

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

ОПТИКО-ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Под редакцией доктора технических наук, профессора В. В. Коротаева

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ	
Алеев А. М., Горбачёв А. А., Коротаев В. В. Исследование схем построения базового блока оптико-электронного прогибомера.....	9
Васильев А. С., Коротаев В. В., Краснящих А. В., Лашманов О. Ю., Ненарокомов О. Н. Совмещение тепловизионного и телевизионного изображений при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений	12
Мараев А. А., Тимофеев А. Н., Ярышев С. Н. Исследование метода спектральной селекции при перекрестных связях в каналах цветных видеокамер.....	17
Ишанин Г. Г., Челибанов В. П. Физические основы работы фотодиодов в фотогальваническом и фотодиодном режимах.....	22
Серикова М. Г., Лебедько Е. Г. Решение задачи Райса при обнаружении сигналов в оптической локации	28
Алехин А. А., Горбунова Е. В., Коротаев В. В., Чертов А. Н. Основные принципы настройки цветowych оптико-электронных систем технического зрения промышленного назначения.....	33
ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ	
Бударгина М. И. Исследование характеристик солнцезащитных очковых линз и их влияние на остроту зрения	37
Никандров Г. В., Путилин Э. С. Фазокомпенсирующие покрытия для асферической оптики	40
Губанова Л. А., Зверев В. А. Создание интерференционных покрытий с улучшенными механическими свойствами на основе смесовых пленок	46
Макаричев Г. В. Влияние толщины слоев, формирующих диэлектрическое зеркало, на его лучевую прочность.....	50

ПРИКЛАДНАЯ И КОМПЬЮТЕРНАЯ ОПТИКА

Зленко А. Н., Колпаков А. К., Толстоба Н. Д., Злобина М. А. Применение матрицы оптимизации решений для автоматизированного конструирования оптических приборов.....	56
Вознесенская А. О. Амплитудный волоконно-оптический преобразователь отражательного типа для датчика давления.....	60
Бахолдин А. В., Цуканова Г. И. Исследование систем несветосильных ортоскопических зеркальных объективов.....	65
Бахолдин А. В., Коршикова Н. Ф., Черкасова Д. Н. Компьютерное моделирование оптической системы глаза индивидуума.....	68
Фисенко М. Г., Ежова К. В., Молев Ф. В. Моделирование зарегистрированного многоэлементными оптическими приемниками изображения.....	73
Ежова К. В., Ощурок Е. В. Трехмерное моделирование поверхностей.....	75

КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Назаров В. Н., Соколов Ю. А. Дифракционный метод контроля угловых и линейных перемещений.....	78
Смирнов А. П., Латыев С. М., Марков Д. В., Чугунов С. А. Сравнительный анализ допусков на первичные погрешности микрообъективов по методу Монте-Карло.....	82
Абакшина О. А., Егоров Г. В., Латыев С. М., Митрофанов С. С. Фотоэлектрические приборы и устройства, основанные на позиционно-чувствительных приемниках.....	88
SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича)	91

THEMATIC ISSUE

OPTICAL-INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

By Edition of V. V. Korotaev Doctor of Technical Science, Professor

CONTENTS

PREFACE.....	5
OPTICAL ELECTRONIC DEVICES AND SYSTEMS	
Aleev A. M., Gorbachev A. A., Korotaev V. V. Study of Basic Unit Schematic for Optoelectronic Deflectometer.....	9
Vasiliev A. S., Korotaev V. V., Krasnyaschikh A. V., Lashmanov O. Yu., Nenarokomov O. N. Superposition of Thermal and Television Images in Examination of Building Units and Constructions.....	12
Maraev A. A., Timofeev A. N., Yaryshev S. N. Study of Multispectral Selection Method under Cross-Impacts in Color Videocamera Channels.....	17
Ishanin G. G., Chelibanov V. P. Physical Background of Photodiode Operation in Photovoltaic and Photodiode Modes.....	22
Serikova M. G., Lebedko E. G. Application of Rice Problem to Signal Detection in Optical Location.....	28
Alekhin A. A., Gorbunova E. V., Korotaev V. V., Chertov A. N. Basic Principles of Industrial Color Vision System Adjustment.....	33
OPTICAL TECHNOLOGIES	
Budargina M. I. Research in Characteristics of Sun-Protection Lenses and Their Impact on Visual Acuity.....	37
Nikandrov G. V., Putilin E. S. Phase-Compensating Coating for Aspherical Optics.....	42
Gubanova L. A., Zverev V. A. Development of Interference Coating with Improved Mechanical Properties on the Base of Mixed Films.....	46
Makarichev G. V. Effect of Layers Thickness on Radiation Resistance of Dielectric Mirror.....	50
APPLIED AND COMPUTER OPTICS	
Zlenko A. N., Kolpakov A. K., Tolstoba N. D., Zlobina M. A. Application of Solution Optimization Matrix to Automated Design of Optical Instrument.....	56
Voznesenskaya A. O. Amplitude Fiber Optic Reflector-Type Converter for Pressure Sensor	60
Bakholdin A. V., Zukanova G. I. Study of Small-Aperture Distortion-Free Mirror Lens	65
Bakholdin A. V., Korshikova N. F., Cherkasova D. N. Computer Modeling of Human Eye Optical System.....	68

Fisenko M. G., Ezhova K. V., Molev F. V. Computer Modeling of Image Obtained with Multi-Element Optical Image Receiver.....	73
Ezhova K. V., Oshurok E. V. Three-Dimensional Surface Modeling.....	75
COMPUTERIZATION AND DESIGN OF OPTICAL INSTRUMENTS	
Nazarov V. N., Sokolov Yu. A. Diffraction Method for Measurement of Angular and Spatial Displacements.....	78
Smirnov A. P., Latyev S. M., Markov D. V., Chugunov S. A. Comparative Analysis of Tolerances on Microlens Primary Errors by Monte Carlo Method	82
Abakshina O. A., Egorov G. V., Latyev S. M., Mitrofanov S. S. Photoelectric Instruments and Devices Based on Position-Sensitive Detectors	88
SUMMARY	91

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящем тематическом выпуске журнала представлены результаты научных исследований и разработок сотрудников факультета оптико-информационных систем и технологий (ФОИСТ) Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (НИУ ИТМО).

Факультет является одним из старейших в Университете (основан в 1930 г.) и самым крупным в России, который подготавливает специалистов-оптиков на четырех выпускающих и двух базовых кафедрах:

- прикладной и компьютерной оптики (ПиКО);
- оптико-электронных приборов и систем (ОЭПиС);
- компьютеризации и проектирования оптических приборов (КиПОП);
- оптических технологий (ОТ);
- экологического приборостроения и мониторинга (ЭПиМ) — базовая кафедра при ВНИИМ им. Д. И. Менделеева;
- светодиодных технологий (СТ) — базовая кафедра при ЗАО „Оптоган“, созданная в 2011 г.

На факультете обучаются бакалавры и магистры по специальности „Оптотехника“, а также специалисты по направлению подготовки „Оптико-электронные приборы и системы“. Преподавателями и научными сотрудниками факультета совместно с аспирантами и студентами ведутся активные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в рамках Научно-исследовательского центра оптических и лазерных систем (НИЦ ОЛС).

Совместная учебная и научная работа представителей разных поколений обеспечивает преемственность и развитие научно-педагогических школ, известных в России и в мире.

Кафедра ПиКО продолжает традиции научно-педагогической школы, у истоков которой стояли выдающиеся русские ученые: Д. С. Игнатовский, В. Н. Чуриловский и М. М. Русинов. Результатом фундаментальных и прикладных работ этой школы является создание разнообразных оптических систем — больших астрономических телескопов, оптических систем авиационного и космического базирования, высокоточных проекционных объективов, предназначенных для микроэлектроники, высокоапертурных объективов — для микроскопии, оптических систем — для подводной фотографии и видеосъемки и др.

Современное направление исследований кафедры связано с применением компьютерных методов моделирования изображений, автоматизированным проектированием оптических систем, созданием новых автоматизированных методов оптического контроля, а также моделированием дифракционных процессов в микроструктурах. Последнее направление непосредственно связано с интенсивным развитием компьютерных методов в микрофотонике, ближнепольной оптике и оптических нанотехнологиях.

Представленные в настоящем выпуске статьи отражают результаты работ современного поколения сотрудников кафедры ПиКО.

Кафедра ОЭПиС, научно-педагогическая школа которой формировалась профессорами К. Е. Солодиловым, С. Т. Цуккерманом, Л. Ф. Порфирьевым, членом-корреспондентом Российской академии наук М. М. Мирошниковым, развивалась в направлении от создания

оптических прицелов в далекие предвоенные годы к систематизации теоретических основ и принципов построения современных оптико-электронных приборов. Благодаря такому развитию был создан ряд оптико-электронных приборов и систем для измерения линейных и угловых величин с целью решения задач астроориентации и контроля промышленных объектов, импульсной локации, видеоинформационных измерительных систем, систем наблюдения быстро движущихся объектов и измерения параметров их движения. Кроме того, были созданы уникальные источники и приемники оптического излучения.

Современные разработки кафедры ОЭПиС экспонировались на ряде выставок и в 2011 г. были отмечены медалями Всероссийского выставочного центра.

Представленные в настоящем выпуске статьи отражают работы кафедры в области видеоинформационных систем видимого и инфракрасного диапазонов оптического излучения, комплексированных многоспектральных систем, систем лазерной локации, а также приемников оптического излучения.

Коллектив кафедры КиПОП продолжает традиции выдающихся конструкторов-разработчиков прошлого: С. Т. Цуккермана, Г. В. Погарева, В. В. Кулагина — и традиционно уделяет значительное внимание вопросам проектирования специальных оптических и оптико-электронных приборов, методам их юстировки, контроля и испытания.

Представленные в настоящем выпуске статьи отражают работы кафедры, направленные на повышение технологичности конструкций и сборки оптических систем, исследование возможности повышения их точности.

Научно-педагогическая школа кафедры ОТ отсчитывает свою историю от создания в 1975 г. кафедры технологии оптических деталей и покрытий, которую возглавил профессор С. М. Кузнецов.

Современные разработки в области создания тонкопленочных покрытий и исследований свойств элементов оптических систем нашли свое отражение в публикуемых материалах.

Большинство авторов статей настоящего выпуска относится к молодому поколению сотрудников, аспирантов и студентов факультета и это служит основой для оптимизма в отношении будущего кафедр и их научных школ.

*Декан факультета
оптико-информационных
систем и технологий НИУ ИТМО
доктор технических наук,
профессор В. В. КОРОТАЕВ*

PREFACE

This issue presents results of scientific investigations and engineering developments carried out by collaborators of the Faculty of Optical Information Systems and Technologies, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics.

The Faculty is one of the oldest in the University (founded in 1930) and a first-rate in Russia. The Faculty performs education of specialist in optics; it includes four departments for training of graduate students and two professional education departments:

- Applied and Computer Optics;
- Optical Electronic Devices and Systems;
- Computerization and Optical Instruments Design;
- Optical Technologies;
- Ecological Instrument-Making and Monitoring (at Mendeleyev State Scientific Research Institute of Metrology);
- Light Diode Technologies (at Close Corporation “Optogan”), founded in 2011.

Students graduate from the Faculty as Bachelors and Masters in “Optotechnique”, and engineers in “Optical Electronic Devices and Systems”. Lecturers and researchers together with post-graduate and graduate students of the Faculty carry out scientific research and engineering development in the frames of Research Center of Optical and Laser Systems.

Joint training and research work performed by students and scientists belonging to various generations ensures succession and progress of scientific and pedagogical schools well known in Russia and worldwide.

Department of Applied and Computer Optics continues tradition of scientific and pedagogical school founded by outstanding Russian scientists D. S. Ignatovsky, V. N. Churilovsky, and M. M. Rusinov. Result of activities of several generations of the school is development of various optical systems — large astronomic telescopes, airborne and space-borne optical systems, high-performance projection lenses for microelectronics, large-aperture lenses for microscopes, optical systems for underwater photography and video filming, etc.

Up-to-date avenue of investigations carried out at the Department relates to application of computer methods of image modeling, automated design of optical systems, development of new methods of optical control, as well as to modeling of diffraction processes in microstructures. The latter line is closely connected with intensive development of computer methods in microphotonics, near-field optics, and optical nanotechnologies. Papers included in this issue present results obtained by the contemporary generation of the staff of Department of Applied and Computer Optics.

At Department of Optical Electronic Devices and Systems, the scientific and pedagogical school founded by professors K. E. Solodilov, S. T. Tsukkerman, L. F. Porfiriev, Corresponding Member of RAS M. M. Miroschnikov, has been heading in the direction from development of optical sights in prewar years long ago, to systematization of theoretical fundamentals and principles of modern optical electronic instruments construction. Due to the advancement, a set of optical electronic devices and systems has been created for measurement of angular and spatial coordinates in astroorientation and control over industrial objects, pulse location, video information measuring

systems, systems for observation of high-speed objects and measurement of parameters of their movement. Besides, unique sources and detectors of optical radiation had been devised.

Modern works by the Department were presented at several All-Russian Exhibitions, and awarded medals from All-Russians Exposition Center in 2011.

Papers included in this issue represent works of the Department in the field of video-information systems of visual and IR ranges, complex multispectral systems, laser location systems, as well as in development of optical detectors.

The staff of department of Computerization and Optical Instruments Design continues traditions of outstanding designers of the past — S. T. Tsukkerman, G. V. Pogarev, V. V. Kulagin. Much attention is traditionally given to development of special optical and optical-electronic instruments, methods of their adjustment, control, and testing.

Papers presented here reflect works by the Department aimed at increase in improvement of manufacturability of construction and assemblage of optical systems, investigation of possibility to improve the systems accuracy.

