pi R \Phi_0 e^{-\sqrt{y^2+x^2}/y}}{y^2 + x^2} dx \quad (11)$$

Примем $y = 1$ и в этих единицах, определим радиус светочувствительной поверхности фотоприемника.

$$\Phi = 2\pi R \Phi_0 \int_0^x \frac{e^{-\sqrt{x^2+1}}}{x^2 + 1} dx \quad (12)$$

Это выражение сводится к интегральному логарифму и не может быть подсчитано непосредственно. Значение интеграла было определено численным методом на ЭВМ для $x = 1, 2, 3, 4$, при этом $\Phi_1 = 0,106$, $\Phi_2 = 0,184$, $\Phi_3 = 0,21$; $\Phi_4 = 0,216$. Значения интегралов $\int_0^3$ и $\int_0^4$ отличается менее чем на 4 %.

Следовательно, радиус светочувствительной поверхности фотоприемника должен в 3 - 4 раза превышать толщину просвечиваемого материала

$$R = (3 \div 4) \cdot y; \quad S = 2\pi \cdot (3 \div 4) \cdot y^2 \quad (13)$$

Таким образом, если радиус ПОИ в 3 - 4 раза превышает толщину просвечиваемого материала, то на светочувствительную поверхность попадает практически весь световой поток, прошедший через КО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Рахимов, Н.Р. Оптоэлектронные средства неразрушающего контроля физико-химических параметров жидких сред / Н.Р. Рахимов, А.М. Касымохунова, Ш. Усманов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль – Киев, 2001. – № 3. – С. 40 - 42.

2 Рахимов, Н.Р. Выбор и модель приемника оптического излучения для многофункциональной системы оптоэлектронных первичных преобразователей / Н.Р. Рахимов, С.А. Холматов // ФерПИ. – 2003. – № 3. – С. 70 - 74.

3 Аксененко М. Д., Бараночников М. Л Приемники оптического излучения. Справочник. — М.: Радио и связь, 1987. — 296 с., ил.

© Н.Р. Рахимов, Т.В. Ларина, И.А. Сатволдиев, 2012

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ОТРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ТЕПЛОВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Алексей Валерьевич Турбин

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Лаврентьева, 2/1, ведущий инженер отдела тепловидения и телевидения, тел. (383) 330-97-49, e-mail: al_t@ngs.ru

Елена Олеговна Ульянова

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Лаврентьева, 2/1, младший научный сотрудник отдела тепловидения и телевидения, тел. (383) 330-97-49, e-mail: helen@oesd.ru

Павел Алексеевич Алдохин

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Лаврентьева, 2/1, младший научный сотрудник отдела тепловидения и телевидения, тел. (383) 330-97-49, e-mail: aldosha@ngs.ru

Игорь Иванович Кремис

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, г. Новосибирск, ул. Николаева, 8, младший научный сотрудник, тел. 8-923-231-66-98, e-mail: igor21738@ngs.ru

Сергей Александрович Вергилес

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, г. Новосибирск, ул. Николаева, 8, ведущий инженер-конструктор, тел. 8-923-231-66-98

В статье рассмотрен тепловизионный прибор, описываются особенности и характеристики разработанного тепловизора, а также приведены изображения, полученные с помощью представленного тепловизионного прибора.

Ключевые слова: тепловизионный прибор, фотоприемное устройство, характеристики.

THE COMPACT THERMAL IMAGING DEVICE FOR ROUTINE OF PROCESSING ALGORITHMS OF THERMAL IMAGE

Aleksey V. Turbin

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics» (NB ISP SB RAS «TDI AM») 2/1, Prosp. Akademika Lavrentieva, Novosibirsk, 630090, principal engineer, department of thermal imaging and television, tel. (383) 330-97-49, e-mail: al_t@ngs.ru

Elena O. Ulyanova

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics» (NB ISP SB RAS «TDI AM») 2/1, Prosp. Akademika Lavrentieva, Novosibirsk, 630090, second researcher, department of thermal imaging and television, tel. (383) 330-97-49, e-mail: helen@oesd.ru

Pavel A. Aldohin

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics» (NB ISP SB RAS «TDI AM») 2/1, Prosp. Akademika Lavrentieva, Novosibirsk, 630090, second researcher, department of thermal imaging and television, tel. (383) 330-97-49, e-mail: aldosh@ngs.ru

Igor I. Kremis

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 «TDIAM»), Nikolaeva street, 8, Novosibirsk, scientist, 630090, Russian Federation, tel. 8-923-231-66-98, e-mail: igor21738@ngs.ru

Sergei A. Vergiles

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 «TDIAM»), Nikolaeva street, 8, Novosibirsk, principal engineer, 630090, Russian Federation, tel. 8 913 908 15 11

The article describes the thermal imaging device, features and characteristics of the thermal imager are given as well as the images obtained by the developed thermal imaging device.

Key words: thermal imaging device, photodetector, characteristics.

В настоящее время тепловизионные приборы являются одними из основных каналов информационных систем, предназначенных для дистанционного контроля и детального исследования окружающего пространства.

В докладе сообщается о характеристиках и особенностях малогабаритного специализированного тепловизионного прибора на базе матричного фотоприемного устройства формата 384×288 элементов чувствительного в области спектра 3-5 мкм, разработанного Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ».

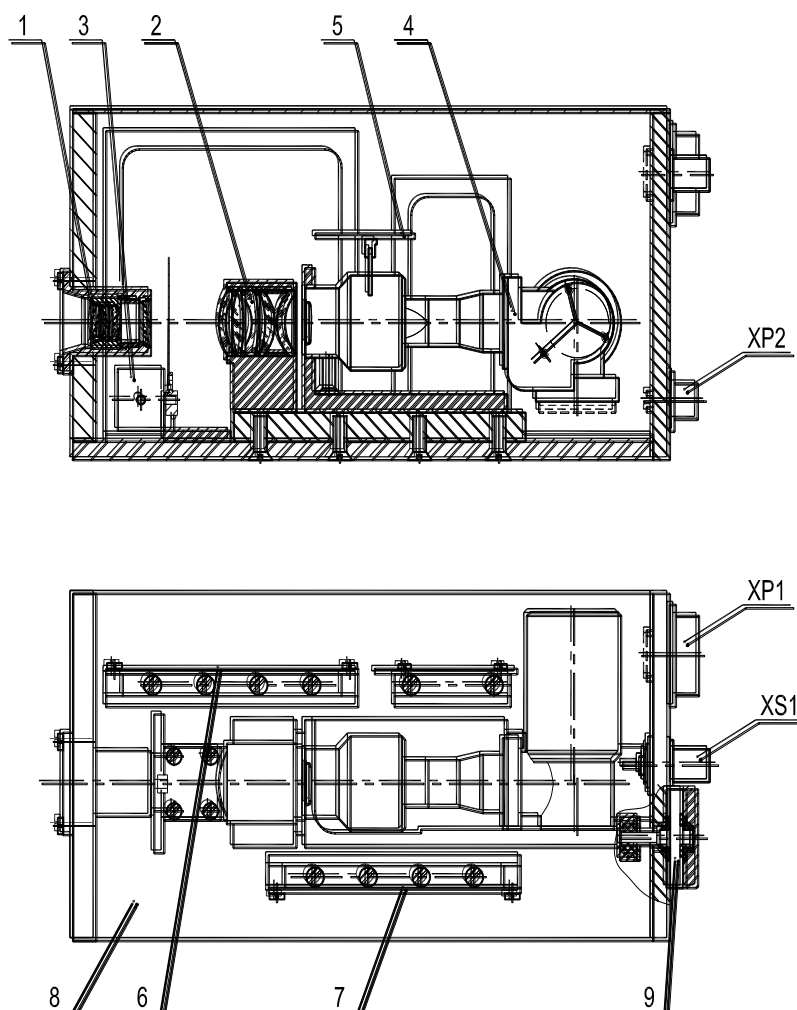
Тепловизионный прибор предназначен для формирования тепловизионного изображения в виде стандартного телевизионного сигнала согласно ГОСТ 7845-92 (для черно-белого изображения) с числом «ступеней дискретизации» по амплитуде от минимума до максимума не менее 4096, и параллельном цифровом 12 битном коде. Особенностью данного прибора является то, что он имеет два видеовыхода. По одному передается видеосигнал к которому применяются стандартные алгоритмы обработки изображения (автоматическая регулировка усиления (АРУ), замещение выбитых элементов, выравнивание чувствительности элементов). По другому выходу передается необработанный видеосигнал непосредственно с фотоприёмного устройства (ФПУ), к нему не применяются стандартные алгоритмы обработки изображения, что дает возможность проводить абсолютные измерения выходных сигналов. Кроме того, с помощью дополнительной электроники и персонального компьютера проверять и разрабатывать собственные алгоритмы обработки тепловизионного изображения.

В состав тепловизионного прибора входят следующие основные узлы и блоки:

- Модуль ФПУ размерностью 384×288 элементов, интегрированный с модулем охлаждения фотоприемника в виде единой конструкции;
- Модуль электронной обработки;
- Узел входной оптики;
- Узел управления;
- Источник питания.

Для глубокого охлаждения матричного ФПУ используется газовая холодильная машина, работающая по замкнутому циклу Сплит-Стирлинга.

Конструкция тепловизионного прибора показана на рис. 1.



- 1 – входной объектив; 2 – проекционный объектив; 3 – шторка; 4 – матричный ФПУ; 5 – плата согласования; 6 – плата предварительной обработки; 7 – плата цифровой обработки; 8 – корпус; 9 – механизм перефокусировки; XP1 – разъем для подачи питающего напряжения, подключения управляющего интерфейса RS422 и цифрового видеопотока; XP2 – разъем для подключения интерфейса USB1.1; XS1 – разъем выхода видеосигнала

Рис. 1. Конструкция тепловизионного прибора

Узел входной оптики рассчитан по принципам изложенным в патенте [1].

Основные характеристики тепловизионного прибора:

- | | |
|--|--------------|
| – Коротковолновая граница спектральной чувствительности, мкм | 3,4; |
| – Длинноволновая граница спектральной чувствительности, мкм | 4,8; |
| – Размер элемента, мкм | 15; |
| – Фокусное расстояние входного объектива, мм | 20; |
| – Относительное отверстие входного объектива, D/f' | 1:3; |
| – Угол поля зрения, 2ω , град | 20; |
| – Разность температур эквивалентная шуму, Мк | 35; |
| – Частота кадров, Гц | 50; |
| – Габаритные размеры, мм | 220×120×100. |

На рис. 2 приведено изображение, полученное с помощью данного тепловизионного прибора, человека держащего в руках зажженную сигарету.



Рис. 2. Изображение человека с горящей сигаретой

Таким образом, тепловизионный прибор является надежным средством для различного рода лабораторных измерений и оптимизации алгоритмов обработки тепловизионного изображения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2419113 Российская Федерация: МПК G20В 13/14, G20В 9/64. Оптическая система с вынесенной апертурной диафрагмой для среднего ИК диапазона спектра [Текст]/ Хацевич Т.Н., Терешин Е.А.; Заявители и патентообладатели: Хацевич Т.Н., Терешин Е.А. – № 2009130270/28; заявл. 06.08.2009; опубл. 20.05.2011, Бюл. № 14. – 20 с.

© А.В. Турбин, Е.О. Ульянова, П.А. Алдохин, И.И. Кремис, С.А. Вергилес, 2012

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМ ОБЪЕКТИВОВ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ

Елена Олеговна Ульянова

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Лаврентьева, 2/1, младший научный сотрудник отдела тепловидения и телевидения, тел. (383) 330-97-49, e-mail: helen@oesd.ru

В статье рассмотрены различные принципы построения схем объективов тепловизионных приборов. Приведены оптические схемы объективов, основные параметры и характеристики, а также оценка качества изображения.

Ключевые слова: тепловизионный прибор, оптическая схема, характеристики.

CONSTRUCTION PRINCIPLES OF LENSES SCHEMES FOR THERMAL IMAGING DEVICES

Elena O. Ulyanova

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics» (NB ISP SB RAS «TDI AM») 2/1, Prosp. Akademika Lavrentieva, Novosibirsk, 630090, junior researcher, department of thermal imaging and television, tel. (383) 330-97-49, e-mail: helen@oesd.ru

The article describes different principles of construction of lenses schemes for thermal imaging devices. Optical schemes of lenses, the main parameters and technical characteristics are given in the paper as well as evaluation of the image quality.

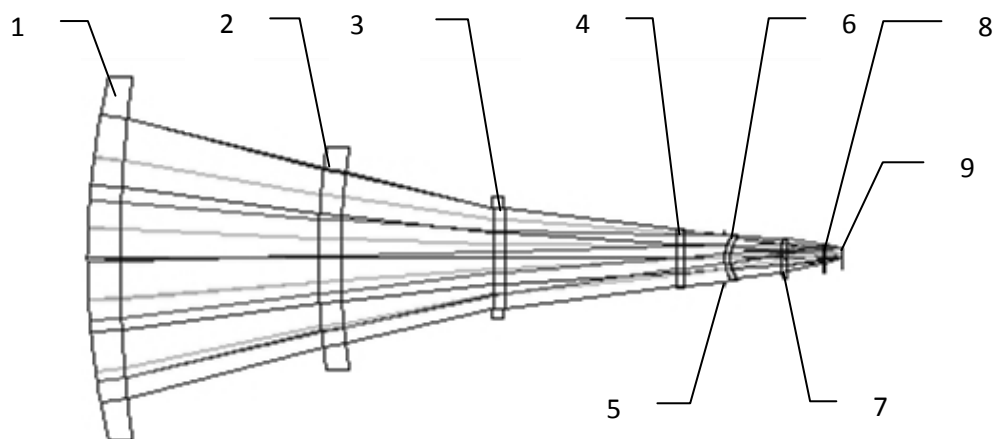
Key words: thermal imaging device, optical scheme, characteristics.

Современный уровень развития тепловизионных приборов и систем предполагает совершенствование оптических систем тепловизоров. Для устранения фонового потока в широкоформатных фотоприемных устройствах (ФПУ) существует несколько принципов построения схем объективов:

- Охлаждение оптической системы объектива до температур, исключая влияние приборных фонов на ФПУ;
- Охлаждение части оптической системы, а именно оптических элементов с диафрагмой;
- Введение в оптическую систему компонентов, формирующих выходной зрачок системы в холодной зоне криостата.

Реализация первого принципа ведет к значительному усложнению конструкции прибора. Поэтому, схемы объективов тепловизионных приборов предпочтительно реализовывать по второму и третьему принципам построения.

В работе [1] рассмотрены некоторые из базовых оптических систем, реализованных по второму принципу построения (рис. 1).

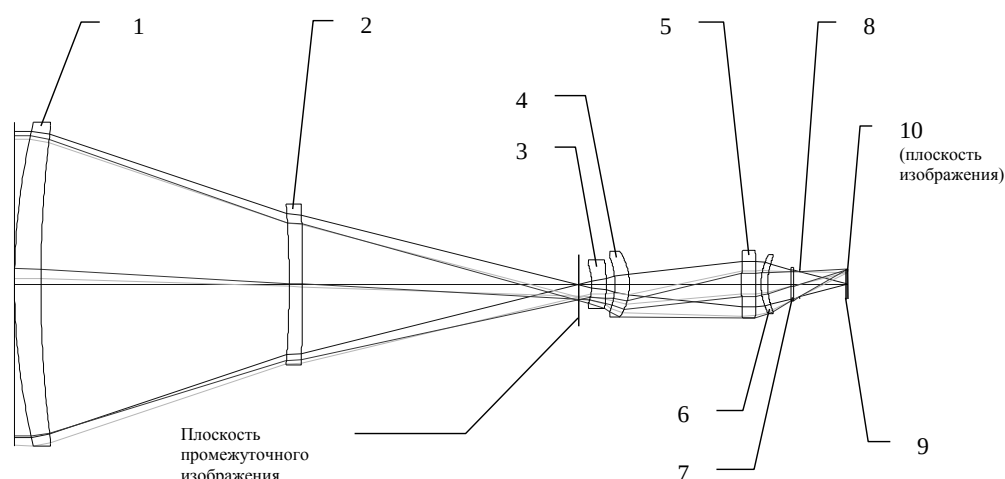


1-3 – фронтальная часть объектива; 4 – входное окно криостата; 5 – апертурная диафрагма; 6 – 7 – задняя часть объектива; 8 – отсекающий фильтр; 9 – плоскость фоточувствительных элементов матричного ФПУ

Рис. 1. Оптическая схема объектива для тепловизионных приборов на основе охлаждаемых матричных ФПУ [1]

В данной схеме объектива устранение фонового потока происходит за счет охлаждения части объектива, а именно оптических элементов (линз поз. 6 и 7 на рис. 1) с апертурной диафрагмой.

Построение схемы объектива по третьему принципу является наиболее предпочтительным, т.к. в данном случае нет необходимости вносить в охлаждаемую зону какие-либо оптические элементы. При построении схемы объектива по данному принципу не происходит значительного усложнения оптической системы, следовательно, нет и значительных потерь, вызванных пропусканием оптической системы. Для реализации по третьему принципу построения была разработана и изготовлена оптическая схема объектива для охлаждаемого матричного фотоприемного устройства (МФПУ) (рис. 2). Схема объектива включает в себя фронтальный компонент, состоящий из двух одиночных линз, а также базовый (проеекционный) блок из четырех оптических компонентов. Все оптические компоненты выполнены из германия и селенида цинка и имеют сферические поверхности. Особенностью разработанной схемы объектива является применение промежуточной плоскости изображения, расположенной между двухлинзовым фронтальным компонентом и четырехлинзовым базовым блоком, что позволяет установку устройств калибровки и механизма микросканирования вблизи промежуточной плоскости изображения, где световые диаметры имеют наименьшие значения, а также применение взаимозаменяемых фронтальных компонентов с другим фокусным расстоянием, что позволяет построить объектив с переменным фокусным расстоянием (полем зрения), не меняя при этом проекционную часть, а также положение относительно фотоприемного устройства.



1-2 – фронтальная часть объектива; 3-6 – (базовая) проекционная часть объектива; 7 – входное окно криостата; 8 – охлаждаемая диафрагма; 9 – охлаждаемый фильтр; 10 – плоскость фоточувствительных элементов МФПУ

Рис. 2. Оптическая схема объектива с промежуточной плоскостью изображения для тепловизионных приборов на основе охлаждаемых МФПУ

В отличие от базовой схемы (рис. 1), реализованной по второму принципу построения, в разработанной схеме объектива с промежуточной плоскостью изображения происходит уменьшение фонового потока за счет формирования апертурной диафрагмы в холодной зоне криостата. В этих целях выходной зрачок объектива совмещается с холодной диафрагмой, находящейся внутри криостатизированного корпуса [2]. Разработанная схема объектива с промежуточной плоскостью изображения позволила значительно уменьшить массогабаритные характеристики фронтальных оптических компонентов и, как следствие, объектива в целом. Использование режима микросканирования позволяет увеличить формат кадра с 320 на 256 чувствительных элементов до 640 на 512 элементов, т.е. возможно получение формата кадра в 2 раза большего, чем исходный, что повышает разрешающую способность системы.

В табл. 1 приведены основные характеристики разработанного объектива с промежуточной плоскостью изображения.

Таблица 1

Фокусное расстояние, мм	250
Относительное отверстие	1:1,94
Угловое поле зрения, градусов (по диагонали кадра)	2,77
Спектральный диапазон работы, мкм	7,7-10,3
Длина, мм	350
Масса, г	900

Параметры оценки качества изображения разработанного объектива с промежуточной плоскостью изображения приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2. Модуляционная передаточная функция объектива с промежуточной плоскостью изображения

Пространств. частота ν , мм ⁻¹	Точка на оси	Точка в зоне	Точка на краю	Дифракционно- ограниченная система
10	0,71	0,70	0,69	0,78
20	0,44	0,42	0,41	0,56
30	0,29	0,29	0,24	0,36
40	0,17	0,12	0,10	0,18
50	0,06	0,03	0,02	0,06

Таблица 3. Функция концентрации энергии объектива с промежуточной плоскостью изображения

Радиус пятна, мкм	Энергия, отн. ед.			
	Точка на оси	Точка в зоне	Точка на краю	Дифракционно- ограниченная система
10	0,50	0,50	0,47	0,60
12,5	0,62	0,60	0,59	0,72
15	0,69	0,67	0,65	0,79

Приведенные выше данные показывают, что разработанный объектив обладает хорошим качеством изображения, позволяющим использовать его в тепловизионных приборах на основе охлаждаемых МФПУ для решения задач обнаружения, распознавания и идентификации объектов наблюдения.

Разработанный объектив может быть сопряжен с охлаждаемыми МФПУ как зарубежных производителей, так и с отечественными охлаждаемыми матричными приемниками, например, разработанными в ИФП СО РАН и ФГУП «НПО «Орион», формат и технические характеристики которых позволяют создавать матричные тепловизионные приборы, аналогичные зарубежным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шатунов К.П. Особенности построения оптических систем тепловизионных приборов с матричными фотоприемными устройствами КРТ// Современные проблемы геодезии и оптики: Сборник материалов ЛIII Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию СГГА, 11 – 21 марта 2003 г., Ч. III. – Новосибирск: СГГА, 2003. – С. 70-72.
2. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г., Инфракрасные системы «смотрящего» типа, Логос. – М.: 2004. – С. 94-96.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОЛОРИМЕТР НА ОСНОВЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Олег Кузьмич Ушаков

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, директор ИОиОТ, кандидат технических наук, доцент, тел. (383)344-40-58, факс +7(383)344-40-58, e-mail: n_rah@ngs.ru

Елена Юрьевна Кутенкова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», (ФГБОУ ВПО «СГГА»), доцент кафедры ТОП, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, тел. (383)361-07-79, e-mail: kutenkova.elena@yandex.ru

Алексей Николаевич Серьезнов

СибНИА им С.А. Чаплыгина, 630051, г. Новосибирск, ул. Ползунова, 21, доктор технических наук, профессор, научный руководитель СибНИА, 8(383)278-70-03, e-mail: sibnia@sibnia.ru

В данной работе предлагается новая усовершенствованная конструкция оптоэлектронного многопараметрового колориметра. Отличительными особенностями которого является то, что кювета в нем выполнена в форме склеенного из двух половин цилиндра с центральным отверстием и установлена стационарно в ходе технологического процесса перекачки полупрозрачной жидкости, кроме того наличие $n+1$ оптопар позволяет контролировать наличие и содержание n компонентов в составе жидкостей.

Ключевые слова: лазерный диод, фотоприемник, оптопара, кварцевая кювета, полупрозрачные жидкости, сумматор, блок обработки фотоэлектрического сигнала, измерительный прибор.

AUTOMATIC COLORIMETER BASED ON OPTOELECTRONIC CONVERTERS

Oleg K. Ushakov

Ph.D., Prof., department of nanosystems and optotechnics, Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383)344-40-58, fax +7(383)344-40-58, e-mail: n_rah@ngs.ru

Elena Yu. Kutenkova

Assoc. prof., department of optical production technologies, Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383)361-07-79, fax +7(383)344-40-58, e-mail: kutenkova.elena@yandex.ru

Alexey N. Seryoznov

Ph.D., Prof, S.A. Chaplygin Siberian Research Institute of Aviation, 21 Polzunova st., Novosibirsk, phone: +7(383)344 40 58, fax +7(383)344 40 58, e-mail: n_rah@ngs.ru.

The new improved construction of optoelectronic multiparametric colorimeter is presented. It features the cylinder-shaped cell (two semicylinders stucked together) with central hole, which is fixed during the technological process of semitransparent liquid pumping; $n+1$ optocouplers being available permit the control of n -components presence and content in the liquid composition.

Key words: laser diode, photodetector, optocoupler, quartz cell, semitransparent liquid, summator, photoelectric signal processing unit, measuring instrument.

Для обеспечения эффективности работы предлагаемых устройств [1-3] необходимо иметь экспериментальные характеристики основных элементов колориметров, одной из которых является проходная характеристика оптронной пары с открытым оптическим каналом (ООК). Для сравнения результатов расчета коэффициента передачи оптического сигнала (ОС) с экспериментальным значением необходима характеристика оптронной пары без ООК. Были сняты характеристики оптронных пар, где в качестве светоизлучающих диодов (СИД) использовались следующие: синие (С), зеленые (З), красные (К), инфракрасные (ИК) (рис. 1). Приемником излучения служил фоторезистор СФ2-4, охватывающий широкую спектральную область. Эксперимент проводился при комнатной температуре ($t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Результаты эксперимента представлены на рис. 1 в виде графической зависимости тока фотоприемника от тока источника излучения. Из результата эксперимента видно, что характеристики достаточно близки к линейной зависимости. В результате были выявлены светодиоды для разных спектральных диапазонов, для которых характеристика идет круче, так как этот светодиоды обладают большей мощностью излучения по сравнению с остальными. Очевидно, что для колориметра имеет смысл брать источник излучения с более крутой характеристикой, соответствующей определенной спектральной области среди синих, зеленых, красных, инфракрасных. В результате проведенных экспериментов в качестве источников оптического излучения было принято решение использовать следующие светодиоды: синие «Пираньи» LED470–P8L5–A80, зеленые «Пираньи» LED515–P8L5–A80, красные «Пираньи» LED625–P8L5–A80, инфракрасные «Пираньи» HIR36.

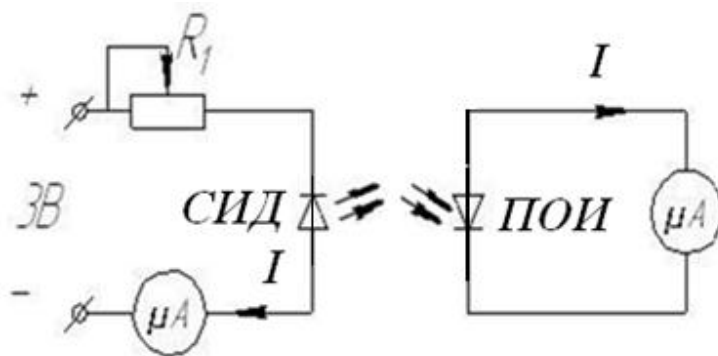


Рис. 1. Схема снятия характеристики оптронной пары

В большинстве применяемых в настоящее время приборов используют дифференциальный метод измерения светопоглощения, при этом необходимо иметь образцовые средства, в качестве которых могут быть светофильтры из цветных стекол или подобранные по равноценной спектральной характеристике жидкости. Отношение оптической плотности контролируемого продукта к оптической плотности образцового средства и измеряют при помощи

оптической системы с электрической компенсацией. Пропорционально изменению отношения оптических плотностей изменяется выходное напряжение, подаваемое на регистрирующий прибор [4].

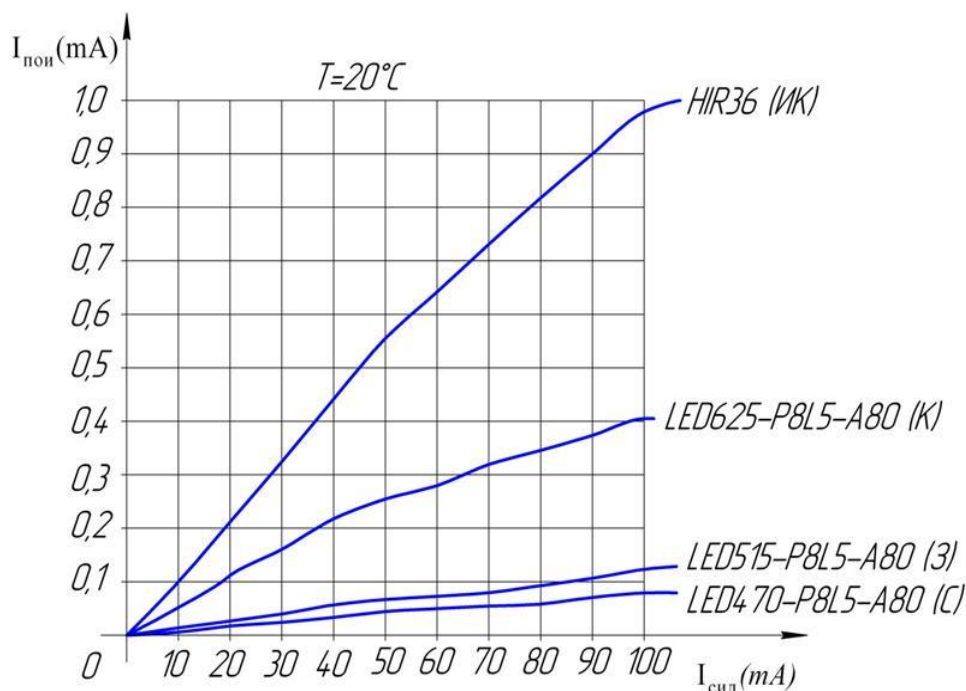


Рис. 2. Характеристики оптронной пары

В большинстве применяемых в настоящее время приборов используют дифференциальный метод измерения светопоглощения, при этом необходимо иметь образцовые средства, в качестве которых могут быть светофильтры из цветных стекол или подобранные по равноценной спектральной характеристике жидкости. Отношение оптической плотности контролируемого продукта к оптической плотности образцового средства и измеряют при помощи оптической системы с электрической компенсацией. Пропорционально изменению отношения оптических плотностей изменяется выходное напряжение, подаваемое на регистрирующий прибор [4].

Главными недостатками данных устройств, кроме необходимости наличия образцов, являются сложность конструкции, низкая чувствительность и неточность, за счет несовершенства кюветы и кюветодержателя, когда для каждого последующего анализа необходимо извлекать кювету из прибора, заполнять её очередной пробой, мыть и протирать оптические поверхности кювет от потоков исследуемой жидкости.

В работах [1, 2,] предлагалась конструкция колориметра кювета которого, в отличие от уже существующих конструкций, выполнена стационарно в виде прозрачной линзы-шара, внутри которой выполнена полость в виде цилиндра, а в центр цилиндра может быть установлена цилиндрическая или призматическая серебряная отражающая поверхность, например четырехгранный стержень с отражающими поверхностями. Сложность изготовления линзы-шара, особенно

полированной поверхности центрального отверстия, является существенным недостатком колориметра.

Рассматриваемый в данной статье оптоэлектронный многопараметровый колориметр гораздо проще изготовить, так как кварцевая кювета состоит из двух полуцилиндрических трубок 15, между которыми приклеивается плоское зеркало с двухсторонним отражением 8 (рис. 1, а, б). К кювете присоединяется стеклянная градуированная воронка 18, куда заливается контролируемая жидкость 9. Снизу полость может перекрываться краном 19. Вся конструкция помещена в корпус 18 (рис. 1, а), а само устройство можно установить на линии технологического процесса, т.е. контролировать жидкости (соки, напитки, пиво и т.д.), протекающие через трубу по стрелке, указанной на рис. 1, а.

Кроме того оптоэлектронный многопараметровый колориметр (рис. 3, б) состоит из задающего генератора 1 (источника импульсного питания), коммутатора 2, опорного лазерного диода 3, измерительных лазерных диодов 4, 5, 6, 7, $(n-1)_{из}$, $n_{из}$, измерительных фотоприемников 11, 12, 13, 14, $(n-1)_{пр}$, $n_{пр}$, блока обработки фотоэлектрического сигнала 16, регистрирующего прибора 17 (например, ЭВМ).

Устройство работает следующим образом. При включении, задающий генератор 1, вырабатывает прямоугольные импульсы 8 - 10 Гц. Разделенные импульсы через коммутатор - переключатель оптронов 2 подаются попеременно на лазерные диоды 4, 5, 6, 7, $(n-1)_{из}$, $n_{из}$, которые имеют определенные спектральные характеристики, соответствующие спектральным характеристикам n компонентов (параметров), содержащихся в полупрозрачных жидкостях. При этом оптопары могут включаться последовательно. Лазерный диод 3 и измерительный фотоприемник 10 образуют опорную оптопару, которая предусмотрена для того, чтобы сравнивать измерительные сигналы с сигналом опорного канала и обеспечивать достоверность результатов измерения. При заполнении цилиндрического отверстия кюветы 15 контролируемой жидкостью 9 она облучается лазерными диодами. В первом положении переключателя, поток излучения лазерного диода 4 фокусируется, проходит через контролируемую жидкость 9, отражается от одной из двух поверхностей плоского зеркала 8, и вновь проходя через контролируемый образец 9, далее попадает на измерительный фотоприемник 11. Затем сигналы поступают в блок обработки фотоэлектрического сигнала (БОФС) - 16, где реализуется отношение сигналов этого измерительного потока и компенсационного - от диода 3 и измерительного фотоприемника 10. Во втором положении переключателя 2 подключается вторая оптопара, процесс измерения повторяется, и так далее происходит для остальных оптопар.

Полученный сигнал отношения пропорционален величине коэффициента пропускания и оптической плотности жидких сред или прозрачных твердых тел, кроме того можно определить наличие и концентрации веществ (параметров) в растворе. Результаты подаются на измерительный прибор или ЭВМ 17, по показанию которого судят о параметрах жидких сред при наличии предварительно определенных градуировочных характеристик. ЭВМ обеспечивает автоматическое выполнение аналого-цифровых измерительных

преобразований, вычислительных процедур, выдачу полученной информации, формирование командной и другой служебной информации, необходимой для функционирования оптоэлектронных многофункциональных автоматических контрольно-измерительных систем.