Scientific-pedagogical school of Department of Optical Technologies reckons its history from 1975 when Department of Technology of Optical Elements and Coatings headed by Professor S. M. Kuznetsov has been established. Recent development of thin-film coating and investigation of properties of optical system elements are presented in papers published here.

The majority of the authors of the papers included in this issue belongs to the younger generation of collaborators, and this fact allows for optimistic view for the future of the Departments and their scientific schools.

*Professor V. V. KOROTAEV,
Dean of the Faculty of Optical Information Systems and Technologies*

А. М. АЛЕЕВ, А. А. ГОРБАЧЁВ, В. В. КОРОТАЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ПОСТРОЕНИЯ БАЗОВОГО БЛОКА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРОГИБОМЕРА

Рассмотрены три возможные схемы построения базового блока двухканального оптико-электронного прогибомера: две с призмными системами и одной видеокамерой, а также схема с двумя противоположно направленными видеокамерами. Исследована чувствительность схем к поворотам базового блока.

Ключевые слова: прогиб, прогибомер оптико-электронный, двухканальная оптико-электронная система.

Введение. Оптико-электронный прогибомер предназначен для контроля продольной деформации (прогиба) таких протяженных сооружений и конструкций, как плавучие доки, мосты, плотины. Прогибомер представляет собой двухканальную оптико-электронную систему (рис. 1, а), основными элементами которой являются базовый блок (ББ), регистрирующий вертикальные смещения двух диаметрально расположенных контрольных элементов (КЭ). На рис. 1, б представлено возможное расположение прогибомера на плавучем доке.

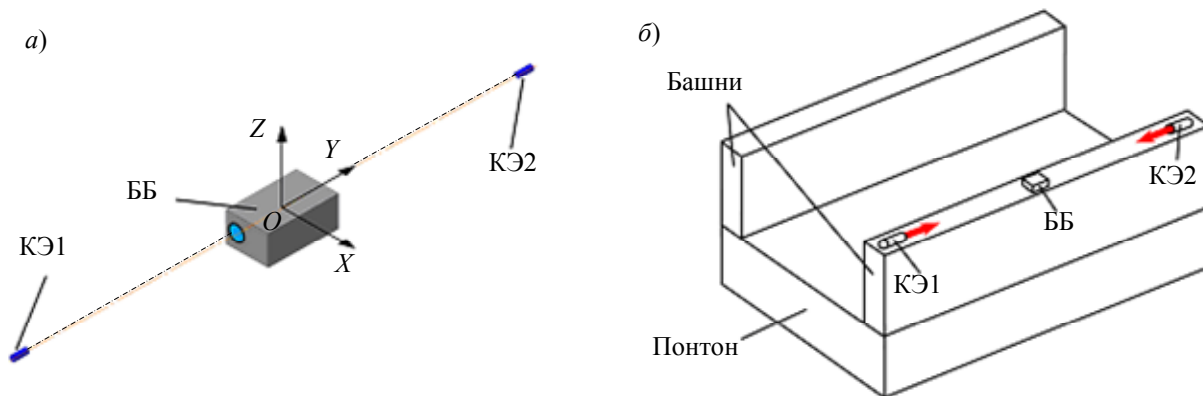


Рис. 1

Одним из важных параметров базового блока является его чувствительность к поворотам, которую следует учитывать при настройке базового блока во время монтажа прогибомера. Кроме того, этот параметр позволяет оценить влияние поворотов блока в процессе эксплуатации (например, в результате тепловых воздействий) на погрешность определения прогиба. В настоящей работе описаны три возможные схемы построения базового блока и по результатам экспериментального исследования оценена их чувствительность к поворотам ББ.

Исследование схем построения базового блока. Схема построения базового блока может быть реализована в нескольких вариантах, различающихся количеством используемых видеокамер и наличием или отсутствием системы отклонения лучей [1, 2].

Система отклонения лучей (СОЛ), входящая в состав базового блока, может быть построена с использованием зеркальных и призмённых систем. Плоские зеркала и зеркальные системы обычно применяются в тех случаях, когда велики поперечные габаритные размеры хода лучей в месте расположения отражающих элементов, требуются малая масса оптической системы, отсутствие хроматизма и малые светопотери в широкой области спектра. Когда необходима наименьшая расстраиваемость отражательных элементов, расположенных в узком сечении световых лучей, целесообразно применять призмы и призмённые системы [3].

На кафедре оптико-электронных приборов и систем НИУ ИТМО были проведены экспериментальные исследования трех вариантов построения базового блока:

- 1) одна видеокамера, содержащая матричный приемник оптического излучения (ПОИ) и объектив (Об), с СОЛ в виде светоделительной призмы (рис. 2, а);
- 2) одна видеокамера с СОЛ в виде призмы AP-90 и пентапризмы с крышей (рис. 2, б);
- 3) две противоположно направленные видеокамеры (рис. 2, в).

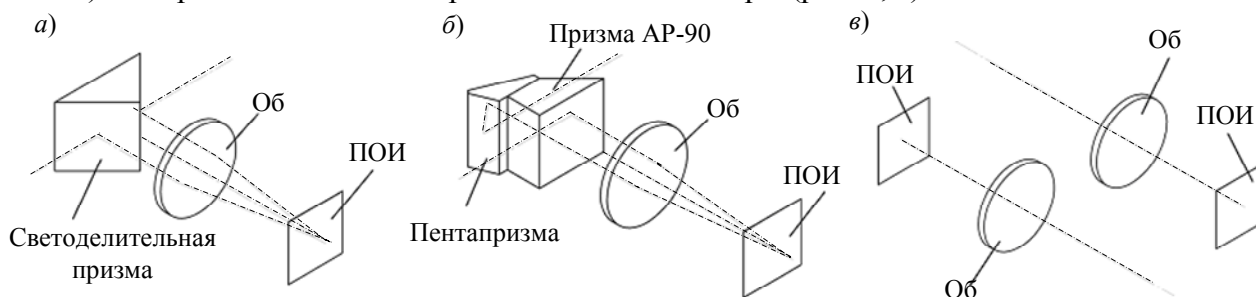


Рис. 2

При проведении эксперимента в качестве ПОИ были задействованы видеокамеры ВЕС-545 (ООО „ЭВС“, Санкт-Петербург) с объективами с фокусным расстоянием $f'=12,5$ мм. В качестве контрольных элементов использованы инфракрасные излучающие диоды Kingbright L-53SF6C ($\lambda_{\max} = 860$ нм). Расстояние от ББ до КЭ в каждом канале — 2,8 м.

Эксперимент проводился по следующей методике. При последовательном повороте базового блока относительно осей OX , OY , OZ (рис. 1, а) для каждого из трех вариантов построения ББ захватывались кадры с изображениями КЭ. Обработка полученных кадров включала поиск энергетических центров изображений КЭ и определение величины их смещения в каждом из каналов в зависимости от угла поворота ББ. Результаты исследования представлены в таблице.

Схема построения	Чувствительность, мкм/град, при повороте относительно оси		
	OX	OY	OZ
Рис. 2, а	862	58	8
Рис. 2, б	877	50	8
Рис. 2, в	927	25	31

Чувствительность всех исследуемых схем сходным образом изменяется в зависимости от оси поворота базового блока. Незначительное отличие наблюдается в схеме с двумя видеокамерами, чувствительность которой при повороте относительно оси OY ниже, чем при повороте относительно оси OZ . Значения чувствительности к поворотам для исследуемых схем несущественно различаются, что позволяет сделать вывод об эффективности использования в прогибомере схемы с двумя противоположно направленными камерами. Данная схема проще и экономичнее в изготовлении, а также обладает возможностью независимой настройки измерительных каналов, что позволяет размещать контрольные элементы на различном расстоянии от базового блока.

Наибольшей чувствительностью каждая из трех рассматриваемых схем обладает при поворотах базового блока относительно оси OX . Данное обстоятельство обуславливает по-

вышенные требования к стабилизации положения ББ в процессе эксплуатации, особенно для исключения поворота блока относительно оси OX , так как смещение изображений КЭ в этом случае вносит существенную погрешность в измеренную величину прогиба.

Заключение. Исследование трех возможных схем базового блока оптико-электронного прогибомера (двух с одной видеокамерой и призмными системами, одну с двумя противоположно направленными видеокамерами) показало их сходную чувствительность к поворотам блока. Таким образом, явным преимуществом обладает более экономичная схема с двумя камерами, особенно в случае различной дистанции от базового блока до контрольных элементов.

Работа осуществлялась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ в рамках аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2010 годы)“ и федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбачев А. А., Коняхин И. А., Тимофеев А. Н. Построение инвариантных оптических схем оптико-электронных систем с сопряженным матричным полем анализа // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 10. С. 54—58.
2. Горбачев А. А., Коняхин И. А., Мусяков В. Л., Тимофеев А. Н. Исследование особенностей построения инвариантных оптико-электронных систем с единым матричным полем анализа // Оптик. журн. 2007. Т. 74, № 12. С. 24—29.
3. Погарев Г. В. Юстировка оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1982. 237 с.

Сведения об авторах

- Алексей Муратович Алеев** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; инженер 2-й категории;
E-mail: lexmaister@yandex.ru
- Алексей Александрович Горбачёв** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: gorbachev@grv.ifmo.ru
- Валерий Викторович Коротаев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

А. С. ВАСИЛЬЕВ, В. В. КОРОТАЕВ, А. В. КРАСНЯЩИХ,
О. Ю. ЛАШМАНОВ, О. Н. НЕНАРОКОМОВ

СОВМЕЩЕНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННОГО И ТЕЛЕВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Рассматривается возможность совмещения полученных в разных спектральных диапазонах изображений для повышения достоверности результатов обследования ограждающих конструкций зданий и сооружений на предмет температурных дефектов и аномалий. Описан порядок расчета температурного режима ограждающих конструкций, необходимый для качественного и количественного анализа полученных результатов измерения — распределения температуры на поверхности ограждающей конструкции.

Ключевые слова: температура внутренней поверхности ограждения, тепловизионное обследование, совмещение тепловизионного и телевизионного изображения.

Введение. Тепловизионное обследование ограждающих конструкций зданий проводится с целью оценки качества их теплозащитных свойств. При приемке здания в эксплуатацию одним из основных показателей качества теплоизоляции элементов ограждающих конструкций является отсутствие скрытых дефектов. В статье рассматривается порядок расчета температуры внутренней поверхности ограждения на основе анализа тепловых изображений, который использовался при написании программного приложения для определения температурного режима ограждающих конструкций здания, также представлены способы совмещения тепловизионного и телевизионного изображений и рассматриваются трудности, связанные с этим процессом.

При тепловизионном обследовании строительных конструкций нередко возникают сложности в восприятии оператором полученной картины и соотнесении ее с реальным объектом. Совмещение телевизионных и тепловизионных изображений заключают в себе как наглядность, присущую первому, так и информацию о тепловом поле исследуемого объекта, содержащуюся во втором типе изображений.

Основные проблемы совмещения тепловизионного и телевизионного изображений. При совмещении тепловизионного и телевизионного изображений сцены необходимо минимизировать временной интервал между кадрами соответствующих источников сигнала. Изображения, сделанные в разных спектральных диапазонах, имеют существенные различия. В таком случае удобно одно из изображений (чаще всего телевизионное) считать опорным.

На данном этапе разрешение фотоприемных матриц тепловизоров заметно уступает матрицам телевизионных систем, поэтому при смещении тепловизионного и телевизионного изображений необходимо учитывать несовпадение их масштабов. Вследствие несовпадения оптических осей информационных каналов на изображениях всегда присутствует пространственный сдвиг, который следует учитывать при обработке. По причине непараллельности оптических осей возникают геометрические искажения. В большинстве случаев эти искажения присутствуют на изображении одновременно [1].

Рассмотрим основные способы совмещения изображений: усреднение; метод маски; метод фурье-спектров; вейвлет-анализа.

Наиболее прост метод усреднения, в этом случае итоговое изображение представляет собой суперпозицию исходных изображений E и M :

$$I(x, y) = \frac{E(x, y) + M(x + dx, y + dy)}{2},$$

где dx — смещение по оси x , dy — смещение по оси y , причем $|dx > 0|, |dy > 0|$.

Следует учитывать, что при таком совмещении в итоговом изображении существенно уменьшается число мелких деталей.

Алгоритм совмещения изображений по методу маски предполагает, что одно изображение является маской для другого, будем считать, что в процессе совмещения тепловизионное изображение M будет наложено на телевизионное E . Для простоты будем считать, что оба изображения приведены к одному масштабу, в них устранены сдвиги и геометрические искажения. Тогда при рассмотрении изображений как наборов уровней яркости M проведем операцию пороговой фильтрации и получим маску для наложения на изображение E . В таком случае после наложения результирующее изображение будет представлять собой суперпозицию M и E . Причем значение каждого пиксела будет определяться соответствующим значением из изображения M , если значение соответствующего пиксела в изображении M равно нулю, то результирующим принимается значение пиксела из изображения E . Математически это можно записать так [1]:

$$I_i(x, y) = \begin{cases} M_i(x, y), & M_i(x, y) > 0, \\ E_i(x, y), & M_i(x, y) = 0. \end{cases}$$

При использовании этого метода основную сложность представляет выбор уровня для порогового фильтра. Неправильный выбор может привести к потере в конечном изображении информативных элементов или, наоборот, к их избытку.

Использование алгоритма совмещения методом Фурье-спектров предполагает рассмотрение обоих изображений в спектральном диапазоне. Такой алгоритм реализует прямое быстрое преобразование Фурье, сложение спектров изображений, а затем — обратное преобразование Фурье, для получения суммарного изображения. Такой алгоритм хорош только для затемненных изображений, суммарная амплитуда сигналов в одной точке которых не превышает 255 (иначе происходит полное или частичное заливание изображения белым цветом). Таким образом, с целью нормировки значений требуется дополнительная обработка итогового массива изображения, в результате которой теряется большая часть мелких деталей, снижается контрастность изображения. Кроме того, преобразование Фурье является достаточно ресурсоемкой операцией.