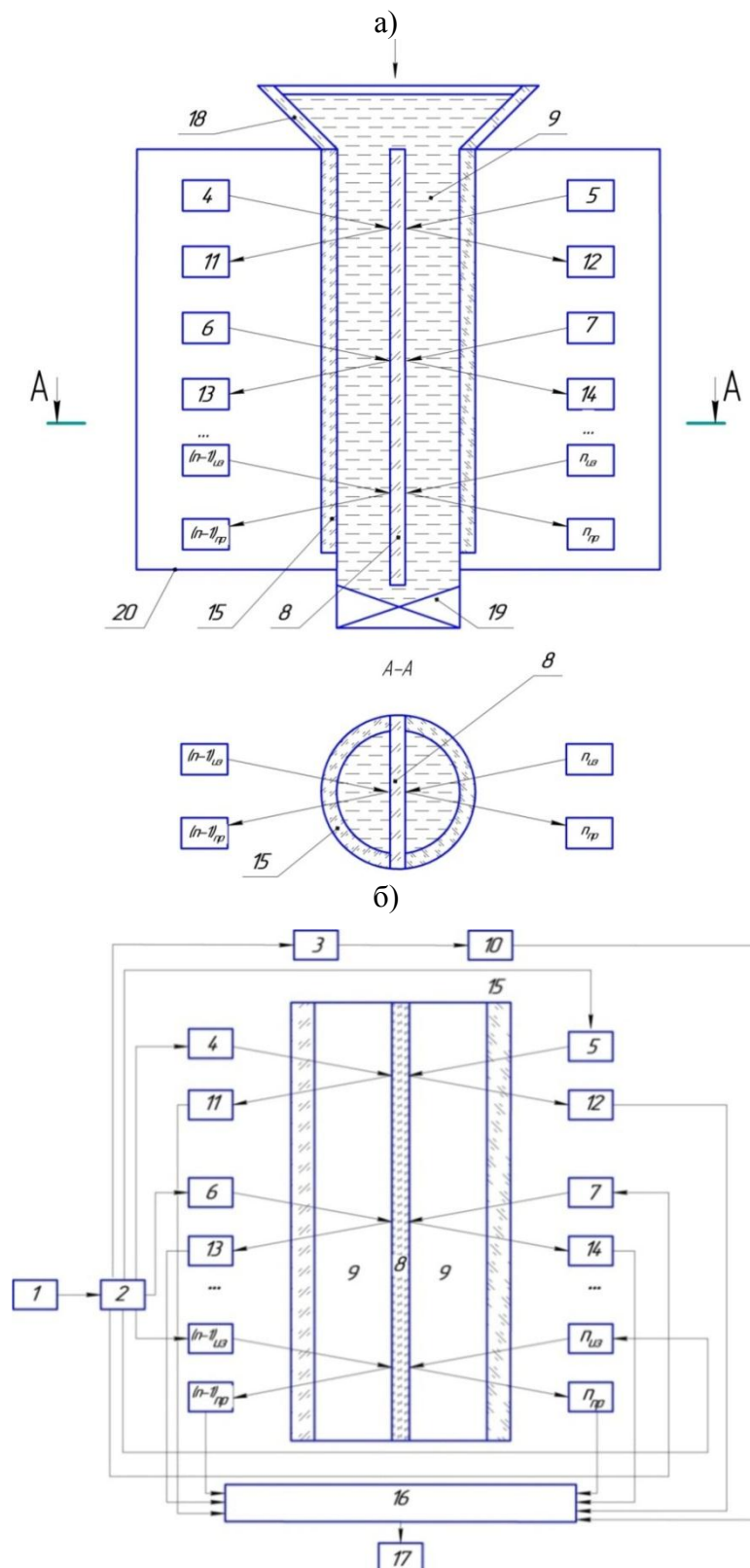


Рис. 3. Оптоэлектронный многопараметровый колориметр: а – конструкция датчика; б – блок схема

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2413201 Российская Федерация, МПК51 G01N 21/03. Оптоэлектронный фотоколориметр/ Рахимов Б.Н., Ушаков О.К., Кутенкова Е.Ю., Ларина Т.В.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия». - №2009146659/28; заявл. 15.12.2009; опубл. 27.02.11, Бюл. № 6. – 4 с. : ил.
2. Рахимов, Б.Н. Оптоэлектронный автоматический колориметр / Б.Н. Рахимов, О.К. Ушаков, Е.Ю. Кутенкова, Т.В. Ларина // Приборы и техника эксперимента, 2011. - № 5. - С. 161 – 162.
3. Заявка № 2011153209 Российская федерация. Оптоэлектронный многопараметровый колориметр/Б.Н. Рахимов и др.; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»
4. Ермолов И.Н. Неразрушающий контроль: Справочник. В 7-ми т. / Под ред. В.В. Клюева. Т. 6. Магнитные методы контроля, Оптический контроль, Радиоволновый контроль. - М.: Машиностроение, 2004.

© О.К. Ушаков, Е.Ю. Кутенкова, А.Н. Серьезнов, 2012

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ГАЗОВЫЕ СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРЫ

Владимир Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой наносистем и оплотехники, тел. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Александра Сергеевна Сырнева

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ассистент кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: aleksandra-syrneva@yandex.ru

Дарья Сергеевна Михайлова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ассистент кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: daria-83@mail.ru

Рассматриваются вопросы применимости многолучевых перестраиваемых интерферометров Фабри–Перо в газовых спектроанализаторах. В качестве чувствительного к составу газовой атмосферы элемента применён трёхзеркальный (призмный) многолучевой интерферометр высокого разрешения, основанный на использовании эффекта полного внутреннего отражения.

Ключевые слова: полное внутреннее отражение, оптическое туннелирование, спектроанализатор.

INTERFERENTIAL GAS SPECTRUM ANALYZER

Vladimir V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy (10 Plahotnogo, Novosibirsk 630108), Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Physics department, (383) 361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy (10 Plahotnogo, Novosibirsk 630108), Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chair of Nanosystems and optical engineering department, (383) 361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Alexandra S. Syrneva

Siberian State Academy of Geodesy (10 Plahotnogo, Novosibirsk 630108), Assistant Lecturer of Physics department, (383) 361-08-36, e-mail: aleksandra-syrneva@yandex.ru

Darya S. Mihajlova

Siberian State Academy of Geodesy (10 Plahotnogo, Novosibirsk 630108), Assistant Lecturer of Physics department, (383) 361-08-36, e-mail: daria-83@mail.ru

Questions of applicability of multibeam tunable interferometers the Fabry-Perot in gas spectrum analyzer are considered. As sensitive to structure of gas atmosphere of an element the triple-optical (prismatic) multibeam interferometer of the high permission based on use of total internal reflection phenomenon is applied.

Key words: total internal reflection, optical tunneling, spectrum analyzer.

Для целей получения молекулярных спектров поглощения газов используют методы дисперсионной инфракрасной спектроскопии (ИКС), основанные на анализе адсорбированных на поверхности газов при однократном или многократном полном внутреннем отражении (ПВО) света от поверхности с адсорбированным слоем [1], методы Фурье- спектроскопии [3], методы растровой спектроскопии [6], и др.

В призмных элементах нарушенного ПВО (НПВО) оптического анализа состава различных сред [1] электромагнитное поле светового пучка туннелирует из среды с большим показателем преломления в среду с меньшим показателем на расстояние порядка длины волны света. Взаимодействие света со средой в области туннелирования приводит к его частичному поглощению или изменению фазы световых колебаний, вышедшее из призмы излучение несёт информацию о составе среды. Чувствительность таких устройств ограничена в связи с малой длиной области взаимодействия излучения со средой.

В настоящем сообщении рассматривается комбинированное спектральное устройство, содержащее скрещённые дифракционный монохроматор и близкий по конструкции к рассмотренному в [2] призмный элемент нарушенного ПВО, в котором, как и в [1], используется эффект полного внутреннего отражения от одной из граней, но также многолучевая интерференция при отражениях света от зеркальных покрытий граней. Комбинирование диспергирующих элементов разных принципов действия, например, дифракционных и интерференционных, призмных и интерференционных описано в литературе [1,4,5].

Преимуществом применения многолучевой интерференции в спектральных газоанализаторах является возможность для каждого светового луча многократно воздействовать на каждую точку анализируемой поверхности, увеличивая тем самым чувствительность анализатора. На рис.1 схематически показана оптическая схема использования призмного многолучевого интерферометра совместно с промышленным спектрометром в качестве газоанализатора.

Картина спектра излучения 1 дифракционного монохроматора формируется в плоскости его выходной щели 2, выходящее излучение попадает в установленный по ходу луча мультиплекс – интерферометр, состоящий из плоского интерферометра 3 и призмного интерферометра 4. Плоская грань 5 призмного интерферометра является поверхностью ПВО, которая предназначена для адсорбции молекул газообразных составляющих окружающей среды и которая является чувствительной поверхностью газоанализатора. Молекулы адсорбированного слоя 6 оказываются в области

существования туннелирующего сквозь поверхность ПВО электромагнитного поля световой волны.

В фокальной плоскости линзы 7 формируется интерференционная картина и установлена диафрагма 8 с кольцевой прорезью. Прошедшее сквозь прорези диафрагмы излучение детектируется фотоприёмником 9.

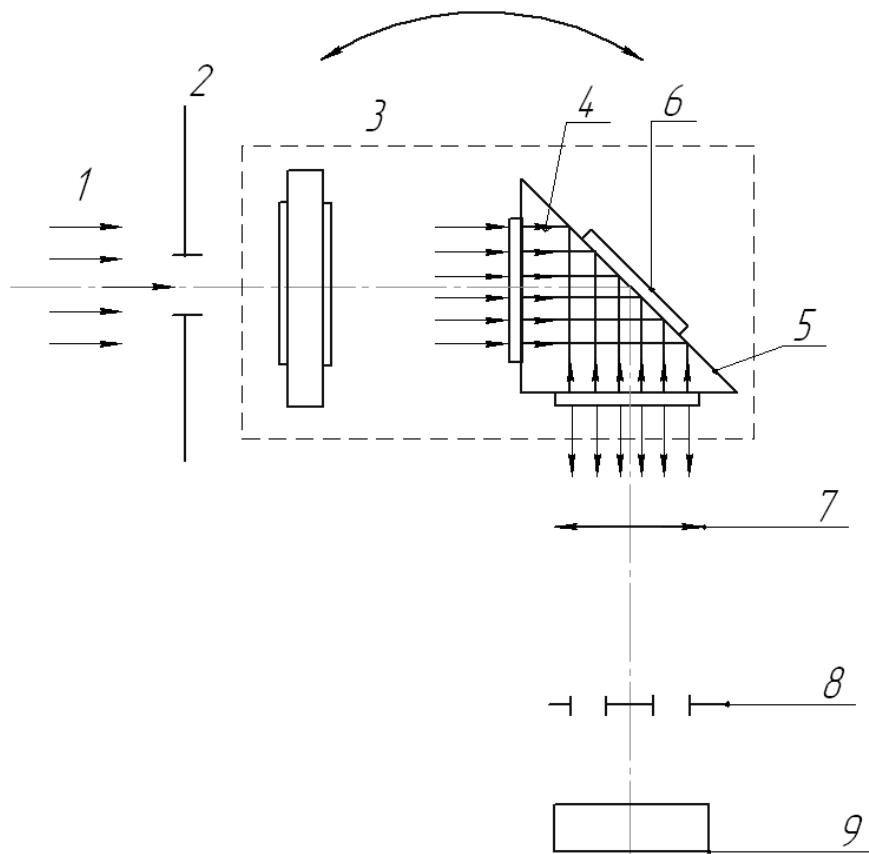


Рис. 1. Оптическая схема газоанализатора с использованием призмного многолучевого интерферометра

Свободная спектральная область призмного интерферометра много уже полосы спектра монохроматора, вырезаемой его выходной щелью, поэтому перед призмным интерферометром установлен пластинчатый интерферометр с меньшим расстоянием между зеркальными поверхностями, чем у призмного, имеющий увеличенную свободную спектральную область. Интерферометры установлены последовательно по ходу луча и образуют собой мультиплекс-интерферометр.

Для полного внутреннего отражения излучения от полноотражающей грани призмы необходимо следующее значение показателя преломления n материала призмы:

$$n \geq \frac{n_0}{\sin \beta}, \quad (1)$$

где n_0 – показатель преломления среды, окружающей призму, β – угол падения излучения изнутри призмы на полноотражающую грань. Отражённое

от полноотражающей грани излучение попадает на полупрозрачное зеркало на выходной грани призмы 4, частично отражается назад, повторяя свою траекторию, и так далее; излучение внутри призмы многократно отражается от зеркал и ПВО - грани. Такое отражение возможно, если падение лучей на зеркала нормальное.

Вышедшие из выходной грани призмы световые пучки интерферируют. Уравнение максимумов интерференционной картины интерферометра Фабри – Перо можно записать в виде [3]:

$$2nL \cos \theta = m\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots, \quad (2)$$

где $2nL \cos \theta$ – оптическая разность хода двух соседних лучей в интерферометре, θ – угол преломления падающего луча света в интерферометре, λ – длина световой волны в вакууме.

Из последней формулы видна возможность перестройки интерферометра по длинам волн как путём изменения угла падения излучения, так и изменением значения хода лучей L .

В теории резонаторов Фабри-Перо число отражений от зеркал характеризуется «эффективным числом отражений» $N_{эф}$, равным примерно 30 – 100. В такое же число раз возрастает чувствительность анализаторов адсорбционного слоя с использованием взамен рефрактометрических датчиков НПВО многолучевого трёхзеркального интерферометра.

Дифракционный монохроматор выделяет выходной щелью участок спектра $\Delta\lambda_p$, который должен быть несколько уже области дисперсии пластинчатого интерферометра 3. Поворотом дифракционной решётки можно выбирать положение участка в общей картине спектра.

Область дисперсии интерферометров Фабри-Перо определяется уравнением [4]:

$$\Delta\lambda_i = \frac{\lambda}{m_i} = \frac{\lambda^2}{2nL_i \cos \theta}, \quad (3)$$

где $m_i = \frac{2nL_i \cos \theta}{\lambda}$ – порядок интерференции в интерферометре; L_i – расстояние между его зеркалами, в случае интерферометра в виде прямоугольной равнобедренной призмы и нормального падения луча на катетную грань отсчитываемое по ходу луча; n – показатель среды между зеркалами интерферометра, i – номер интерферометра.

Ширину линии спектра пропускания интерферометра можно определить по формуле:

$$\delta\lambda_i = \frac{\lambda^2}{2N_{эф} nL_i \cos \theta}. \quad (4)$$

В рассматриваемой на рис. 1 схеме у пластинчатого интерферометра $i = 1$, у призмного $i = 2$. В случае мультиплекс-интерферометра ширина спектра линии пропускания определяется интерферометром с большей величиной L , свободная спектральная область – полосой интерферометра с меньшей величиной L [3].

Световой поток, вышедший из выходной щели монохроматора, имеет в сечении форму прямоугольника, вдоль длинной стороны которого спектральный состав не изменяется. Интерференционная картина, создаваемая светом после прохождения мультиплекс-интерферометра, имеет форму полосы, пересекаемой отрезками интерференционных концентрических колец. При фотоэлектрической регистрации интенсивности выходящего из скрещённых монохроматора и интерферометра излучения предложено [5] получающуюся интерференционную картину проецировать на диафрагму 8 с кольцеобразным отверстием, концентричным кольцам картины; отверстие пропускает часть излучения на фотоприёмник.

Работу с газоанализатором необходимо производить следующим образом. Вначале перестройкой монохроматора находят в спектре пропускания исследуемого образца линии, которые подлежат подробному исследованию, затем включают сканирование выделенной полосы спектра спектральной полосой пропускания мультиплекс – интерферометра. Сканирование производят, например, наклоном мультиплекс-интерферометра относительно направления светового потока с соблюдением параллельности смежных поверхностей пластинчатого и призмного интерферометров, угол наклона не должен превышать требуемый для изменения спектра проходящего излучения в пределах свободной спектральной области мультиплекс – интерферометра.

Сканирование спектра поворотом мультиплекс – интерферометра возможно в связи с тем, что дисперсия интерферометра не зависит от расстояния между отражающими слоями [5].

Найдём значение угла поворота мультиплекс-интерферометра относительно направления падающего на него луча при перестройке положения линии пропускания интерферометра на величину $\delta\lambda_u$. Синхронно поворачиваются входящие в его состав интерферометры и при условии равенства целому числу отношения $\frac{n_2 L_2}{n_1 L_1}$ (где n_1 и n_2 – показатели преломления пластинки интерферометра и призмы) максимумы интерференционных картин интерферометров остаются совпадающими.

Уравнения интерферометра Фабри-Перо при нормальном падении луча на входную поверхность призмы и при таком угле падения, при котором угол преломления равен θ , можно записать в виде:

$$2nL_u = m_u \lambda \Rightarrow 2nL_u \cos \theta = m_u (\lambda - \delta\lambda_u). \quad (5)$$

Можно найти, что при малых значениях угла θ :

$$\theta \approx \sqrt{2\delta\lambda_u / \lambda}. \quad (6)$$

При этом угол падения равен

$$\varphi = n_i \theta \quad (7)$$

При перестройке мультиплекс-интерферометра по длине волны на величину свободной спектральной области $\Delta\lambda_1$ угол поворота $\varphi_{кр}$ равен:

$$\varphi_{кр} = n_1 \sqrt{2\Delta\lambda_1 / \lambda} \quad (8)$$

Результаты расчётов приведены в табл. 1. Предполагается, что призмы изготовлены из кремния (ИКС-29) и стекла (СФ-46), φ_2 – максимальный угол поворота призмы, обеспечивающий перестройку в пределах свободной спектральной области, L_1 и L_2 - расчётные значения.

Таблица 1 – Расчёты спектральных характеристик газоанализаторов, использующих мультиплекс-интерферометры.

спектрометр	λ , мкм	$\Delta\lambda_p = \Delta\lambda_1$, нм	n	L_1 , мм	$\delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2$, нм	L_2 , мм	$\delta\lambda_2$, нм	φ_2 , рад
ИКС-29	5	6	3,4	0,6	0,2	18	$6,7 \cdot 10^{-3}$	0,17
СФ-46	0,5	0,15	1,5	0,56	0,005	16,8	$5 \cdot 10^{-6}$	0,037

При адсорбции на поверхность ПВО-границы призмы из газовой фазы слоя вещества, поглощающего на некоторой длине волны, полное внутреннее отражение на этой длине волны нарушается, интенсивность выходящего из призмы излучения уменьшается.

Определим эффективность взаимодействия излучения с адсорбированным на поверхности гипотенузной грани слоем молекул газа. Амплитуда E электрической компоненты световой волны в области туннелирования определяется уравнением [4,5]:

$$E = E_0 \exp(-x / \chi), \quad (9)$$

где x – расстояние от поверхности, χ – расстояние, на котором амплитуда уменьшается в e раз от значения на поверхности. Уменьшение интенсивности световой волны на расстоянии x от поверхности определяется формулой:

$$I / I_0 = (E / E_0)^2 = \exp(-2x / \chi) \quad (10)$$

Излучение дважды пересекает адсорбированный на поверхности слой под углом β , проходя в нём туда и обратно путь ℓ :

$$\ell = 2d / \cos \beta, \quad (11)$$

где d – толщина адсорбированного слоя. Адсорбированный слой имеет толщину много меньше длины волны света и находится в области максимума напряжённости E_0 электрической компоненты туннелирующей световой волны ($x=0$), поэтому в соответствии с законом Бугера для поглощения света в адсорбированном слое можно записать:

$$T_{\max} / T_{\max 0} = \exp(-N_{\text{эф}} \ell \alpha_\lambda) \approx 1 - N_{\text{эф}} \ell \alpha_\lambda \quad (12)$$

где $T_{\max} / T_{\max 0}$ – отношение пропускания интерферометра при наличии адсорбированного слоя к пропусканию в отсутствие слоя в максимуме пропускания излучения на некоторой длине волны, α_λ – коэффициент поглощения излучения в веществе адсорбированного слоя, $N_{\text{эф}} \ell \alpha_\lambda \ll 1$.

Учитывая (11) и (12), получим:

$$\Delta T / T_{\max 0} = 2N_{\text{эф}} \alpha_\lambda d / \cos \beta, \quad (13)$$

где $\Delta T = T_{\max} - T_{\max 0}$.

При изучении мономолекулярных адсорбированных на поверхности слоёв оценочно можно считать толщину адсорбированного слоя равной

$$d = \eta a_{at}, \quad (14)$$

где a_{at} – диаметр адсорбированного атома, η – коэффициент заполнения адсорбированного слоя атомами. Можно получить формулу:

$$\Delta T / T_{\max 0} = 2N_{эф} \alpha_{\lambda} \eta a_{at} / \cos \beta. \quad (15)$$

Наклонное падение излучения на грань призмы приводит к влиянию на фильтрующие свойства спектрального устройства поляризационных эффектов [4,5]. При фильтрации неполяризованного излучения каждая линия спектра разделяется на две, соответствующие расположению светового вектора в волне в плоскости падения и перпендикулярно плоскости падения, в результате одной длине волны в спектре поглощения соответствует две полосы. Для устранения эффекта устанавливают по ходу луча поляризационный ахроматический светофильтр, что приводит к уменьшению светосилы прибора.

Введение мультиплекс-интерферометра повышает разрешающую силу всего комбинированного спектрального устройства на 2–3 порядка величины.

Многолучевой трёхзеркальный интерферометр найдёт применение в оптике при создании интерференционных приборов различного назначения – для спектроскопии, при обработке оптической информации, в качестве сенсорных устройств различных датчиков и анализаторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Харрик Н. Спектроскопия внутреннего отражения. – М.: Мир, 1970. – 335 с.
- 2 ГЕО-Сибирь-2011. Т. 5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнология. Ч. 2.: сб. матер. VII Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2011», - Новосибирск: СГГА, 2011. – 259. – с. 166-168.
- 3 Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры. 1976. – 392 с.
- 4 Ахманов С. А., Никитин С. Ю. Физическая оптика : Учебник – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 656 с.
- 5 Борн М., Вольф Э. Основы оптики. - М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат. лит. 1970. – 855 с.
- 6 Шлишевский В. Б. Теория и практика светосильной растровой спектроскопии. – Новосибирск: СГГА, 2005. – 264 с.
- 7 Скоков И. В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.

© В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, А.С. Сырнева, Д.М. Михайлова, 2012

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМБИНИРОВАННЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ ФАБРИ-ПЕРО

Владимир Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой наносистем и оплотехники, тел. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Александра Сергеевна Сырнева

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ассистент кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: aleksandra-syrneva@yandex.ru

Дарья Сергеевна Михайлова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ассистент кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: daria-83@mail.ru

Рассматриваются вопросы применимости перестраиваемых интерферометров Фабри–Перо в комбинированных спектроанализаторах в сочетании с дифракционными монохроматорами. Интерферометр вводится в спектроанализатор, как приставка к монохроматору; показана возможность увеличения разрешающей силы промышленных спектрометров в десятки раз при сохранении величины свободной спектральной области, присущей дифракционным диспергирующим элементам.

Ключевые слова: спектрометр, монохроматор, многолучевой интерферометр Фабри–Перо

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THE COMBINED SPECTRAL DEVICES WITH INTERFEROMETER FABRI-PERO

Vladimir V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 10 Plahotnogo, Novosibirsk 630108, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Physics department, (383) 361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 10 Plahotnogo, Novosibirsk 630108, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Chair of Nanosystems and optical devices department, (383) 361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Alexandra S. Syrneva

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 10 Plahotnogo, Novosibirsk 630108, Assistant Lecturer of Physics department, (383) 361-08-36, e-mail: aleksandra-syrneva@yandex.ru

Darya S. Mihajlova

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 10 Plahotnogo, Novosibirsk 630108, Assistant Lecturer of Physics department, (383) 361-08-36, e-mail: daria-83@mail.ru

Here questions of applicability of reconstructed interferometers the Fabri-feather in combined spectrum analyzer in a combination to diffraction monochromators are considered. The interferometer is entered in spectrum analyzer, as a prefix to a monochromator. Here possibility of increase in resolving force of industrial spectrometers in tens times is shown at preservation of size of the free spectral area inherent in diffraction dispersing elements.

Key words: a spectrometer, a monochromator, a multibeam interferometer the Fabri-Pero.

В научных исследованиях и промышленности широко используются дифракционные спектрометры и монохроматоры. Разрешающая сила спектрометров не всегда достаточна для решения конкретных задач, поэтому применяются комбинации спектральных приборов, в частности, основанных на комбинировании диспергирующих элементов разных принципов действия, например, дифракционных и интерференционных, призмных и интерференционных [1, 2, 4]. Применение в измерительной технике различного вида многолучевых интерферометров описано в работе [3].

В настоящем сообщении рассматривается устройство и спектральные параметры спектральных приборов, использующих скрещённые дифракционные монохроматоры и многолучевые интерферометры Фабри-Перо с фотоэлектрическим детектированием сигнала (например, [5]), анализируется применение многолучевых пластинчатого и клинового интерферометров.

На рис. 1 показана оптическая схема комбинированного спектроанализатора, использующая скрещённые перестраиваемый дифракционный монохроматор и многолучевой клиновой интерферометр.

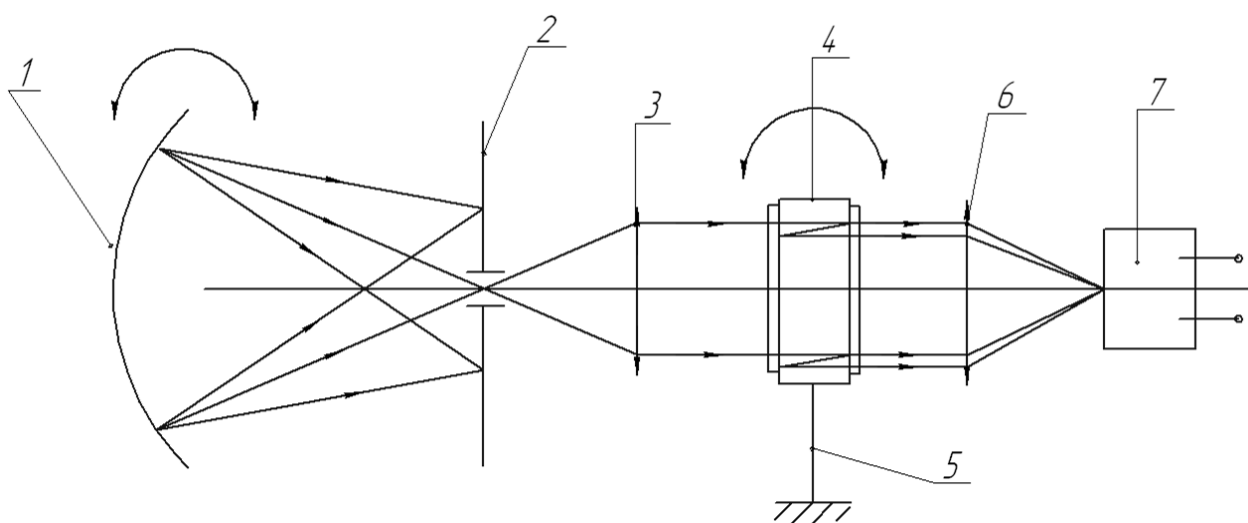


Рис. 1. Оптическая схема комбинированного спектроанализатора

Здесь дифракционный монохроматор представлен вогнутой дифракционной решёткой 1 и установленной в фокальной плоскости

диафрагмой 2 с выходной щелью. Перестройка монохроматора по спектру производится поворотом его решётки 1. Вышедшее из щели излучение проходит клиновую пластинку 4 интерферометра с полупрозрачными зеркалами на её поверхностях; в фокальной плоскости линзы 6 располагается диафрагма с прорезями, за которыми установлен фотоприёмник 7. Спектральное положение полосы пропускания клинового интерферометра может регулироваться его перемещением в своей плоскости перпендикулярно продольной оси выходной щели монохроматора. На рисунке интерферометр закреплён в механизме 5, позволяющем перемещать клиновую пластинку интерферометра поперёк светового потока. Интерференционная приставка, включающая линзу, интерференционную пластинку и механизм её перемещения, помещается в кюветное отделение промышленного дифракционного спектрофотометра.

При сочетании дифракционного монохроматора и многолучевого интерферометра в одном спектральном приборе следует учитывать разницу в физических явлениях, определяющих дисперсию света при дифракции и при многолучевой интерференции. При дифракции дисперсия обусловлена угловым отклонением выходящих из дисперсионного элемента лучей, зависящим от длины волны, а при интерференции направления выходящих лучей данной длины волны совпадают с направлениями входящих. В то же время, интенсивность выходящих из интерферометра лучей данной длины волны зависит от угла входа лучей в интерферометр. В случае клиновых интерферометров направление выходящих лучей отличается от направления входящих; соседние выходящие лучи отличаются по углу на 2ε , где ε - угол клина.

Место выхода луча из интерферометра после N отражений внутри интерферометра от одной зеркальной поверхности отстоит от места входа на расстояние

$$x = 2\varepsilon NL, \quad (25)$$

где L – расстояние между зеркальными поверхностями клинового интерферометра в месте входа луча в интерферометр. В связи с не параллельностью выходящих лучей для оценки величин интерференционных эффектов необходимо учитывать разность фаз первого входящего нормально в интерферометр луча и испытавшего в нём N отражений.

В работе [5] для случая нормального падения луча на интерферометр разность фаз между вышедшим сразу после падения на интерферометр и испытавшим N отражений лучами определяется уравнением:

$$\delta_N = (N-1) \frac{4\pi nL}{\lambda} - \frac{2N^3\varepsilon^2}{3} \frac{4\pi nL}{\lambda}, \quad (26)$$

справедливым в пренебрежении изменением фазы при отражении на поверхности клина. Здесь n – показатель преломления среды между зеркалами интерферометра. Максимумы интерференции наблюдаются при равенстве разности фаз целому числу π . Если второй член мал в сравнении с π , то (2) упрощается, становится аналогичным уравнению для интерферометра Фабри-Перо:

$$\delta_N \approx \frac{4\pi nL}{\lambda}, \quad (27)$$

и в плоскости клина наблюдаются интерференционные полосы, как при использовании плоской пластинки. Эти полосы параллельны ребру клина и находятся друг от друга на расстоянии, равном линейной величине свободной спектральной области:

$$\Delta x_u = \frac{\lambda}{2n\varepsilon}. \quad (28)$$

Значение Δx_u связано с расходимостью излучения, прошедшего выходную щель монохроматора, и приблизительно равно апертуре коллиматора этого излучения, уменьшающей расходимость до требуемого для многолучевого интерферометра уровня:

$$D_k \approx \Delta x_u \quad (29)$$

Условие малости члена с ε^2 по сравнению с π в (2) следующее:

$$nL = \frac{3\lambda}{8N^3\varepsilon^2}. \quad (30)$$

Можно найти, что в исследуемом в данной работе случае условие малости выполняется. Клиновой интерферометр располагается таким образом, что ребро его двугранного угла параллельно щели монохроматора; на длине отрезка интерферометра длиной Δx_u порядок интерференции изменяется на единицу и толщина интерферометра изменяется на $\lambda / (2n)$. Угол клина равен:

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{2n\Delta x_u} \approx \frac{\lambda}{2nD_k}. \quad (31)$$

Во избежание виньетирования за счёт выхода лучей при многократных отражениях в интерферометре за пределы области Δx_u необходимо, учитывая (1), выполнить условие:

$$\Delta x_u \geq 2\varepsilon nL. \quad (32)$$

Спектральное значение свободной спектральной области определяется формулой:

$$\Delta \lambda_u = \lambda / m = \frac{\lambda^2}{2nL}, \quad (33)$$

где $m = \frac{2nL}{\lambda}$ – порядок интерференции в интерферометре.

Из последнего уравнения можно найти, что в пределах одного порядка $\Delta \lambda / \lambda = \Delta L / L$. (34)

Диапазон перестройки спектра комбинированного устройства определяется количеством M отрезков $\Delta x_u \approx D_k$, размещающихся по длине H клиновой пластины интерферометра:

$$\Sigma \lambda = M \Delta \lambda_u = \frac{M \lambda^2}{2nL \cos \varepsilon}; \quad M = H / D_k. \quad (35)$$

На рис. 2 показана схема преобразований спектра излучения, проходящего комбинированный спектроанализатор. Здесь а) условное изображение свободной спектральной области дифракционного монохроматора, б) область спектра $\delta\lambda_p$, вырезаемая выходной щелью; при поворотах дифракционной решётки эта область перемещается по спектру; в) спектр пропускания интерферометра, характеризуемый порядками m интерференции; $\Delta\lambda_u$ - свободная спектральная область интерферометра; г) спектр излучения на выходе комбинированного спектроанализатора, $\delta\lambda_u$ - ширина полосы пропускания анализатора.

При неподвижной решётке и перестройке интерферометра по спектру перемещением клиновой пластинки поперёк направления излучения, спектральная полоса пропускания интерферометра сканирует по спектральной полосе пропускания щели, и разрешение всего устройства равно разрешению $\lambda / \delta\lambda_u$ интерферометра. Если дополнительно прибегнуть к поворотам решётки, то область перестройки спектра пропускания всего комбинированного устройства, соответственно, увеличится. Дифракционный монохроматор выделяет выходной щелью участок спектра $\Delta\lambda_p$, который должен быть несколько уже ширины $\Delta\lambda_u$ свободной спектральной области интерферометра. Поворотом дифракционной решётки можно выбирать положение участка шириной $\Delta\lambda_p$ в общей картине спектра излучения.

Ширину линии спектра пропускания клинового интерферометра, обусловленную дисперсией интерферометра, оценочно определим по формуле, аналогичной формуле плоского интерферометра:

$$\delta\lambda_u = \frac{\lambda^2}{2N_{эф}nL_u}, \quad (36)$$

где $N_{эф}$ – эффективное число лучей в многолучевом интерферометре; при близких к единице значениях коэффициента отражения R определяется формулой [2]:

$$N_{эф} \approx \pi / (1 - R). \quad (37)$$

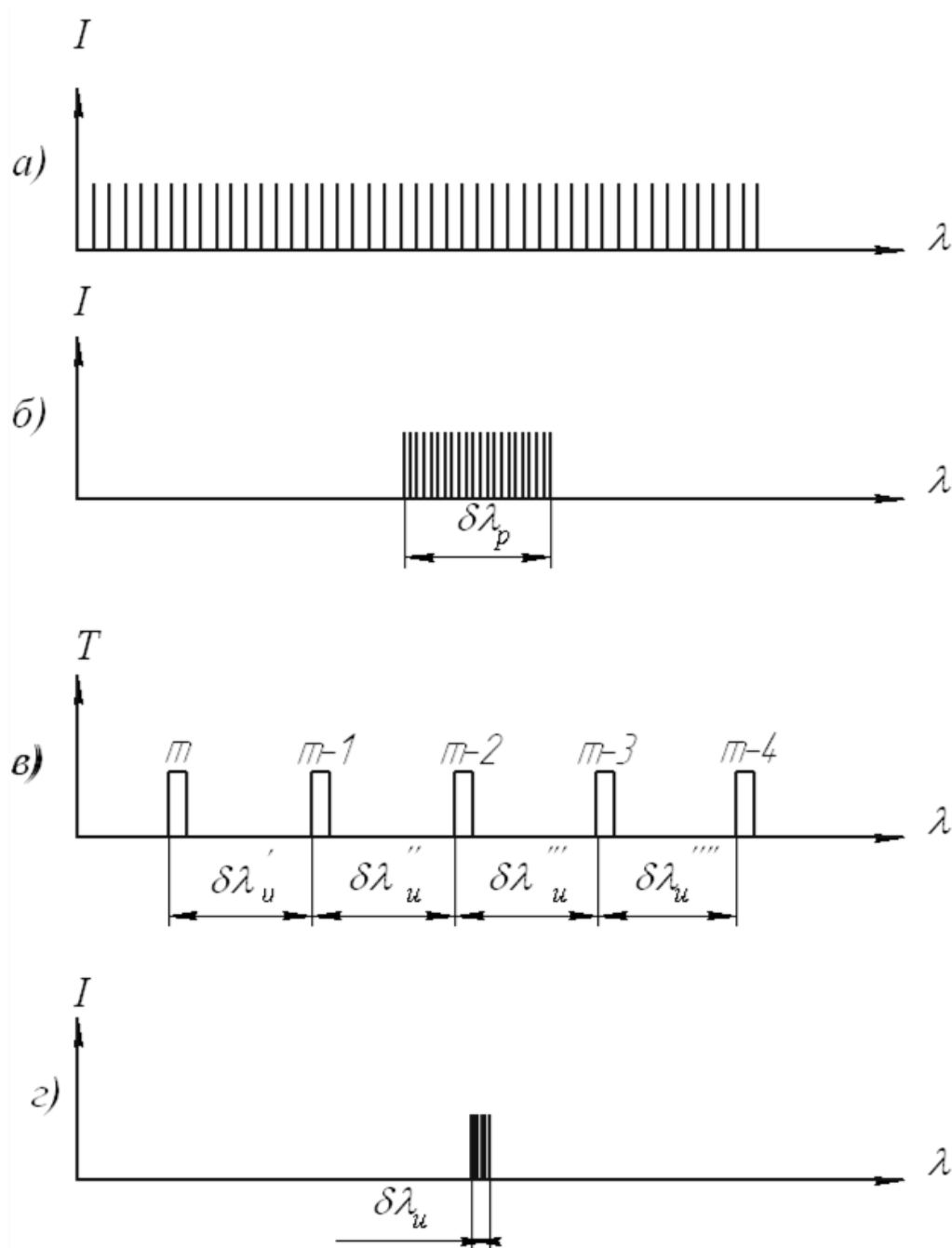


Рисунок 2 – Схема преобразований спектра излучения, проходящего комбинированный спектроанализатор

Найдём допустимое значение расходимости φ входящего в интерферометр светового потока, при которой линия пропускания существенно не расширяется. Уравнения интерферометра Фабри-Перо при нормальном падении луча на его зеркала и при таком угле падения, при котором угол преломления равен θ_m , можно записать в виде:

$$2nL_u = m\lambda \Rightarrow 2nL_u \cos \theta_m = m(\lambda - \delta\lambda_u). \quad (38)$$

Можно найти, что при малых значениях угла θ_m :

$$\theta_m \approx \sqrt{2\delta\lambda_u / \lambda} \quad (39)$$

Учитывая преломление света на поверхности пластины, получим:

$$\phi = n\sqrt{2\delta\lambda_u / \lambda} \quad (40)$$

Здесь правая часть неравенства - расходимость входящего светового потока, при которой вклад в ширину линии пропускания интерферометра, обусловленный расходимостью, равен вкладу, обусловленному дисперсией интерферометра.

Расходимость светового потока может быть вызвана дифракцией на выходной щели монохроматора. Расходимость ухудшает разрешающую силу интерферометра и может приводить к заметному расширению полосы пропускания интерферометра. Оценка дифракционной расходимости по формуле:

$$\phi_d \approx \lambda / d, \quad (41)$$

где d – ширина выходной щели, даёт для видимого диапазона спектра и ширине щели 100 мкм значение $\phi_d = 5$ мрад. Расчёт допустимого значения расходимости по (16) при $\delta\lambda_u = 0,005$ нм даёт значение $n\sqrt{2\delta\lambda_u / \lambda} = 5$ мрад. Равенство вычисленных значений означает примерное удвоение ширины полосы пропускания интерферометра; отсюда вытекает требование необходимости коллимации излучения в промежутке между дифракционным монохроматором и интерферометром, уменьшения расходимости излучения.

Коллимация с помощью линзы приводит также к расширению области засветки поверхности клинового интерферометра и уменьшению требуемого значения ε угла клина, что способствует уменьшению разности фаз интерферирующих лучей.

Пропускание комбинированного спектрального устройства можно определить как произведение коэффициентов пропускания его составных частей:

$$T = T_{\text{реш}} \cdot T_{\text{инт}}, \quad (21)$$

где $T_{\text{реш}}$ и $T_{\text{инт}}$ – коэффициенты пропускания дифракционной решётки и многолучевого интерферометра. Формулы коэффициентов пропускания для различных конфигураций этих диспергирующих элементов приведены в различных пособиях и монографиях [1-5].

Перестройку спектра пропускания включённых последовательно дифракционного и интерференционного диспергирующих элементов, можно производить двояким образом.

В первом случае, поворачивая дифракционную решётку, можно спектральную полосу пропускания решётки перемещать по спектру пропускания интерферометра, содержащего ряд узких полос пропускания, соответствующих порядкам интерференции, поочерёдно их «включая».

Во втором случае, перемещая клиновую полосу, можно сканировать спектр излучения монохроматора узкой (шириной $\delta\lambda_u$) линией спектрального пропускания интерферометра. Поворачивая дополнительно решётку монохроматора, можно выбирать в спектре пропускания исследуемого образца участки, подлежащие изучению с более высоким разрешением.

Разрешаемая комбинированным спектрометром разность длин волн определится разрешением интерферометра.

При анализе комбинированного спектрального устройства, использующего интерферометр не в виде клина, а в виде плоской пластинки, основные соотношения повторяют полученные для клина. Отличием является проведение сканирования по спектру наклоном пластинки относительно направления падающего луча. Угол наклона, требующийся для перестройки положения спектральной линии пропускания на величину свободной спектральной области, определяем, подставив в (15) вместо $\delta\lambda_u$ величину $\Delta\lambda_u$.

В качестве примера можно рассмотреть возможность использования в комбинированном приборе в качестве монохроматора спектрофотометра СФ-46 или инфракрасного спектрометра ИКС-29. Результаты расчётов для варианта с перестраиваемым многолучевым интерферометром приведены в табл. 1. Расчёты выполнены для значений длин волн второго столбца таблицы.

Таблица 1. Результаты расчёта спектральных характеристик спектрометров, скрещённых с интерферометром

спектрометр	λ , мкм	$\delta\lambda_p$, нм	L, мм	n	φ_m , рад	Δx_u , мм	R	$\Delta\lambda_u$, нм	$\lambda / \delta\lambda_u$
СФ-46	1	0,15	2	1,5	$2,6 \cdot 10^{-2}$	10	0,9	0,15	$2 \cdot 10^5$
							0,97	0,15	$6,7 \cdot 10^5$
ИКС-29	5	6	0,6	3,4	$4,5 \cdot 10^{-2}$	10	0,9	6	$2,5 \cdot 10^4$
							0,97	6	$8,3 \cdot 10^4$

Расчёты проведены для применения интерферометров в качестве приставок к спектрометрам видимого и ИК- диапазонов. Диспергирующие элементы интерферометров выполнены из стеклянной пластинки толщиной 2 мм (видимый диапазон) и кремниевой - толщиной 0,6 мм (ИК- диапазон). В варианте с переключаемыми порядками интерферометра и параметрами приставки, рассчитанными под спектрофотометр СФ-46, число переключаемых порядков интерференции и, тем самым, полос пропускания спектрального прибора $K = \frac{\Delta\lambda_p}{\Delta\lambda_u} = \frac{0,5 \cdot 10^3}{0,15} \approx 3 \cdot 10^3$. Расчётные значения разрешающей способности приборов с учётом параметров приставок составляют $(2 - 6,7) \cdot 10^5$ и $(2,5 - 8,3) \cdot 10^4$ (последние значения в ИК диапазоне).

Рассматриваемое комбинированное спектральное устройство с приставкой в виде многолучевого интерферометра может найти применение в оптике при создании спектральных приборов или в виде светофильтра с переключением спектральных узких полос пропускания, имеющих ширину, соответствующую полосам спектрометров высокого разрешения, или в виде перестраиваемого монохроматора со сверхвысоким разрешением, соответствующим многолучевым спектральным интерференционным приборам, и широкой

свободной спектральной областью, соответствующей дифракционным монохроматорам.

Использование спектрального устройства в качестве интерференционного светофильтра, имеет, кроме функции переключения спектральных полос пропускания, преимущество в том, что практически исключается ослабление прошедшего светофильтра излучения дополнительными фильтрами боковых полос пропускания, обычно необходимых в интерференционных узкополосных тонкоплёночных светофильтрах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры. 1976. – 392 с.
2. Ахманов С. А., Никитин С. Ю. Физическая оптика: Учебник – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 656 с.
3. Скоков И. В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
4. Калитеевский Н. И. Волновая оптика. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1971. – 376 с.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат. лит. 1970. – 855 с.

© В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, А.С. Сырнева, Д.С. Михайлова, 2012

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ НА ОБЪЁМНЫХ ТЕЛАХ В СРЕДЕ МАТЛАБ

Сергей Александрович Шойдин

Сибирская государственная геодезическая академия, Новосибирск, ул. Плеханова, 10, 630108, Россия, кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. 291-00-92, e-mail: shoydin@ssga.ru

В докладе представлены модельные эксперименты по дифракции света на 3-D объектах с использованием преобразования Френеля – Кирхгофа для плоских изображений.

Ключевые слова: Дифракция на объёмных телах, численные методы в голографии, спектры 3-D объектов.

THE REPORT PRESENTS THE MODEL EXPERIMENTS FOR LIGHT DIFFRACTION ON A 3-D OBJECTS USING A FLAT FRESNEL-KIRHGOFF TRANSFORMATION

Sergey A. Shoydin

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plahotnogo st., Novosibirsk, 630108, Russian Federation, Ph.D., Prof. of Nanosystems & optical engineering department, tel +7-383-291-00-92

Key words: diffraction by volume solids, numerical methods in holography, spectra of 3-D objects.

Задачи дифракции на объёмных телах имеют глубокие исторические корни и по-прежнему актуальны сегодня [1,2]. Так, в [3] показано, что иногда, в специальных случаях, существуют аналитические решения простых трёхмерных задач, например, задачи дифракции на полуплоскости. Там же видно, что, в случае двумерной задачи, решение может быть найдено через интегралы Френеля, а в случае обобщения на случай дифракции плоской волны на полуплоскости, решения приходится искать уже на более высоком уровне, уже не как решения интеграла Френеля-Кирхгофа, а как решения трёхмерных волновых уравнений в дифференциальной форме. Вместе с тем, уже в самом ходе, представленного в [3, § 11.6] решения видна подсказка. Там рассматривается случай, когда продольная (вдоль оптической оси z) волна несет информацию о третьем измерении только в виде экспоненциального множителя $e^{-jkz \sin\theta}$, что и было положено в основу наших расчётов. Следует отметить, похожий подход был предпринят Кривенковым Б.Е. и Чугуем Ю. В. в [1], когда авторы разбили исходный трёхмерный объект на несколько двумерных срезов и далее применили интегралы двумерного преобразования Френеля к каждой плоскости отдельно, получая дополнительную фазовую задержку, при распространении волны от одной плоскости дифракции к другой. Это позволило авторам сделать ряд расчётов для плоских объёмных тел. Однако, реальные эксперименты и в этой модели потребовали численных расчётов.

Наши модельные расчёты сразу проводились в среде MATLAB R2009a Portable, в приближении не очень глубоких (по продольной координате Z) тел,

что, безусловно, вносит некоторые ограничения общности. Однако полученные результаты расчётов имеют более прозрачную интерпретацию и могут быть использованы не только в задачах, решаемых в [1], но и в моделировании ряда голографических процессов.

Использование высокоуровневого программного обеспечения MATLAB внесло некоторые ограничения на быстродействие и пространственную дискретизацию изображений. Однако, полученные результаты носят модельный характер и могут быть, в случае необходимости, уточнены в рамках специальных программ, например таких, как C++, FORTRAN, или других.

Основная модельная задача сводилась к вычислению известного интеграла Френеля – Кирхгофа [4]

$$U_0(x_0, y_0) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \iint U_1(x_1, y_1) \exp\left\{\frac{jk}{2z}[(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2]\right\} dx_1 dy_1 \quad (1)$$

где $U_1(x_1, y_1)$ – распределение комплексной амплитуды поля в плоскости объекта;

$U_0(x_0, y_0)$ – распределение комплексной амплитуды поля в плоскости наблюдателя.

Нами использовалось $U_1(x_1, y_1) = U_1(x_1, y_1) \cdot \exp[j\varphi(x_1, y_1)]$, где $U_1(x_1, y_1)$ – распределение действительной амплитуды по полю в плоскости объекта, а $\varphi(x_1, y_1)$ – фаза волны, определяемая как изменение глубины точек объекта, измеренной в длинах волн с множителем 2π . Таким образом, $U_1(x_1, y_1)$ является функцией, задающей 3-D форму исследуемого объекта. Нашей целью было определение спектра Френеля (1) по известному $U_1(x_1, y_1)$, а затем получения U_2 , вычисляемого заменой в выражении (1) U_1 на U_0 и сменой знака перед фазой, что характеризует обратное распространение волны к наблюдателю, как это часто бывает в голографии (восстановленный сигнал). Уже в первых модельных численных экспериментах было показано, что предложенный метод введения третьего измерения хорошо работает в ряде практических задач.

На рис. 1 показаны три изображения А, В и С, Рис 1А соответствует U_1 , для конуса с шириной у основания 4 мм., высотой 0,2 мм. При расстоянии до плоскости наблюдения спектра $Z=1000$ мм. и $\lambda=0.53$ мкм., был рассчитан спектр U_0 . На рис. 1В показаны значения его модуля, а на рис. 1С приведена картина распределения U_2 , что соответствует обратному восстановлению изображения конуса, как простейшего 3-D объекта.

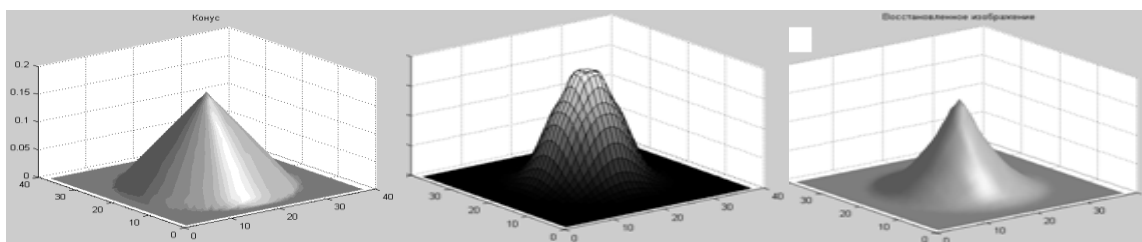


Рис. 1А

Рис. 1В

Рис. 1С

Аналогичные вычисления были проведены для полусферы (рис. 2)

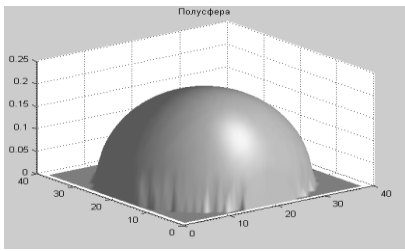


Рис. 2А

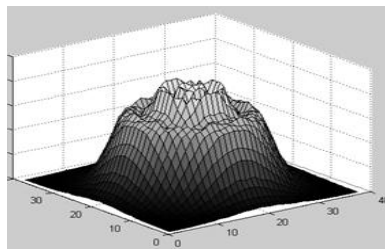


Рис. 2В

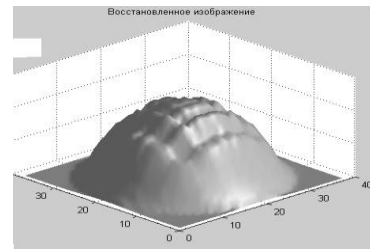


Рис. 3С

и для модельного изображения рис 3.

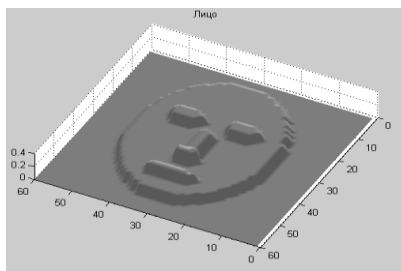


Рис. 3А

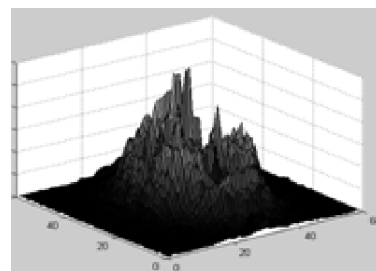


Рис. 3В

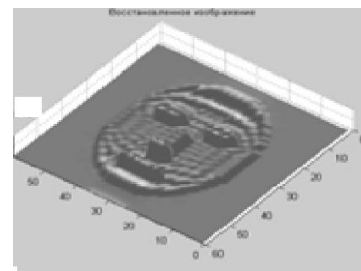


Рис. 3С

Во всех трёх случаях восстановленное 3-D изображение вполне узнаваемо, хотя имеет некоторые искажения по сравнению с исходным, природа которых связана как с дифракционными ограничениями, так и с недостаточным квантованием исходных изображений (пикселей в изображении) и их спектров. Это указывает на адекватность вычисленного спектра.

Также, в процессе работы были получены спектры голограмм, вычисленные, как результат перемножения спектров U_0 (Рисунки В) на комплексную функцию наклонного опорного пучка и последующего восстановления тем же пучком. Типичное изображение спектра в плоскости голограммы, при этом, имело вид, приведённый на рис. 4. Здесь левое изображение А – изопроекция фрагмента голограммы, а правое В – её «фотография».

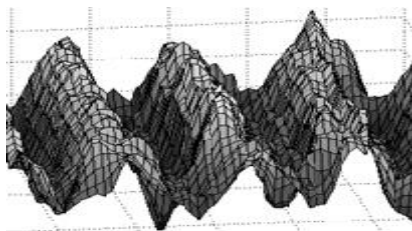


Рис. 4А

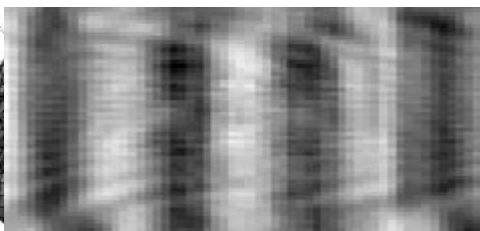


Рис. 4В

Приведённые выше модельные численные эксперименты показывают возможность применения в расчётах дифракции на 3-D объектах классического выражения интеграла Френеля –Кирхгофа, связывающего амплитуды световых полей, расположенных в двух плоскостях на расстоянии Z друг от друга вдоль

оптической оси с введением третьего измерения исследуемого 3-D объекта в виде фазы. Это облегчает модельные эксперименты с 3-D объектами и при расчёте голограмм.

Автор выражает благодарность магистранту кафедры Нефёдову И.С. за помощь в проведении вычислений в среде MATLAB.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кривенков Б.Е., Чугуй Ю.В. Fraunhofer diffraction by volumetric bodies constant thickness // Journal of the Optical Society of America. – USA. – 1989. – Vol. A 6. – № 5. – P. 617-626.
2. Уфимцев П.Я. Теория дифракционных краевых волн в электродинамике // П.Я. Уфимцев М. Основы оптики.– М.: Бином, 2007. - 366 С.
3. Борн, М. Основы оптики // М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. - 533 с.
4. Шойдин С.А. Методы оптической обработки информации // С.А. Шойдин. - Новосибирск: СГГА, 2008.- С. 31.

© С.А. Шойдин, 2012

ТЕПЛОВЫЕ СПОСОБЫ РЕГИСТРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Андрей Георгиевич Паулиш

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, г. Новосибирск, проспект акад. Лаврентьева, 2/1, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела тепловидения и телевидения, тел. (383) 316-59-10, e-mail: paulish63@ngs.ru

В работе рассмотрена схема регистрации терагерцового излучения на основе конвертера ТГц излучения в ИК с последующей регистрацией ИК излучения болометрической ИК камерой. Конвертер представляет собой ультратонкий резонансный поглотитель ТГц излучения (метаматериал) на обратную сторону которого нанесен эмиссионный слой. Поглотитель на основе метаматериалов позволяет создавать неохлаждаемые детекторы ТГц излучения с пространственным, спектральным и поляризационным разрешением, работающие в режиме реального времени.

Ключевые слова: детекторы терагерцового излучения, терагерцовое изображение, метаматериалы, многоспектральное видение, приборы субмиллиметрового диапазона, ультратонкие резонансные поглотители.

THERMAL METHODS FOR TERAHERTZ RADIATION DETECTION BASED ON METAMATERIALS

Andrey G. Paulish

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics» (NB ISP SB RAS «TDIAM») 2/1, Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Dr., associate professor, senior researcher, Department of thermal imaging and television, tel. (383) 316-59-10, e-mail: paulish63@ngs.ru

The scheme of the terahertz radiation detection utilizing the THz-to-IR conversion followed by the IR detection by means of high sensitive IR camera is proposed. The THz-to-IR converter is represented as an ultra-thin metamaterial absorber with polarization-selective resonant absorption at the prescribed wavelength. The metamaterial absorber with a configuration, «metasurface + grounded dielectric slab», provided unique possibility to design the pixels with different spectral and polarization sensitivity, using a single dielectric slab. The backside of the structure was covered with a high-performance infrared emissive layer. Absorption of terahertz radiation led to heating of the structure and increasing IR emission in the emissive layer, which was henceforth detected by the IR camera. The matrix structure consisted of cells with different spectral and polarization sensitivity, which provided multispectral terahertz imaging with polarization discrimination in a real time regime.

Key words: terahertz radiation detection systems, terahertz imaging, metamaterials, multispectral imaging, submillimeter wave devices, ultra-thin resonant absorber.

До недавнего времени терагерцовая область электромагнитного излучения (0.1–10 ТГц, длина волн 0.03–3 мм) была наименее освоенной в основном из-за отсутствия как природных (за исключением космических), так и искусственных

источников данного излучения. Однако в последнее десятилетие наблюдается бурный рост технологий создания источников терагерцового излучения, в том числе большой мощности, таких как лазер на свободных электронах в Новосибирском Академгородке. Развитие источников терагерцового излучения требует адекватного развития приёмников данного излучения для построения квазиоптических систем различного назначения, включая системы терагерцового видения. При создании матричных терагерцовых приемников можно выделить две основные проблемы. Первая связана с малой энергией фотона (0,04-0,4 мэВ), что при использовании фотонных приёмников требует глубокого охлаждения до гелиевых температур [1-3]. Вторая ключевая проблема заключается в достаточно большой длине волны излучения, что требует создания матриц большого размера с соответствующей системой считывания. Современные неохлаждаемые болометрические и пироэлектрические матричные структуры хотя и обладают некоторой чувствительностью в терагерцовой области [4, 5], однако размер пикселя матрицы не превышает 50×50 мкм², а размер всей матрицы около 20 мм, что совершенно не достаточно для получения качественного изображения с длиной волны порядка 1 мм.

В данной работе предложен метод получения изображения в терагерцовой области излучения с использованием конвертера терагерцового излучения в инфракрасное излучение [6]. ТГц-ИК конвертер представляет собой ультратонкий резонансный поглотитель терагерцового излучения толщиной много меньше рабочей длины волны [7], на обратную сторону которого нанесен тонкий эмиссионный слой с коэффициентом черноты близким к единице. Малые толщины поглотителя и эмиссионного слоя необходимы для минимизации теплоёмкости конвертера и обеспечения высокой чувствительности и быстродействия детектора. Поглощение ТГц-излучения приводит к нагреву поглотителя и увеличению интенсивности ИК излучения со стороны эмиссионного слоя, которое регистрируется высокочувствительной ИК камерой.

Ультратонкий поглотитель (в современной литературе он называется метаматериалом) представляет собой металлизированный с двух сторон диэлектрический слой толщиной много меньше рабочей длины волны. С одной стороны слоя методом контактной фотолитографии сформирован геометрический рисунок, представляющий собой частотно-избирательную поверхность (ЧИП), обеспечивающую близкое к единице поглощение на заданной длине волны [8]. Схема ТГц-ИК конвертера и его спектральные характеристики для разных ориентаций поляризации падающего излучения показаны на рис. 1.

В качестве диэлектрика использовалась плёнка полипропилена толщиной 20 микрон, толщина алюминиевой металлизации 0.4 микрона, толщина эмиссионного слоя около 10 микрон. Термодинамические расчёты показали, что эффективность преобразования ТГц излучения в ИК составляет более 30% и эта величина может быть увеличена дальнейшим снижением толщины поглотителя и эмиссионного слоя.

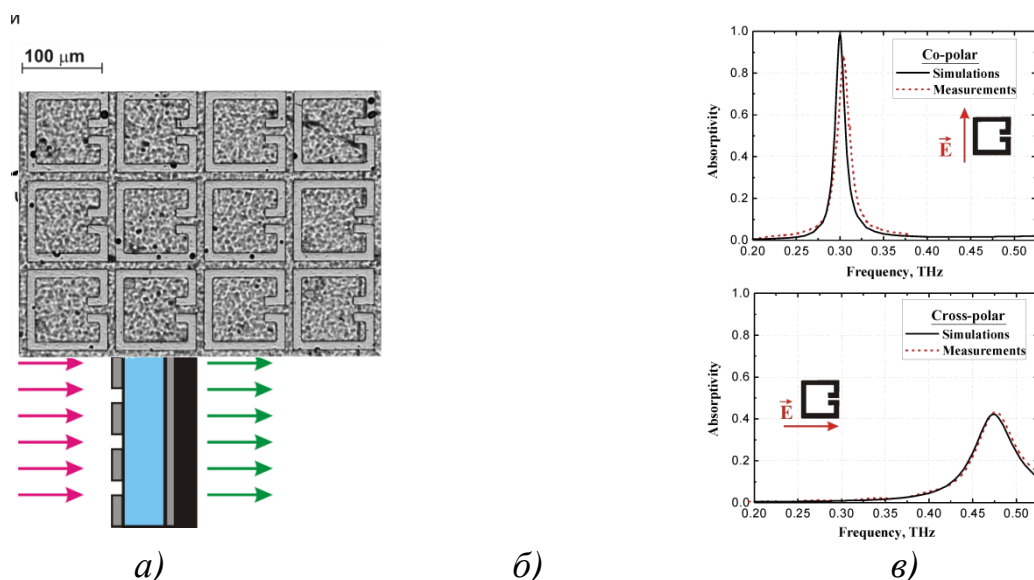


Рис. 1. (а) – схема ТГц-ИК конвертера. ЧИП – частотно избирательная поверхность, ПП – полипропилен, Al – алюминий; (б) – топологический рисунок ЧИП; (в) – спектральная характеристика поглотителя

На рис. 2 слева показана схема получения терагерцового изображения с помощью ТГц-ИК конвертера. В качестве источника терагерцового излучения использовалась лампа обратной волны (BWO) с перестраиваемой частотой в диапазоне 0.1-1.5 ТГц и выходной мощностью 3-5 мВт. Для уменьшения потерь за счет теплопроводности воздуха конвертер помещался в вакуумную камеру, снабженную входным окном для ввода терагерцового излучения и выходным окном для вывода инфракрасного излучения. На рис. 2 справа показано изображение миры 15×3 мм, освещенной ТГц излучением частотой 0.20 ТГц, имеющим гауссово распределение с шириной на полувысоте около 16 мм.

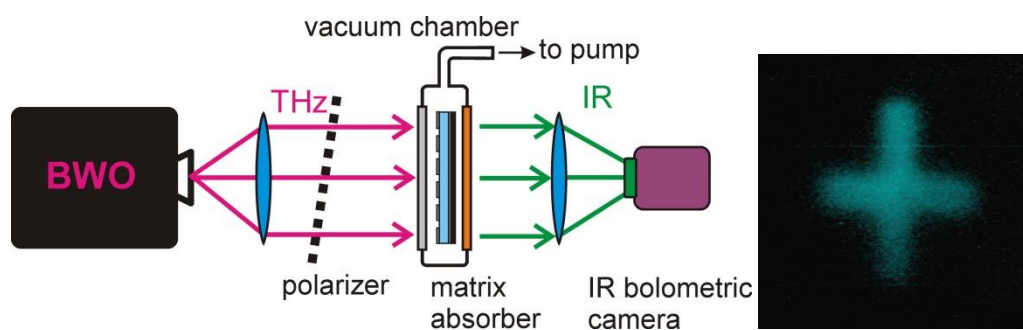


Рис. 2. Схема получения терагерцового изображения с помощью ТГц-ИК конвертера и инфракрасной камеры (слева); изображение миры 15×3 мм, освещенной ТГц излучением частотой 0.20 ТГц

Существенным преимуществом такого схмотехнического решения является то, что детектор не имеет ограничений на общий размер матрицы, так как считывание информации с матрицы происходит оптическим методом. Это существенно для визуализации излучения с длиной волны порядка одного

миллиметра, где общий размер преобразователя должен быть достаточно большим (много больше рабочей длины волны). Например, для излучения с длиной волны 1 мм, сочетающим достаточно высокую проникающую способность и приемлемое пространственное разрешение, размер матрицы должен составлять более 50 мм.

Другим преимуществом ТГц-ИК конвертера является возможность на одной плёнке изготавливать фрагменты ЧИП (пиксели) с различной спектральной и поляризационной чувствительностью. Это позволяет создавать, в зависимости от задач, целую линейку детекторов, таких как многоспектральный визуализатор (рис. 3).

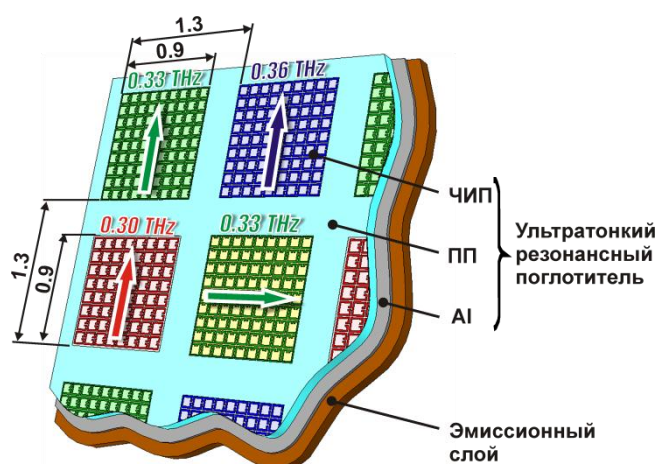


Рис. 3. Схема многоспектрального поглотителя для матричной структуры конвертера. ЧИП – частотно-избирательная поверхность, ПП – полипропилен, AL – металлический слой алюминия, Резонансные частоты каждого пикселя указаны на рисунке в терагерцах, Цифрами указаны размер пикселя и период в миллиметрах

Предельным многоспектральным детектором является спектрофотометр, в котором каждый пиксель настроен на свою длину волны. Таким образом, появляется возможность в реальном времени анализировать спектральный состав терагерцового излучения.

Другим применением конвертера является создание многоспектрального поляриметра для определения эллипса поляризации падающего излучения на заданных длинах волн. В этом случае матрица состоит из трёх пикселей, имеющих одинаковую спектральную чувствительность, повернутых относительно друг друга на 45 градусов в плоскости конвертера (Рис.4 справа). В случае падения на пиксели излучения с произвольным эллипсом поляризации, измеряя интенсивности сигналов с каждого из трех пикселей I_1 , I_2 , I_3 , можно с помощью не очень сложных формул определить исходный эллипс поляризации. Таких групп пикселей можно расположить несколько на одной структуре с разной спектральной чувствительностью, как показано на рис. 4. На рис. 4 слева показаны их спектральные характеристики. На сегодня реализована структура поляриметра на 12 длин волн.

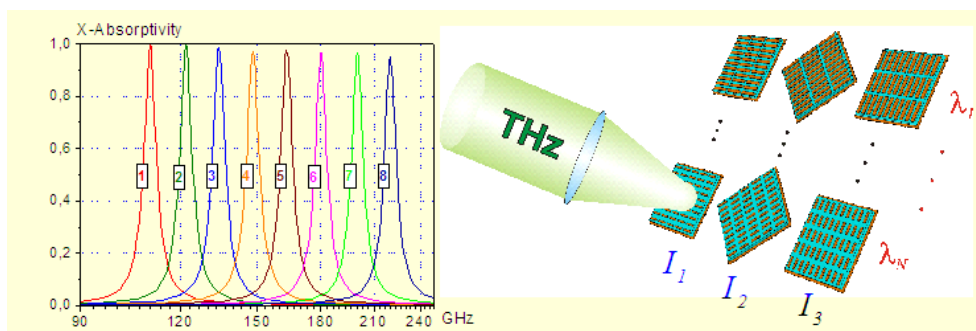


Рис. 4. Спектральные характеристики поглотителей для многоспектрального поляриметра (слева) и схема их расположения (справа)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Silverberg R.F., Ali S., Bier A., Campano B., Chen T.C., Cheng E.S., Cottingham D.A., Crawford T.M., Downes T., Finkbeiner F.M., Fixsen D.J., Logan D., Meyer S.S., O'Dell C., Perera T., Sharp E.H., Timbie P.T., Wilson G.W. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2004. – vol. 520. – P. 421.
2. Hübers H.-W. // Nature Photonics. – 2010. – N4. – P.503.
3. Lee Y.-S. Principles of Terahertz Science and Technology (Springer Science+Business Media, LLC, New York, 2009).
4. Rogalski A. Infrared Detectors // Electrocomponent Science Monographs 10. Gordon and Breach Science Publishers: Singapore 2000.
5. Pyroelectric Array Cameras: Pyrocam™ III Series [Electronic resource] / SPIRICON, Member of the Ophir Group – Англ. – Режим доступа: www.ophiropt.com / www.spiricon.com.
6. Kuznetsov S.A., Paulish A.G., Gelfand A.V., Lazorskiy P.A., Fedorinin V.N. // Applied Physics Letters. – 2011. – Vol.99. – P.023501.
7. Liu X., Starr T., Starr A.F., and Padilla W.J. // Phys. Rev. Lett. – 2010. – Vol. 104. – P.207403.
8. Munk B.A. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design / John Wiley&Sons Inc, 2000.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ТЕПЛОВИЗОРАХ С МАТРИЧНЫМИ ПРИЕМНИКАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Игорь Иванович Кремис

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, г. Новосибирск, ул. Николаева, 8, младший научный сотрудник, тел. 8-923-231-6698, e-mail: igor21738@ngs.ru

Виктор Николаевич Федоринин

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, г. Новосибирск, ул. Николаева, 8, руководитель филиала, тел. (383)-3307-240, факс: 339-17-26, 3309-106, e-mail: ktipm@amel.oesd.ru

Василий Михайлович Тымкул

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383) 343-39-37, e-mail: rektorat@ssga.ru

В статье рассмотрены методика и результаты исследования шума и чувствительности фотоэлементов матричных ФПУ для режимов, при которых наблюдалось неустойчивое поведение пикселей. Предложены методика компенсации постоянной составляющей элементов ФПУ и алгоритм компенсации дефектных элементов ФПУ. Представлены результаты разработки системы оптико-электронной обработки сигналов и системы визуализации инфракрасного изображения устойчивых к различиям в технических характеристиках применяемых ФПУ.

Ключевые слова: фотоприемник, дефектные элементы, тепловизор.

Igor I. Kremis

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 «TDIAM»), Nikolaeva street, 8, Novosibirsk, scientist, 630090, Russian Federation, tel. 8-923-231-6698, e-mail: igor21738@ngs.ru

Viktor N. Fedorinin

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 «TDIAM»), Nikolaeva street, 8, Novosibirsk, 630090, the head of branch, Russian Federation, tel. (383) 3307-240, e-mail: ktipm@amel.oesd.ru

Vasiliy M. Tymkul

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA) 10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation, professor, the Department of nanosystems and optotechnique

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF PERSPECTIVE SYSTEM FOR OPTICAL-ELECTRONIC PROCESSING OF SIGNALS IN THERMAL IMAGER WITH MATRIX RADIATION RECEIVERS

In this paper we have considered the methods and results of noise and sensitivity study of matrix photodetectors (FPU) photocells for mode, under which the unstable behavior of the pixels

have been observed. Methods for compensations the constant forming of FPU element and algorithm for FPU fault element compensations are proposed. The results of system optometrist-electronic processing signal development and systems for visualizations of infrared images stable for differences in used FPU technical features are presented.