Алгоритм совмещения методом вейвлет-анализа подразумевает, что на вход подаются два изображения, которые после предварительной обработки (например, изменения масштаба, устранения сдвигов) разбиваются на разномасштабные составляющие, затем складываются соответствующие составляющие двух изображений и применяется обратное вейвлет-преобразование [2]. Стоит отметить вейвлет-преобразование Хаара, такой алгоритм требует гораздо меньших вычислительных ресурсов по сравнению с алгоритмом, основанным на преобразовании Фурье, но так же, как и предыдущий алгоритм, приводит к потере мелких деталей. Однако вследствие многомасштабности преобразования детали легко восстановить повторным сложением составляющих малого масштаба.

На данном этапе работы наиболее удобным представляется алгоритм смещения с помощью маски, однако два других алгоритма требуют дополнительных исследований, так как весьма перспективны благодаря универсальности. В настоящей работе рассматривается применение метода маски для тепловизионного обследования ограждающих конструкций зданий.

Порядок расчета температурного режима ограждающих конструкций здания. Тепловизионное обследование, в ходе которого регистрируются температурные поля на обследуемых поверхностях ограждающих конструкций зданий, является эффективным средством контроля качества теплозащитных свойств наружных ограждений зданий.

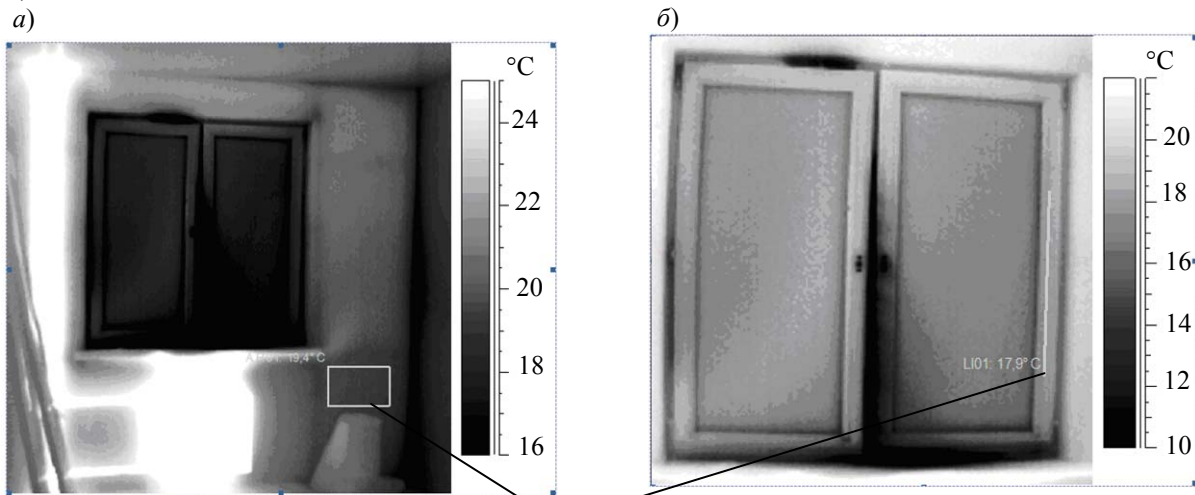
Допустимое значение температуры внутренней поверхности помещений рассчитывается [3] для условий, указанных в нормативных документах [3, 4]. Участки ограждающих конструкций, температура которых при расчетных условиях будет ниже требуемого значения, признаются дефектными.

Таким образом, температура внутренней поверхности ограждения при расчетных температурных условиях определяется по формуле [5]:

$$\tau_B^p = t_B^p - (t_B^p - \tau_B') \frac{\alpha_B}{\alpha_B'} \quad (1)$$

где t_B^p — расчетная температура внутреннего воздуха, °С; τ_B' — температура внутренней поверхности ограждения без учета коэффициента теплоотдачи, °С; $\alpha_B = \alpha_K + \alpha_L$ — коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения в эксперименте при t_B^p , t_B^3 и τ_B^3 , Вт/(м²·°С); $\alpha_B' = \alpha_K' + \alpha_L'$ — то же, при t_B^p и τ_B' , Вт/(м²·°С); α_K , α_K' и α_L , α_L' — коэффициенты конвективного и лучистого теплообмена внутренней поверхности ограждения.

На рис. 1 приведен участок ограждающей конструкции здания (*а* — стена, *б* — оконный блок).



Базовые участки

Рис. 1

Температура внутренней поверхности ограждения τ_B' определяется по формуле:

$$\tau_B' = t_B - (t_B^3 - \tau_B^3) \frac{t_B^p - t_H^p}{t_B^3 - t_H^3},$$

где τ_B^3 — температура внутренней поверхности базового участка ограждения [5], получаемая с термограммы, °С; t_H^p , t_H^3 — расчетная и экспериментально определенная температура атмосферного воздуха, °С.

Температуру внутреннего воздуха t_B^p можно рассчитать по формуле:

$$t_B^p = \frac{t_H^p - \tau_B^3 R_0 \alpha_B}{1 - R_0 \alpha_B},$$

где R_0 — номинальное сопротивление теплопередаче базового участка, (м²·°С)/Вт.

Согласно статье [6], можно рассчитать действительное сопротивление теплопередаче по формуле:

$$R_d = R_0 - R_0 \frac{\tau'_B - t_H^P}{t_B^P - t_H^P}$$

При расчете температуры внутренней поверхности ограждения только одной ограждающей конструкции одного типа одного помещения требуется учитывать несколько параметров. Удобнее всего определять необходимое значение температуры в отдельном программном приложении, написанном авторами специально для этих целей. Приложение разработано в интегрированной среде разработки программного обеспечения Delphi 7 и представляет собой стандартное окно Windows с таблицей (рис. 2), введя в которую известные параметры, можно получить искомую температуру внутренней поверхности ограждения.

п/п	Помещение	Тип ограждающей конструкции	Температура внутреннего воздуха	Температура базового участка	Минимальное допустимое значение температуры	Температура атмосферного воздуха	Сопротивление базового участка	Температура дефекта	Описание дефекта
1	квартира №1	Стена	20,19	19,4	15,70	-1	3,1	10,7	примыкание стены к перегородке
2	квартира №1	светопрозрачные ОК (раны)	21,61	17,9	13,26	-1	0,7	3	примыкание оконного блока к откосам, притворы

Рис. 2

Полученные результаты. После совмещения тепловизионного (см. рис. 2) и телевизионного изображений по методу маски (учтен рассчитанный критерий минимально допустимой температуры) на полученных кадрах видны дефекты (темноокрашенные участки) на внутренней поверхности ограждающей конструкции (рис. 3, а). Отдельно анализируются тепловизионные изображения светопрозрачных конструкций (рис. 3, б), и на этих термограммах обозначаются участки, температура внутренней поверхности которых при расчетных условиях будет ниже +3 °С.

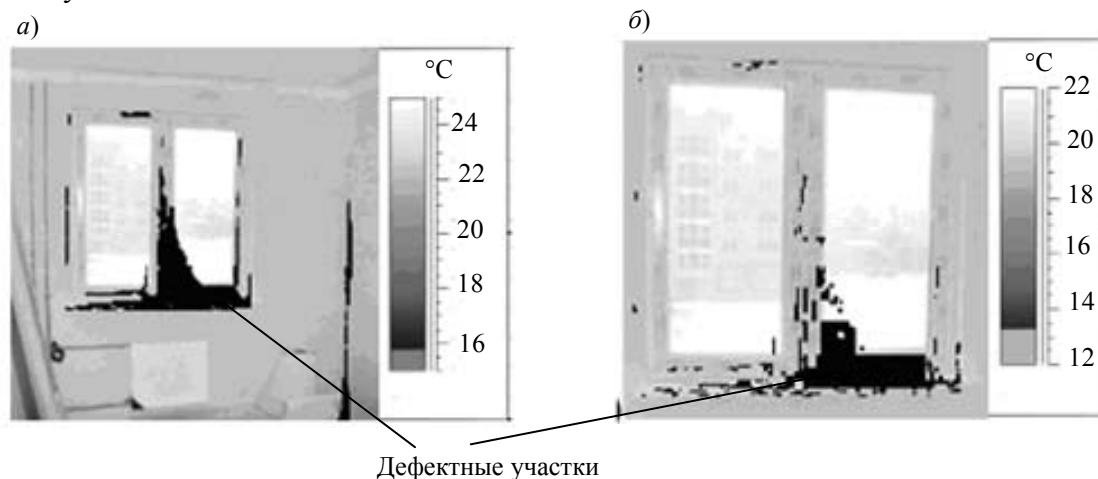


Рис. 3

Заключение. Представленный подход к тепловизионному обследованию строительных конструкций, с одной стороны, позволяет воспользоваться всеми преимуществами тепловизионного метода (нахождение участков с температурными аномалиями, поиск температурных градиентов), а с другой — сохраняет наглядность и восприятие результатов. Несомненным преимуществом совмещения изображений является объективность результатов расчета минимально допустимой температуры на поверхности ограждающей конструкции здания, что позволяет выявлять дефектные участки. Совмещение изображений, полученных в различных спектральных диапазонах, позволяет проводить анализ ограждающих конструкций зданий в полевых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов О. Ю. Совмещение изображений // Цифровая обработка сигналов. 2005. № 3. С. 51—55.
2. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: Основы теории и примеры применения // УФН. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145—1170.
3. ГОСТ 26629-85. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций. М.: Изд-во стандартов, 1986. 10 с.
4. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. 47 с.
5. ГОСТ 26254-84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. М.: Изд-во стандартов, 1994. 19 с.
6. Kalamees T. Critical values for the temperature factor to assess thermal bridges // Proc. of the Estonian Academy of Sci. Engineering. 2006. Vol. 12, N 3. P. 218—229.

Сведения об авторах

- Александр Сергеевич Васильев** — студент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: yoshikawa06@gmail.com
- Валерий Викторович Коротаев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Андрей Владимирович Краснящих** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: crus@mail.ru
- Олег Юрьевич Лашманов** — студент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: o.lashmanov@gmail.com
- Олег Николаевич Ненарокомов** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; ассистент; E-mail: 4307_globl@mail.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

А. А. МАРАЕВ, А. Н. ТИМОФЕЕВ, С. Н. ЯРЫШЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ СЕЛЕКЦИИ ПРИ ПЕРЕКРЕСТНЫХ СВЯЗЯХ В КАНАЛАХ ЦВЕТОВЫХ ВИДЕОКАМЕР

Предложены алгоритмы обработки спектрозональных изображений на едином матричном поле анализа с учетом перекрестных связей между элементами оптико-электронной системы предупреждения техногенных катастроф по пространственному положению элементов конструкции. Предложенный способ спектрозональных измерений координат активных реперных меток в поле зрения единого цветового матричного фотоприемника позволяет учитывать воздействие градиента температур воздушного тракта на процесс контроля оптико-электронной системы.

Ключевые слова: спектрозональный метод, оптико-электронная система, оценки координат изображений меток.

Для предупреждения техногенных катастроф возможно применять распределенные оптико-электронные системы (РОЭС) долговременного и оперативного контроля по пространственному положению элементов [1, 2], поскольку обследования технического состояния и экспертизы промышленной безопасности подавляющего большинства зданий и сооружений проводятся нерегулярно.

Использование РОЭС с многоэлементными фотоприемниками (МФП) имеет целый ряд преимуществ по сравнению с использованием остальных методов измерения координат. Погрешность таких измерителей достигает 0,05 от шага элемента фотоприемной многоэлементной структуры [3]. Помимо того, комплексирование информации по длине волны оптического излучения в многоканальных РОЭС с МФП [4] позволяет повысить эффективность работы систем такого класса.

В современных РОЭС существенное влияние на результат контроля оказывает среда распространения оптического излучения. Прежде всего, величина погрешности измерений зависит от таких явлений в атмосфере, как рефракция и турбулентность воздушного тракта. Рефракция вызывает систематическое отклонение направления распространения оптического излучения, в основном вследствие температурного градиента показателя преломления воздуха. Одним из способов уменьшения влияния рефракции является использование принципа спектрозональной селекции [5].

Целью настоящей работы является исследование возможности реализации спектрозонального метода при контроле пространственного положения активных реперных меток (РМ) РОЭС [1, 2] на МФП с учетом перекрестных связей между цветовыми фотоприемными матричными полями.

Наиболее доступным вариантом для реализации спектрозональной селекции является применение видеокамеры, каналы которой соответствуют трем основным цветам системы *RGB* [2]. В соответствии с шаблоном Байера три основных цвета формируют три спектрозональных канала *RGB*, информация с которых может быть снята с фотоприемника независимо друг от друга, так как каналы „обслуживаются“ независимыми группами пикселей. На рис. 1 представлены кривые (4—6) спектральной плотности S_λ фоточувствительности пикселей соответственно для *RGB* составляющих (КМОП матрицы OV561) и 1—3 — спектральных составляющих яркости характерного *RGB* ПИД. Кривая 6 (рис. 1) спектральной плотности фоточувствительности пикселей синей (*B*) области спектра пересекается с областью чувствительности красных (*R*) полупроводниковых излучающих диодов (ПИД), в то время как кривая 3

спектральной области излучательной способности синих (В) ПИД не пересекается с кривой 1 красных. При обработке изображений РМ, реализованных белыми ПИД в разных спектральных диапазонах, между каналами возникают перекрестные связи, которые обуславливают выбор специальных алгоритмов обработки этих изображений РМ.