Key words: photodetector, defective elements, thermal imager.

В настоящее время, все более широко применяются тепловизоры на основе матричных приемников излучения. В этой связи, целесообразным является создание системы обработки сигналов, легко адаптируемой к фотоприемникам разного типа.

Кроме того, применение единой системы оптико-электронной обработки сигналов для различных фотоприемников требует применения алгоритмов и методов, которые позволяют учитывать текущие характеристики применяемого фотоприемника и эффективно устранять остаточный геометрический шум изображения. Это в свою очередь требует изучения стабильности параметров диодов КРТ в используемых фотоприемниках.

В экспериментах изучения стабильности параметров фотоэлементов приемника использовались тепловизионные приборы (ТВП), построенные на основе ФПУ производства фирмы «Софрадир» 320×256 , ИФП СО РАН 320×256 и ФГУП «НПО «Орион» 384×288 . Рабочий диапазон длин волн исследуемых приемников соответствует дальней инфракрасной области от 8 до 14 мкм и колеблется в пределах от $\lambda_1 = 7,7$ мкм до $\lambda_2 = 10,5$ мкм.

Предварительный анализ массивов данных, получаемых с ФПУ позволил выделить следующие группы дефектных элементов:

- Дефектные по шуму элементы (ДШЭ);
- Элементы с постоянным уровнем сигнала;
- Дефектные по чувствительности элементы (ДЧЭ) – элементы с чувствительностью, существенно превышающей пределы установленных порогов неравномерности чувствительности по всей матрице.

Для выяснения поведения ДШЭ и ДЧЭ, были проведены исследования шума и чувствительности фотоэлементов ФПУ при режимах приемника, для которых наблюдалось неустойчивое поведение пикселей и выработаны алгоритмы обнаружения элементов с шумом и чувствительностью, превышающими некоторые пороговые значения.

При этом были реализованы следующие методические положения:

1. Выработка алгоритмов обнаружения ДШЭ и ДЧЭ;
2. Исследование шума и чувствительности пикселей при каждом новом включении прибора, т. е. при прохождении полного цикла заморозки ФПУ от 293 до 77 К;
3. Исследование шума и чувствительности пикселей при текущем включении прибора в зависимости от температуры входного потока ИК-излучения;

4. Исследование поведения пикселей обнаруженных по критерию, выработанному в п. 1, дефектных по шуму и чувствительности элементов для условий в соответствии с п. 2 и п. 3.

По результатам обработки данных были получены данные, отображающие поведение шума и чувствительности элементов ФПУ, а также поведение ДШЭ и ДЧЭ [1, 2].

Недостатком существующих алгоритмов обнаружения и компенсации ДЭ, описанных в [3, 4], является необходимость обеспечения дополнительных функций, осуществляющих периодическую, в процессе работы, калибровку прибора, предназначенную для выполнения нового цикла обнаружения дефектных элементов. Это необходимо для учета нестабильности структуры элементов ФПУ на основе КРТ, в результате которой с течением времени на изображении появляются элементы в виде темных или светлых пикселей. Кроме того, указанные алгоритмы предъявляют жесткие требования на качество обнаружения дефектных элементов, поскольку необнаруженные ДЭ будут резко выделяться на малоконтрастных изображениях.

Для устранения вышеуказанных недостатков был разработан алгоритм компенсации дефектных фоточувствительных элементов, адаптивный к шуму фотоприемника [5].

На рис. 1 представлены изображения, показывающие эффективность применения алгоритма.

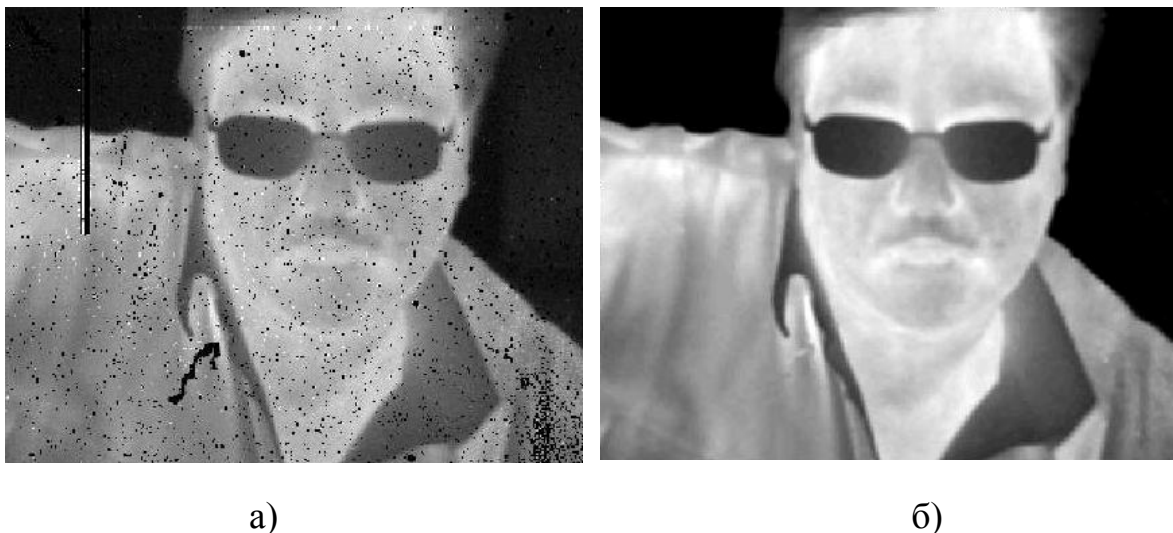


Рис. 1. Изображения полученные: без применения алгоритма компенсации ДЭ (а); с применением алгоритма компенсации ДЭ (б)

Для формирования на фоточувствительной области приемника равномерного теплового фона и выполнения эффективной компенсации постоянной составляющей элементов ФПУ, предлагается методика компенсации, основанная на формировании равномерной засветки ФПУ по сцене наблюдения и при этом не требующая значительных вычислительных ресурсов.

При этом на фоточувствительные элементы ФПУ всегда будет поступать поток излучения, пропорциональный усредненному потоку сцены наблюдения, и, в конечном итоге, это способствует повышению качества тепловизионного изображения (рис. 2). Это также избавляет ТВП от систем контроля и управления опорными источниками излучения и позволяет снизить показатели массы, габаритов, и энергопотребления электронной системы ТВП. При этом исключается время, необходимое для установки величины потока опорного источника, пропорционально входному потоку наблюдения, так как поток, поступающий на ФПУ после элемента расфокусировки, гарантированно пропорционален входному потоку сцены наблюдения, тем самым достигается независимость компенсации постоянной составляющей элементов от динамики изменения потока энергии сцены наблюдения.



а)



б)

Рис. 2. Изображения, полученные при компенсации: по металлической заслонке (а); по сигналам сцены наблюдения (б)

Оптическая эквивалентная схема, поясняющая методику компенсации постоянной составляющей элементов ФПУ, показана на рисунке 3. Сущность методики состоит в том, что компенсацию постоянной составляющей элементов осуществляют посредством введения в оптический тракт ТВП расфокусирующей системы 3. При перемещении расфокусирующей системы из позиции 3' в позицию 3, происходит смещение плоскости изображения 5 в плоскость холодной диафрагмы 4.

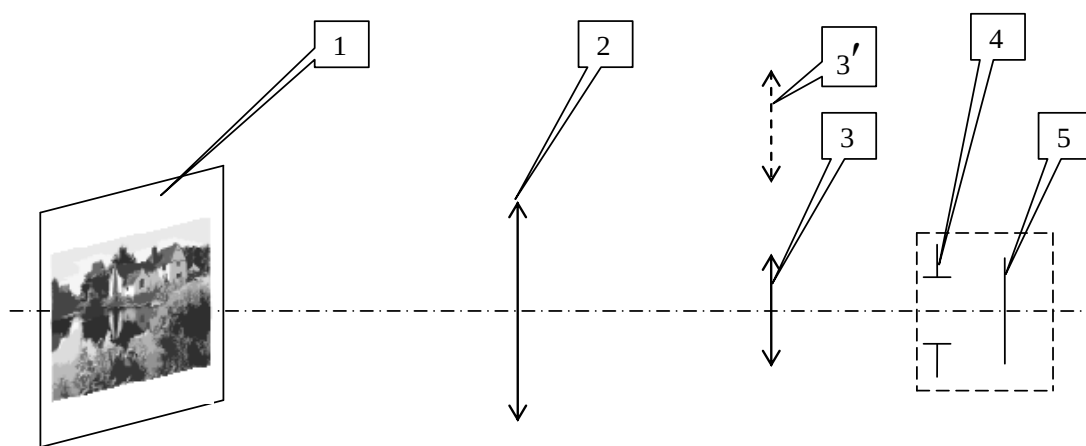


Рис. 3. Оптическая эквивалентная схема объектива ТВП с применением расфокусирующей системы:

1 – наблюдаемая сцена в пространстве предметов; 2 – объектив ТВП; 3, 3' – расфокусирующая система; 4 – плоскость холодной диафрагмы; 5 – плоскость изображений

При этом на фоточувствительные элементы ФПУ всегда будет поступать поток излучения, пропорциональный усредненному потоку сцены наблюдения, и, в конечном итоге, это способствует повышению качества тепловизионного изображения (рис. 3). Это также избавляет ТВП от систем контроля и управления опорными источниками излучения и позволяет снизить показатели массы, габаритов, и энергопотребления электронной системы ТВП. При этом исключается время, необходимое для установки величины потока опорного источника, пропорционально входному потоку наблюдения, так как поток, поступающий на ФПУ после элемента расфокусировки, гарантированно пропорционален входному потоку сцены наблюдения, тем самым достигается независимость компенсации постоянной составляющей элементов от динамики изменения потока энергии сцены наблюдения.

Также, на основе предложенной методики компенсации была разработана методика анализа чувствительности ТВП. Методика основана на выражении для пороговой температурной чувствительности тепловизоров при работе по неоднородному объектно-фоновому полю температур и позволяет оценить влияние неоднородности поля излучения на температурную чувствительность ТВП [6].

Разработанная на основе проведенных исследований перспективная система оптико-электронной обработки сигналов (ПСОЭОС), позволяет поддерживать работу с ФПУ отличающимися производителем, форматом и характеристиками фоточувствительных элементов, без изменения конструкции модуля системы и без необходимости перепрограммирования его элементов. Модуль системы имеет габариты 75x75x8 мм, массу 0,038 кг и потребляет мощность 2,2 Вт.

Для полноценного функционирования системы перспективной оптико-электронной обработки сигналов достаточно ее совместного применения с модулем системы предварительной обработки сигналов. При этом для

первоначальной и текущей, в процессе работы, настройки прибора потребуются участие оператора, с целью обеспечения внешних условий калибровки. Наибольшую эффективность применения ПСОЭОС находит в случае его использования в составе модульной системы визуализации инфракрасного изображения для ТВП на основе матричных ФПУ [7].

Модульное построение системы визуализации позволяет производить добавление любых функциональных модулей в целях соответствия требованиям, предъявляемым к конкретному тепловизору, что позволяет добиться следующих показателей применения:

- Повышение надежности;
- Расширение возможностей использования системы в отношении ассортимента тепловизоров, повышение унификации;
- Снижение удельной трудоемкости при разработке и эксплуатации электронной системы.

Таким образом, результатом проведенных исследований фоточувствительных элементов ФПУ, является комплекс разработок, включающий методы и алгоритмы предназначенные для применения в ПСОЭОС, который позволяет снизить габариты, массу и энергопотребление электронной системы ТВП, обеспечивает качественную компенсацию постоянной составляющей фоточувствительных элементов независимо от динамики и диапазона изменения входного потока излучения. Что в конечном итоге способствует повышению эффективности применения ТВП построенных на основе матричных приемников излучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кремис И.И. Результаты исследования чувствительности фотоэлементов матричных КРТ фотоприемников в различных температурных режимах // Прикладная физика. – 2010. – № 4. – С. 91–99.
2. Кремис И.И. Исследование шума сигнала фотоэлементов матричных фотоприемников в различных температурных режимах // Научные технологии. – 2010. – № 2. – Т. 11. – С. 59–70.
3. Болтарь К.О., Грачев Р.В., Полунеев В.В. Определение дефектных элементов матричных тепловизионных приемников в процедуре двухточечной коррекции // Прикладная физика. – 2009. – № 109(1). – С. 42–45.
4. Грачев Р.В. Калибровка параметров тепловизионной матрицы для двухточечной коррекции в блоке электронной обработки на базе микроконтроллера МС-24 // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. – 2008. – Вып. 3. – С.148–156.
5. Пат. № 2412554. Российская Федерация, МПК H04N5/335. Способ компенсации дефектных фоточувствительных элементов многоэлементного фотоприемника / Кремис И.И.; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН. – № 2010102391/09; заявл. 25.01.2010; опубл. 20.02.2011.
6. Тымкул В.М., Тымкул Л.В., Кремис И.И. Методика анализа температурной чувствительности тепловизоров «смотрящего» типа на основе матричных приемников излучения // ГЕО-Сибирь-2011. – Т. 5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии. Ч. 1.: сб. матер. VII Междунар. науч. конгресса

«ГЕО-Сибирь-2011», 19–29 апреля 2011 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2011. – С. 25–27.

7. Пат. 98311. Российская Федерация, МПК H04N5/33. Электронная система визуализации инфракрасного изображения для матричных тепловизоров / Кремис И.И.; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН. – № 2010116724/09; заявл. 27.04.2010; опубл. 10.10.2010.

© И.И. Кремис, В.Н. Федоринин, В.М. Тымкул, 2012

ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ УФ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И МЕДИЦИНЫ

Александр Михайлович Разжев

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией импульсных газоразрядных лазеров, Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, просп. Лаврентьева 13/3, тел. (383) 330-62-14, e-mail: razhev@laser.nsc.ru

В статье рассмотрены процессы взаимодействия мощного импульсного ультрафиолетового лазерного излучения с различными материалами, металлами, полимерами, биополимерами. Показана роль фотохимического и теплового механизмов в процессе абляции лазерным излучением в широком диапазоне длин волн УФ области спектра и плотностей энергии. Предложены новые оптические технологии создания субмикронных структур в полимерных и полупроводниковых материалах и новые методы лечения в медицине, в частности коррекции аномалий рефракции глаза путем абляции роговицы лазерным излучением 193 и 223 нм.

Ключевые слова: импульсный, ультрафиолетовый эксимерный лазер, короткая длительность, плотность энергии, абляция, медицина, офтальмология, коррекция близорукости, дальнозоркости.

OPTICAL TECHNOLOGIES WITH THE USE OF THE PULSED UV LASERS FOR MICROELECTRONICS AND MEDICINE

Alexander M. Razhev

Professor, Head of the Laboratory of Pulsed Gas Discharge lasers, Institute of Laser Physics SB RAS. 13/3, Ac. Lavrentyev's prosp., Novosibirsk, 630090, Russia, tel. +7 (383) 330-62-14, e-mail: razhev@laser.nsc.ru

The processes of interaction of high power pulsed ultraviolet laser emission with different materials such as the polymers, cornea of the human eye are presented. The role of the photochemical mechanism in the ablation process under laser emission in wide area of UV spectrum wavelengths and energy density has been shown. New optical technology for creation of submicron structure in the polymeric and semiconductor materials and new methods of the healing different diseases in medicine, particularly for the correction of the anomaly of eye refraction using the ablation of the cornea by laser emission of 193 and 223 nm are proposed.

Key words: pulsed, ultraviolet laser, short duration, energy density, ablation, medicine, ophthalmology, microelectronics, submicron structure.

Создание импульсных ультрафиолетовых и, прежде всего, газоразрядных эксимерных лазеров [1-4] открыло возможность разработки новых оптических методов и технологий для решения ряда важнейших практических задач в таких областях как микроэлектроника, фотолитография [5], медицина [6].

Для реализации таких технологий используются мощные импульсные лазеры такие как эксимерные лазеры, на длинах волн 193 нм (ArF), 223 нм (KrCl), 248 нм (KrF), 308 нм (XeCl), 353 нм (XeF), 337 нм (N₂). При длительности 5-20 нс импульсная мощность излучения достигает 1-30 МВт [7].

Новые оптические лазерные методы и технологии, которые описываются в данной работе, разработаны с использованием процесса абляции диэлектрических конденсированных сред (полимеров, биотканей) импульсным ультрафиолетовым лазерным излучением. Абляция возникает в результате сильного поглощения УФ квантов лазерного излучения с большой энергией 4-6,5 эВ в течение времени значительно меньшего характерного времени теплопроводности данного вещества. Опишем некоторые основные положения классической лазерной абляции. Воздействие лазерного импульса длительностью τ и плотностью мощности q на поверхность вещества, можно разделить на последовательные стадии [8]. На начальной стадии лазерная энергия, поглощенная в скин-слое становится источником тепловой волны, распространяющейся в глубь вещества в результате теплопроводности. При достаточно большой плотности мощности лазерного излучения по веществу начнет распространяться волна испарения, скорость которой будет зависеть от плотности и удельной энергии испаренного материала. Волна испарения догонит тепловую волну к моменту времени t , после чего процесс станет чисто испарительным, т.к. теплопроводность перестанет играть заметную роль, а абляция материала будет определяться газо- и гидродинамикой разлета продуктов деструкции материала. Такой эффект имеет место при плотностях мощности, превышающих 10^6 Вт/см², при этом глубина абляции d будет определяться плотностью энергии $F=q\tau$. Момент времени t разделяет два физически различных процесса взаимодействия лазерного импульса с материалом [9]. При длинных лазерных импульсах ($\tau > t$) процесс абляции определяется процессом теплопроводности, т.е. фронт абляции движется по веществу, температурное поле которого сформировано за счет диффузии тепла из области поглощения лазерного излучения. В этих условиях испаряется тонкий слой прогретого вещества и велика глубина и степень тепловой деструкции неиспаренной части материала. При коротких лазерных импульсах $\tau \ll t$ (на практике это импульсы микро- и наносекундной длительности) волной испарения охвачено все прогретое вещество, и зона тепловых повреждений в конденсированной фазе будет очень узкой вблизи абляционной поверхности. Размер этой зоны будет уменьшаться с укорочением длительности импульса. Описанная выше ситуация имеет место при абляции таких материалов как металлы, т.е. в условиях, когда вся энергия целиком поглощается в тонком скин-слое, а теплопроводность металлов относительно велика. В случае диэлектрических материалов, таких как полимеры, биоткани, лазерный импульс проникает в глубь материала (на десятки-сотни микрон), причем энергия лазерного импульса, распространяясь в объеме материал, уменьшается в глубину по экспоненциальному закону. Коэффициент поглощения УФ лазерного импульса определяет эту глубину для большинства полимеров и биополимеров и имеет большую величину 10^3 - 10^6 см⁻¹. В начальной стадии процесса взаимодействия импульсного УФ излучения с полимерами внутри вещества будет происходить одноквантовый разрыв многих химических связей и электронное возбуждение молекул вещества. Таким образом, в отличие от абляции короткими импульсами металлов, где главным

является тепловой механизм взаимодействия, в диэлектриках возникает еще и фотохимический механизм взаимодействия. Поэтому при исследовании и использовании процесса абляции диэлектриков необходимо рассматривать два качественно различных механизма взаимодействия – фотохимический [10-14] и тепловой [15-17]. Внешнее проявление действия этих механизмов можно видеть на рис. 1, а) и б). Было показано, что абляция полимерных материалов таких как полиэтилентерефталат (ПЕТ), полиметилметакрилат (ПММА), полиимид и др., под действием излучения ArF-лазера (193 нм) или KrF-лазера (248 нм) с короткой длительностью импульса ($\tau = 2 \times 10^{-8}$ с) происходит без оплавления с субмикронной точностью абляционной границы материала в области поглощенного излучения (рис. 1, а). Термическая деструкция материала в этих условиях является незначительной. Для объяснения этого эффекта был предложен фотохимический механизм взаимодействия, заключающийся в прямых одноквантовых разрывах химических связей в полимерных цепях. В результате происходит диссоциация молекул из электронно-возбужденного состояния, в котором они оказываются после поглощения кванта с большой энергией.

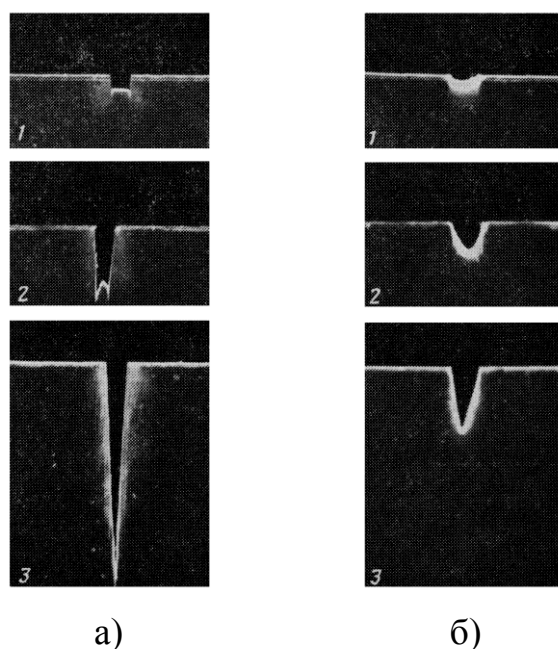


Рис. 1. Профиль зоны абляции, образующейся в пленке ПЕТ, полученный воздействием лазерного излучения. Ширина падающего пучка 100 мкм (на картинке сверху). а) $\lambda = 248$ нм; б) $\lambda = 353$ нм [16, 17]

При высокой плотности мощности излучения, фокусируемого на поверхность обрабатываемого материала создаются условия, при которых количества квантов достаточно не только для разрыва связей между полимерными цепями и внутри цепей между отдельными молекулами (мономерами), но и для разрыва химических связей внутри молекул (типа *C-C* или *C-H*, например в полимерах). Для фотохимического механизма абляции

характерной является зависимость толщины испаряемого слоя от дозы падающего излучения [10].

В работах [11-14] было показано, что процесс абляции имеет пороговый характер, т.е. ростом плотности мощности после достижения определенной для данного материала величины, происходит скачкообразное увеличение толщины удаленного за импульс слоя, которая изменяется от 10^{-4} до $>10^{-1}$ мкм/имп. Такой процесс абляции нельзя уже объяснить фотохимическим механизмом абляции. Поэтому в [14] для объяснения порогового характера процесса абляции был предложен тепловой механизм, согласно которому диссоциация молекул происходит в основном электронном состоянии. Подтверждением существования теплового механизма абляции является логарифмическая зависимость толщины удаленного за один импульс слоя от плотности энергии лазерного излучения [14-17]. Поскольку фотохимический процесс абляции принципиально исключить нельзя, то мы предлагаем рассматривать процесс абляции как результат совместного действия фотохимического и теплового механизмов деструкции полимера в условиях, когда плотность мощности лазерного импульса превышает пороговое значение для данного материала.

На рис. 1 при оценке зоны абляции с точностью ~ 1 мкм были выделены два характерных случая: прямоугольный профиль зоны абляции без заметных следов оплавления (рис. 1, а) и округлый оплавленный (рис. 1, б). Обнаруженное различие хорошо коррелирует с коэффициентом поглощения в ПЕТ излучения данных длин волн. В первом случае эта величина была равна 10^4 см^{-1} вблизи длины волны 250 нм, а втором $< 10^2 \text{ см}^{-1}$ для излучения длиннее 340 нм.

Описанный выше процесс абляции с использованием импульсных УФ лазеров послужил основой для применения УФ эксимерных лазеров в микротехнологии и фотолитографии, в частности, для сухого и ионного травления, а также вакуумной очистки поверхности. В многослойной фотолитографии УФ эксимерные лазеры уже используются в технологиях производства СБИС.

Наиболее эффективным оказалось применение импульсных УФ эксимерных лазеров в медицине и, в частности, в офтальмологии. Американскими учеными было предложено [18, 19], а нами впервые в мире реализовано в медицинской практике применение лазеров с длиной волны 193 и 223 нм для коррекции аномалий рефракции глаза человека (близорукости, дальнозоркости), включая нами же разработанный всем хорошо известный метод коррекции ЛАСИК [20, 21]. Впервые в мире мы осуществили высокоэффективное лечение УФ лазерным излучением герпетических кератитов, а также открытоугольной глаукомы. На фото – созданные нами УФ лазерные офтальмологические системы (рис. 2).



Рис. 2. УФ лазерные офтальмологические системы

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ищенко В.Н., Лисицын В.Н., Ражев А.М. Мощная сверхсветимость на эксимерах ArF, KrF, XeF в электрическом разряде. // Письма в ЖТФ. – 1976. – т. 2. – Вып. 18. – С. 839–842.
2. Ishchenko V.N., Lisitsyn V.N., Razhev A.M. Superradiative Rare Gas Halide Lasers Excited by Electric Discharge // Appl. Phys. – 1977. – Vol. 12. – № 1. – P. 55–58.
3. Ishchenko V.N., Lisitsyn V.N., Razhev A.M. Efficient Discharge Pumping XeCl Laser // Opt. Commun. – 1977. – Vol. 21. – № 1. – P. 30–33.
4. Ищенко В.Н., Лисицын В.Н., Ражев А.М. О частотном режиме работы эксимерного лазера на KrF // Письма в ЖТФ. – 1977. – Т. 3. – Вып. 14. – С. 690–693.
5. Srinivasan R., Leigh W.J. Ablative photodecomposition: Action of far-ultraviolet (193 nm) laser radiation on poly (ethylene terephthalate) films // J. Amer. Chem. Soc. – 1982. – Vol. 104. – P. 6784–6785.
6. Muller D. Excimer lasers in medicine // Lasers and Applications. – 1986. – Vol. 5. – № 5. – P. 85–89.
7. Ищенко В.Н., Кочубей С.А., Ражев А.М. 30 МВт электроразрядный KrF лазер с КПД 2,5 % // Квантовая электроника. – 1986. – Т. 13. – № 5. – С. 1078.
8. Афанасьев Ю.В., Демченко Н.Н., Завестовская И.Н., Исаков В.А., Канавин А.П., Урюпин С.А., Чичков Б.Н. Моделирование абляции металлов ультракороткими лазерными импульсами // Известия АН СССР. – Сер. физическая. – 1999. – Т. 63. – № 4. – С. 675.
9. Исаков В.А. Обработка материалов сверхкороткими лазерными импульсами // Лазер-Информ. – 2003. – № 16. – С. 8–12.
10. Валиев К.А., Великов Л.В., Душенков С.Д., Митрофанов А.В., Прохоров А.М. Эффект фототравления полимеров под действием ультрафиолета // Письма в ЖТФ. – 1982. – Т. 8. – № 1. – С. 36–36.
11. Srinivasan R., Mayne-Banton V. Self-developing photoetching of poly (ethylene terephthalate) films by far-ultraviolet excimer laser radiation // Appl. Phys. Lett. – 1982. – Vol. 41. – № 6. – P. 576–578.
12. Srinivasan R. Kinetics of the ablative photodecomposition of organic polymers in the far ultraviolet (193 nm) // J. Vac. Technol. – 1983. – Vol. B1. – № 4. – P. 923–925.
13. Garrison B.J., Srinivasan R. Microscopic model for the ablative photodecomposition of polymers by far ultraviolet radiation (193 nm) // Appl. Phys. Lett. – 1984. – Vol. 44. – № 9. – P. 849–851.
14. Brannon J.H., Lankard J.R., Baise A.J., Burns F., Kaufman J. Excimer laser etching of polyimide // J. Appl. Phys. – 1985. – Vol. 58. – № 5. – P. 2036–2043.
15. Andrew J.E., Dyer P.E., Forster D., Key P.H. Direct etching of polymeric materials using a XeCl laser // Appl. Phys. Lett. – 1984. – Vol. 43. – № 8. P. 717–719.

16. Алифанов В.Н., Ищенко В.Н., Кочубей С.А., Лантух В.В., Пятин М.М., Ражев А.М., Рыданных О.В., Хохлов И.Г., Цибизов А.В., Чеботаев В.П. Травление диэлектриков импульсным УФ лазерным излучением // Известия АН СССР. Сер. физич. – 1988. – Т. 52. – № 6. – С. 1149–1154.
17. Ищенко В.Н., Кочубей С.А., Лантух В.В., Пятин М.М., Ражев А.М., Чеботаев В.П. Фотоиспарение материалов мощным УФ излучением. Некоторые применения // Известия АН СССР. – Сер. физич. – 1987. – Т. 51. – № 8. – С. 1425–1430.
18. Trokel S.L., Srinivasan R., Braren B. Excimer laser surgery of the cornea // Amer. J. Ophthalmology. – 1983. – Vol. 96. – № 6. – P. 710–715.
19. Puliafito C.A., Steinert R.F., Deutsch T.F. Excimer laser ablation of the cornea and lens // Ophthalmology. – 1985. – Vol. 93. – № 6. – P. 741–748.
20. Ищенко В.Н., Кочубей С.А., Лантух В.В., Пятин М.М., Ражев А.М., Субботин В.М., Чеботаев В.П. Использование УФ излучения эксимерных лазеров в микрохирургии глаза // Оптика и спектроскопия. – 1987. – Т. 63. – Вып. 5. – С. 1132–1138.
21. Chebotayev V.P., Ishchenko V.N., Iskakov I.A., Kochubei S.A., Lantukh V.V., Pyatin M.M., Razhev A.M. UV excimer lasers in eye microsurgery // Lasers in the Life Sciences. – 1988. – Vol. 2. – № 4. – P. 271–284.

© А.М. Ражев, 2012

ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРИБАЛЛИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОБРАТНОГО МЕТАНИЯ

Сергей Григорьевич Губин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры специальных устройств и технологий СГГА, тел. 89139059035, e-mail: yura6810@mail.ru

В данной статье рассматривается методика расчёта внутриваллистических параметров схемы обратного метания с отсечкой пороховых газов в переменном-замкнутом объёме.

Ключевые слова: выстрел, пороховой заряд, теплоёмкость, внутриваллистические параметры.

RESEARCH INTO INTERBALLISTIC PARAMETERS OF A BACK THROWING SYSTEM

Sergei G. Gubin

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), Russia, Novosibirsk 630108, 10 Plakhotnogo St; MSc, senior lecturer, associate professor, department of specialized instrumentation and technologies SSGA; tel. 89139059035, e-mail: yura6810@mail.ru

This article discusses the method of calculating the parameters of the circuit intraballistic throwing back to cutoff propellant gases in the alternating closed volume.

Key words: shot, powder charge, heat capacity, intraballistic options.

Особенностью расчёта внутриваллистических параметров является то, что каждый шток имеет свой объём (см. рис 1), поэтому расчёты для обычного оружия не подходят, требуют иного подхода при решении задач внутренней баллистики данного выстрела.

Для расчётов внутриваллистических параметров за основу были приняты основные положения методик, предложенных известными баллистами, такими как: Граве И.П., Дроздов Н.Ф., Серебряков М.Е., Венцель Д.А. и др. [1-5]. Примем основные допущения, принятые в большинстве методик для внутриваллистических расчётов.

1. Воспламенение заряда происходит мгновенно.
2. Влияние газов воспламенителя настолько мало, что им можно пренебречь.
3. Горение порохового заряда подчиняется геометрическому закону.
4. Параметры расширения пороховых газов не изменяются.
5. Справедлив линейный закон скорости горения.
6. Состав пороховых газов не изменяется.
7. Вместо отношения истинных теплоёмкостей принимается отношение средних теплоёмкостей.

8. Различные работы, производимые пороховыми газами, помимо главной работы $\frac{m \cdot V^2}{2}$, принимаются пропорциональными живой силе гранаты в поступательном движении.

9. Перемещение оружия за время движения снаряда не учитываются.

10. Деформация стенок корпуса и штоков при выстреле мала и ей можно пренебречь.

11. Прорыва пороховых газов не происходит.

12. Охлаждение газов под влиянием стенок корпуса и штоков в расчёт не принимается.

13. Движение гранаты начинается лишь тогда, когда в камере разовьётся давление P_0 .

14. В предварительном периоде:

Ψ_0 – относительная часть сгоревшего заряда за предварительный период.

$$\Psi_0 = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta}}{\frac{f}{P_0} + \alpha - \frac{1}{\delta}},$$

где: P_0 – давление форсирования;

α – коэф. порох. газов;

δ – плотность порохового заряда;

f – сила пороха;

Δ – плотность заряжания.

$$z_0 = \frac{2 \cdot \Psi_0}{(\sigma_0 + 1) \cdot \gamma_1},$$

z_0 – относительная толщина пороха, сгоревшая от начала горения.

$$\sigma_0 = \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{\lambda_1}{\gamma_1} \cdot \Psi_0}.$$

где: σ_0 – относительная поверхность пороха, сгоревшая от начала горения.

15. В первом периоде:

Линейный закон скорости горения:

$$u = u_1 P,$$

где: u – скорость горения;

u_1 – коэф. скорости горения пороха;

P – давление.

Процесс образования пороховых газов описывается уравнением:

$$\Psi = \gamma_1 z \cdot (1 + \lambda_1 z);$$

где: Ψ – относительная часть сгоревшего заряда,

z – относительная сгоревшая толщина пороха,

γ_1, λ_1 – характеристики формы пороха, постоянные числа, зависящие от формы зерна.

Уравнение пиродинамики:

$$PS(l_{\Psi} + l) = f\omega\Psi - \frac{\theta\varphi q V^2}{2g}$$

где: S – площадь поперечного сечения каморы;
 l_ψ – приведённая длина свободного объёма каморы;
 l – длина пути снаряда по каналу ствола;
 W_0 – начальный объём, в котором происходит горение пороха;
 θ – параметр расширения;
 φ – коэффициент фиктивности;
 q – вес гранаты;
 V – скорость гранаты;
 g – ускорение силы тяжести;
 ω – вес пороха;
 $l_0 = \frac{W_0}{S}$

где: l_0 – приведённая длина каморы.

Процесс поступательного движения гранаты:

$$\frac{\varphi q}{g} \cdot \frac{dV}{dt} = SP$$

Итак, окончательно, с учётом $I_k = \frac{e_1}{u_1}$ – конечный импульс, получим

систему уравнений в виде:

где e_1 – толщина горящего свода пороха в одном направлении.

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi = \gamma_1 z (1 + \lambda_1 z) \\ P = f\omega \cdot \frac{\psi - \frac{\theta \varphi q V^2}{2gf\omega}}{S \cdot (l_\psi + l)} \\ l_\psi = l_0 \left[1 - \frac{\Delta}{\delta} - \left(\alpha - \frac{1}{\delta} \right) \cdot \Delta \psi \right] \\ \frac{dl}{dt} = V \\ \frac{dz}{dt} = \frac{P}{I_k} \\ \frac{\varphi q}{g} \cdot \frac{dV}{dt} = SP \end{array} \right.$$

Учитывая конструктивные особенности схемы метания, в расчеты необходимо внести изменения.

Предварительный период.

В нашем случае предварительный будет являться 0 стадией. Он имеет временные границы от момента удара поршня-ударника по капсулю-воспламени-телю, до момента достижения давления форсирования, после чего начинается выдвигание штоков.

Протекает точно также как и при обычном выстреле, рассчитывается, как и при обычном выстреле.

$$\psi_0 = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta}}{\frac{f}{P_0} + \alpha - \frac{1}{\delta}},$$

$$z_0 = \frac{2 \cdot \psi_0}{(\sigma_0 + 1) \cdot \gamma_1}.$$

Первый период выстрела.

Для того, чтобы учесть особенности схемы обратного метания (см. рис. 1), нам необходимо задать порядок раскрытия штоков, влияние присоединения массы штоков. Порядок раскрытия задаем следующим образом: штоки 3, 4; затем поршень-ударник 5, далее шток 4.

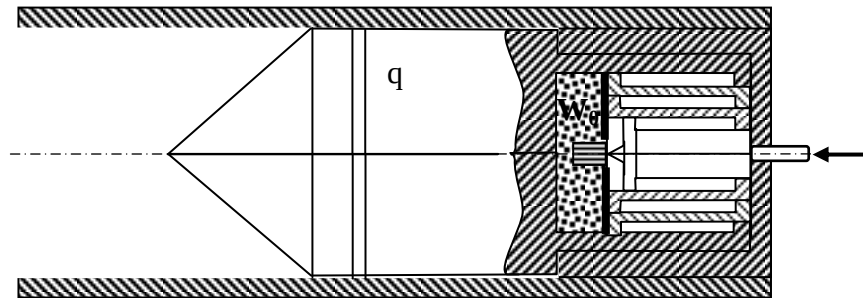


Рис. 1. Предварительный период

Для проведения расчетов разделим данный период на стадии и произведем расчет следующим образом: вначале рассчитаем раскрытие первой группы, условно обозначим стадия 1, а остальное рассчитаем аналогично выдвигению всей группы, указанной в стадии 1, за исключением:

- В начальных данных площадь поперечного сечения, по которому движется последующий шток - S ;
 - В начальных данных начальный объем, в котором продолжает горение порох - W_0 ;
 - В начальных данных вес гранаты $q = m_e + m_{ui}$;
- где: m_e – вес гранаты;
 m_{ui} – вес последующего штока.

Каждое выдвигение штоков будет являться одной из стадий. Данный период выстрела в данной схеме можно разделить на 4 последовательных стадии.

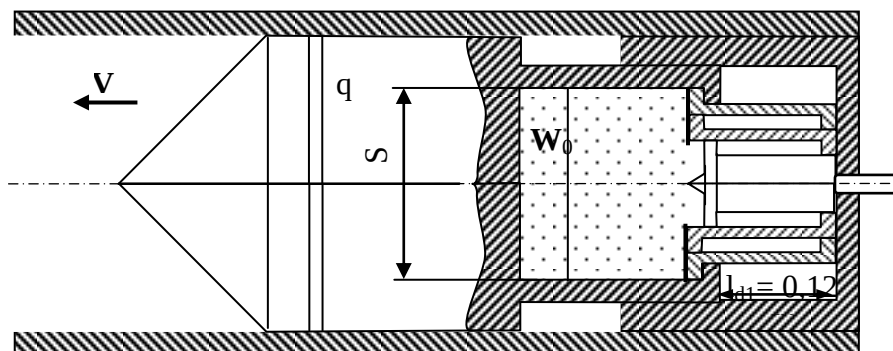


Рис. 2. Окончание первой стадии

1 стадия – начинается при достижении давления форсирования P_0 . Выдвигаются вместе два штока и поршень до зацепления первого штока за корпус. При зацеплении первого штока за корпус к массе корпуса прибавляется масса штоков и поршня, происходит небольшое снижение скорости гранаты (см. рис. 2).

2 стадия – начинается после зацепления первого штока за корпус гранаты. Выдвигается поршень до его зацепления за второй шток. При зацеплении поршня за второй шток к общей массе прибавляется масса поршня и происходит небольшое снижение скорости гранаты.

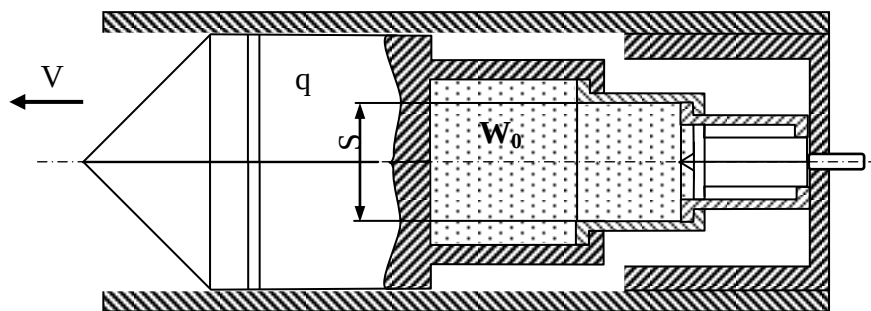


Рис. 3. Окончание второй стадии

3 стадия – начинается после зацепления поршня за корпус гранаты. Выдвигается второй шток до зацепления второго штока за первый. При зацеплении второго штока за первый к общей массе прибавляется масса второго штока и происходит небольшое снижение скорости гранаты.

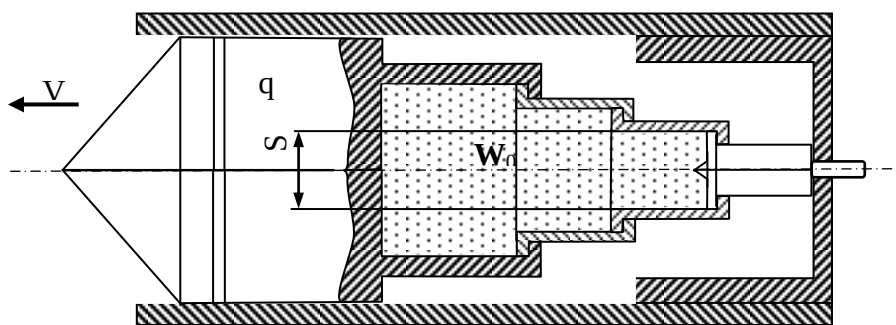


Рис. 4. Окончание третьей стадии и четвертая стадия

4. стадия – начинается после раздвижения всех штоков. Остатки пороха догорают в постоянном объеме (см. рис. 4).

Начальными условиями для последующих стадий являются результаты, полученные в предыдущей стадии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дроздов Н.Ф. Решение задач внутренней баллистики для бездымного пороха трубчатой формы. – М.: Артакадемия, 1941. – 122с.
2. Вентцель Д.А. Внутренняя баллистика. – М.: ВВИА им. Жуковского, 1948. – 415 с.

3. Граве И.П. Внутренняя баллистика, пиродинамики. - Л.: Артакадемия, 1933. – 162 с.
4. Граве И.П. Внутренняя баллистика // Пиродинамика. Выпуск II. – Л.: Артакадемия им. Ф.Э. Дзержинского, 1934. – 292 с.
5. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет // – М.: Гос. Науч.-Тех. Издат. Оборонгиз, 1962. – 703 с.
6. Губин С.Г. Боеприпас для бесшумной, беспламенной и бездымной стрельбы с отсечкой пороховых газов на основе схемы обратного метания // Сборник тезисов докладов XXXI научно-практической конференции «Проектирование систем» МГТУ. – 2004. – С. 192–195.
7. Губин С.Г. Боеприпас для бесшумной стрельбы с отсечкой пороховых газов на основе схемы обратного метания // Сборник тезисов LIV научно-технической конференции. – Новосибирск. СГГА, 2004. – с. 156-160.

© С.Г. Губин, 2012

ОБ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ

Андрей Иванович Родионов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, профессора кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31, e-mail: kaf.osnov@ssga.ru

Сергей Викторович Савелькаев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, профессора кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31, e-mail: kaf.osnov@ssga.ru

Геннадий Александрович Сырецкий

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, профессора кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31, e-mail: kaf.osnov@ssga.ru

Осуществлено Расширение теории Максвелла – Лагранжа на управляемые электромеханические и мехатронные системы с неполными произвольными дифференциальными программами движения. Создан формализм, описывающий динамику таких систем. В докладе приводится R_sL-M ковариантная форма уравнения движения. В качестве примера рассмотрена динамика плоской модели электромеханического авиатренажера.

Ключевые слова: электромеханические и мехатронные системы, авиатренажер.

ON ELEKTROMECHANICS OF CONTROL MODELS SYSTEMS OF HIGHER ORDER

Andrei I. Rodionov

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo, Novosibirck, 630108, professors, department of special devices and technologies, tel. (383) 361-07-31, e-mail: kaf.osnov @ ssga.ru

Sergei V. Savelkaev

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo, Novosibirck, 630108, professors, department of special devices and technologies, tel. (383) 361-07-31, e-mail: kaf.osnov @ ssga.ru

Gennady A. Syretsky

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo, Novosibirck, 630108, professors, department of special devices and technologies, tel. (383) 361-07-31, e-mail: kaf.osnov @ ssga.ru

The extension of Maxwell–LaGrange theory for electromechanical and mechatronic systems with arbitrary incomplete differential programs of motion is made. The formalism describing dynamics of such systems are created. The R_sL-M covariant form of the equations of motion is resulted. As an example dynamics of flat model of an electromechanical air simulator is considered.

Key words: electro-mechanical and mechatronic systems, aviatrenazher.

В последние годы возник вопрос об адекватных механических моделях движения электромеханических и мехатронных систем с неполными дифференциальными программами движения высших порядков [1-3]. К таким системам, относятся объекты с дифференциальными связями - *программами движения*, начиная с нелинейных по ускорениям или линейных по резкости-рывку. Интерес к этим системам возник в связи с бурным развитием мехатроники, авионики, нетрадиционных систем движения, например, управляемых инерциоидов, создаваемых динамических испытательных стендов для электронных, оптических и оптико-электронных систем с управлением по рывку, систем мягкой управляемой виброзащиты, основанной на модулях квазинулевой жесткости и так далее.

В динамике систем с дифференциальными связями имеет место электромеханическая аналогия, подобная 1-ой электромеханической аналогии классической механики. Она базируется на Постулате-Расширении Постулата Максвелла [3]. Этот Постулат сформулируем так:

Уравнения движения управляемых электромеханических систем с неполными дифференциальными программами движения составляются в "Appell - Maxwell - подобная" – $R_s A-M$, "LaGrange - Maxwell – подобная"- $R_s L-M$ [3].

В докладе на примере модельной задачи кратко представлена теория, описывающая динамику управляемых электромеханических и мехатронных систем с неполными произвольными дифференциальными программами движения. Эта теория позволяет решать большой класс современных задач электромеханики и мехатроники.

Исследования в области авиа и космической медицины доказали, что живой организм наиболее неприятно реагирует на резкие и неожиданные изменения ускорения, то есть на резкость (рывок). В качестве примера рассмотрим разомкнутую модель управления движением *плоской модели* (z, φ) авиатренажера - электродинамического стенда, управляемого по рывку и представленного на рис. 1.

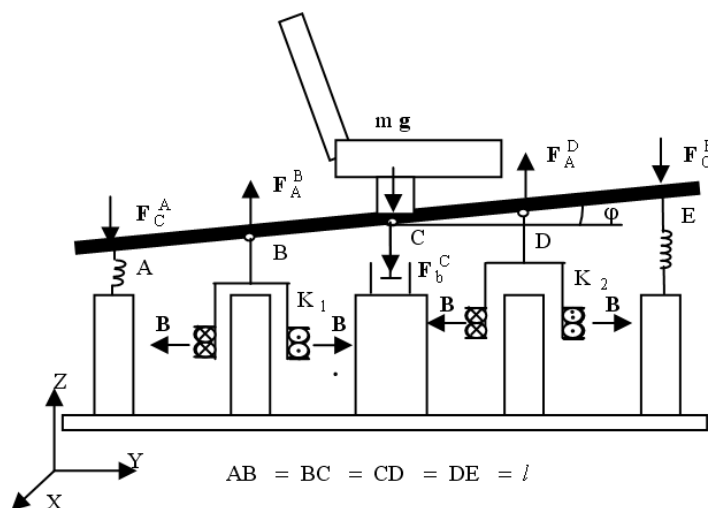


Рис. 1

Здесь кресло пилота рассматривается как жесткий элемент испытательного стенда. - Масса механической части тренажёра-системы “кресло-столешница стенда” равна m . $J_{cx} = J_c$ - момент инерции этой системы относительно оси x ; c - жесткость пружин; b - коэффициент демпфирования; B - индукция магнитного поля в зазоре; R - активное сопротивление каждой катушки; L - индуктивность каждой катушки; n - число витков каждой катушки; r - средний радиус каждой катушки. Управляющие напряжения U_1, U_2 подаются на катушки. Магнитодвижущие силы, силы Ампера F_A^B, F_A^D являются управляющими силами. За механические обобщенные координаты здесь взяты: $q_{1mex} = z_c = x$ - отклонение центра масс стола от положения статического равновесия, $q_{2mex} = \varphi$ - угол φ (считаем его малым). В соответствии с общепринятым в электромеханике (рис. 1. Авиатренажер) заряды, протекающие по катушкам К1 и К2 $q_{1эл} = q$, $q_{2эл} = e$, взяты за электрические обобщенные координаты. При этом электрические токи в этих катушках соответственно равны $I_q = \dot{q}$, $I_e = \dot{e}$.

Управление движением тренажера осуществим в соответствии с неполной дифференциальной программой движения, задаваемой уравнением

$$\dot{f} = S^{mex} - S_0^{mex} = 0, \quad (1)$$

где $S^{mex} = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}J_c(\dot{\varphi}^2 + \dot{\varphi}^2)$ - энергия ускорений [3].

Решение. Составим уравнения движения системы в R_sL - M -форме [3]. Ограничимся градиентным управлением стенда и примем $Q_{j(T)}^{(1)} = 0$.

$$\begin{cases} \hat{A}_x^{(2)} L_{(2)} = -\partial R_{(2)} / \partial \ddot{x} + \dot{\eta} \partial f / \partial \ddot{x} \\ \hat{A}_\varphi^{(2)} L_{(2)} = -\partial R_{(2)} / \partial \ddot{\varphi} + \dot{\eta} \partial f / \partial \ddot{\varphi} \\ \hat{A}_q^{(2)} L_{(2)} = -\partial R_{(2)} / \partial \ddot{q} + \dot{\eta} \partial f / \partial \ddot{q} + \dot{U}_q \\ \hat{A}_e^{(2)} L_{(2)} = -\partial R_{(2)} / \partial \ddot{e} + \dot{\eta} \partial f / \partial \ddot{e} + \dot{U}_e \\ d_t f = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $L_{(2)}$, согласно [3], есть функция Лагранжа 2-го порядка, а $R_{(2)}$ - функция Релея 2-го порядка

$$\begin{aligned} L_{(2)} &= (S^{mex} + S^{эл}) - (\Pi_{(1)}^{mex} + \Pi_{(1)}^{эл}) = \\ &= \frac{1}{2}[m\dot{x}^2 + J_c(\dot{\varphi}^2 + \dot{\varphi}^4) + L(\dot{q}^2 + \dot{e}^2) - 2c(x^2 + 4l^2\varphi^2)], \quad \Pi_{(1)}^{эл} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

$$R_{(2)} = R_{(2)}^{mex} + R_{(2)}^{эл} = \frac{1}{2}(b\dot{x}^2 + R(\dot{q}^2 + \dot{e}^2)).$$

При этом силы Ампера равны:

$$F_A^B = 2\pi n B I_q, F_A^D = 2\pi n B I_e \quad (4)$$

Тогда управляющие обобщенные силовые факторы $Q_{j(\lambda)}^{(1)}$ [2,3] примут следующий вид:

$$\begin{aligned} Q_{x(\lambda)}^{(1)} &= \dot{\eta} \partial f / \partial x = \dot{F}_A^B + \dot{F}_A^D = 2\pi n B (\dot{I}_q + \dot{I}_e), \\ Q_{\varphi(\lambda)}^{(1)} &= \dot{\eta} \partial f / \partial \varphi = (\dot{F}_A^D - \dot{F}_A^B) l = 2\pi n B (\dot{I}_e - \dot{I}_q) l, \\ Q_{q(\lambda)}^{(1)} &= Q_{e(\lambda)}^{(1)} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Выразим из (5) $\dot{I}_q, \dot{I}_e$ и подставим в (3). В результате уравнения движения электромеханического стенда-тренажера в переменных $x, \varphi, U_q, U_e, \eta$ будут иметь вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + (b - \dot{\eta}m)x + cx = 0 \\ J(\ddot{\varphi} - \dot{\eta}\dot{\varphi} - \dot{\varphi}^3) + cl\dot{\varphi} = 0 \\ L \frac{d}{dt} (\dot{\eta}(mlx - J\dot{\varphi})) + R\dot{\eta}(mlx - J\dot{\varphi}) = 4\pi n l B \dot{U}_q \\ L \frac{d}{dt} (\dot{\eta}(mlx + J\dot{\varphi})) + R\dot{\eta}(mlx + J\dot{\varphi}) = 4\pi n l B \dot{U}_e \\ m\ddot{x}\dot{x} + J(\ddot{\varphi} + 2\dot{\varphi}^3)\dot{\varphi} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Приведенный пример простой плоской модели электромеханического авиатренажера демонстрирует пути решения большого класса современных задач электромеханики и мехатроники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Родионов А.И. К динамике мехатронных систем с неполными дифференциальными программами движения / А.И. Родионов // Вестник СГГА (Физика). - Новосибирск: Изд-во СГГА, 2002. - Выпуск 7. - С. 205-211.
2. Родионов А.И. О замкнутых и разомкнутых моделях управления мехатронных систем высших порядков / А.И. Родионов, Г.А. Сырецкий, В.М. Кавешников, Н.И. Щуров // Сб. трудов 4-й международной науч. конф. "Проблемы механики современных машин". — Улан-Удэ: Изд-во ВСТГУ, 2009. - Т.3 - С.7-14.
3. Родионов А.И. Уравнения движения электромеханических систем высших порядков / А.И. Родионов, Г.А. Сырецкий // Транспорт: Наука, техника, управление. - М: Изд-во РАН ВИНТИ, 2011 - №2. - С. 10-13.

© А.И. Родионов, С.В. Савелькаев, Г.А. Сырецкий, 2012

ДИНАМИЧЕСКАЯ ГРАВИТАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ДИССИПАТИВНЫХ СРЕДАХ

Сергей Викторович Савелькаев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, профессор кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31, e-mail: kaf.osnov@ssga.ru

Теоретически и экспериментально доказано, что взаимодействующие тела механической системы из-за взаимного влияния их движения возбуждают в диссипативной среде ее собственное динамическое гравитационное поле, оказывающее на нее действие, эквивалентное внешнему.

Ключевые слова: механическая система взаимодействующих тел, динамическое гравитационное поле.

DYNAMIC GRAVITY OF MECHANICAL SYSTEMS IN DISSIPATIVE MEDIA

Sergei V. Saelkaev

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo, Novosibirsk, 630108, professor, department of special devices and technologies, tel. (383) 361-07-31, e-mail: kaf.osnov @ ssga.ru

Theoretically and experimentally proved that the mechanical system of interacting bodies due to the mutual influence of the motion excited in a dissipative medium of its own gravitational field of the dynamic rendering her action, equivalent to the outside.

Key words: mechanical system of interacting bodies, dynamic gravitational field.

Введение. Термин динамическая гравитация впервые был введен в работах [1 - 3]. В этих работах показано, что взаимодействующие тела механической системы из-за взаимного влияния их движения возбуждают в диссипативной среде ее собственное динамическое гравитационное поле, оказывающее на нее действие, эквивалентное внешнему.

Недостатком выше упомянутых работ является то, что в них не содержится строгого теоретического обоснования, которое доказывает существование динамического гравитационного поля на основе представленного в этих работах эксперимента. Предлагаемая статья совместно с работой [4] направлена на устранение этого недостатка.

Динамическое гравитационное поле. Рассмотрим механическую систему S , находящуюся в диссипативной среде, которая показана на рис. 1. Она содержит опорное тело с массой m_1 , на котором посредством идеального стержня с длиной R , шарнирного по отношению к этому телу, установлено другое тело с массой m_2 , которое совершает вращательное движение относительно опорного тела m_1 со скоростью $v_{21} = \dot{\varphi}_{21}R$ при $\dot{\varphi}_{21} = const$, где $\dot{\varphi}_{21}$ - угловая скорость вращательного движения тела m_2 .

Вращательное движение тела m_2 осуществляется посредством пары реактивных сил, приложенных к оси шарнира стержня R , создающих вращающий момент M , который поддерживает $\dot{\varphi}_{21} = \text{const}$ и для идеального шарнира не передается телу m_1 .

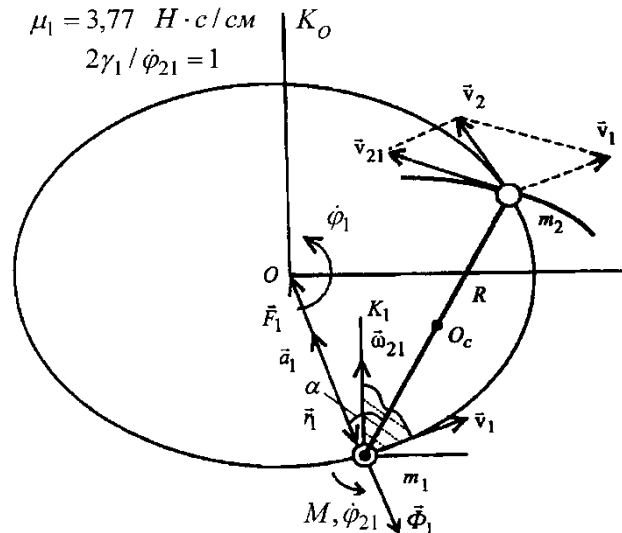


Рис. 1. Механическая система S

Выберем две системы отсчета – абсолютную K_0 , связанную с некоторым, подлежащим определению, силовым центром O и собственную систему отсчета K_1 тела m_1 , которая вместе с ним совершает поступательное движение в системе отсчета K_0 с абсолютной скоростью $v_1 = \dot{\varphi}_1 r_1$ при $\dot{\varphi}_1 = \text{const}$, где $\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_{21}$ – угловая скорость поступательного движения тела m_1 в системе отсчета K_0 .

В качестве обобщенных координат выберем полярные координаты r_1 и φ_1 тела m_1 в системе отсчета K_0 и полярную координату φ_{21} тела m_2 в системе отсчета K_1 .

Кинетическую энергию рассматриваемой системы S можно определить в виде

$$T = \frac{1}{2} \sum_i m_i \bar{v}_i^2, \quad (1)$$

где $\bar{v}_i$ – абсолютная скорость i -го тела в системе отсчета K_0 .

Так как в системе отсчета K_0 абсолютная скорость $\bar{v}_2$ тела m_2 есть сумма

$$\bar{v}_2 = \bar{v}_1 + \bar{v}_{21}, \quad (2)$$

то из (1) получим

$$T = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) \bar{v}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \bar{v}_{21}^2 + m_2 \bar{v}_1 \bar{v}_{21}. \quad (3)$$

Первое слагаемое (3) представляет собой кинетическую энергию поступательного движения рассматриваемой системы S как целой в системе

отсчета K_o , второе – кинетическую энергию вращательного движения тела m_2 в системе отсчета K_1 и третье к кинетической энергии не относится, так как представляет собой результат взаимного влияния двух движений тела m_2 – переносного (поступательного вместе с системой отсчета K_1) и относительного (вращательного в системе отсчета K_1) со скоростями $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_{21}$.

Так как $r_1, \dot{\phi}_1, \dot{\phi}_{21} = \text{const}$, а также с учетом того, что $\vec{v}_1 \vec{v}_{21} = \dot{\phi}_1 r_1 \dot{\phi}_{21} R \cos(\pi - \alpha) = -\dot{\phi}_1 r_1 \dot{\phi}_{21} R \cos \alpha$ лагранжиан L рассматриваемой системы S выразим из (3) в виде

$$L = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)\dot{\phi}_1^2 r_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{\phi}_{21}^2 R^2 + U, \quad (4)$$

где α - угол между радиус-вектором $\vec{r}_1$ и стержнем R , который может быть определен как в [4]

$$\alpha = \arctg(2\gamma_1 / \dot{\phi}_{21}); \quad (5)$$

U - динамический гравитационный потенциал

$$U = -m_2 \dot{\phi}_1 r_1 \dot{\phi}_{21} R \cos \alpha, \quad (6)$$

рассматриваемой системы S , возбуждаемый телом m_2 из-за его участия в переносном и относительном движениях со скоростями $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_{21}$ в системе отсчета K_o .

Запишем уравнение Лагранжа

$$\frac{\partial L}{\partial r_1} = \frac{\partial D}{\partial \dot{r}_1} \quad (7)$$

рассматриваемой системы S с учетом сопротивления μ_1 внешней среды движению ее опорного тела m_1 относительно координаты r_1 .

Подставив в эти уравнения лагранжиан L (4) и диссипативную функцию

$$D = \frac{1}{2}\mu_1 \dot{\phi}_1^2 r_1^2 \quad (8)$$

получим следующее уравнение

$$\Phi_1 + F_1 = \text{const} \quad (9)$$

движения рассматриваемой системы S относительно силового центра O , который является центром динамического гравитационного поля

$$F_1 = -\frac{\partial U}{\partial r_1} = m_2 \dot{\phi}_1 \dot{\phi}_{21} R \cos \alpha, \quad (10)$$

оказывающего на нее в системе отсчета K_o действие, эквивалентное внешнему, которому противодействует ее сила Φ_1 инерции

$$\Phi_1 = (m_1 + m_2)\dot{\phi}_1^2 r_1, \quad (11)$$

как целой в этой же системе отсчета K_o .

Радиус r_1 поступательного движения тела m_1 , а также радиусы r_2 , r_c вращательного движения тела m_2 и центра O_c масс рассматриваемой системы S в системе отсчета K_o можно определить по формулам:

$$r_1 = A_1; r_2 = \sqrt{A_1^2 + R^2 - 2A_1R \cos \alpha}; r_c = \sqrt{A_1^2 + a^2 - 2A_1a \cos \alpha}, \quad (12)$$

где A_1 - амплитудный коэффициент, который может быть определен как в [4]

$$A_1 = \frac{a}{\sqrt{1 + 4\gamma_1^2 / \dot{\phi}_{21}^2}}, \quad (13)$$

в котором $a = m_2 R / (m_1 + m_2)$ и $\gamma_1 = \mu_1 / [2(m_1 + m_2)]$.

Таким образом, показано, что на рассматриваемую систему S действует ее собственное динамическое гравитационное поле F_1 (10), возбуждаемое телом m_2 в системе отсчета K_O из-за участия этого тела в этой системе отсчета в переносном и относительном движениях. Под действием этого поля система S как целое совершает относительно его центра O замкнутое движение

$$(m_1 + m_2)\dot{\phi}_1^2 r_1 = F_1 \quad (14)$$

с ускорением

$$\vec{a}_1 = \vec{v}_1 \times \vec{\omega}_{21}, \quad (15)$$

как показано на рис. 1, где $\vec{\omega}_{21}$ - вектор угловой скорости $\dot{\phi}_{21}$ вращательного движения тела m_2 в системе отсчета K_1 .

Экспериментальное подтверждение. Для косвенной регистрации динамического гравитационного поля F_1 (10) была разработана гравитационная центрифуга, которая показана на рис. 2.

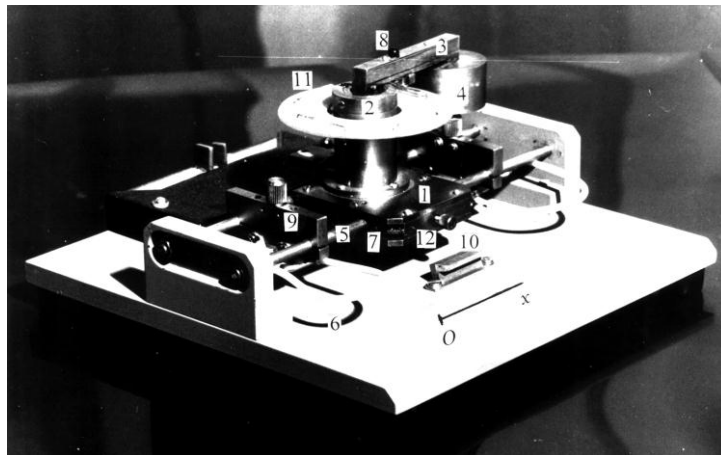


Рис. 2. Гравитационная центрифуга

Она содержит каретку 1 с массой $m_1 = 0,18$ кг, на валу электродвигателя 2 которой посредством кулисы 3 с длиной $R = 6$ см установлено тело 4 с массой $m_2 = 0,12$ кг, которое имеет возможность его вращательного движения относительно каретки 1. Каретка 1 установлена на направляющих 5, размещенных на основании 6, с возможностью перемещения по ним на роликах 7. Центр O_c масс системы каретка 1 – тело 4 индицируется светодиодом 8, установленным на кулисе 3. Положение каретки 1 на направляющих 5

контролируется датчиками ее положения 9, которые установлены на направляющих 5, а также нониусом 10. Угол поворота φ_{21} тела 4 контролируется датчиками 11. Коэффициент вязкого трения каретки 1 о направляющие 5 можно изменять с помощью регулируемого тормозного устройства 12, содержащего латунную тормозную колодку, покрытую слоем смазки, обеспечивающим приближение к вязкому трению.

Перед проведением эксперимента уравнение Лагранжа (7) было записано в декартовой форме [4], с присвоением $y_1 = 0$, $y_2 = R \sin \varphi_{21}$. Далее были рассчитаны траектории поступательного движения каретки 1 (m_1) и вращательного движения тела 4 (m_2) и центра O_c масс системы каретка 1 (m_1) – тело 4 (m_2), которые показаны на рис. 3.

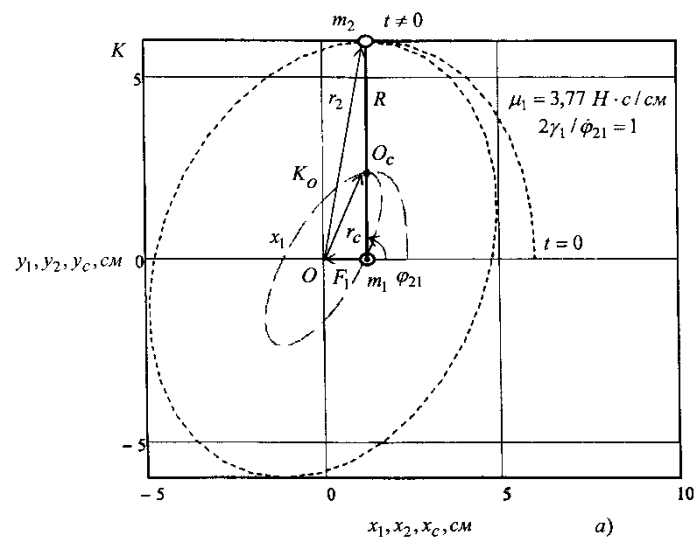


Рис. 3. Траектории поступательного движения каретки 1 (m_1) центрифуги и вращательного движения ее тела 4 (m_2) и центра O_c масс системы каретка 1 (m_1) – тело 4 (m_2)

Как видно из рис. 3 каретка 1 (m_1) и тело 4 (m_2) центрифуги при $\varphi_{21} > \pi/2$ совершают в системе отсчета K_o соответственно поступательное и вращательное движения относительно центра O динамического гравитационного поля F_1 , координаты которого соответствуют начальному положению тела 4 (m_2) при $t = 0$. Кроме того, из этого рисунка видно, что при $\varphi_{21} > \pi/2$ произошло стягивание системы каретка 1 (m_1) – тело 4 (m_2) к центру O динамического гравитационного поля F_1 , что не может быть обеспечено линейным вязким трением.

Эксперимент проводился следующим образом. Тело 4 (m_2) центрифуги, показанной на рис. 2, при $\varphi_{21} = 0$ приводилось во вращательное движение электродвигателем 2 с постоянной угловой скоростью $\dot{\varphi}_{21} = 12,57$ рад/с для

различных фиксированных значений сопротивления $0 < \mu_1 \leq \infty$ движению каретки 1 (m_1), которое выбиралось с помощью откалиброванного регулируемого тормозного устройства 12.

Положения каретки 1 (m_1) регистрировались датчиками 9, угол поворота тела 4 (m_2) - датчиками 11 и положение центра O_c масс системы каретка 1 (m_1) – тело 4 (m_2) - светодиодом 8. Полученные данные сверялись с рассчитанными траекториями их движения при фиксированных $0 < \mu_1 \leq \infty$, аналогичными траекториям и графикам, показанным на рис. 3 при $\mu_1 = 3,77 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{см}$. В результате было показано, что экспериментальные данные отличаются рассчитанных траекторий не более чем на 5%. Это доказывает существование динамического гравитационного поля вида F_1 (10) с центром O , оказывающего на систему каретка 1 (m_1) – тело 4 (m_2) действие, эквивалентное внешнему.

Заключение. Таким образом, теоретически и экспериментально доказано, что взаимодействующие тела механической системы из-за взаимного влияния их движения возбуждают в диссипативной среде ее собственное динамическое гравитационное поле, оказывающее на нее действие, эквивалентное внешнему. Так как этому полю противодействует сила инерции этой механической системы как целой, то это поле нельзя отождествлять с ее инерцией.

Динамическое гравитационное поле существенно влияет на движение центра масс механической системы [4] и на движение инерциоидов [5, 6], что обосновывает значимость его введения для описания динамики механических систем в диссипативных средах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савелькаев, С. В. Теория гравитации [Текст]. – М.: МЭИ, 1993. – 108 с.
2. Савелькаев, С. В. Динамическая гравитация в диссипативных средах [Текст]. – М.: МЭИ, 1995. – 34 с.
3. Исследование принципов движения механических систем под действием внутренних источников активных сил [Текст]: отчет о НИР/С. В. Савелькаев; Новосибирск: НЭТИ, 1992. – 45 с. - № ГР01920014666. - Инв. № 02920011180.
4. Савелькаев, С. В. Эффект независимости величины смещения центра масс механической системы от диссипативности внешней среды (Эффект Савелькаева) [Текст]/ С. В. Савелькаев // Механика машин, механизмов и материалов. – Минск: Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, 2011. – № 4(17). – С. 42 – 48.
5. Пат. № 2056524 Россия, F 03 G 3/00. Гравитационный движитель Савелькаева /С. В. Савелькаев. – 1996.
6. Пат. № 2147595 Россия, F 03 G 3/00. Гравитационный движитель Савелькаева /С. В. Савелькаев. – 2000.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТРЕХМЕРНЫХ ГРАФИКОВ

Александр Анатольевич Гиенко

ФГУП СНИИМ, инженер, г. Новосибирск

В работе приведено описание результатов работы программного обеспечения для трехмерной визуализации графиков с данными, получаемыми от технологического оборудования.