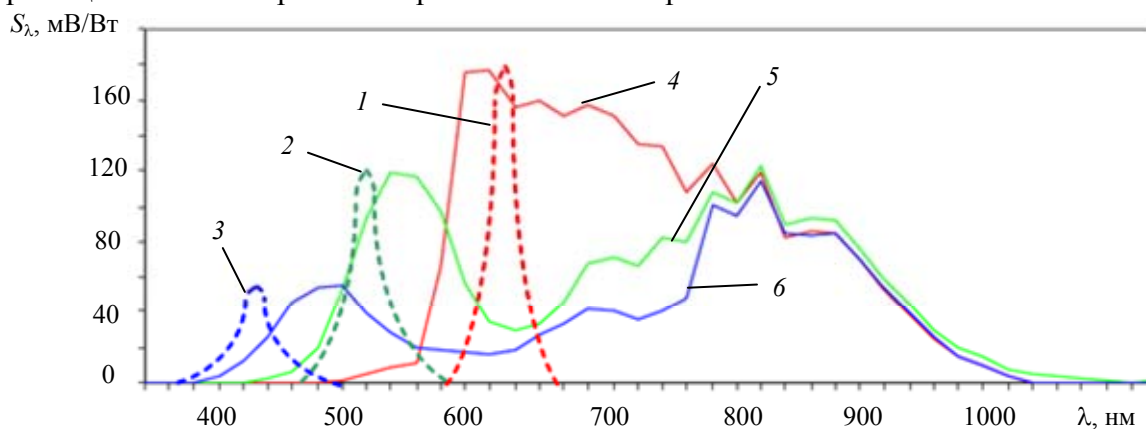


Рис. 1

На рис. 2 продемонстрировано пространственное расположение изображений синей 1 и красной 2 РМ на синих и красных матричных полях фоточувствительных элементов единой приемной матрицы при наличии вертикального градиента температуры в воздушном тракте: а — расположение синих полей, б — расположение красных полей. В соответствии с расположением элементов байеровского шаблона для матричного фотоприемника синие пиксели занимают нечетные номера элементов матричного поля и располагаются в нечетных строках (рис. 2, а); красные пиксели занимают четные номера элементов и располагаются в четных строках (рис. 2, б).

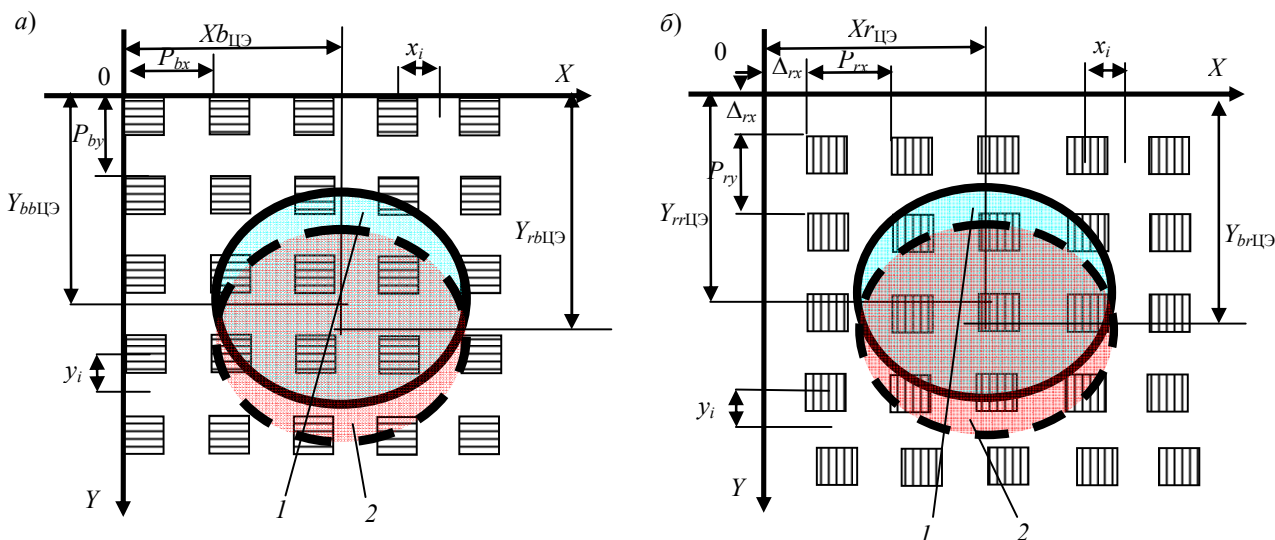


Рис. 2

Шаг синих элементов P_{bx} и P_{by} по координатам $0X$ и $0Y$ в два раза больше шага матричного поля x_i и y_i по соответствующим координатам.

Для адекватной оценки координат изображения малоразмерного объекта методом определения энергетического центра (ЭЦ) тяжести требуется, чтобы линейные размеры изображения РМ составляли не менее 4—5 размеров элемента (пиксела) [3]. В этом случае вычисление оценки координат центра синего (В) изображения РМ $X_{bbЦЭ}$ и $Y_{bbЦЭ}$ (рис. 2, а) для синей области спектра МФП можно производить по формулам:

$$X_{bb \text{ ЦЭ}} = \frac{2}{M} \sum_{j=0}^{j=M} \frac{\sum_{i=0}^{i=N} [Q_i(x_i) x_i]}{\sum_{i=0}^{i=N} Q_i(x_i)}; Y_{bb \text{ ЦЭ}} = \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{j=N} \frac{\sum_{i=0}^{i=M} [Q_i(y_i) y_i]}{\sum_{i=0}^{i=M} Q_i(y_i)}, \quad (1)$$

где x_i, y_j — координаты элементов, входящих в окрестность $M \times N$; M, N — величина окрестности, содержащей изображение PM (для квадратных областей $M=N$); $Q_j(y_j)$ — суммарный сигнал с элементов, входящих в окрестность j -й строки; $Q_i(x_i)$ — суммарный сигнал с элементов, входящих в окрестность $M \times N, i$ -го столбца.

Для красного канала шаг элементов P_{rx} и P_{ry} (рис. 2, б), так же как и в синем канале, по координатам OX и OY будет в два раза больше шага матричного поля x_i и y_i по соответствующим координатам.

В этом случае вычисление оценки координат центра красного изображения PM $X_{rr \text{ ЦЭ}}$ и $Y_{rr \text{ ЦЭ}}$ для используемой системы координат OXY в красной области спектра МФП можно производить по аналогичным формулам синего канала:

$$X_{rr \text{ ЦЭ}} = \Delta_{rx} + \frac{2}{M} \sum_{j=0}^{j=M} \frac{\sum_{i=0}^{i=N} [Q_i(x_i) x_i]}{\sum_{i=0}^{i=N} Q_i(x_i)}; Y_{rr \text{ ЦЭ}} = \Delta_{ry} + \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{j=N} \frac{\sum_{i=0}^{i=M} [Q_i(y_i) y_i]}{\sum_{i=0}^{i=M} Q_i(y_i)}, \quad (2)$$

где Δ_{rx} и Δ_{ry} — горизонтальная и вертикальная поправки в красном канале видеокамеры.

При наличии градиента воздушного тракта для матричного поля синих элементов изображения синей и красной областей излучения PM будут смещены друг относительно друга (рис. 2, а). Для этого случая в алгоритме энергетического взвешивания изображений PM на синем матричном поле координаты общего энергетического центра $X_{ob \text{ ЦЭ}}$ и $Y_{ob \text{ ЦЭ}}$ будут определяться выражениями:

$$X_{ob \text{ ЦЭ}} = \frac{2}{M} \sum_{j=0}^{j=M} \frac{\sum_{i=0}^{i=N} [Q_{ib}(x_i) x_i + Q_{ir}(x_i) x_i]}{\sum_{i=0}^{i=N} [Q_{ib}(x_i) + Q_{ir}(x_i)]}; Y_{ob \text{ ЦЭ}} = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{i=N} \frac{\sum_{j=0}^{j=M} [Q_{jb}(y_i) y_i + Q_{jr}(y_j) y_j]}{\sum_{j=0}^{j=M} [Q_{jb}(y_j) + Q_{jr}(y_j)]}, \quad (3)$$

где $X_{ob \text{ ЦЭ}}, Y_{ob \text{ ЦЭ}}$ — координаты общего энергетического центра изображений R и G PM на синем поле; x_i, y_j — координаты элементов, входящих в окрестность $M \times N$; $Q_{jb}(x_i), Q_{jr}(x_i)$ — суммарный сигнал с элементов, входящих в окрестность $M \times N, j$ -й строки синих и красных элементов матрицы.

В то же время в алгоритме энергетического взвешивания изображений PM на красном матричном поле координаты общего энергетического центра $X_{or \text{ ЦЭ}}$ (рис. 2, б) и $Y_{or \text{ ЦЭ}}$ будут определяться как

$$X_{or \text{ ЦЭ}} = \Delta_{rx} + \frac{2}{M} \sum_{j=0}^{j=M} \frac{\sum_{i=0}^{i=N} [Q_{ib}(x_i) x_i + Q_{ir}(x_i) x_i]}{\sum_{i=0}^{i=N} [Q_{ib}(x_i) + Q_{ir}(x_i)]};$$

$$Y_{or\ \text{ЦЭ}} = \Delta_{ry} + \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{i=N} \frac{\sum_{j=0}^{j=M} [Q_{jb}(y_i) y_i + Q_{jr}(y_j) y_j]}{\sum_{j=0}^{j=M} [Q_{jb}(y_j) + Q_{jr}(y_j)]}, \quad (4)$$

где $X_{or\ \text{ЦЭ}}$, $Y_{or\ \text{ЦЭ}}$ — координаты общего энергетического центра изображений R и B РМ на красном матричном поле.

Для определения величины вертикального градиента температуры воздушного тракта необходимо вычислить разность положений энергетических центров синего и красного изображения РМ:

$$\Delta Y_{rb} = Y_{bb\ \text{ЦЭ}} - Y_{rr\ \text{ЦЭ}}. \quad (5)$$

Величину ΔY_{rb} выражают через регистрируемые координаты $Y_{ob\ \text{ЦЭ}}$ (3) изображения РМ на синем матричном поле и координаты $Y_{or\ \text{ЦЭ}}$ (4) изображения РМ на красном матричном поле с учетом коэффициентов перекрестной связи K_{rb} и K_{br} между синими и красными матричными полями.

Пусть уровни освещенности в изображениях синих и красных РМ отличаются в k_{br} раз, т.е.

$$k_{br} = Q_{bb\ i} / Q_{rr\ i},$$

где $Q_{bb\ i}$ — значение освещенности в i -м элементе изображения синей РМ; $Q_{rr\ i}$ — максимальное значение освещенности в i -м элементе изображения красной РМ. Тогда зависимость координаты положения энергетического центра $Y_{b\ \text{ЦЭ}}$ от регистрируемых координат положения энергетических центров $Y_{ob\ \text{ЦЭ}}$ и $Y_{or\ \text{ЦЭ}}$ для синего изображения РМ в синем канале видеокамеры с учетом коэффициентов влияния перекрестных связей K_{rb} , K_{br} и k_{br} будет

$$Y_{b\ \text{ЦЭ}} = [Y_{ob\ \text{ЦЭ}}(K_{rb}/k_{br} + 1) - Y_{or\ \text{ЦЭ}} K_{rb}(K_{br} + 1)] / (1 - K_{rb} K_{br}), \quad (6)$$

а зависимость координаты положения энергетического центра $Y_{r\ \text{ЦЭ}}$ от регистрируемых координат положения энергетических центров $Y_{ob\ \text{ЦЭ}}$ и $Y_{or\ \text{ЦЭ}}$ для красного изображения РМ в красном канале видеокамеры будет:

$$Y_{r\ \text{ЦЭ}} = [Y_{or\ \text{ЦЭ}}(1 + k_{br} K_{br}) - Y_{ob\ \text{ЦЭ}} K_{br}(k_{br} + K_{rb})] / (1 - K_{br} K_{rb}). \quad (7)$$

Тогда с учетом выражений (6) и (7) спектральная разность ΔY_{rb} будет:

$$\Delta Y_{rb} = (Y_{or\ \text{ЦЭ}}[(1 + k_{br} K_{br}) + K_{rb}(K_{br} + 1)] - Y_{ob\ \text{ЦЭ}}[K_{br}(k_{br} + K_{rb}) + (K_{rb}/k_{br} + 1)]) / (1 - K_{rb} K_{br}). \quad (8)$$

Из выражения (8) нетрудно увидеть, что систематическая составляющая относительной погрешности регистрации спектральной разности в случае перекрестных связей сильно зависит от величины K_{rb} , K_{br} и k_{br} , поэтому при обработке результатов измерений спектральной разности ΔY_{rb} необходимо учитывать влияние коэффициентов перекрестных связей в соответствии с выражением (8).

Чтобы оценить возможность реализации спектрального метода с учетом перекрестных связей, экспериментально исследовалось влияние градиента температуры воздушного тракта на функционирование физической модели РОЭС с белыми ПИД.

В такой модели РОЭС излучение от белого ПИД проходит через объектив и попадает на цветовой МФП камеры. Разрешение передаваемого видеосигнала, контрастность или способ получения видеoinформации устанавливаются при помощи персонального компьютера, к которому подключена камера. В физической модели РОЭС использовалась камера VEC-545 (матрица КМОП OV5620 формата 1/2,5", размер пиксела 2,2×2,2 мкм, объектив Юпитер-21М, $f' = 200$ мм, расстояние до источника 2,73 м). В качестве РМ использован белый ПИД AL-513RGB, создающий оптическое излучение в трех спектральных диапазонах ($\lambda_{\max} = 470$, 525 и 625 нм). Обработка и управление моделью РОЭС осуществлялись с помощью специальной компьютерной программы, разработанной в среде LabView, только для двух длин волн B и R (соответственно 470 и 625 нм).

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости координат $Y_{орЦЭ}$ и $Y_{обЦЭ}$ изображений РМ от времени наблюдения (нарастание температуры воздушного тракта) в синем (1) и красном (2) каналах видеокамеры с учетом корректировок перекрестных связей в синем (3) и красном (4) каналах. Как видно из хода кривых 1 и 2, при воздействии температуры на воздушный тракт наблюдается ожидаемое смещение координат центров изображений РМ. При этом координаты $Y_{орЦЭ}$ и $Y_{обЦЭ}$ удаляются друг от друга, что указывает на увеличение спектральной разности ΔY_{rb} . Рост оценки СКО координат $Y_{орЦЭ}$ и $Y_{обЦЭ}$ прекращается через час, что характеризует наступление стационарного режима. За это время под воздействием температуры координаты изображений РМ $Y_{орЦЭ}$ и $Y_{обЦЭ}$ сместились соответственно на 22,62 и 20,73 пкс, при этом максимальное СКО не превысило 0,5 пкс. Максимальная спектральная разность между измерениями ЦЭ в каналах составила $\Delta Y_{rb} = 0,14$ пкс по вертикали и $\Delta X_{rb} = 0,04$ пкс по горизонтали, что соответствует градиенту температуры воздушного тракта.

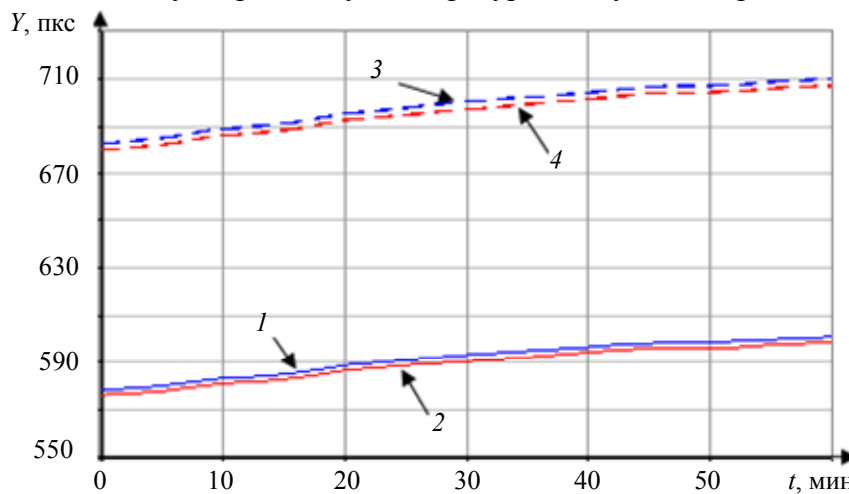


Рис. 3

С учетом коэффициента коррекции влияния перекрестных связей для значений $K_{br} = 0,165$, $K_{rb} = 0,013$ разность между смещениями центров в каналах составляет $\Delta Y_{rb} = 0,039$ пкс по вертикали и $\Delta X_{rb} = 0,011$ пкс по горизонтали.

В результате описанных исследований

— предложены алгоритмы пересчета оценки координат изображений активных РМ при спектральной селекции на едином матричном поле анализа цветового МФП;

— доказана возможность синхронно обеспечивать СКО результата измерения положения изображения РМ не более 0,5 пикселя в двух спектральных диапазонах, используя выпускаемые серийно видеокамеры ВЕС-545.

— доказано, что предложенный способ спектральной селекции координат активных РМ в поле зрения единого цветового МФП позволяет регистрировать воздействие градиента температур воздушного тракта на процесс контроля РОЭС.

Работа проведена в рамках федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатинский Е. М., Коротаев В. В., Мараев А. А., Тимофеев А. Н. Исследование путей ослабления влияния воздушного тракта в распределенных оптико-электронных системах предупреждения техногенных катастроф // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2010. № 3 (67). С. 130.
2. Лапшинов О. Ю., Пантюшин А. В., Тимофеев А. Н., Ярышев С. Н. Исследование возможности применения спектральной селекции для ослабления влияния воздушного тракта в оптико-электронных системах контроля положения // Там же. 2011. № 3 (73). С. 5—9.

3. Соломатин В. А., Якушенков Ю. Г. Сравнение некоторых способов определения координат изображений, осуществляемых с помощью многоэлементных приемников излучения // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1986. № 9. С. 62—69.
4. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. М.: Университетская книга; Логос, 2007. 192 с.
5. Latyev S. M., Pankov E. D., Prokofjev A. V., Tymofeev A. N. Refraction's slacking in optoelectronic systems for positioning of elements of ecological dangerous objects // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5381. P. 157—163.

Сведения об авторах

- Антон Андреевич Мараев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: antoshka87@gmail.com
- Александр Николаевич Тимофеев** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: timofeev@grv.ifmo.ru
- Сергей Николаевич Ярышев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: ysn63@mail.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

УДК 681.78

Г. Г. ИШАНИН, В. П. ЧЕЛИБАНОВ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ФОТОДИОДОВ В ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКОМ И ФОТОДИОДНОМ РЕЖИМАХ

Рассматриваются особенности работы фотодиодов на основе p — n -перехода в фотогальваническом (ФГ) и фотодиодном (ФД) режимах. Выводится выражение для полного тока фотодиода. Проанализированы достоинства и недостатки работы фотодиодов в ФГ- и ФД-режимах.

Ключевые слова: фотодиод, вольтовая чувствительность, фотогальванический режим, фотодиодный режим.

Фотодиодами (ФД) называют полупроводниковые приборы, основанные на внутреннем фотоэффекте, использующие одностороннюю проводимость p — n -перехода, в которых при облучении появляется ЭДС (фотогальванический режим). В случае, когда к фотодиоду прикладывается питающее обратное напряжение, при облучении ФД появляется обратный ток неосновных носителей и реализуется фотодиодный режим. Фотодиоды изготавливают на основе гомогенного перехода (p — n -переход, образованный на границе двух областей одинакового материала, но с примесями противоположного типа). Возможно изготовление ФД и на основе гетерогенного перехода (p — n -переход, образованный на границе двух областей разного материала с примесями противоположного типа), барьера Шоттки (контактный барьер, образующийся на границе „металл— n -полупроводник“ или „металл— p -полупроводник“).

Рассмотрим особенности работы фотодиодов на основе p — n -переходов в фотогальваническом (ФГ) режиме [1]. После спекания n - и p -полупроводников начинается процесс диффузии основных носителей n_n и p_p в противоположные области (в которых они становятся

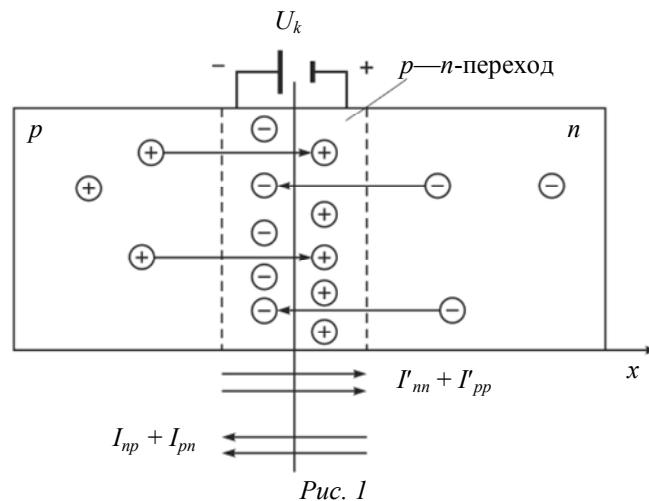
неосновными n_p и p_n), при этом появляются диффузионные токи основных носителей I'_{nn} и I'_{pp} (рис. 1). Количество носителей, диффундирующих из n -области в p -область и, наоборот, в ФД, зависит от их концентрации в соответствующих областях.

Образующаяся после диффузии контактная разность потенциалов U_k приводит к возникновению дрейфовых обратных токов неосновных носителей I_{np} и I_{pn} .

Направление токов основных носителей I'_{nn} и I'_{pp} одинаково, так как дырочный ток — это условное понятие. То же можно сказать и о токах неосновных носителей I_{np} и I_{pn} , которые возникают под действием контактной разности потенциалов U_k . В установившемся режиме при отсутствии облучения токи основных носителей уравниваются токами неосновных носителей и сумма токов равна нулю:

$$I'_{nn} + I'_{pp} - I_{np} - I_{pn} = 0, \tag{1}$$

где I'_{nn} и I'_{pp} — токи основных носителей в отсутствие облучения фотодиода; I_{np} и I_{pn} — обратные дрейфовые токи неосновных носителей, вызванные контактной разностью потенциалов U_k .



Число носителей, перешедших в противоположные области, определяется следующим образом:

$$n_p = n_n \exp[-eU_k / (kT)], \quad p_n = p_p \exp[-eU_k / (kT)], \tag{2}$$

где n_p — число электронов, перешедших в p -область из n -области за счет диффузии, p_n — число дырок, перешедших в n -область за счет диффузии, n_n и p_p — концентрация основных носителей в соответствующих областях; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ [А · с] — заряд электрона; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ [Дж · К⁻¹] — постоянная Больцмана; T [К] — температура полупроводников и p - n -перехода. Умножив выражения (2) на заряд электрона, получим:

$$I'_{nn} = I_{np} = en_n \exp[-eU_k / (kT)], \quad I'_{pp} = I_{pn} = ep_p \exp[-eU_k / (kT)], \tag{3}$$

а контактная разность потенциалов будет равна:

$$U_k = (kT / e) \ln(n_n / n_p) = (kT / e) \ln(p_p / p_n). \tag{4}$$

Из полученных выражений можно сделать вывод, что „темновые“ токи основных и неосновных носителей и U_k зависят от абсолютной температуры полупроводника.

При облучении фотодиода с включенной нагрузкой через последнюю потечет фототок неосновных носителей, для которых U_k является ускоряющим, а для основных носителей — запирающим (рис. 2). Направление фототока $I_\Phi = S_i \Phi$ совпадает с „темновыми“ токами неосновных носителей (S_i [А/Вт] — токовая чувствительность фотодиода в ФГ-режиме, Φ — поток излучения).

Падение напряжения ($U_{R_H} > 0$) на сопротивлении нагрузки (R_H) вычитается из контактной разности потенциалов, что приводит к увеличению токов основных носителей (рис. 2):

$$I_{nn} = en_n \exp[-e(U_k - U_{R_H}) / (kT)], \quad I_{pp} = ep_p \exp[-e(U_k - U_{R_H}) / (kT)], \quad (5)$$

или, с учетом (3),

$$I_{nn} = I_{np} \exp[eU_{R_H} / (kT)], \quad (6)$$

$$I_{pp} = I_{pn} \exp[eU_{R_H} / (kT)]. \quad (7)$$

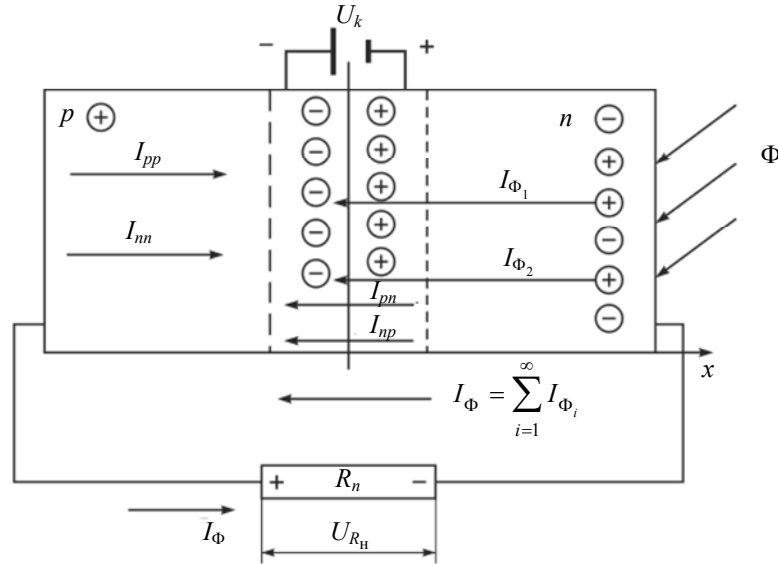


Рис. 2

Представим соотношение для суммарного тока, протекающего через p — n -переход:

$$I = I_{nn} + I_{pp} - I_{np} - I_{pn} - I_{\Phi},$$

или

$$\begin{aligned} I &= I_{np} \exp[eU_{R_H} / (kT)] + I_{pn} \exp[eU_{R_H} / (kT)] - I_{np} - I_{pn} - I_{\Phi} = \\ &= I_{np} (\exp[eU_{R_H} / (kT)] - 1) + I_{pn} (\exp[eU_{R_H} / (kT)] - 1) - I_{\Phi} = \\ &= (I_{np} + I_{pn}) (\exp[eU_{R_H} / (kT)] - 1) - I_{\Phi}. \end{aligned} \quad (8)$$

Сумма „темновых“ токов $I_{np} + I_{pn}$ обозначается через I_s и выражение для полного тока будет выглядеть следующим образом:

$$I = I_s (\exp[eU_{R_H} / (kT)] - 1) - I_{\Phi}. \quad (9)$$

При $R_H \rightarrow \infty$ суммарный ток $I = 0$, а $U_{R_H} = U_{xx}$ (напряжение холостого хода), т.е.:

$$0 = I_s (\exp[eU_{xx} / (kT)] - 1) - I_{\Phi}.$$

После преобразований найдем напряжение холостого хода:

$$U_{xx} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_{\Phi}}{I_s} + 1\right) = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{S_i \Phi}{I_s} + 1\right). \quad (10)$$

Напряжение холостого хода (фотоЭДС) ФД в фотогальваническом режиме изменяется с ростом потока излучения по логарифмическому закону и в пределе достигает значения, равного контактной разности потенциалов p — n -перехода. Зависимость $U_{xx} = f(\Phi)$ — сложная и нелинейная, но диапазон изменения сигнала велик. Линейность наблюдается только на начальном участке при $I_{\Phi} = I_s$. Продифференцируем полученное выражение и найдем экстремум функции для максимальной вольтовой чувствительности

$$S_{U_{\max}} = \frac{dU_{xx}}{d\Phi} = \frac{kT}{e} \frac{1}{\left(\frac{S_i\Phi}{I_s} + 1\right) I_s} \frac{S_i}{I_s} = \frac{kT}{e} \frac{S_i}{(S_i\Phi_{\max} + I_s)} = \frac{kT}{eI_s} \frac{S_i I_s}{(S_i\Phi_{\max} + I_s)} = R_0 \left[\frac{S_i I_s}{S_i\Phi_{\max} + I_s} \right], \quad (11)$$

где $R_0 = \frac{kT}{eI_s}$ — сопротивление p — n -перехода в отсутствие облучения.