Ключевые слова: трехмерная визуализация, стереоскопические изображения.

THE SOFTWARE FOR VISUALIZATION OF THE THREE-DIMENSIONAL DIAGRAMS

Alexander A. Gienko

Siberian State Metrology Research Institute, engineer, Novosibirsk

In work the description of results of work of the software for three-dimensional visualization of the diagrams with the data received from the process equipment is given.

Key words: three-dimensional visualization, stereoscopic images.

Продолжая тему, затронутую в работах [1] и [2], в исследовательских целях автором был разработан программный пакет под названием *StereoMagic*, предназначенный для трехмерной визуализации стереоскопических изображений на различных стереоустройствах.

Способ стереопросмотра изображений зависит от конструкции того или иного стереоустройства. Стереоустройством мы назовем систему, состоящую из стереомонитора для вывода изображений и селектора ракурсов для их наблюдения, [1].

На сегодняшний день стереопросмотр осуществляется только при помощи специальных очков - селекторов ракурсов:

1. Анаглифические (различных дополнительных цветов);
2. Поляризационные (разнообразных видов поляризации);
3. Затворные (переключаемые).

По типу очков-селекторов можно классифицировать упомянутые способы стереопросмотра. Каждый режим работы программного обеспечения (ПО) должен однозначно соответствовать определенному способу стереопросмотра изображений. Далее такой режим работы ПО будем называть стереорежимом.

Актуальность темы подтверждается стремительным развитием компьютерных технологий, возросшими требованиями к качеству фото- и видеоизображений, а также появлением на рынке устройств отображения (телевизоров и компьютерных мониторов) с высоким разрешением и большой диагональю.

Разработанный пакет состоит из собственно программы *StereoMagic*, файла для сохранения ее настроек, некоторых вспомогательных программ и системы вложенных каталогов для размещения стереоконтента.

Под стереоконтентом в дальнейшем будем понимать совокупность стереоскопических фотографий и стереофильмов (роликов). Набор html-страниц для текстовой информации об упомянутых фотографиях, фильмах и роликах, их расположении на компьютере, а также для связи их друг с другом в работе называется текстовым контентом.

Программа *StereoMagic* предназначена для управления показом файлов стереоконтента из загруженных страниц контента текстового. Поэтому она оснащена встроенным интернет-браузером. Вид окна программы с загруженной в браузер страницей показан на рис. 1.

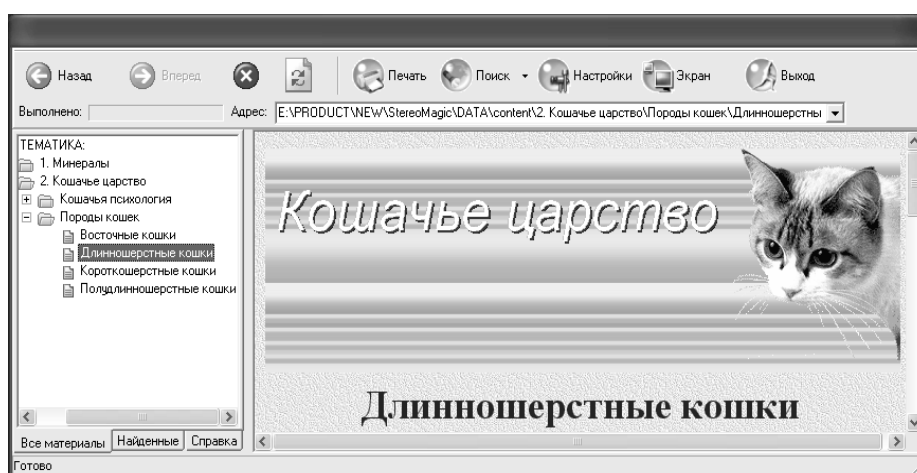


Рис. 1. Вид окна программы с загруженной в браузер страницей

Для управления программой и браузером служит инструментальная панель, расположенная в верхней части окна программы. Для загрузки страниц в браузер служит набор древовидных структур в левой части окна. Для загрузки и показа файлов стереоконтента служат специальные ссылки в составе страницы. Переход по такой ссылке приведет к трансформации окна (окон) программы и отображению выбранного файла на стереоустройстве – рис. 2, 3 и 4.



Рис. 2. Отображение фотографии в стереорежиме «Анаглиф»

Стереорежим «Анаглиф» применяется для просмотра изображений в красно-голубых очках на одном мониторе. Левый и правый ракурсы совмещены друг с другом на плоскости экрана. Для совмещенных на одном экране ракурсов программа поддерживает стереорежим «Черезстрочный» для наблюдения в поляризационных очках. Но для этого необходимо располагать монитором со специальной пленкой, наклеенной на экран.



Рис. 3. Отображение фотографии в стереорежиме «Призма»

Стереорежим «Призма» применяется для просмотра изображений на одном мониторе в призматических очках либо вообще без очков. Поскольку в данном случае ракурсы разделены, то просмотр стереоизображения без очков возможен при разведении наблюдателем зрительных осей глаз, чтобы каждый глаз видел свое изображение. Это получается после некоторой тренировки.



Рис. 4. Отображение фотографии в стереорежиме «Зеркальный»

Стереорежим «Зеркальный» применяется для просмотра изображений в поляризационных очках на зеркальной стереоустановке. Последняя состоит из двух плоских мониторов с полупрозрачным зеркалом между ними, [1]. Окна программы занимают на экранах своих мониторов одинаковые положения и имеют одинаковые размеры. При этом перемещение мышью любого окна (а также изменение его размеров) немедленно вызывает аналогичные изменения у другого окна программы. Поэтому совмещение обоих ракурсов стереопары всегда сохраняется.

Программа *StereoMagic* поддерживает две вебкамеры, причем типы камер могут быть различными. Программа отображает стереоизображение от этих камер и может сохранить его в два видеофайла.

Кроме того, программа позволяет отображать трехмерные диаграммы графиков данных, получаемых из файлов или принимаемых от подключенной аппаратуры – рис. 5.

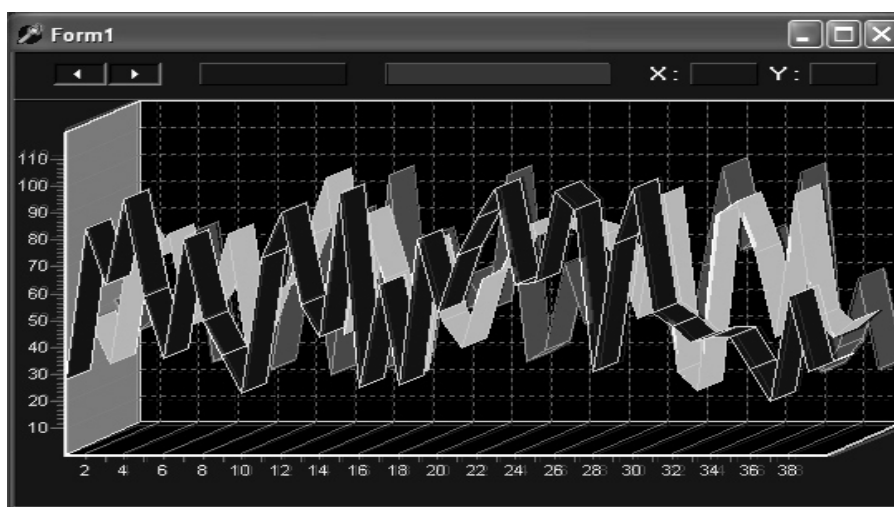


Рис. 5. Трехмерные графики параметров

Программа *StereoMagic* может быть применена в образовательных учреждениях (в качестве основы для электронного учебника), в музеях (для предварительного или дистанционного ознакомления с экспозицией), на выставках, в рекламном бизнесе, или как основа домашней стереоскопической видеостудии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гиенко, А. А. Визуализация объемных изображений методом пространственной селекции ракурсов. 3D монитор [Текст] / А. А. Гиенко // Сб. матер. VI Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2010» / СГГА. - Новосибирск: СГГА, 2010. - Т. 5, ч. 2. - С. 14-17.
2. Гиенко, А. А. Применение отражающих поверхностей для визуализации объемных изображений. 3D монитор [Текст] / А. А. Гиенко // Сб. матер. VII междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2011» / СГГА. - Новосибирск: СГГА, 2011.-Т.5, ч.2.- С. 144-148.
3. Мамчев, Г. В. Стереотелевидение [Текст] / Г. В. Мамчев. - М.: Энергия, 1979. – 64 с.
4. Копылов, П. М. Телевидение и голография [Текст] / П. М. Копылов, А. Н. Тачков. - М.: Связь, 1976. – 168 с.

© А.А. Гиенко, 2012

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ИХ КРУГОВОГО РАССМАТРИВАНИЯ

Александр Анатольевич Гиенко

ФГУП СНИИМ, инженер, г. Новосибирск

В работе заявлены некоторые методы визуализации трехмерных изображений с использованием цилиндрических зеркал. Изложенные методы могут быть использованы для разработки трехмерных дисплеев, а также в развитии концепции много ракурсного телевидения.

Ключевые слова: трехмерное изображение, ракурс изображения.

USE OF A CYLINDRICAL MIRROR SURFACE FOR CONSTRUCTION OF THE THREE-DIMENSIONAL IMAGES WITH AN OPPORTUNITY OF THEIR CIRCULAR VIEWING

Alexander A. Gienko

Siberian State Metrology Research Institute, engineer, Novosibirsk

In work some methods of visualization of the three-dimensional images with use of cylindrical mirrors are stated. The stated methods can be used for development of three-dimensional displays, and also in development of the concept for holographic TV.

Key words: three-dimensional image, image angle.

Логичным выводом из темы, затронутой в работах [1] и [2], является разработка способа пространственной селекции ракурсов для кругового рассматривания трехмерных изображений. В настоящей работе таких способов предложено два. Вопрос об источниках изображений в работе не рассматривается. Достаточно предположить, что снимаемый объект со всех сторон окружен вебкамерами, изображения с которых мы назовем здесь ракурсами.

1. Пространственно-временной способ селекции ракурсов

Предположим наличие проекционной системы с проектором, обладающим возможностью синхронизации внешних для него устройств с его кадровой частотой. В качестве такого внешнего устройства рассмотрим инфракрасный маячок, выдающий во все стороны (на все 360 градусов) импульсы с запаздыванием относительно последовательности кадров проектора, изменяющимся в зависимости от направления ИК-излучения. Допустим, что:

- Частота смены кадров проектора равна 48 Гц;
- Количество ракурсов (вебкамер) в системе 8.

Тогда импульсы ИК-излучения маячка должны следовать с частотой 6 Гц и иметь длительность, равную времени проецирования одного кадра, то есть $1/48$ с.

Предположим также, что вебкамеры расположены вокруг объекта съемки в следующих направлениях:

- Северном;
- Северо-восточном;
- Восточном и т.д.

Нумерация вебкамер начинается с северной (это камера 1) и продолжается далее по часовой стрелке. Последняя камера (камера 8) расположена в северо-западном направлении относительно объекта съемки. В качестве последовательности кадров в проектор подаются по одному кадры с соответствующей вебкамеры. Последовательность повторяется 6 раз в секунду.

ИК-импульсы от маячка в северном направлении должны следовать без запаздывания относительно начала последовательности кадров. В северо-восточном направлении импульсы должны запаздывать от начала последовательности кадров на длительность одного кадра (на $1/48$ секунды). В восточном направлении ИК-импульсы должны запаздывать на длительность двух кадров. По аналогии, импульсы в северо-западном направлении должны запаздывать на $7/48$ секунды.

Автором разработано соответствующее программное обеспечение (ПО), которое не только выстраивает последовательность кадров от окружающих объект вебкамер, но и осуществляет преобразование каждого кадра таким образом, чтобы отраженное в поверхности цилиндрического зеркала указанное изображение имело нормальный вид. Вид одного кадра изображения, преобразованного указанным ПО, представлен на рис. 1.



Рис. 1. Вид изображения, спроектированного на экран

Если наблюдатель применяет специальные затворные очки, оснащенные микропроцессором и управляемые по ИК-каналу, то, находясь в секторе между северным и северо-восточным направлениями относительно зеркального цилиндра, правым глазом он будет видеть изображение от северной камеры (первой), а левым глазом – от северо-восточной (второй). Если наблюдатель находится в секторе между северо-восточным и восточным направлениями от цилиндра, то правым глазом наблюдатель будет видеть изображение от 2-й камеры, а левым – от 3-й. И так далее...

Главное достоинство способа – применение единственного проектора для любого количества наблюдателей, могущих находиться на различных расстояниях от зеркального цилиндра.

Основным недостатком вышеизложенного способа пространственно-временной селекции является применение специальных (чувствительных к направлению) затворных очков со встроенными элементами питания и электронной схемой. Способ также требует наличие проектора с высокой частотой смены изображений (кадров) и специального ИК-маячка, жестко синхронизированного со сменой кадров проектора и тоже управляемого микропроцессором.

2. Пространственный способ селекции ракурсов

Предположим наличие нескольких источников изображений (ракурсов), а также соответствующих данным ракурсам видеопроекторов. Все видеопроекторы расположены по окружности и проецируют каждый свое изображение на зеркальный цилиндр в центре – рис. 2. Изображения

фокусируются проекторами не на поверхности самого цилиндра, а на мнимом изображении в нем внешнего кольца, расположенного соосно с цилиндром и имеющего радиус, превышающий радиус цилиндра в два (или более) раза.

Данное внешнее кольцо на своей внутренней стороне имеет анизотропное катафотное покрытие (см. [2]). Вдоль направляющей цилиндра это покрытие зеркально, а вдоль образующей оно является катафотом. Сфокусированное одним из проекторов изображение будет распределено по внутренней поверхности кольца на угол 240 (или более – зависит от соотношения диаметров кольца и цилиндра) градусов. Если бы эта поверхность являлась обычным диффузным рассеивателем, то изображения от разных проекторов накладывались бы друг на друга со сдвигом, равным угловому расстоянию между проекторами.

Поскольку внутренняя поверхность по вертикали является зеркалом, то изображения отражаются обратно на зеркальный цилиндр, глядя в который их и надо рассматривать. Из каждой такой зоны видно только изображение одного ракурса, проецируемое данным проектором.

В этом случае осуществляется пространственная селекция ракурсов с возможностью кругового оглядывания без применения каких-либо очков. При этом количество наблюдателей ограничивается только наличием свободного места для размещения наблюдателя вблизи внешнего кольца.

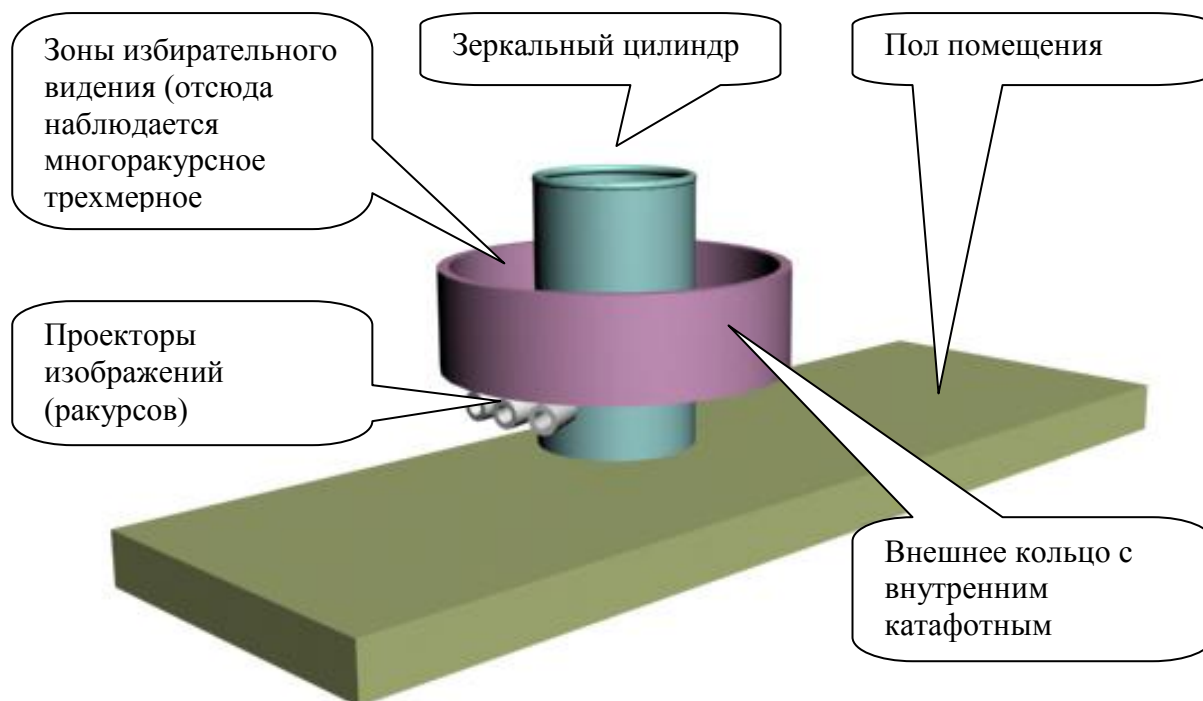


Рис. 2. Внешний вид установки

Несомненное достоинство способа – отсутствие очков.

Недостаток – наличие большого количества проекторов, равного количеству ракурсов.

В данной работе рассмотрены варианты селекции ракурсов только по горизонтали. Для селекции еще и по вертикали описанные способы не подходят.

Применение построенных с реализацией описанных способов устройств возможно в качестве рекламных установок, размещаемых в публичных местах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гиенко, А. А. Визуализация объемных изображений методом пространственной селекции ракурсов. 3D монитор [Текст] / А. А. Гиенко // Сб. матер. VI Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2010» / СГГА. - Новосибирск: СГГА, 2010. - Т. 5, ч. 2.- С. 14-17.
2. Гиенко, А. А. Применение отражающих поверхностей для визуализации объемных изображений. 3D монитор [Текст] / А. А. Гиенко // Сб. матер. VII Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2011» / СГГА. - Новосибирск: СГГА, 2011. - Т. 5, ч. 2. - С. 144-148.
3. Копылов, П. М. Телевидение и голография [Текст] / П. М. Копылов, А. Н. Тачков. - М.: Связь, 1976. – 168 с.

© А.А. Гиенко, 2012

АНАЛИЗ ШЕРОХОВАТОСТИ НЕПРОЗРАЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ ПСЕВДОЦВЕТОВОГО КОДИРОВАНИЯ

Сергей Сергеевич Овчинников

Сибирская государственная геодезическая академия, г. Новосибирск, ул. Пахотного, 10, преподаватель кафедры специальных устройств и технологий, тел 8-961-872-49-66, e-mail: serpanya@yandex.ru

В статье рассмотрен способ и особенности формирования псевдоцветового кодирования изображений на основе существующих технических решений.

Ключевые слова: шероховатости, псевдоцветовое кодирование, светодиод, электронно-дырочный переход, от ультрафиолет, инфракрасный диапазон.

ANALYSIS OF OPAQUE SURFACES ROUGHNESS BY PSEUDOCOLOUR CODING

Sergey S. Ovchinnikov

A teacher, department of Special Devices and Technologies, 10 Plakhotnogo st., Novosibirsk 630008, phone: 8-961-872-49-66, e-mail: serpanya@yandex.ru

The features and techniques of images pseudocolor coding on the basis of the existing engineering solutions are considered.

Key words: roughness, pseudocolor coding, light-emitting diode, electron-hole transition, ultraviolet, infrared.

В соответствии с [1] требования к шероховатости поверхности должны устанавливаться, исходя из функционального назначения поверхности для обеспечения заданного качества изделий. Если в этом нет необходимости, то требования к шероховатости поверхности не устанавливаются и шероховатость этой поверхности контролироваться не должна.

Для измерения шероховатости, в частности, может использоваться двойной микроскоп В. П. Линника. Прибор состоит из двух частей: первого микроскопа для освещения исследуемой поверхности и второго микроскопа для наблюдения и измерения профиля поверхности [2]. Оси обеих частей микроскопа, наклоненные под углом 45° к исследуемой поверхности, пересекаются между собой в предметной точке объективов.

Предлагаемый в работе [3] метод псевдоцветового кодирования изображений основан на том, что большая часть любой информации, в том числе результаты микроскопических исследований, оценивается визуально, а контрастная чувствительность глаза к изменениям цвета на два порядка превышает чувствительность глаза к изменениям интенсивности.

Используя в качестве осветителей светодиоды, нами была собрана установка, оптическая схема которой представлена на рисунке 1, позволившая применить выше указанные принципы и для контроля непрозрачных

материалов. При этом практически установлено, что оптимальным является сочетание светодиодов «синего» и «красного» цветов.

Светодиоды, представляют из себя полупроводниковые приборы с электронно-дырочным переходом, создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока. Излучаемый свет лежит в узком диапазоне спектра, благодаря этому свойству появляется возможность создать светодиоды для любой длинны волны, от лежащих в области от ультрафиолета до среднего инфракрасного диапазона. При проведении данного эксперимента подсветка производилась двумя светодиодами: красным ($610 < \lambda < 760$) и синим ($450 < \lambda < 500$) [4].

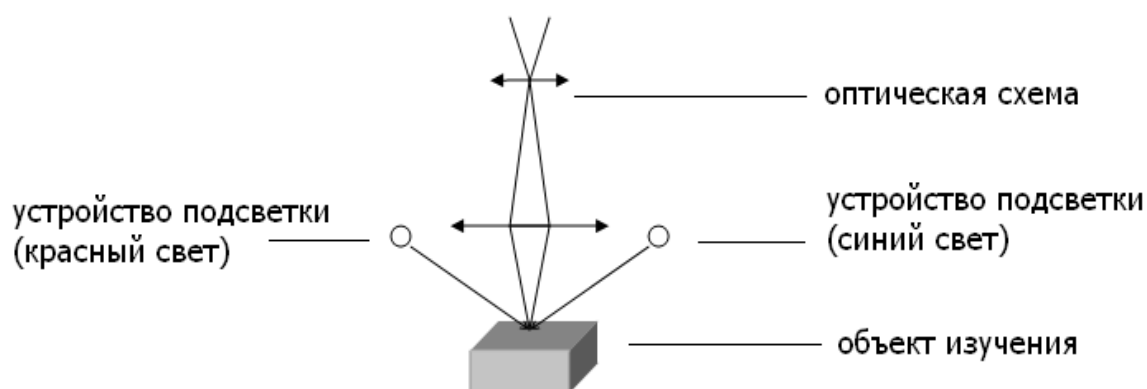


Рис. 1. Принципиальная схема установки

По сравнению с другими электрическими источниками света (преобразователями электроэнергии в электромагнитное излучение видимого диапазона), светодиоды имеют следующие отличия: высокая световая отдача, малая инерционность, высокая механическая прочность, отсутствие чувствительных составляющих, не требуются высокие напряжения, значительный срок службы - от 30 000 до 100 000 часов (при работе 8 часов в день - 34 года) [5]. Низкая стоимость индикаторных светодиодов, Безопасность — не требуются высокие напряжения, низкая температура светодиода или арматуры, обычно не выше 60 градусов Цельсия. Излучение лежит в узком диапазоне спектра, благодаря этому можно создать светодиоды, с узким спектром излучения для повышения фазового контраста[6].

На рис. 2 представлено черно-белое и псевдоцветное изображение образца шероховатости поверхности полученные при помощи выше указанной установки.

В качестве образца использована эталонная поверхность после операции «плоское шлифование».

Вывод: предлагаемый в статье способ повышения контраста и информативности непрозрачных объектов (на примере образца шероховатости поверхности после операции «плоское шлифование» может быть использован на предприятиях и в организациях изготавливающих (эксплуатирующих) данные образцы).

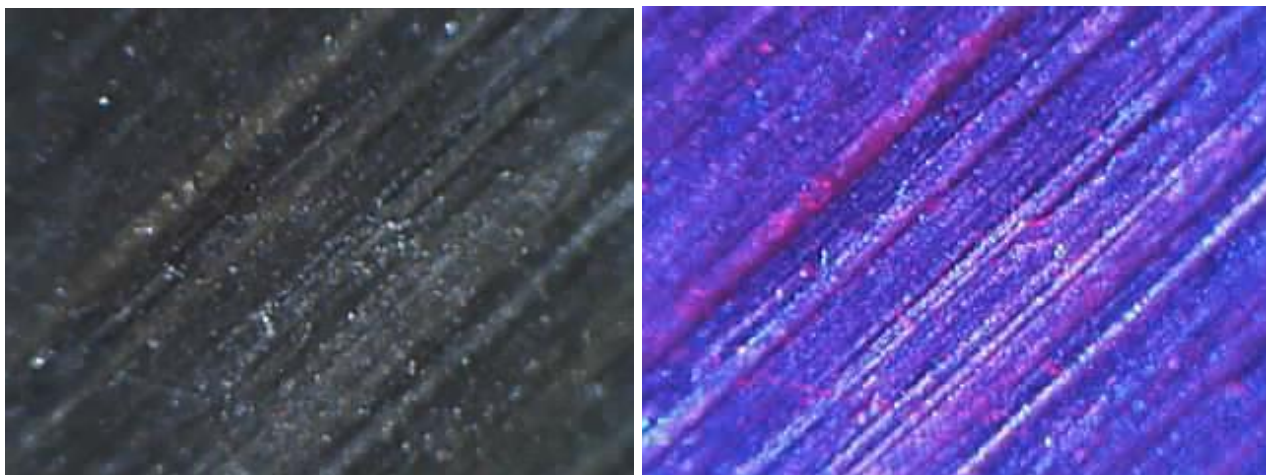


Рис. 2. Черно-белое и псевдоцветовое изображение образца шероховатости поверхности

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения.
2. Дунин-Барковский, И.В., Карташова, А.Н. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
3. Кузнецов, М.М. Повышение контраста и информативности изображений на основе спектральной и пространственно-угловой фильтрации излучения [Текст] / М.М. Кузнецов, О.К. Ушаков, В.М. Тымкул, М.Ф. Носков // Вестник СГГА. – 2010. – № 2(13). – С. 96–100.
4. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16710416?dopt=Abstract>
5. <http://physicsworld.com/cws/article/news/24926>
6. <http://www.nature.com/nature/journal/v441/n7091/full/nature04760.html>

© С.С. Овчинников, 2012

ОСЛАБЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСИОННОГО РАСПЛЫВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ В АТМОСФЕРЕ НА РАБОТУ ПРЕЦИЗИОННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ

Александр Владимирович Кошелев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры специальных устройств и технологий СГГА, тел. 8 923 243 5505, e-mail: alvlkosh@yandex.ru

Александр Петрович Карник

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, ректор, тел. 343-25-34, e-mail: rectorat@ssga.ru

Анатолий Константинович Снякин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры специальных устройств и технологий, проректор, тел. 343-25-34, e-mail: rectorat@ssga.ru

Юрий Григорьевич Костына

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры высшей математики СГГА, тел. 343-25-77, e-mail: kostinaug@mail.ru

Сергей Сергеевич Овчинников

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ассистент кафедры специальных устройств и технологий СГГА, тел. 8 961 872 4966, e-mail: serpanya@yandex.ru

Юрий Владимирович Скипа

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры высшей математики СГГА, тел. 343-25-77, e-mail: syura63@yandex.ru

Наталья Викторовна Заржецкая

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры специальных устройств и технологий СГГА, тел. 8 913 456 0797, e-mail: zargetskaya@yandex.ru

Предложены методы ослабления влияния дисперсионного расплывания фемтосекундных лазерных импульсов в атмосфере, вызывающего увеличение погрешностей дальномерных измерений.

Ключевые слова: дисперсионное расплывание, ошибка измерений, фемтосекундные лазерные импульсы.

ELIMINATION OF DISPERSION SPREADING INFLUENCE IN ATMOSPHERE ON HIGH-PRECISION FEMTOSECOND LASER RANGER OPERATION

Alexandr V. Koshelev

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), Russia, Novosibirsk 630108, 10 Plakhotnogo St; MSc, senior lecturer, Prof..., department of specialized instrumentation and technologies SSGA; tel. 89232435505, e-mail: alvkosh@yandex.ru

Alexandr P. Karpik

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), Russia, Novosibirsk 630108, 10 Plohotnogo St; Ph. DSc, Prof., rector. tel. 343-25-34, e-mail: rectorat@ssga.ru

Anatoly K. Sinjakin

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), Russia, Novosibirsk 630108, 10 Plakhotnogo St; MSc, senior lecturer, Prof., department of specialized instrumentation and technologies SSGA; tel., e-mail: rectorat@ssga.ru

Yuri G. Kostina

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), Russia, Novosibirsk 630108, 10 Plakhotnogo St; MSc, senior lecturer, Prof., department of Applied Mathematics SSGA, tel. (383)343-25-77, e-mail: kostinaug@mail.ru

Sergey S. Ovchinnikov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), Russia, Novosibirsk 630108, 10 Plohotnogo St; post-graduate science student, department of specialized instrumentation and technologies SSGA; tel. 89618724966, e-mail: serpanya@yandex.ru

Yuri V. Skipa

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), Russia, Novosibirsk 630108, 10 Plakhotnogo St; lecturer, department of Applied Mathematics SSGA, tel. (383)343-25-77, e-mail: syura63@yandex.ru

Natalya V. Zarzhetskaya

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), Russia, Novosibirsk 630108, 10 Plohotnogo St; lecturer, department of specialized instrumentation and technologies SSGA; tel. 89134560797, e-mail: zarzhetskaya@yandex.ru

Same methods of dispersion spreading influence attenuation of femtosecond laser pulses in atmosphere resulting in the increase ranger finder measurements errors are suggested.

Key words: dispersion spreading, measurements errors, femtosecond laser pulses.

Высокая пиковая мощность и сверхмалая длительность фемтосекундных лазерных импульсов (ФЛИ) позволяют существенно повысить инструментальную точность измерения расстояний и дальность действия фемтосекундных лазерных дальномеров (ФЛД) [1]. Это дает возможность выполнять измерения больших расстояний с микрометровой инструментальной погрешностью. Однако при измерении больших расстояний возникают два отрицательных явления способных существенно уменьшить потенциально высокую точность и эффективность фемтосекундных светодальномерных измерений в предложенном работе [1] дальномере.

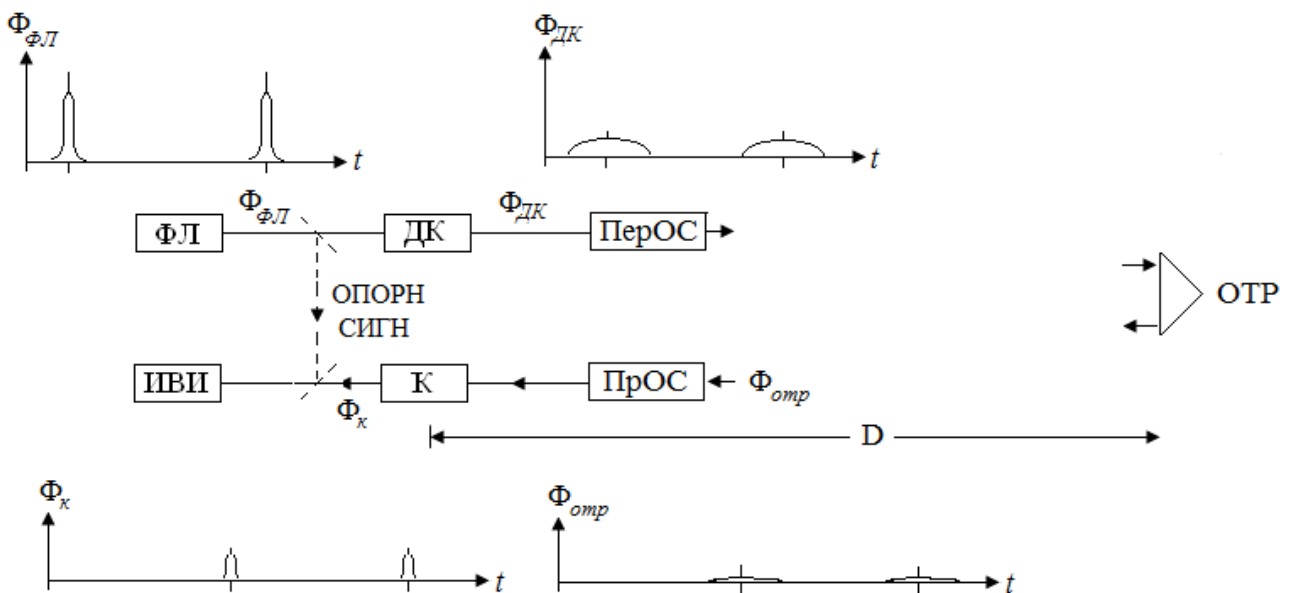


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема ФЛД с декомпрессией и компрессией ФЛИ

В процессе распространения ФЛИ в диспергирующей атмосфере происходит дисперсионное расплывание ФЛИ, что приводит к увеличению длительности отраженных импульсов. Поскольку большинство схем импульсно-фазовых ФЛД [1] работает с использованием нелинейных эффектов, основанных на корреляционной обработке опорных и отраженных сигналов при их временном совмещении, то увеличение длительности отраженных импульсов приведет к снижению точности измерений расстояний из-за увеличения погрешностей измерения временных интервалов. Другой отрицательный эффект заключается в том, что из-за сверхвысокой мощности ФИ в воздухе возникают нежелательные нелинейные эффекты. К ним относятся самофокусировка и схлопывание лазерных пучков с последующим существенным увеличением угла расходимости лазерного излучения. Отмеченные факторы могут значительно уменьшить дальность действия измерения расстояний и снизить точность фемтосекундных импульсных светодальномеров из-за малой мощности отраженных импульсов.

Сущность способа ослабления воздействия отмеченных выше отрицательных факторов на работу дальномера [1] рассмотрим на примере упрощенной схемы импульсного лазерного дальномера, представленной на рис. 1. В этой схеме фемтосекундный лазер генерирует одиночные лазерные импульсы. Поскольку мощность импульсов очень велика, то для исключения отмеченных выше эффектов дисперсионного расплывания ФИ и дополнительного увеличения угла расходимости излучение ФИ подается в декомпрессор (ДК) схема которого представлена на рис. 2.