Преобразовав (11), получим выражение для максимальной вольтовой чувствительности фотодиода в фотогальваническом режиме, зависящее также от температуры. Для комнатной температуры $kT/e = 0,025$, поэтому получим:

$$S_{U_{\max}} = 0,025[S_i/(S_i\Phi_{\max} + I_s)]. \quad (12)$$

В фотодиодном режиме (рис. 3) напряжение питания подается в обратном направлении. Падение напряжения на нагрузке U_{R_n} вычитается из U_n , которое складывается с контактной разностью потенциалов:

$$I = I_s \left(\exp \frac{e(U_R - U)}{kT} - 1 \right) - I_{\Phi}, \quad (13)$$

где U — напряжение внешнего источника питания.

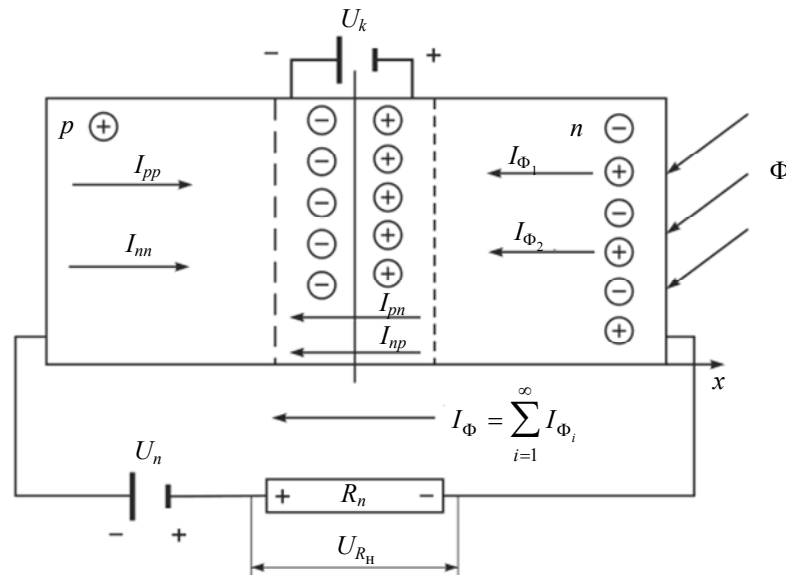


Рис. 3

На рис. 4 приведены вольт-амперные характеристики фотодиода [2]: a — фотодиодный и фотогальванический режим в четырех квадрантах; b — фотодиодный; $в$ — фотогальванический режим.

Как следует из соотношения (13), напряжение питания складывается с контактной разностью потенциалов в диодном режиме. В этом случае сопротивление p — n -перехода увеличивается, переход расширяется и ускоряющее поле для неосновных носителей становится примерно равным U . Для основных носителей U является тормозящим и токи основных носителей стремятся к нулю: $I_{nn} = I_{pp} \rightarrow 0$.

Суммарный ток $I = I_{\Phi} + I_s$ или с учетом того, что $I_{\Phi} = S_i \Phi$, получим:

$$I = S_i \Phi + I_s. \quad (14)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = 1/R_n = 1/(U_n/I_n) = I_n/U_n,$$

где α — угол наклона прямой для выбранного R_n

Напряжение на нагрузке будет:

$$U_{R_n} = IR_n = S_i \Phi R_n + I_s R_n. \quad (15)$$

Найдем вольттовую чувствительность фотодиода в диодном режиме

$$S_U = \frac{dU_H}{d\Phi} = S_i R_H. \tag{16}$$

Как следует из полученного выражения, значение S_U будет тем больше, чем выше сопротивление нагрузки, которое зависит от регистрируемого потока излучения.

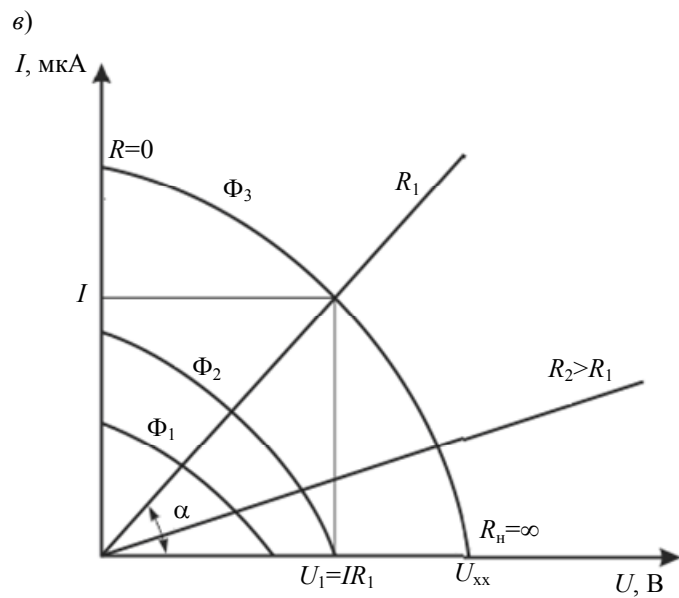
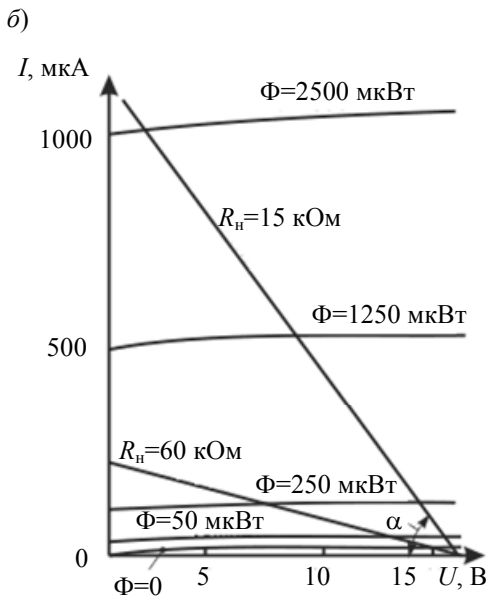
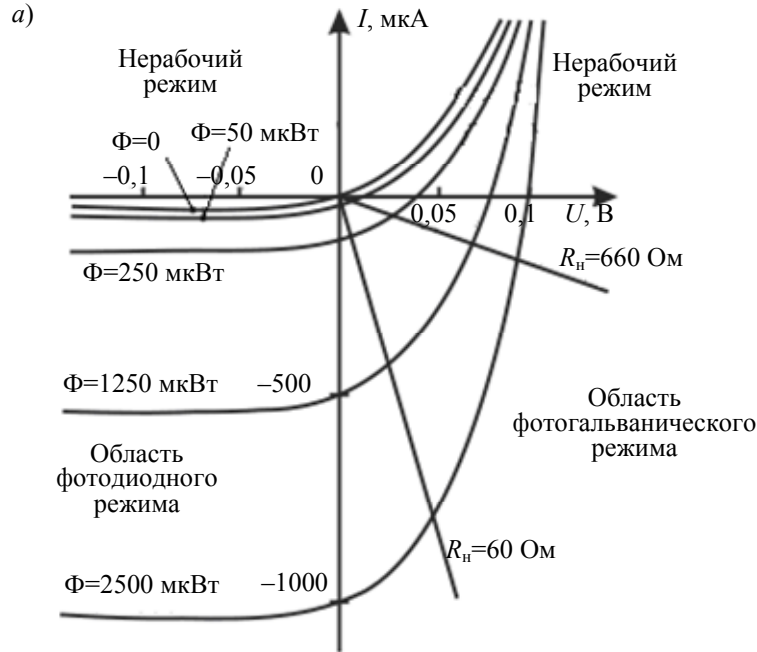


Рис. 4

Для того чтобы ФД работал в линейном режиме и небольшие колебания напряжения питания не вызывали изменения фототока, нагрузочные прямые проводятся из точки U_H в точку перегиба вольттовой характеристики для максимального регистрируемого потока излучения. Максимальное сопротивление должно быть согласовано с регистрируемым потоком излучения:

$$R_{Hmax} = U_H / (I_\Phi + I_s) = U_H / (S_i \Phi + I_s), \tag{17}$$

откуда

$$S_{U_{\max}} = S_i U_{\pi} / (S_i \Phi + I_s). \quad (18)$$

Найдем соотношение вольтовой чувствительности в фотодиодном (18) и фотогальваническом (12) режимах:

$$\frac{S_{U_{\max \text{ ФД}}}}{S_{U_{\max \text{ ФГ}}}} = \frac{S_i U_{\pi} / (S_i \Phi_{\max} + I_s)}{(kT/e)[S_i / (S_i \Phi_{\max} + I_s)]} = \frac{U_{\pi}}{kT/e}. \quad (19)$$

Напряжение питания ФД примерно равно 15 В, $kT/e = 0,025$, откуда получим:

$$S_{U_{\max \text{ ФД}}} / S_{U_{\max \text{ ФГ}}} = 15 : 0,025 \cong 600.$$

Рассмотрим особенности использования ФГ- и ФД-режимов.

Достоинства фотогальванического режима

1. Отсутствие источников питания.
2. Малые собственные шумы.
3. Малый пороговый поток.

Недостатки фотогальванического режима

1. Нелинейная логарифмическая зависимость сигнала от потока излучения.
2. Малое внутреннее сопротивление, что требует использования усилительного тракта с низкоомным входом.
3. Вольтовая чувствительность более чем на два порядка ниже по сравнению с ФД-режимом.
4. Большая постоянная времени по сравнению с ФД-режимом.
5. Для реализации пороговых возможностей ФД в ФГ-режиме требуются большие коэффициенты усиления усилительного тракта с малыми собственными шумами и тепловыми шумами нагрузочного сопротивления, которое приходится охлаждать.

Достоинства фотодиодного режима

1. Большая вольтовая чувствительность.
2. Большое внутреннее сопротивление фотодиода, что позволяет использовать соизмеримое с ним внутреннее сопротивление усилительного тракта.
3. Небольшие, по сравнению с ФГ-режимом, коэффициенты усиления усилительного тракта.
4. Меньшая постоянная времени ФД вследствие значительного приложенного напряжения питания, которое ускоряет образовавшиеся при облучении носители тока.
5. Большой, по сравнению с ФГ-режимом, спектральный диапазон работы.
6. Выходной сигнал линеен в широком динамическом диапазоне облученности.

Недостатки фотодиодного режима

1. Необходимость в источнике питания.
2. Наличие обратного тока источника питания, который приводит к увеличению всех собственных шумов ФД, к которым добавляются шумы источника питания.
3. Меньшая предельная обнаружительная способность, по сравнению с ФГ-режимом без охлаждения.

Необходимо анализировать условия использования фотогальванического и фотодиодного режимов ФД. Критериями для выбора режима являются: вольтовая чувствительность, постоянная времени и наличие напряжения питания. При использовании ФД на производстве и в бытовой технике чаще выбирают фотодиодный режим из-за высокой вольтовой чувствительности. В космической технике из-за необходимости наличия напряжения питания ФД можно использовать фотогальванический режим, однако следует иметь в виду, что постоянная времени приемников в этом случае больше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ишанин Г. Г., Панков Э. Д., Челибанов В. П. Приемники излучения: Учеб. пособие для вузов. СПб: Папирус, 2003. 527 с.
2. Цуккерман С. Т., Гридин А. С. Управление машинами при помощи оптического луча. Л.: Машиностроение, 1969. 197 с.

Сведения об авторах

- Геннадий Григорьевич Ишанин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: Ishanin@mail.ru
- Владимир Петрович Челибанов** — канд. хим. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра ЭПиМ; E-mail: chelibanov@gmail.com

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

УДК 535:621.373.826

М. Г. СЕРИКОВА, Е. Г. ЛЕБЕДЬКО

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАЙСА ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ СИГНАЛОВ В ОПТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ

Рассматривается возможность применения задачи Райса для обнаружения сигналов в приложении оптической локации. Показано, что даже в случае низкого отношения порог—шум возможно качественное обнаружение при условии приема сигнала на интервале между двумя шумовыми выбросами.

Ключевые слова: задача Райса, выбросы случайных процессов, оптическая локация, обнаружение сигналов.

В теории случайных процессов задачей Райса называется проблема поиска распределенных интервалов между нулями случайного процесса в приложении теории связи [1]. Однако со временем она расширилась до поиска распределений временных интервалов не только над ненулевым, но и над функционально заданным уровнем, а также несколькими не равными друг другу уровнями. Решение данной проблемы имеет большое прикладное значение для разных областей, среди которых океанография, распознавание речи, сейсмология, биологические системы и лазерная оптика. Важным приложением решения задачи Райса в оптической локации является обнаружение и оценка информационных параметров сигналов на фоне шумов приемно-усилительного тракта.

Известно, что при заданной средней мощности случайный процесс обладает максимальной информативностью, если имеет нормальное распределение [2]. Воздействие помехи с нормальным распределением на информацию приведет к ее частичной или даже полной потере. Следовательно, наиболее опасной является помеха, которая при заданной средней мощности имеет нормальный закон распределения.

Рассмотрим распределения длительности выбросов случайного процесса при пересечении им одного уровня и интервалов между последовательными выбросами (далее — одноуровневое пересечение) [3—5]. Решение выражается через функцию Райса, которая представляет собой условную вероятность $Q(\tau, H)$ того, что процесс $x(t)$ пересекает уровень H с отри-

цательной производной на интервале $(t_0, t_0 + \tau)$ при условии, что начало выброса совпадает с точкой t_0 [4]:

$$Q(\tau, H) = 1 - \int_0^\tau \tilde{d}_1(t) dt + \frac{1}{2!} \int_0^\tau \int_0^\tau \tilde{d}_2(t_1, t_2) dt_1 dt_2 - \frac{1}{3!} \int_0^\tau \int_0^\tau \int_0^\tau \tilde{d}_3(t_1, t_2, t_3) dt_1 dt_2 dt_3 + \dots =$$

$$= \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(-1)^s}{s!} \int_0^\tau \dots \int_0^\tau \tilde{d}_s(t_1, t_2, \dots, t_s) dt_1 \dots dt_s, \quad (1)$$

где $\tilde{d}_s(t_1, t_2, \dots, t_s)$ — совместная плотность распределения вероятности процесса $x(t)$ и его производной при условии, что в момент времени $t = t_0$ начался выброс (значение случайного процесса $x(t_0) = H$, а $x'(t_0) > 0$).

При этом искомая плотность вероятности распределения интервалов $P(\tau, H)$ между выбросами случайного процесса связана с $Q(\tau, H)$ как

$$\int_{\tau}^{\infty} P(\tau, H) d\tau = Q(\tau, H).$$

Таким образом, искомое значение $P(\tau, H)$ находится, согласно формуле (1), следующим образом [4]:

$$P(\tau, H) = \tilde{d}_1(\tau) - \int_0^\tau \tilde{d}_2(t, \tau) dt + \dots \quad (2)$$

Аналогичным образом могут быть получены выражения для длительности интервалов между выбросами.

Несмотря на то что использование общего выражения для плотности распределения вероятности (2) затруднено, в области малых значений длительности τ можно ограничиться вычислением только первых двух членов ряда (2) и пренебречь теми, которые учитывают маловероятные в данном случае множественные пересечения уровня H на малом по длительности интервале $(t_0, t_0 + \tau)$. Исходя из определения функций $\tilde{d}_s(t_1, t_2, \dots, t_s)$ [4, 5] получим:

$$P(\tau, H) \approx P_0(\tau, H) = \frac{1}{N(H)} \int_0^\infty dx'_0 \int_0^{-\infty} x'_0 x'_1 p_2(H, H, x'_0, x'_1) dx'_1, \quad (3)$$

где N — частота пересечения процессом уровня H .

На рис. 1 представлен результат приближенного расчета плотности распределения вероятности для интервалов между выбросами нормального случайного процесса в первом приближении, рассчитанные по выражению (3); кривая 1 — $H/\sigma=0$, 2 — 1, 3 — 2 ($\Delta f=10$ — ширина энергетического спектра шума, σ — СКО шума). Из рисунка видно, что длительность выбросов случайного процесса с гауссовой статистикой имеет негауссово распределение.

Используя данное свойство случайного процесса, можно перейти от обнаружения на фоне гауссовых помех к обнаружению при воздействии помех с менее „опасным“ негауссовым распределением. При этом следует использовать для приема отраженного сигнала временной интервал между двумя выбросами помех на выходе приемного устройства. Это оказывается возможным, если время запаздывания сигнала сопоставимо с его длительностью, что характерно для схем ближней локации, в которых рабочая дистанция ограничена 10—15 метрами [6].

Используя данный метод, можно принимать слабые сигналы с малой вероятностью ложной тревоги, несмотря на сниженное значение отношения порог—шум решающего устройства. Возможность уменьшить порог позволяет снизить мощность лоцирующего импульса, а следовательно, сделать систему более энергетически эффективной.

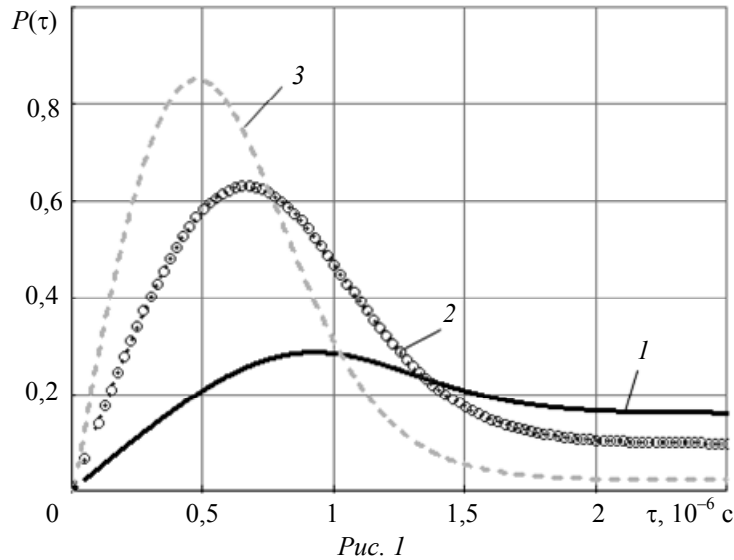


Рис. 1

Для реализации указанного способа приема необходимо синхронизировать момент запуска излучения со спадом шумового выброса. На рис. 2 проиллюстрирован выбор порога при шумовой синхронизации излучения: а) порог задает распределение вероятности интервалов между шумовыми выбросами, по которому рассчитывается обеспечиваемая вероятность ложной тревоги $P_{ЛТ}$, б) порог влияет на частоту посылки зондирующих импульсов $N(H/\sigma)$ ($1 — \Delta f=0,2$; $2 — 1$; $3 — 2$; $4 — 10$ МГц). Вероятность ложной тревоги $P_{ЛТ}$ в данном случае задается распределением шумовых интервалов и рабочей дистанцией $l=Tc/2$, где c — скорость света (рис. 2, а), а частота импульсов излучения определяется частотой пересечения уровня H с положительной производной (рис. 2, б) [7, 8]. Можно заметить, что требования к частоте посылок излучения и вероятности ложной тревоги противоречат друг другу. С одной стороны, требование низкой вероятности ложной тревоги обуславливает повышение порога детектирования (снижение длительности интервалов), а с другой — при высоком пороге резко снижается частота излучения лазера, это может привести к тому, что за время наблюдения не будет послан ни один зондирующий импульс.

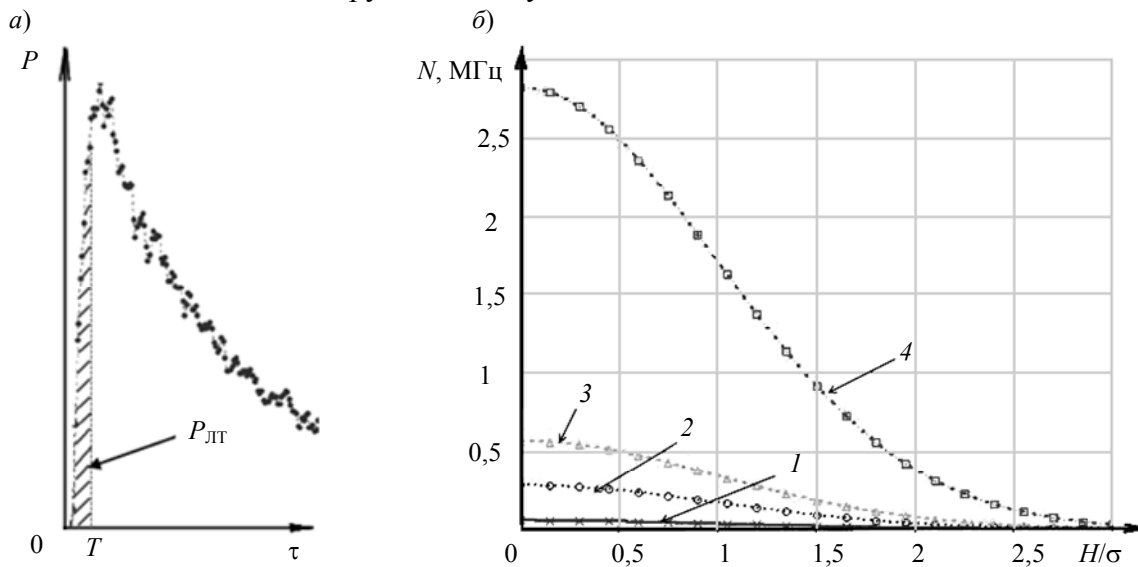


Рис. 2

Однако эти противоречия могут быть разрешены использованием двухуровневой схемы приема, в которой импульс излучения возникает в момент пересечения шумовым выбросом с отрицательной производной более низкого уровня, а принятие решения о наличии сигнала вырабатывается при пересечении процессом более высокого уровня [7, 8]. На рис. 3 продемонстрирована шумовая синхронизация излучения при двухуровневой схеме обработки (в кружке указан момент запуска излучателя).

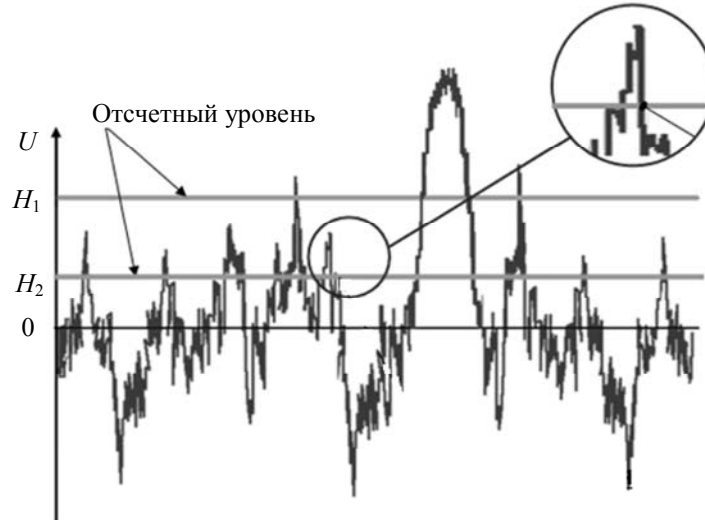


Рис. 3

При этом, если задача поиска оптимального уровня H_2 в предложенном методе обнаружения сигналов на сегодня решена, то выбор верхнего уровня H_1 , связанный с определением достижимой вероятности ложной тревоги, может быть выполнен только экспериментально, поскольку в аналитическом виде задача поиска плотности вероятности распределения шумовых интервалов при пересечении случайным процессом двух уровней (далее — двухуровневое пересечение) сегодня не решена даже приближенными методами [3—5].

Для поиска распределений шумовых интервалов при двухуровневом пересечении была разработана модель в среде LabView (рис. 4). Сформированный генератором случайного процесса шум поступает на вход низкочастотного фильтра с изменяемой полосой пропускания (фильтр Баттерворта первого порядка). Далее случайный сигнал (шум) поступает на два уровня H_1 и H_2 , сигналы с выхода которых запускают процедуры поиска моментов отрицательных и положительных пересечений соответственно.

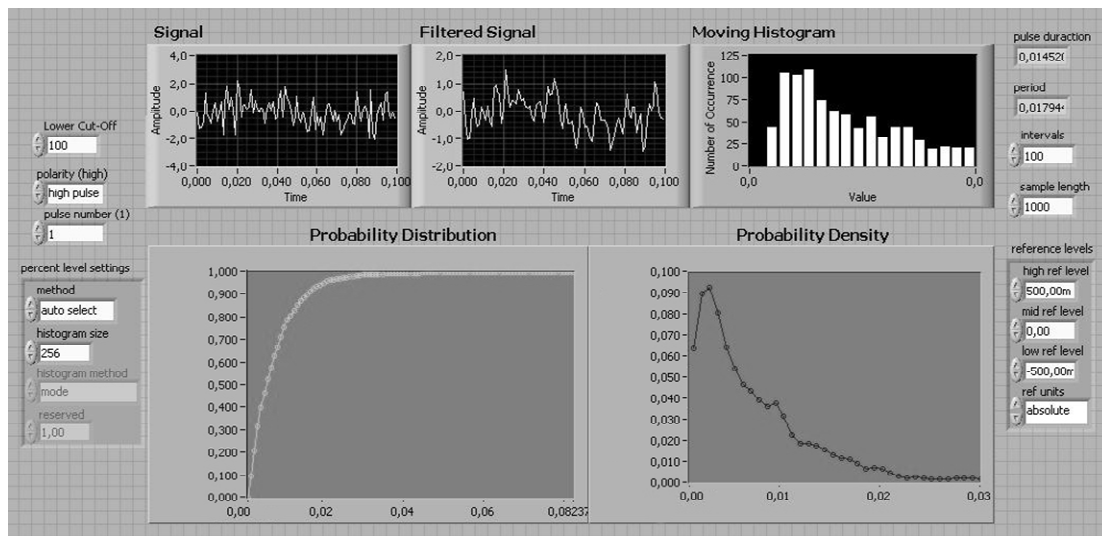


Рис. 4

Данные о найденных моментах пересечений являются входными для процедуры вычисления длительности интервалов. Полученная таким образом информация о числе и длительности интервалов передается на построитель гистограммы. Плотность распределения вероятности рассчитывается путем нормирования полученного результата по числу интервалов, после чего выводится на экран в виде графика; при равенстве значений H_1 и H_2 возможно получить распределение интервалов между выбросами, характерное для одноуровневого пересечения.