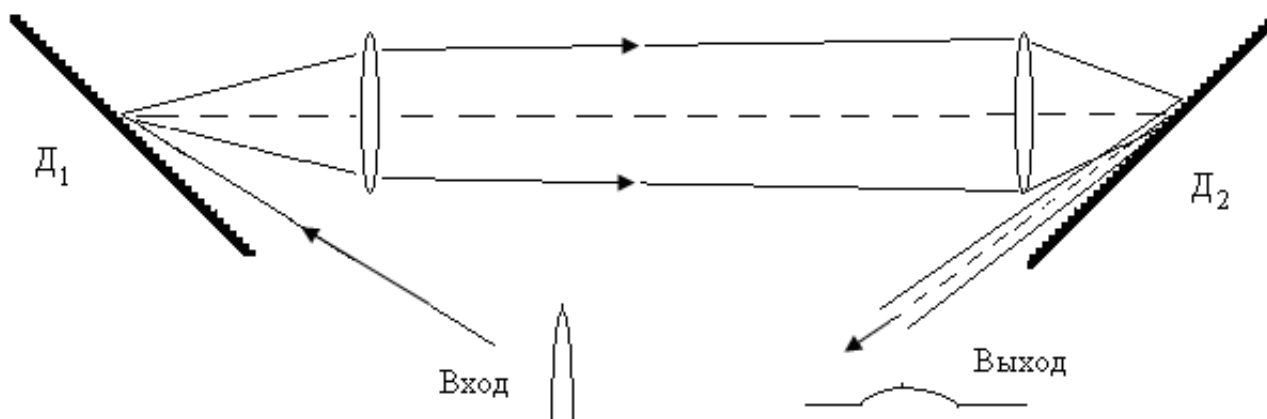


Рис. 2. Схема декомпрессора (ДК) [2]

В простейшем случае ДК для оптических ФИ представляет собой пару дифракционных решеток, обладающих большой угловой дисперсией [2], на которые импульсы направляются под определенным углом, как это показано на рис. 2. В результате длительность излучаемых импульсов искусственно увеличивается примерно в 10^4 раз, а их мощность и полоса частот во столько же раз уменьшается. При этом спектр импульса сужается примерно на четыре порядка и поэтому воздействие диспергирующей атмосферы на импульсы большой длительности значительно уменьшается. Это позволяет существенно снизить отрицательное воздействие атмосферы, связанное как с увеличением длительности ФИ, так и со значительным увеличением угла расходимости излучения лазера от нелинейного дробления пучка сверхмощных импульсов. В результате излучение лазера проходит измеряемое расстояние до отражателя и обратно без дополнительных потерь мощности излучения и увеличения длительности ФИ, вызванного дисперсией атмосферы для широкополосного излучения порядка 10^{15} Гц.

Однако искусственное увеличение длительности импульсов в ДК с низкой крутизной их фронтов отрицательно сказывается на точности измерения временных интервалов, а, следовательно, и расстояний. Поэтому для сохранения потенциально высокой точности измерений, присущей фемтосекундным лазерным импульсам, в приемной оптической системе выполняется действие обратное декомпрессии, т. е. осуществляется компрессия (сжатие) длительности отраженных ФИ. Это происходит в блоке компрессора К, состоящего также из пары дифракционных решеток [2] для выполнения обратной нелинейной операцией по сжатию импульсов во времени, показанного на рис. 3 сразу после приемной оптической системы ПрОС.

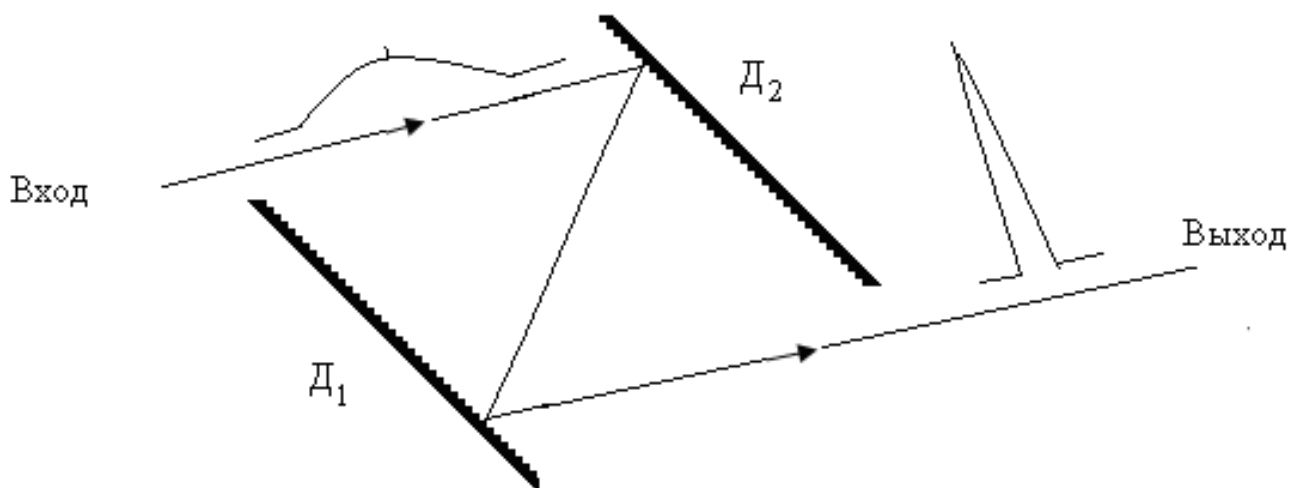


Рис. 3. Принцип работы компрессора [2]

С этой целью в компрессоре рис. 3 дифракционные решетки устанавливаются под определенными углами, приводящими к сжатию импульсов во времени. Таким образом, создается возможность выполнять измерения расстояний без искажающих воздействий атмосферы на увеличения длительности ФИ и дополнительного влияния роста угла расходимости импульсного излучения на дальность действия ФЛД и точность измерения расстояний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кошелев А.В. Фемтосекундный лазерный дальномер. 1998 4 TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACTUAL PROBLEMS OF ELECTRONIC INSTRUMENT ENGENIRING PROCEEDINGS, APEIA-98, Novosibirsk, v. 2, p. 241-242.
2. Крюков П.Г. Фемтосекундные импульсы. - М., ФМЛ. 2008.

© А.В. Кошелев, А.П. Карпик, А.К. Синякин, Ю.Г. Костына,
С.С. Овчинников, Ю.В. Скипа, Н.В. Заржецкая, 2012

СТАБИЛИЗАЦИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС В ОБЪЕМЕ ДЕФОРМИРУЕМОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Юрий Цыдыпович Батомункуев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент, e-mail: opttechnic@mail.ru

Рассматриваются условия стабилизации интерференционных полос в объеме деформируемой голографической среды. Показано, что выбором температуры и внутреннего напряжения среды возможна стабилизация интерференционных полос при динамической записи пропускающих и отражающих голограмм.

Ключевые слова: стабилизация интерференционных полос, голограмма, динамическая голография, деформация голографической среды.

STABILIZATION OF THE INTERFERENCE FRINGES IN VOLUME OF DEFORMED HOLOGRAPHIC MEDIUM

Yuri Ts. Batomunkuev

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation, associate professor, e-mail: opttechnic@mail.ru

The conditions of stabilization of the interference fringes in volume of deformed holographic medium are considered. It is shown, that stabilization of the interference fringes in the dynamic recording of transmission and reflection holograms can be realized by choice of the temperature and of internal pressure.

Key words: stabilization of interference fringes, hologram, dynamic holography, deformation holographic medium.

Известно, что при записи внеосевого ГОЭ сферическими или цилиндрическими волнами в первом приближении требуется выполнение условий дифракции плоских волн. Поэтому рассмотрим подробнее стабилизацию интерференционных полос в объеме светочувствительной среды при записи локальных объемных пропускающих и отражающих решеток. На рис. 1 а, б представлены объемная пропускающая и объемная отражающая голографические решетки, записываемые двумя волнами с интенсивностями I_r , I_o и длиной волны λ_o в динамической среде толщиной L , показателем преломления n и линейным коэффициентом температурного расширения α_T . В процессе экспозиции, в результате фотоиндуцированного $\Delta n_{o,f}$, $\Delta n_{r,f}$, термоиндуцированного $\Delta n_{o,t}$, $\Delta n_{r,t}$ и деформационного $\Delta n_{o,d}$, $\Delta n_{r,d}$ изменений среднего показателя преломления среды происходит непрерывное изменение углов распространения записывающих волн в среде, приводящее к смещению интерференционных полос относительно записываемой объемной решетки [1-3].

С другой стороны, фотоиндуцированные $\Delta L_{o,f}$, $\Delta L_{r,f}$, термоиндуцированные $\Delta L_{o,t}$, $\Delta L_{r,t}$ и деформационные $\Delta L_{o,d}$, $\Delta L_{r,d}$ изменения толщины среды приводят к смещению записываемой решетки ГОЭ относительно интерференционных полос, тем самым, обеспечивая возможность динамической стабилизации положения интерференционных полос при совпадении скоростей смещения решетки ГОЭ и интерференционных полос.

Условие стабилизации интерференционных полос относительно решетки ГОЭ представляется в виде системы:

$$\Delta\varphi(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z) - \Delta\varphi(x, y, z) = 0,$$

$$\Delta x = \Delta x_f + \Delta x_t + \Delta x_d,$$

$$\Delta y = \Delta y_f + \Delta y_t + \Delta y_d,$$

$$\Delta z = \Delta z_f + \Delta z_t + \Delta z_d, \quad (1)$$

где $\Delta\varphi(x, y, z)$, $\Delta\varphi(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$ – соответственно разности фаз записывающих волн в точках (x, y, z) , $(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$; Δx , Δy , Δz – сдвиги интерференционных полос в точке (x, y, z) ; Δx_f , Δy_f , Δz_f – фотоиндуцированные сдвиги; Δx_t , Δy_t , Δz_t – термоиндуцированные сдвиги; Δx_d , Δy_d , Δz_d – деформационные сдвиги решетки в точке (x, y, z) .

Рассмотрим подробно стабилизацию интерференционных полос объемного пропускающего ГОЭ. Для объемного пропускающего ГОЭ, представленного на рис. 1а, рассмотрим локальные фазы записывающих волн в произвольной точке (y, z) его сагиттальной плоскости yOz . Если в начале экспозиции интерференционные полосы формируются в окрестности точки (y, z) среды одними узкими пучками опорной и объектной волн, то при изменении толщины среды ГОЭ на величину ΔL в процессе экспозиции интерференционные полосы в точке $(y + \Delta y, z + \Delta z)$ формируются уже другими пучками опорной и объектной волн.

Фазу объектной волны в точке (y, z) среды в начале экспозиции можно записать в виде

$$\varphi_o(y, z) = (2\pi/\lambda_o)(nz/\cos\Theta_o + s_o),$$

где s_o – длина пути в воздухе. Фазу опорной волны в точке (y, z) в начале экспозиции можно записать в виде

$$\varphi_r(y, z) = (2\pi/\lambda_o)(nz/\cos\Theta_r + s_r),$$

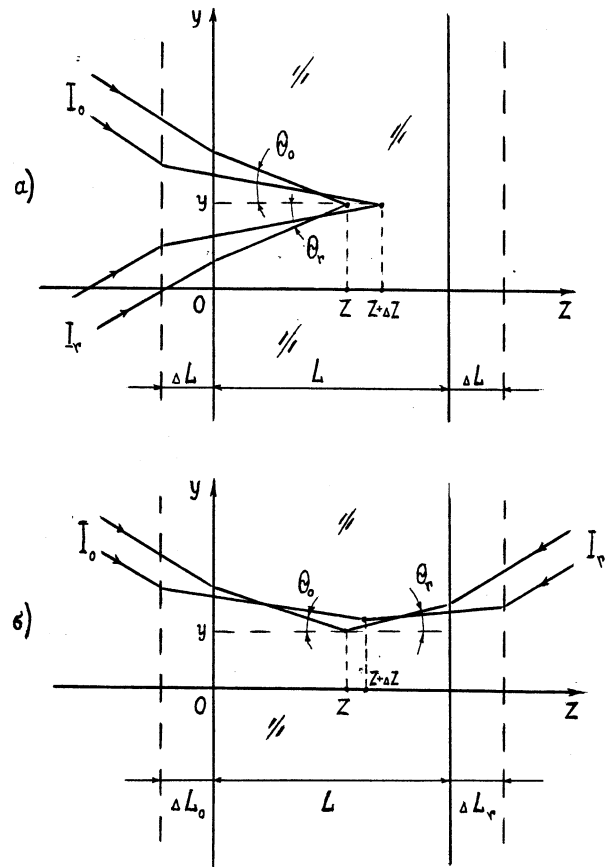


Рис. 1. Динамическая запись объемной пропускающей (а) и объемной отражающей (б) решеток при записи в голографической среде

где s_r – длина пути в воздухе. При изменении показателя преломления и толщины среды в процессе экспозиции фазу объектной волны в точке $(y + \Delta y, z + \Delta z)$ можно представить уже в виде

$$\varphi_o(y+\Delta y, z+\Delta z) = (2\pi/\lambda_o)(n + \Delta n_o)(z + \Delta L + \Delta z)/\cos\Theta_o.$$

Фаза опорной волны в точке $(y+\Delta y, z+\Delta z)$

$$\varphi_r(y+\Delta y, z+\Delta z) = (2\pi/\lambda_o)(n + \Delta n_r)(z + \Delta L + \Delta z)/\cos\Theta_r.$$

Вычисляя разности фаз

$$\Delta\varphi(y+\Delta y, z+\Delta z) = \varphi_o(y+\Delta y, z+\Delta z) - \varphi_r(y+\Delta y, z+\Delta z),$$

$$\Delta\varphi(y, z) = \varphi_o(y, z) - \varphi_r(y, z),$$

и разлагая полученные выражения по малым параметрам, получаем условие стабилизации (1) в виде

$$\begin{aligned} & (2\pi/\lambda_o)[(\Delta n_{o,f} + \Delta n_{o,t} + \Delta n_{o,d})/\cos\Theta_o - (\Delta n_{r,f} + \Delta n_{r,t} + \Delta n_{r,d})/\cos\Theta_r + \\ & + n(\Delta z_f + \Delta z_t + \Delta z_d)(\cos\Theta_o - \cos\Theta_r)/z] = 0, \\ & (2\pi/\lambda_o)[(\Delta L_f + \Delta L_t + \Delta L_d)[n(\cos\Theta_o - \cos\Theta_r) - \cos\Theta_o^a + \cos\Theta_r^a] = 0, \\ & (2\pi/\lambda_o)[(\Delta y_f + \Delta y_t + \Delta y_d)[\sin\Theta_o - \sin\Theta_r] = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Заметим, что действительно, в первом приближении фотоиндуцированные, термоиндуцированные и деформационные изменения толщины и показателя преломления приводят к независимым дополнительным изменениям разности фаз записывающих волн. Поэтому оптимальным выбором изменения температуры (в общем случае оптимальным изменением пространственного распределения температуры), экспозиции, механического напряжения (пространственного распределения напряжения), выбором оптических характеристик сред возможно выполнение условия стабилизации (2) при заданных параметрах записывающих волн.

При отсутствии фотоиндуцированного, термоиндуцированного и деформационного сдвига ГОЭ или их взаимной компенсации (суммы $\Delta L_f + \Delta L_t + \Delta L_d$, $\Delta y_f + \Delta y_t + \Delta y_d$, $\Delta z_f + \Delta z_t + \Delta z_d$ равны нулю) система (2) сводится к известным условиям [2-4].

В случае, когда запись ГОЭ производится в среде на неподвижной прозрачной подложке (сумма $\Delta L_f + \Delta L_t + \Delta L_d$ равна нулю), то вторым выражением в системе (2) можно пренебречь.

Рассмотрим интересные с практической точки зрения частные случаи условия стабилизации (2) (при координате z , принимающей значения от нуля до толщины L). В случае несимметричной схемы записи (углы Θ_o и Θ_r различны), стабилизация имеет место при отсутствии во время экспозиции сдвига поверхности среды, являющейся плоскостью падения записывающих волн (сумма $\Delta L_f + \Delta L_t + \Delta L_d$ равна нулю) и взаимной компенсации термоиндуцированного, фотоиндуцированного и деформационного сдвига ГОЭ вдоль оси Oy (сумма $\Delta y_f + \Delta y_t + \Delta y_d$ равна нулю). Сдвиг решетки ГОЭ и интерференционных полос вдоль оси Oz при этом может быть различным (сумма $\Delta z_f + \Delta z_t + \Delta z_d$ не равна нулю). Изменение температуры, изменение механического напряжения среды в процессе экспозиции определяется из первого выражения условия (2).

В параксиальной области углов (углы Θ_o и Θ_r намного меньше единицы) первое выражение системы (2) с учетом закона Гука сводится к виду

$$\Delta n = \Delta n_{o,f} + \Delta n_{o,t} + \Delta n_{o,d} = \Delta n_{r,f} + \Delta n_{r,t} + \Delta n_{r,d} = \\ = n(\Delta z_f + \Delta z_t + \Delta z_d)/z = \gamma_z n + \alpha_t n \Delta T + E_z n \Delta \sigma,$$

где γ_z – коэффициент фотоусадки (набухания) среды во время экспозиции вдоль оси Oz; α_t – коэффициент линейного температурного расширения среды вдоль оси Oz; E_z – модуль упругости среды вдоль оси Oz; ΔT – изменение температуры; $\Delta \sigma$ – изменение механического напряжения.

При этом получаем, что стабилизация имеет место при такой температуре, когда относительное изменение показателя преломления $\Delta n/n$ равно относительному сдвигу решетки ГОЭ от начального положения вдоль оси Oz. Это выражение справедливо локально вне оптической оси при записи осевого ГОЭ цилиндрическими или сферическими волнами. Также оно должно выполняться в меридиональной плоскости yOz.

Величина изменения температуры ΔT , при которой имеет место стабилизация

$$\Delta T = (\Delta n_f/n + \Delta n_d/n - \gamma_z - E_z \Delta \sigma)/(\alpha_t - (\partial n/\partial T)/n),$$

где $\partial n/\partial T$ – термооптический коэффициент среды. В частном случае, когда деформационными изменениями показателя преломления и толщины среды можно пренебречь, а фотоиндуцированные и термоиндуцированные изменения показателя преломления и толщины среды имеют противоположные знаки, стабилизация происходит при нагреве (охлаждении) среды, если фотоиндуцированное изменение толщины имеет отрицательный (положительный) знак.

Величина напряжения $\Delta \sigma$, необходимая для стабилизации получается

$$\Delta \sigma = (\Delta n_f/n + (\partial n/\partial T)/n - \gamma_z - \alpha_t \Delta T)/(E_z - (\partial n/\partial \sigma)/n),$$

где $\partial n/\partial \sigma$ – коэффициент фотоупругости среды. В частном случае, когда можно пренебречь термоиндуцированными изменениями показателя преломления и толщины, а фотоиндуцированные и деформационные изменения показателя преломления и толщины среды имеют противоположные знаки, стабилизация происходит при увеличении (уменьшении) напряжения среды, если фотоиндуцированное изменение толщины имеет отрицательный (положительный) знак.

Рассмотрим схему записи с волнами одинаковой интенсивности. При равенстве локальных интенсивностей записывающих волн, то есть при выполнении условия $\Delta n_{o,f} + \Delta n_{o,t} + \Delta n_{o,d} = \Delta n_{r,f} + \Delta n_{r,t} + \Delta n_{r,d} = \Delta n$ первое выражение системы (2) сводится к виду

$$\Delta n = n(\Delta z_f/z + \Delta z_t/z + \Delta z_d/z) \cos \Theta_o \cos \Theta_r = n(\gamma_z + \alpha_t \Delta T + E_z \Delta \sigma) \cos \Theta_o \cos \Theta_r,$$

то есть получаем, что стабилизация имеет место при оптимальном выборе температуры, напряжения и углов наклона волн, а также при выполнении дополнительного условия: относительное изменение показателя преломления $\Delta n/n$ в процессе экспозиции совпадает по знаку, но меньше по абсолютной величине относительного изменения толщины среды $(\Delta z_f + \Delta z_t + \Delta z_d)/z$.

В частном случае, когда не учитывается изменение напряжения среды, величина изменения температуры ΔT , при которой имеет место стабилизация

$$\Delta T = (\Delta n_f/n - \gamma_z \cos \Theta_o \cos \Theta_r) / (\alpha_r \cos \Theta_o \cos \Theta_r - (\partial n / \partial T)/n),$$

где $\partial n / \partial T$ – термооптический коэффициент среды.

В другом частном случае, когда не учитывается изменение температуры среды, величина изменения напряжения $\Delta \sigma$, требуемая для стабилизация

$$\Delta \sigma = (\Delta n_f/n - \gamma_z \cos \Theta_o \cos \Theta_r) / (E_z \cos \Theta_o \cos \Theta_r - (\partial n / \partial \sigma)/n),$$

где $\partial n / \partial \sigma$ – коэффициент фотоупругости среды.

Рассмотрим симметричную схему записи (углы Θ_o и Θ_r равны по абсолютной величине, но интенсивности записывающих волн различны). В этом случае стабилизация имеет место при таких значениях температуры и напряжения, когда фотоиндуцированное, термоиндуцированное и деформационное изменения показателя преломления взаимно компенсируют друг друга, то есть

$$\Delta n_{o,f} + \Delta n_{o,t} + \Delta n_{o,d} = \Delta n_{r,f} + \Delta n_{r,t} + \Delta n_{r,d} = 0,$$

а фотоиндуцированный и термоиндуцированный сдвиги решетки ГОЭ по оси Ox компенсируются деформационным сдвигом (сумма $\Delta y_f + \Delta y_t + \Delta y_d$ равна нулю).

Для волн, распространяющихся в среде под другими углами и формирующих дополнительные (шумовые) решетки, условие стабилизации не выполняется.

Из системы (2) следует условие, когда изменением температуры ΔT в процессе записи пропускающей решетки можно пренебречь: модуль произведения $\Delta T L$ должен быть намного меньше модуля выражения

$$(\Delta n_f/n + \Delta n_d/n - (\gamma_z + E_z \Delta \sigma) \cos \Theta_o \cos \Theta_r) L / (\alpha_r \cos \Theta_o \cos \Theta_r - (\partial n / \partial T)/n).$$

Из системы (2) также следует условие, когда изменением напряжения среды $\Delta \sigma$ в процессе записи пропускающей решетки можно пренебречь: абсолютная величина изменения напряжения $\Delta \sigma$ должна быть намного меньше модуля выражения

$$(\Delta n_f/n + \Delta n_t/n - (\gamma_z + \alpha_z \Delta T) \cos \Theta_o \cos \Theta_r) / (E_z \cos \Theta_o \cos \Theta_r - (\partial n / \partial \sigma)/n).$$

Рассмотрим стабилизацию интерференционных полос объемного отражающего ГОЭ. Для объемного отражающего ГОЭ, схема записи которого представлена на рисунке 1б, вычислим разности фаз $\Delta \phi(y + \Delta y, z + \Delta z) = \phi_o(y + \Delta y, z + \Delta z) - \phi_r(y + \Delta y, z + \Delta z)$, $\Delta \phi(y, z) = \phi_o(y, z) - \phi_r(y, z)$ в произвольной точке (y, z) сагиттальной плоскости yOz . Разлагая полученные выражения по малым параметрам, можно представить условие стабилизации (1) в виде:

$$\begin{aligned} & (2\pi/\lambda_o) [(\Delta n_{o,f} + \Delta n_{o,t} + \Delta n_{o,d})/\cos \Theta_o + (\Delta n_{r,f} + \Delta n_{r,t} + \Delta n_{r,d})/\cos \Theta_r + \\ & + n(\Delta z_f + \Delta z_t + \Delta z_d)(\cos \Theta_o + \cos \Theta_r)/z] = 0, \\ & (2\pi/\lambda_o) [\Delta L_o(\cos \Theta_o^a - n \cos \Theta_o) - \Delta L_r(\cos \Theta_r^a - n \cos \Theta_r) - \\ & - (\Delta n_{r,f} + \Delta n_{r,t} + \Delta n_{r,d})L/\cos \Theta_r] = 0. \\ & (2\pi/\lambda_o) [(\Delta y_f + \Delta y_t + \Delta y_d)[\sin \Theta_o + \sin \Theta_r] = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Заметим, что для отражающего, как и для пропускающего ГОЭ в первом приближении фотоиндуцированные, термоиндуцированные и деформационные

изменения толщины и показателя преломления приводят к независимым дополнительным изменениям разности фаз записывающих волн и оптимальным выбором изменения температуры (в общем случае оптимальным изменением пространственного распределения температуры), параметров записывающих волн и оптических характеристик среды возможно выполнение условий стабилизации (3).

Рассмотрим интересные частные случаи условия стабилизации (3) (при координате z , принимающей значения от нуля до толщины L).

В случае несимметричной схемы записи (углы Θ_o и Θ_r различны) стабилизация имеет место при изменении температуры, когда термоиндуцированное изменение показателя преломления, толщины среды, соответствующие смещения интерференционных полос и решетки компенсируются их фотоиндуцированными и деформационными изменениями

$$\Delta T = -(\Delta n_{o,f} + \Delta n_{o,d})/(\partial n/\partial T) = -(\Delta n_{r,f} + \Delta n_{r,d})/(\partial n/\partial T) = \\ = -(\gamma_z + E_z \Delta \sigma)/\alpha_T = -(\gamma_y + E_y \Delta \sigma)/\alpha_T,$$

где $\partial n/\partial T$ – термооптический коэффициент; γ_y, γ_z – относительная фотоусадка среды вдоль осей Oy и Oz ; E_y, E_z – модуль упругости среды вдоль осей Oy и Oz . В частном случае, когда можно не учитывать деформационное изменение показателя преломления и толщины, а фотоиндуцированное и термоиндуцированное изменения показателя преломления и толщины среды имеют противоположные знаки, стабилизация происходит при нагреве среды.

Стабилизация может быть достигнута обеспечением механического напряжения $\Delta \sigma$ (или пространственного распределения напряжения $\Delta \sigma(x,y,z)$) среды

$$\Delta \sigma = -(\Delta n_{o,f} + \Delta n_{o,t})/(\partial n/\partial \sigma) = -(\Delta n_{r,f} + \Delta n_{r,t})/(\partial n/\partial \sigma) = \\ = -(\gamma_z + \alpha_T \Delta T)/E_z = -(\gamma_y + \alpha_T \Delta T)/E_y,$$

где $\partial n/\partial \sigma$ – коэффициент фотоупругости; γ_x, γ_z – относительная фотоусадка среды вдоль осей Ox и Oz ; E_z, E_y – модули упругости среды вдоль осей Oz и Oy .

Рассмотрим схему записи с волнами одинаковой интенсивности. При равенстве локальных интенсивностей записывающих волн

$$\Delta n_{o,f} + \Delta n_{o,t} + \Delta n_{o,d} = \Delta n_{r,f} + \Delta n_{r,t} + \Delta n_{r,d} = \Delta n,$$

и выполнении условия $\Delta y_f + \Delta y_t + \Delta y_d = 0$, система (3) сводится к виду:

$$\Delta n/\cos \Theta_r + n(\gamma_z + \alpha_T \Delta T + E_z \Delta \sigma) \cos \Theta_o = 0,$$

$$\Delta L_o(\cos \Theta_o^a - n \cos \Theta_o) - \Delta L_r(\cos \Theta_r^a - n \cos \Theta_r) - \Delta n L/\cos \Theta_r = 0. \quad (4)$$

Подставляя первое выражение (4) во второе, получаем при записи на термостабильной подложке ($\Delta L_r = 0$),

$$(\Delta L_o/L)(\cos \Theta_o^a - n \cos \Theta_o) + n(\gamma_z + \alpha_T \Delta T + E_z \Delta \sigma) \cos \Theta_o = 0.$$

Учитывая, что $\gamma_z = \Delta L_o/L$, получаем

$$\gamma_z \cos \Theta_o^a + n(\alpha_T \Delta T + E_z \Delta \sigma) \cos \Theta_o = 0.$$

Или

$$\Theta_o = \arcsin[(1 - \gamma_z^2/n^2(\alpha_T \Delta T + E_z \Delta \sigma)^2)^{1/2}/(1 - \gamma_z^2/(\alpha_T \Delta T + E_z \Delta \sigma)^2)^{1/2}].$$

Если не учитывать изменение температуры ($\Delta T = 0$) и напряжение среды ($\Delta \sigma = 0$), то $\cos \Theta_o^a = 0$. Это означает, что в этом случае запись отражающих ГОЭ

необходимо производить при скользящем угле падения волны в среду [5]. Угол Θ_r определяется из первого выражения в (4).

Учет нагрева среды позволяет определить изменение температуры ΔT , при которой имеет место стабилизация

$$\Delta T = - ((\Delta n_f + \Delta n_d)/n + (\gamma_z + E_z \Delta \sigma) \cos \Theta_o \cos \Theta_r) / ((\partial n / \partial T)/n + \alpha_T \cos \Theta_o \cos \Theta_r) = \\ = - (\gamma_y + E_z \Delta \sigma) / \alpha_T.$$

Таким образом, получаем, что в среде на подложке стабилизация имеет место при оптимальном выборе температуры и углов распространения волн, а также при одновременном выполнении условия: фотоиндуцированное смещение решетки ГОЭ вдоль оси Оу в процессе экспозиции компенсируется соответствующим термоиндуцированным смещением.

Для параксиальных углов Θ_o и Θ_r изменение температуры

$$\Delta T = - ((\Delta n_f + \Delta n_d)/n + \gamma_z + E_z \Delta \sigma) / (\alpha_T + (\partial n / \partial T)/n).$$

Также это условие должно выполняться в меридиональной плоскости xOz .

Учет деформации среды позволяет определить изменение напряжения $\Delta \sigma$, при которой имеет место стабилизация

$$\Delta \sigma = - ((\Delta n_f + \Delta n_t)/n + (\gamma_z + \alpha_T \Delta T) \cos \Theta_o \cos \Theta_r) / ((\partial n / \partial \sigma)/n + E_z \cos \Theta_o \cos \Theta_r) = \\ = - (\gamma_y + \alpha_T \Delta T) / E_y.$$

Таким образом, получаем, что в среде на подложке стабилизация имеет место при оптимальном напряжении среды и выборе соответствующих углов распространения волн, а также при одновременном выполнении условия: деформационное смещение решетки ГОЭ вдоль оси Оу в процессе экспозиции компенсируется соответствующим фотоиндуцированным и термоиндуцированным смещениями.

Для параксиальных углов Θ_o и Θ_r изменение напряжения

$$\Delta \sigma = - ((\Delta n_f + \Delta n_t)/n + \gamma_z + \alpha_T \Delta T) / ((\partial n / \partial \sigma)/n + E_z).$$

Также это условие должно выполняться в меридиональной плоскости yOz .

Рассмотрим симметричную схему записи (углы $\Theta_o = \Theta_r = \Theta$). Для среды на подложке (ΔL_r равна нулю), стабилизация имеет место при величине изменения температуры

$$\Delta T = - ((\Delta n_f + \Delta n_d)/n + (\gamma_z + E_z \Delta \sigma) \cos^2 \Theta) / ((\partial n / \partial T)/n + \alpha_T \cos^2 \Theta).$$

Но при этом не требуется взаимной компенсации фотоиндуцированного, термоиндуцированного и деформационного смещений решетки ГОЭ по оси Оу.

Также стабилизация может быть достигнута изменением напряжения $\Delta \sigma$ среды

$$\Delta \sigma = - ((\Delta n_f + \Delta n_t)/n + (\gamma_z + \alpha_T \Delta T) \cos^2 \Theta) / ((\partial n / \partial \sigma)/n + E_z \cos^2 \Theta).$$

Из системы (3) следует условие, когда изменением температуры ΔT в процессе записи отражающего ГОЭ можно пренебречь: модуль произведения $\Delta T L$ должен быть намного меньше модуля выражения

$$((\Delta n_f + \Delta n_d)/n + (\gamma_z + E_z \Delta \sigma) \cos \Theta_o \cos \Theta_r) L / ((\partial n / \partial T)/n + \alpha_T \cos \Theta_o \cos \Theta_r).$$

Из системы (3) также следует условие, когда изменением напряжения среды $\Delta \sigma$ в процессе записи отражающего ГОЭ можно пренебречь: модуль изменения напряжения $\Delta \sigma$ должен быть намного меньше модуля выражения

$$((\Delta n_f + \Delta n_t)/n + (\gamma_z + \alpha_T \Delta T) \cos \Theta_o \cos \Theta_r) / ((\partial n / \partial \sigma) / n + E_z \cos \Theta_o \cos \Theta_r).$$

Таким образом, полученные результаты указывают на возможность взаимной компенсации фотоиндуцированного и термоиндуцированного искажения волновых фронтов в деформируемой голографической среде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балабаер К.Г., Марков В.Г., Кухтарев И.В. и др. Преобразование фаз и интенсивностей световых пучков при записи динамических решеток в кристаллах LiNbO_3 // Журн. техн. физ. –1980. –Т. 50, № 12. – С. 2560–2566.
2. Суханов В.И., Петников А.Е., Ащеулов Ю.В. Запись голограмм во встречных пучках на органическом материале реоксан // Оптическая голография. – Л., 1983. – С. 56–64.
3. Мамаев А.В., Шкунов В.В. Условия статической записи трехмерных голограмм в динамических средах // Оптическая голография с записью в трёхмерных средах. – Л., 1989. – С. 56–61.
4. Батомункуев Ю.Ц., Сандер Е.А., Шойдин С.А. Аберрации объемных голограмм // Тез. Всесоюз. семин. "Автоматизация проектирования оптических систем"(26 - 28 октября 1988 г. Москва).– М., 1989.–С.101–112.
5. Батомункуев Ю.Ц., Мещеряков Н.А. Стабилизация положений интерференционных полос при записи объемной голограммы в реальном времени / Автометрия. – 2000. – № 1. – С. 50 – 56.

© Ю.Ц. Батомункуев, 2012

СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЁТА ТЕРМОДЕФОРМАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ОХЛАЖДАЕМЫХ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Алексей Сергеевич Рафаилович

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, г. Новосибирск, ул. Николаева, 8, научный сотрудник Отдела конструирования оптико-электронных приборов, тел. (383) 330 80 78, e-mail: ra@oesd.ru

В докладе приводится сравнительный анализ результатов численного моделирования термодформаций сопряжённых по наибольшей плоскости пластин из различных материалов, проведённого различными расчётными методами.

Ключевые слова: биметалл, термодформации, численное моделирование.

COMPARISON OF METHODS FOR CALCULATING THE THERMAL DEFORMATIONS OF ELEMENTS OF COOLED THERMAL IMAGING DEVICES

Alexey S. Rafailovich

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian, Academy of Sciences, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics» (NB ISP SB RAS «TDIAM») Nikolaeva st., 8, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, research associate in the Department of constructing optoelectronic devices, phone: +7 383 330 80 78, e-mail: ra@oesd.ru

The report presents a comparative analysis of the results of numerical simulation of thermal deformations coupled to the highest plane of the plates of different materials, conducted by different calculation methods.

Key words: bimetal, thermal deformation, numerical simulations.

В составе охлаждаемых тепловизионных устройств часто встречаются конструктивные элементы, включающие две или более сопряжённые по плоскости пластины из материалов с отличающимися друг от друга коэффициентами теплового линейного расширения (КТЛР). Ввиду значительных перепадов температур, возникающих в процессе эксплуатации прибора, возникающие при этом деформации, могут оказывать значительное влияние на его функциональные параметры, а также срок службы.

В рамках программы по формированию единой среды проектирования ЦКП по стандартизации СО РАН нашему предприятию поставлены компьютеры с предустановленной системой численного моделирования SolidWorks Simulation Professional 2011 (далее в настоящем докладе – Simulation).

Одной из основных функциональных возможностей Simulation является моделирование деформаций элементов конструкции в результате изменения температуры. В терминологии Simulation данная процедура носит название «линейный статический анализ». В ходе анализа рассчитываются силы

перемещений, напряжения и реакции, возникающие в элементах конструкции в результате воздействия нагрузок.

В линейном статическом анализе используются следующие допущения:

- Все нагрузки прилагаются медленно и постепенно, пока не достигнут своих полных величин; по достижению своих полных величин нагрузки остаются постоянными (неизменными по времени);
- Соотношения между нагрузками и вызванными ими реакциями предполагаются линейными.
- Все материалы в модели подчиняются закону Гука, в соответствии с которым напряжение прямо пропорционально деформации;
- Вызванные перемещения достаточно малы, чтобы можно было пренебречь изменениями в жесткости, вызванными нагрузкой;
- Граничные условия не изменяются во время приложения нагрузок;
- Нагрузки должны быть постоянными по величине, направлению и распределению и неизменными во время деформирования модели.

Численное моделирование производится методом конечных элементов в два основных этапа. На первом этапе создаётся трёхмерная модель изделия и разбивается на элементы, задаются нагрузки. На втором – производится вычисление искомых величин для каждого элемента.

Однако разработчик программного обеспечения предупреждает о возможности несоответствия расчётных данных экспериментальным и необходимости обязательной экспериментальной проверки результатов моделирования.[1] Таким образом, существует проблема достоверности результатов расчёта.

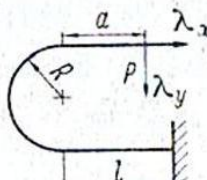
Методы расчёта термобиметаллических пластин достаточно освещены в специальной литературе [2, 3]. Однако данные методы применимы только к конструктивным элементам достаточно простой формы, и только если ширина термобиметаллической пластины значительно меньше длины, в случае, когда конструктивный элемент не является плоской прямоугольной пластиной.

С целью оценки адекватности численного моделирования термодетформаций программным обеспечением Simulation были проведены проверочные расчёты силового элемента механизма компенсации терморасфокусировки тепловизора, представляющего собой подковообразную биметаллическую пружину по формулам приведённым таблице 1.

Конструктивные параметры термобиметаллической пружины следующие:

– Материал пассивного (наружного) слоя	инвар
– Материал активного (внутреннего) слоя	латунь
– Ширина пластины, мм	13,65
– Толщина пластины h , мм	2,6
– КТЛР пассивного слоя, $^{\circ}\text{C}^{-1}$	2×10^{-6}
– КТЛР активного слоя, $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$18,5 \times 10^{-6}$
– Радиус R , мм	21,2

Таблица 1. Формулы для определения перемещения концевое сечения пружины из нормального биметалла согласно [2]

Схема нагружения пружины	Перемещение	
	линейное λ , мм	угловое φ , рад
	$\lambda_x = k \Delta t R (\pi R + 2l)$ $\lambda_y = k \Delta t [0,5 (a^2 - l^2) + al + 2R^2 + \pi Ra]$	$k \Delta t (a + l + \pi R)$

В приведённых формулах использованы следующие обозначения:

$$\Delta t = t_1 - t_2 \quad (1)$$

где t_1 и t_2 – начальная и конечная температуры соответственно;

$$k = 1,5(\alpha_1 - \alpha_2)/h \quad (2)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплового линейного расширения материалов активного и пассивного слоя соответственно;

h – толщина пластины (сумма толщин активного и пассивного слоёв).

В статическом исследовании Simulation температурные воздействия задавались двумя возможными методами:

- Температура задана из меню «Внешние воздействия» (метод 1);
- Внешние нагрузки используют данные о температуре из результатов ранее проведённого термического исследования (метод 2).

Результаты расчётов и моделирования в сравнении с перемещением механизма с теми же параметрами приведены на рис. 1.

Из приведённых результатов моделирования следует, что:

- Величина перемещения, рассчитанная по формулам табл. 1, практически совпадает с перемещением реального механизма;
- Результат расчёта термодеоформаций Simulation, при одинаковых исходных данных, зависит от способа задания температуры;
- Ни один из результатов моделирования Simulation не соответствует полностью экспериментальным данным;
- Среднее арифметическое, рассчитанное по результатам моделирования по методу 1 и 2 близко к значениям, полученным по формулам табл. 1 и экспериментальным данным.

Таким образом, установлено, что рассмотренные расчётные методы термобиметаллической пружины показывают приемлемое совпадение с экспериментальными данными.

Однако, в случае, когда термическим воздействиям подвергаются три и более сопряжённые пластины из материалов с различными коэффициентами теплового линейного расширения, расчёт по формулам [2, 3] применим только частично.

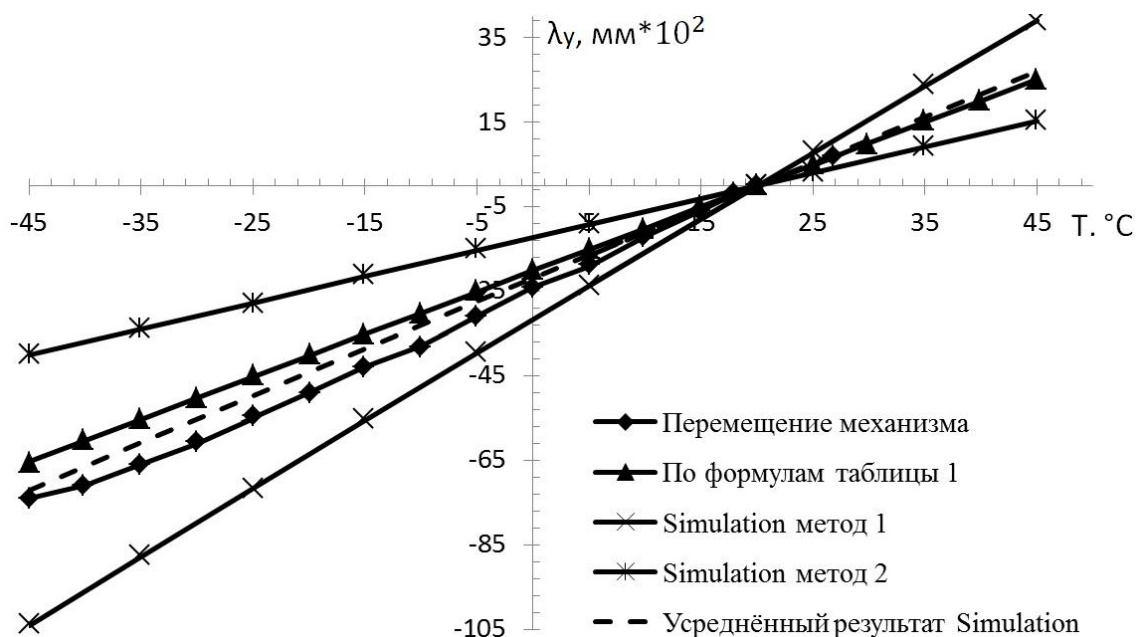


Рис. 1. Результаты расчёта и измерений перемещения свободного концатермобиметаллического элемента

В то же время основная функциональная часть охлаждаемых тепловизионных фотоприёмных устройств (ФПУ) – гибридная микросборка, является именно такой структурой, подвергающейся в процессе эксплуатации сильным перепадам температур.

Эпюра изменений размеров и взаимного расположения элементов конструкции одного из вариантов узла показана на рис. 2.

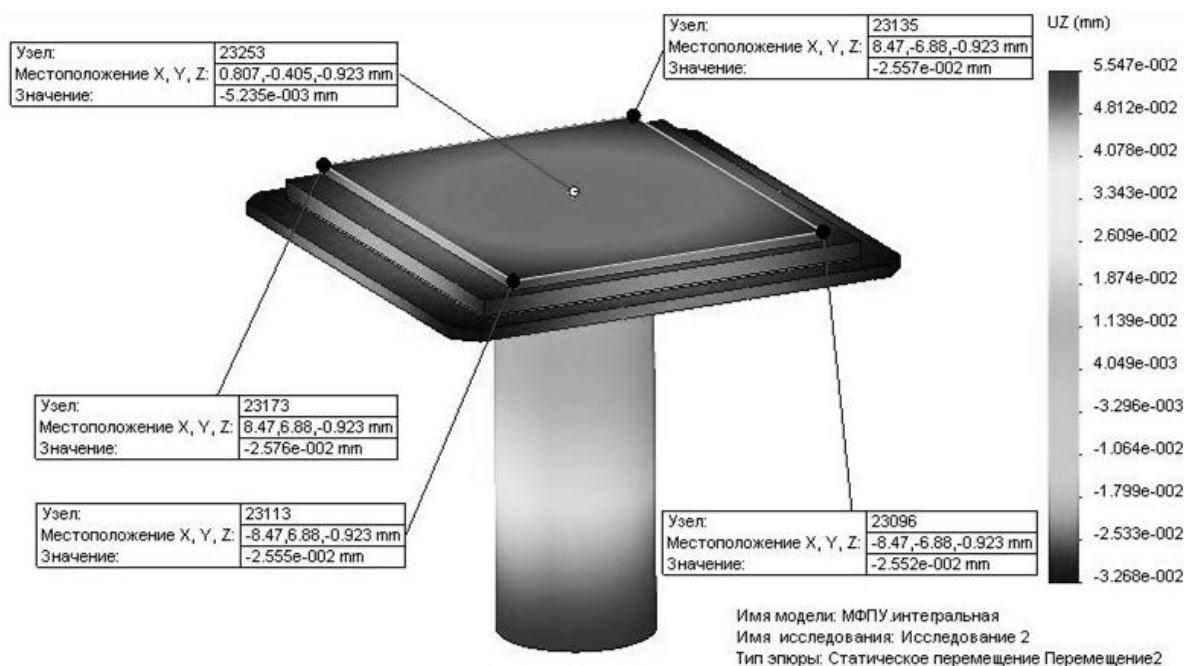


Рис. 2. Эпюра смещений точек модели в направлении оси Z

При моделировании различных конфигураций гибридной микросборки матричного ФПУ в сборе с охлаждаемым столиком вакуумного криостатируемого корпуса (ВКК) средствами Simulation установлено, что расчётные значения смещений краевых точек, расположенных симметрично относительно центральной части Si подложки гетероструктуры отличаются друг от друга.

Данный факт обусловлен несимметричностью сети расчётной модели.

Наиболее близким к реальному положению соответствующих точек элементов конструкции после деформации, является среднее арифметическое значений смещения, рассчитанных методами 1 и 2.

Таким образом, установлено, что результаты моделирования термдеформаций средствами программного комплекса SolidWorks Simulation 2011 адекватны экспериментальным данным только при выполнении определённых условий, никак не отражённых в инструкциях по применению, а именно:

- Необходимо проводить два независимых расчёта (в терминологии Simulation – «исследования») задавая температуру различно для каждого из них;
- Сетка в каждом из исследований должна быть задана идентично;
- Наиболее близкий к экспериментальному результат это среднее арифметическое между значениями деформаций полученными разными методами для одной и той же точки элемента конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Предпосылки анализа [Электронный ресурс]: 2011 Справка по SolidWorks. – Режим доступа: <http://help.solidworks.com/2011/Russian/cworks/LegacyHelp/Simulation/> SolidWorks/

AnalysisBackground/IDH_Analysis_Background_Analysis_Background.html?id=c1322a7fb5c145b49fed49c48190f750#Pg0

2. Веркович, Г.А. и др. Справочник конструктора точного приборостроения [Текст] / Г.А. Веркович, Е.Н. Головенкин, В.А. Голубков и др.; под общ. ред. К.Н. Явленского, Б.П. Тимофеева, Е.Е. Чадаевой. – Ленинград: Машиностроение. Ленингр. Отделение, 1989. – 792 с.

3. Заплетохин, В.А. Конструирование деталей механических устройств: Справочник [Текст] / В.А. Заплетохин. – Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1990. – 669 с.

© А.С. Рафаилович, 2012

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ ТЕПЛОВИЗИОННЫМИ ПРИБОРАМИ

Игорь Владимирович Касаткин

Открытое акционерное общество «Центральное конструкторское бюро точного приборостроения», 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, инженер, тел. (383)225-96-48, e-mail: papahano@mail.ru

Уровень вычислительных мощностей и программного обеспечения современных компьютеров дает принципиальную возможность дополнять результаты расчета дальности действия проектируемых тепловизионных приборов моделями изображений, идентичными по своим параметрам, реальным тепловизионным изображениям. Это открывает новые области применения подобных моделей. Например, при отработке алгоритмов автоматического обнаружения и распознавания целей или при обучении и аттестации потенциальных наблюдателей.

В докладе рассматривается возможный алгоритм компьютерного моделирования изображений, формируемых тепловизионными приборами, и предложена его реализация в программной среде MatLab.

Ключевые слова: тепловизионный прибор, двумерный силуэт.

COMPUTER SIMULATION OF THERMAL IMAGING DEVICES IMAGES

Igor V. Kasatkin

Open joint-stock company «The Central Design Office of precision instruments», 179/2 Dusi Kovalchuk, Novosibirsk 630049, engineer, tel. (383)225-96-48, e-mail: papahano@mail.ru

At present the level of computing capacities and software of modern computers gives an opportunity to supplement the range calculation results of thermal image devices with image models, identical to real thermal images. This opens new fields for application of such models, when developing algorithms of an automatic target detection and recognition or when potential observers' training and confirming their qualification.

In this article the possible algorithm of a computer simulation of thermal imaging devices images is described. Its implementation in the software environment MatLab is proposed.

Key words: thermal imaging devices, two-dimensional silhouette.

Предметом рассмотрения будет процесс моделирования (синтезирование) тепловизионных изображений, формируемых тепловизионными приборами.

Моделирование целесообразно проводить имитацией последовательного воздействия на исходное изображение всех функциональных блоков моделируемого прибора, с учетом характеристик цели и влияния атмосферы.

Разработанная программа включает в себя следующий алгоритм:

- Создание исходного изображения в виде двумерного силуэта цели;
- Удаление цели на заданную дальность;
- Деформация изображения двумерного силуэта в приемном объективе;
- Формирование энергетического окраса двумерного силуэта цели;

- Дискретизация силуэта цели на фоточувствительной матрице прибора;
- Формирование шумовой картины прибора;
- Моделирование системы автоматической регулировки контраста и яркости изображения прибора;
- Вывод синтезированного изображения на экран компьютера.

В качестве программной среды разработки выбрана система MatLab.

Создание исходного изображения в виде двумерного силуэта цели на подстилающем фоне

Тепловизионное изображения в полной мере представляется палитрой определенного числа градаций серого.

Исходные изображения цели и фона формируются в виде матрицы чисел, где в каждой ячейке содержится значение яркости соответствующего пикселя.

В программе реализовано моделирование двумерных силуэтов целей типа «мира» (далее - мира) и «бортовая проекция танка» (далее - БПТ).

Цели формируются на кадре рядом друг с другом и имеют одинаковый вертикальный размер. Одновременное наблюдение обоих типов целей позволяет как субъективно оценивать силуэт танка с последующей попыткой его обнаружения, распознавания или идентификации, так и проводить более точную оценку разрешения моделируемого прибора по количеству разрешаемых штрихов мира, что по критерию Джонсона эквивалентно решению тех же самых задач с некоторой вероятностью.

Вид исходного изображения представлен на рис. 1.



Рис. 1. Исходное изображение

На данном этапе разработки программы, разрешение исходного изображения ограничивается разрешением фотографии реального танка и составляет 906×456 пикселей. Разрешение мира - 144×144 пикселя.

Удаление цели на заданную дальность

Суть операции заключается в приведении размеров изображения целевых и фоновых объектов в соответствие с линейными размерами поля зрения прибора и дальности до объекта. Примеры удаления на заданную дальность показаны на рис. 2.



удаление на 200 м

удаление на 500 м

Рис. 2. Удаление цели на заданную дальность

Деформация изображения двумерного силуэта в приемном объективе

На данном этапе исходное изображение подвергается обработке с целью учета функции рассеяния точки (далее - ФРТ) объектива моделируемого прибора. Деформация проводится методом двумерной свертки матрицы исходного изображения с матрицей двумерной ФРТ.

ФРТ задается в виде гауссова распределения вида

$$\text{ФРТ}(x,y) = \exp\left[\frac{-x^2-y^2}{2 \cdot (D_{kr}/6)^2}\right],$$

где x, y – пространственные координаты;

D_{kr} – диаметр кружка рассеяния объектива моделируемого прибора.

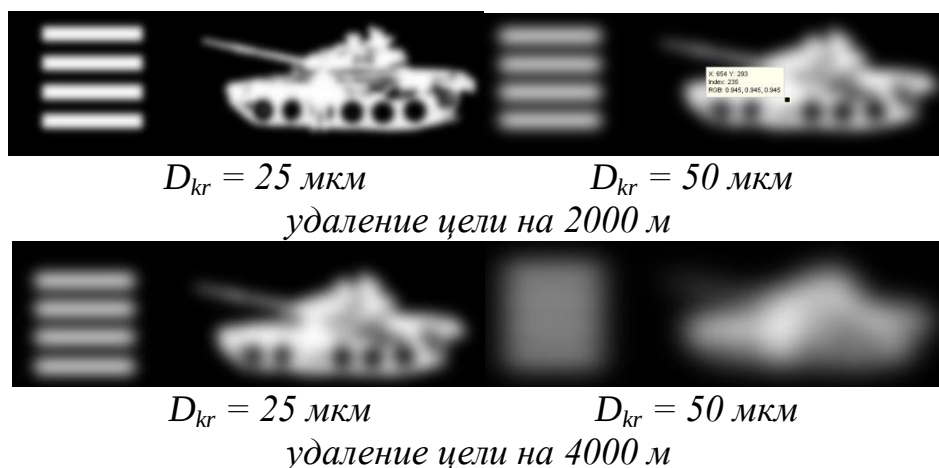
Для обеспечения постоянной точности моделирования, формат матрицы, описывающей ФРТ, изменяется относительно линейных размеров D_{kr} .

Адаптивное изменение масштаба матрицы ФРТ приводит к тому, что линейные размеры каждого пикселя изображения, описываемого этой матрицей, остаются постоянными вне зависимости от величины D_{kr} .

При расчете коэффициента масштабирования исходного изображения учитываются:

- Линейный размер матрицы фоточувствительных элементов моделируемого прибора;
- Фокусное расстояние объектива;
- Удаление цели на заданную дальность.

Примеры деформации силуэта цели представлены на рис. 3.



$D_{kr} = 25 \text{ мкм}$

$D_{kr} = 50 \text{ мкм}$

удаление цели на 2000 м

$D_{kr} = 25 \text{ мкм}$

$D_{kr} = 50 \text{ мкм}$

удаление цели на 4000 м

Рис. 3. Деформация двумерного силуэта цели на исходном изображении

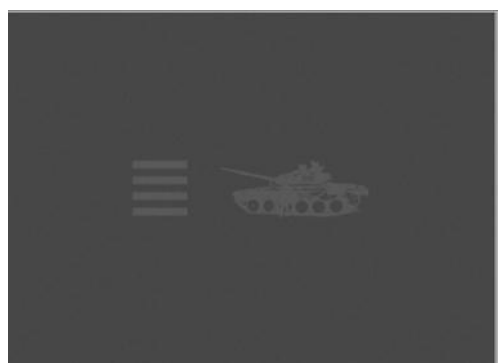
Формирование энергетического окраса двумерного силуэта цели

Энергетический окрас двумерного силуэта цели осуществляется присвоением соответствующей яркости каждому пикселю, входящему в его состав. Аналогично осуществляется окрас элементов фона.

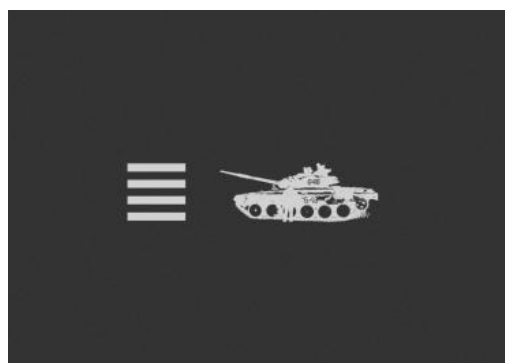
Значение яркости каждого пикселя рассчитывается относительно более чем 20 вводных параметров, включающих в себя параметры цели, фона, приемного объектива, фотоприемного устройства и атмосферной трассы, в которой распространяется излучение. В настоящее время в качестве модели атмосферы используется модель из [1].

Эквивалентные яркости присваиваются соответствующим пикселям изображения после сравнения энергетических потоков от объектов фоно-целевой обстановки и пороговой мощности срабатывания фотоприемного устройства.

На рисунке 4 представлены модели изображения двумерных силуэтов цели при различном температурном контрасте.



$\Delta T = 5 K$



$\Delta T = 25 K$

Рис. 4. Изображения двумерных силуэтов цели при различных контрастах

Дискретизация силуэта цели на фоточувствительной матрице прибора

Фотоприемные устройства тепловизионных приборов имеют дискретную структуру и состоят из малого количества фоточувствительных элементов. При анализе изображения, получаемого с такой матрицы, становится очевидна его "ступенчатость".

В процессе дискретизации силуэта цели исходное изображение разбивается на определенное количество зон, содержащих $M \times M$ элементов исходного изображения. Число зон равно количеству элементов применяемого фотоприемного устройства. Внутри каждой зоны производится расчет средней яркости входящих в их состав пикселей исходного изображения.

На рис. 5 представлен фрагмент смоделированного изображения целей, удаленных от прибора на дальность 1000 м при четырехкратном электронном увеличении прибора.



Рис. 5. Цель на дальности 1 000 м

Формирование шумовой картины прибора

В процессе разработки программы моделирования, и особенно на ее первых этапах, целесообразно введение одного общего модуля нанесения шумовых составляющих на исходное изображение. Как показывает практика [2], основную составляющую шумов можно представить белым гауссовым шумом фотоприемного устройства. Другие источники шума пренебрежимо малы.

Программную реализацию в этом случае, можно проводить графической обработкой исходного изображения. В частности, программный модуль Matlab Image Processing Toolbox [3] содержит функцию `imnoise`, которая позволяет создавать новое изображение путем добавления шума к исходному изображению. Функция может добавлять, в том числе и белый гауссов шум.

Моделирование системы автоматической регулировки контраста и яркости изображения прибора

На заключительном этапе моделирования проводится учет различных алгоритмов обработки сигнала, реализуемых в моделируемом приборе.

На данный момент в состав программы входит модуль автоматической регулировки контраста и яркости изображения.

Так как обработка проходит уже после нанесения на изображение шумовой составляющей, регулировка проводится и для шумовых выбросов. В результате, на итоговом изображении при недостаточной чувствительности прибора яркость изображения выставляется, фактически, по шумовым выбросам.

Примеры изображений с включенным модулем автоматической регулировки контраста и яркости представлены на рис. 6.

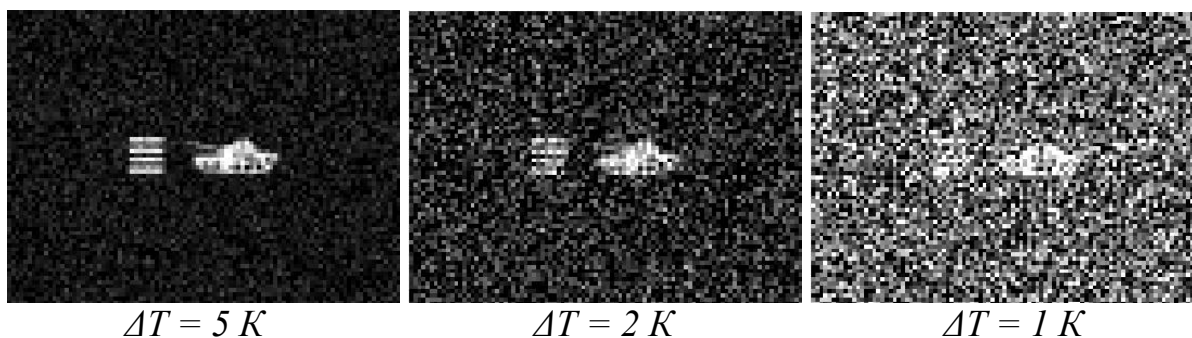


Рис. 6. Примеры изображений с включенным модулем автоматической регулировки контраста и яркости

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алеев Р.М., Иванов В.П., Овсянников В.А. Влияние атмосферы на эффективность аппаратуры / Р.М. Алеев, В.П. Иванов, В.А. Овсянников // Основы теории анализа и синтеза воздушной тепловизионной аппаратуры. – Казань. – 2000. – С. 96-104.
2. Иванов, В.П., Курт, В.И., Овсянников, В.А., Филиппов, В.Л. Компьютерное имитационное моделирование тепловизионных изображений / В.П. Иванов, В.И. Курт, В.А. Овсянников, В.Л. Филиппов // Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. – Казань. – 2006. – С. 426-444.
3. Рудаков, П.И., Сафонов, В.И. Пакет прикладных программ Image Processing Toolbox / П.И. Рудаков, В.И. Сафонов // Обработка сигналов и изображений. – Москва. – 2000. – С. 252-408.

© И.В. Касаткин, 2012

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

Борис Викторович Поллер

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13, корп. 3, доктор технических наук, профессор, тел. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Василий Михайлович Клементьев

Институт лазерной физики СО РАН, , 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13, корп. 3, доктор физико-математических наук, профессор, тел. 333-21-27, e-mail clock@laser.nsc.ru

Александр Викторович Бритвин

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13, корп. 3, младший научный сотрудник, тел. 330-71-20, e-mail: jeepo@yandex.ru

Юрий Дмитриевич Коломников

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13, корп. 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Андрей Борисович Поллер

Институт лазерной физики СО РАН, , 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13, корп. 3, тел. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

В статье рассматриваются некоторые характеристики фотонно-кристаллических волноводов, сформированных из полимерных волоконных волноводов. Предложен метод формирования периодической структуры фотонно-кристаллического волновода путем свертки пленки с закрепленными на ней волокнами с заданным шагом.

Ключевые слова: фотонно-кристаллические волноводы, полимерные волокна.

EXPERIMENTAL PARAMETERS OF TERAGERCOVYH POLYMER PHOTONIC CRYSTAL WAVEGUIDES

Boris V. Poller

Institute of laser physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentyev Ave., 13, building 3, Doctor of Engineering., professor, ph. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Vasily M. Klementyev

Institute of laser physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentyev Ave., 13, building 3, doctor of physical and mathematical sciences., professor, ph. 333-21-27, e-mail clock@laser.nsc.ru

Alexander V. Britvin

Institute of laser physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentyev Ave., 13, building 3, younger research associate, ph. 330-71-20, e-mail: jeepo@yandex.ru

Yury D. Kolomnikov

Institute of laser physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentyev Ave., 13, building 3, candidate of physical and mathematical sciences., с.н.с., ph. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Andrey B. Poller

Institute of laser physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentyev Ave., 13, building 3, ph. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

In article it is considered some characteristics of the photon and crystal wave guides created from polymeric fiber wave guides. The method of formation of periodic structure of a photon and crystal wave guide by a way of convolution of a film with the fibers fixed on it with the set step is offered.

Key words: photon and crystal wave guides, polymeric fibers.

В последнее время активно развивается применение терагерцового излучения. Существующие ТГц системы достаточно громоздки из-за применения для передачи и управления ТГц излучением громоздких и требующих точной настройки оптических элементов. Уменьшение массогабаритных параметров значительно увеличит сферу применения ТГц систем.

Одним из вариантов уменьшения данных параметров является перевод систем передачи и управления ТГц на гибкие волноводные структуры с малым затуханием сигнала. Такими системами являются фотонно-кристаллические волноводы (ФКВ). Наименьшее затухание в ТГц диапазоне и имеют полые полимерные ФКВ.

На передаточную характеристику ТГц волновода существенно влияет состояние воздушных каналов – микрополостей между волокнами. На основе этой зависимости, например для структурированных стеклянных волноводов с полый сердцевинной, исследуются сенсорные свойства такого волновода при заполнении различными жидкостями [1]. В статье [2] нами был также предложен метод управления передаточной характеристикой волновода за счет изменения спектральных характеристик волновода при внешнем лазерном облучении, открывающий возможность быстрого дистанционного управления параметрами волновода. Такая же возможность открывается при заполнении полостей в ТГц волноводе оптическими жидкостями, содержащими проводящие и магниточувствительные микрочастицы, либо при заполнении жидкостями полых волокон – капилляров.

Традиционно формирование ФКВ осуществляется за счет вытягивания волокна из заготовки большего диаметра [3]. Нами для формирования ФКВ предложен вариант формирования периодических структур используя сборку из полимерных волноводов [2]. В данном случае периодическая структура ФКВ обеспечивается полимерными волноводами и воздушными промежутками между ними.

В терагерцовом диапазоне открываются новые возможности заданного изменения коэффициента преломления и соответственно характеристик ФКВ, за счет сборки ФКВ из волокон определенного диаметра $d_i \leq \lambda_t$ из разных

полимеров с заданными коэффициентами преломления – n_i . В этом случае значительно расширяется диапазон изменения коэффициента преломления материала волновода и можно формировать новые структуры изменения $n(x,y,z)$ в волноводе, недоступные для прежнего метода.

Для оценки этого метода была выполнена в лабораторных условиях вытяжка волокон из полипропилена РР ($n = 1,49$) с диаметром от 50 до 300 мкм.

Формирование ФКВ из волоконных волноводов осуществляется путем объединения волноводов в самоорганизующийся массив. На Рис. 1а представлена структура ФКВ, образующаяся при равном диаметре волоконных волноводов. Для формирования полого ФКВ необходимо удалить центральный волновод. Вид экспериментального образца представлен на рис. 1в.

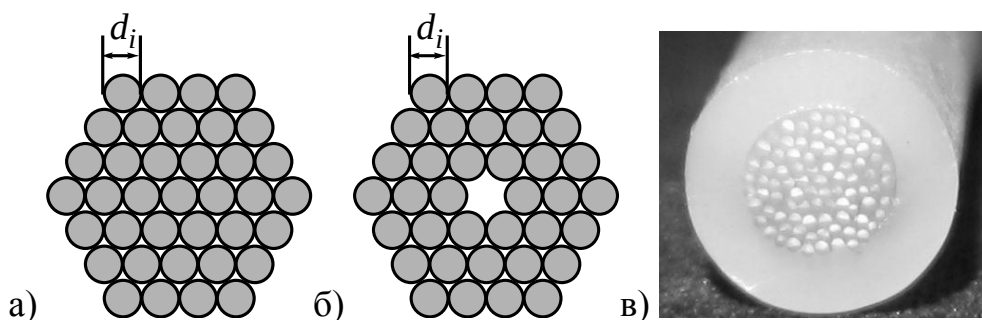


Рис. 1. Схема формирования фотонно-кристаллического волновода из матрицы полимерных волокон: а) цельная середина; б) полая середина; в) фотография экспериментального образца

Формирование протяженных ФКВ методом самоорганизации из полимерных волокон, полученных в лабораторных условиях затруднительно, так как полученные волноводы имеют кривизну, полученную при намотке волокна на барабан во время изготовления. Наиболее сложно в данных условиях сформировать ФКВ с полой сердцевиной.

Для совершенствования технологии изготовления ФКВ волновода был разработан метод свертки тонкой полимерной ленты, на которую прикреплялись волокна d_i из полипропилена с шагом укладки L_i . Сечение такого волновода после свертки представлено на Рис. 2.

Оператор преобразования входного ТГц сигнала, или передаточная характеристика волновода $H(P, n_i, d_i, L_i)$ будет зависеть от соотношения d_i и L_i определяющего период кристаллической решетки и соответственно характеристики фотонных запрещенных зон волновода i .

Предложенный метод формирования ФКВ, скруткой пленки с нанесенными волоконными волноводами, позволяет в значительной степени упростить формирование заданной периодической структуры волновода.

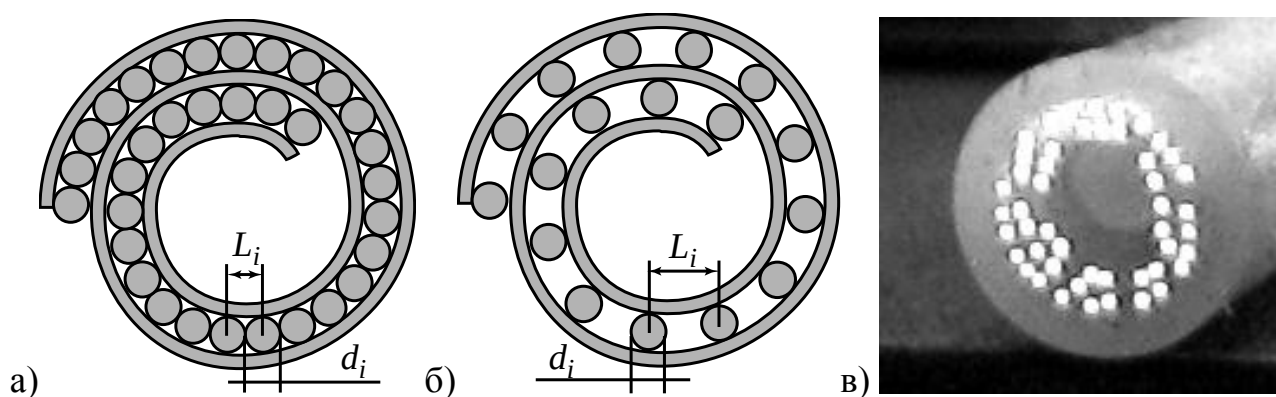


Рис. 2. Формирование фотонно-кристаллического волновода за счет спиральной свертки: а) плотная компоновка, б) разряженная компоновка, в) снимок экспериментального образца

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.В. Тучин, Ю.С. Скибина, В.И. Белоглазов и др Письма в ЖТФ, 2008. том 34, вып. 15. - с. 63 – 69.
2. Б. В. Поллер, В. М. Клементьев, Ю. Д. Коломников, С. И. Коняев, С. И. Трашкеев, А. Б. Поллер, О. А. Ванда О характеристиках моделей терагерцовых полимерных фотонно-кристаллических волноводов и нанокомпозитных жидкокристаллических преобразователей лазерных и тепловых излучений ГЕО-Сибирь-2011. Т. 5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника. Ч. 2: сб. матер. IV Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2011», 19–29 апреля 2011 г., Новосибирск. – Новосибирск : СГГА.
3. 2011Bora Ung, Anna Mazhorova, Alexandre Dupuis, Mathieu Rozé, and Maksim Skorobogatiy Polymer microstructured optical fibers for terahertz wave guiding Optics Express, Vol. 19, Issue 26, pp. B848-B861 (2011).

© Б.В. Поллер, В.М. Клементьев, А.В. Бритвин,
Ю.Д. Коломников, А.Б. Поллер, 2012