С помощью рассмотренной модели удалось получить экспериментальные данные, в которых присутствовали такие известные особенности искомым распределений, как многовершинность [4], экспоненциальное затухание „хвостов“ [2, 3] и др. Кроме того, результаты тестов для одноуровневого пересечения хорошо согласуются с полученными ранее экспериментальными данными [2—4]. На следующем этапе исследования планируется доработать существующую модель, с тем чтобы определять зависимость значения H_2 от вероятности ложной тревоги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rice S. O. The Mathematical Analysis of Random Noise // B.S.T.J., 1944. Vol. 23, N 3; 1945. Vol. 24, N 1.
2. Лебедько Е. Г. Теоретические основы передачи информации. СПб: Лань, 2011. 360 с.
3. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. I. М.: Сов. радио, 1969. 752 с.
4. Тихонов В. И., Хименко В. И. Выбросы траекторий случайных процессов. М.: Наука, 1987.
5. Mupakata T. Some unsolved problems on the level crossing of random process // Unsolved Problems of Noise / Ed. by C.R. Doering, L.B. Kiss, and M.F. Shlesinger. Singapore: World Scientific, 1997. P. 213—222.
6. Мусьяков М. П., Миценко И. Д., Ванеев Г. Г. Проблемы ближней лазерной локации: Учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 295 с.
7. Лебедько Е. Г., Серикова М. Г. Анализ распределения интервалов между выбросами случайного процесса и возможность построения систем ближней локации с шумовой синхронизацией // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2010. Вып. 6(70). С. 1—5.
8. Serikova M. G. and Lebedko E. G. Noise-induced outpulsing technique for energy efficiency improvement of laser radar systems // Proc. SPIE. 2011. Vol. 8137. P. 813 718.

Сведения об авторах

- Мария Геннадьевна Серикова** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: serikovamg@gmail.com
- Евгений Георгиевич Лебедько** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: eleb@rambler.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

А. А. АЛЁХИН, Е. В. ГОРБУНОВА, В. В. КОРОТАЕВ, А. Н. ЧЕРТОВ

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ НАСТРОЙКИ ЦВЕТОВЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Исследованы особенности цветопередачи систем технического зрения промышленного назначения. Рассмотрены ключевые принципы настройки указанных систем.

Ключевые слова: цветопередача, система технического зрения, система телевизионная, настройка, тестовая таблица.

На сегодняшний день системы машинного зрения широко применяются в различных отраслях промышленности как для автоматизации технологических процессов, так и для контроля качества выпускаемой продукции. Поскольку такие системы часто предполагают работу с цветным изображением, важно обеспечивать правильную цветопередачу анализируемой сцены, нередко в условиях освещения сложного спектрального состава. Таким образом, задача аттестации цветových систем машинного зрения для их использования в конкретных производственных условиях является весьма актуальной.

В настоящей работе приведены результаты исследований особенностей цветопередачи телевизионной системы (ТВС) и рассмотрены основные принципы ее настройки.

Для оценки качества цветопередачи цветových ТВС наблюдения и контроля можно использовать спектрофотометрический метод и метод реальных испытательных цветов [1].

С помощью спектрофотометрического метода определяют спектральные характеристики чувствительности R , G и B каналов камеры и по ним находят выходные значения сигналов, являющиеся координатами цвета в системе цвета камеры. Затем координаты цвета переводят в систему цвета МКО и по кривым сложения находят их истинные значения.

При оценке цветопередачи ТВС по способу реальных испытательных цветов перед камерой помещают эталонные образцы: по одному для каждого цвета. При этом аттестацию можно осуществлять либо по отображаемым камерой цветам, либо по сигналам, поступающим с нее. В первом случае цвета воспроизводятся соответствующим образом аттестованным видеоконтрольным устройством и сравниваются с эталонными качественным, визуальным методом. Во втором случае объективно оценить цветопередачу можно, измерив характеристики цвета, воспроизведенного на видеоконтрольном устройстве, либо определив полученные координаты R , G и B сигнала камеры, после чего сравнить их с известными координатами цветности соответствующих эталонных образцов.

Для работы в промышленных условиях наиболее применим второй из описанных методов аттестации, поскольку он выгодно отличается от первого меньшими трудозатратами и удобством использования.

На рис. 1 представлена установка для исследований особенностей цветопередачи ТВС и отработки ключевых принципов их настройки по методу реальных испытательных цветов. В качестве исследуемой ТВС использовалась камера VEI-545-USB2.0 на базе КМОП матрицы OV5620 производства фирмы OmniVision.

Указанная экспериментальная установка включает в себя следующие элементы: источник (1), который питает узел освещения (2), состоящий из двух линеек белых светодиодов (ADJD-WMR3-NKKZ0 фирмы Avago Technologies), симметрично расположенных относительно настраиваемой ТВС (3). Данное расположение источников необходимо для обеспечения

максимально равномерного освещения экрана (4). На экране помещается тестовая колориметрическая таблица Munsell Color, изображение которой, регистрируемое системой (3), обрабатывается и выводится на монитор компьютера (5).

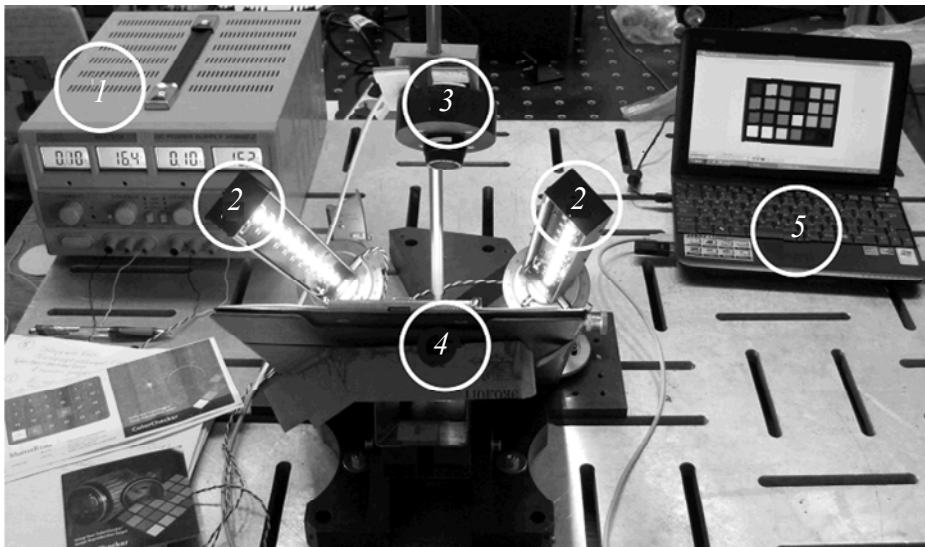


Рис. 1

Предварительная оценка качества цветопередачи ТВС производилась при включенных автоматических настройках экспозиции и усиления путем визуального сравнения полученного изображения с таблицей. При этом было очевидно, что исследуемая система воспроизводит цветовую картину неверно, и это характерно для большинства применяемых систем технического зрения, в том числе и специального назначения, предназначенных для получения цветных изображений.

Результаты предварительной визуальной оценки цветопередачи исследуемой матрицы полностью подтверждаются при анализе составляющих R , G и B изображения тестовой таблицы, полученного при помощи ТВС.

На рис. 2 приведены значения цветовых координат ряда нейтральных цветов для элементов тестовой таблицы, задающих эталоны градаций серого цвета (a), и результат разложения RGB -изображения тестовой таблицы, полученного при включенных автоматических настройках ТВС (b — красный, v — зеленый, z — синий канал). На поверхностях, построенных в среде MatLab и характеризующих изображение в цветовых каналах (рис. 2, b — z), шкала градаций серого цвета находится в нижнем левом ряду и при верной цветопередаче должна выглядеть, как почти равномерная „лестница“. Однако видно, что необходимая равномерность изменения цветовых координат в каналах цветности нарушена.

Для настройки колориметрически верной цветопередачи ТВС можно использовать такие механизмы коррекции, доступные пользователю, как „гамма-коррекция“, „насыщенность“, „баланс белого“, „яркость“, „контраст“, „экспозиция“. Однако параметры настройки правильной цветопередачи нелинейно зависят друг от друга, что сильно усложняет алгоритм настройки [2].

На рис. 3 приведены результаты разложения нижнего ряда цветов тестовой таблицы по красному каналу телевизионной системы при разных значениях насыщенности.

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить наиболее приемлемую последовательность действий при настройке цветопередачи цветных ТВС.

1) Установка минимального уровня видеоусиления и компенсация недостаточной яркости изображения увеличением времени накопления сигнала.

2) Калибровка шкалы оттенков серого — достижение максимального соответствия экспериментально измеренных цветовых координат изображения ряда тестовой таблицы с

оттенками серого цвета в каждом из оттенков аттестованным значениям посредством изменения настроек „гамма-коррекция“, „яркость“ и „контраст“ по методу последовательных приближений.

3) Колориметрическая настройка — достижение максимального соответствия экспериментально измеренных цветových координат изображения остальных цветových оттенков тестовой таблицы их аттестованным значениям посредством изменения настроек „баланс белого“ и „насыщенность“ по методу последовательных приближений.

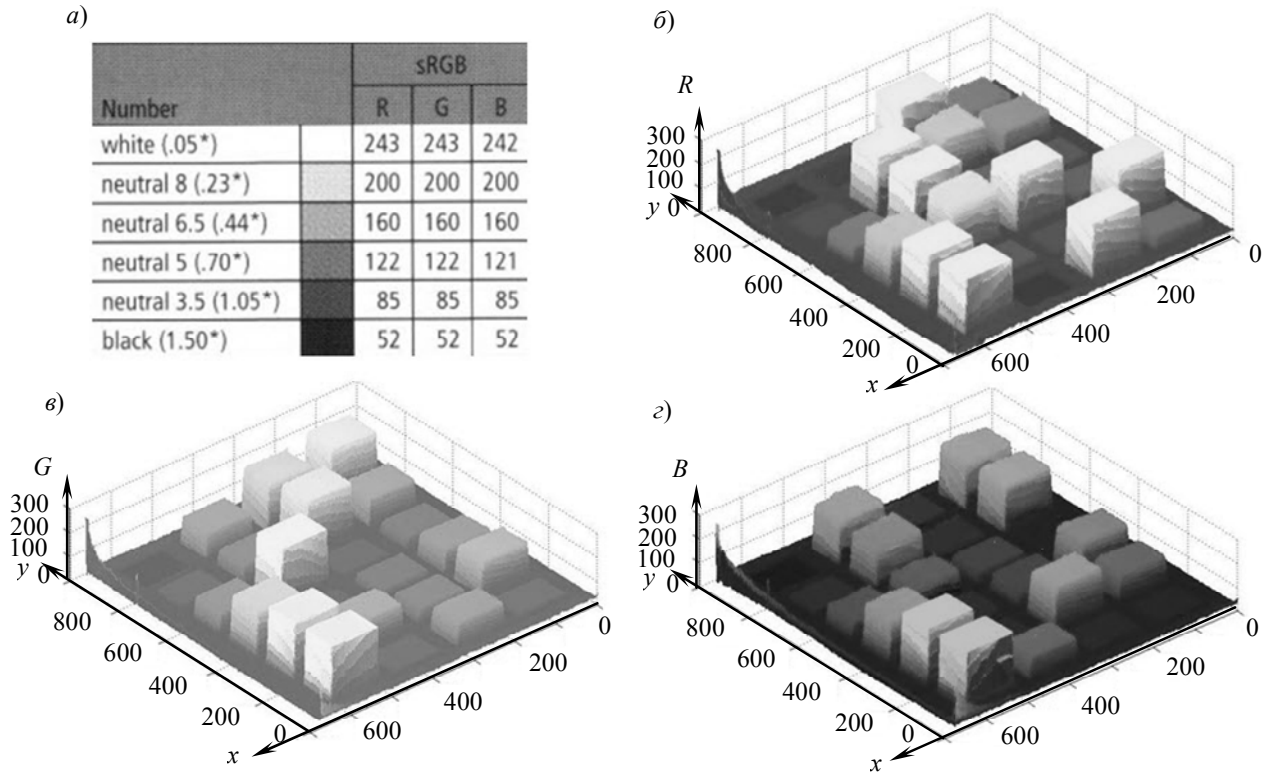


Рис. 2

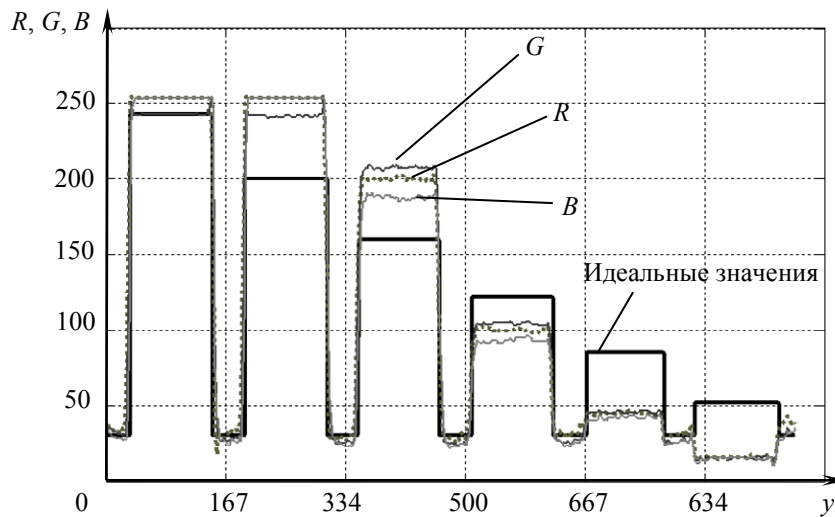


Рис. 3

Применение на этапах 2 и 3 метода последовательных приближений предполагает циклическое изменение настроек для достижения оптимального соответствия измеренных цветových координат цветových оттенков их аттестованным значениям.

Три этапа настройки цветопередачи, применяемые совместно с адаптивным подходом к учету изменения условий функционирования ТВС, являются базовыми при постановке методики их цветовой аттестации.

Работа проводится в рамках федеральных целевых программ „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009—2013 гг.“ и „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 гг.“.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годен Ж. Колориметрия при видеообработке / Пер. с фр. А. Л. Лаут. М.: Техносфера, 2008. 328 с.
2. Форсайт Д. А., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Изд. дом „Вильямс“, 2004. 928 с.

Сведения об авторах

- Артём Андреевич Алехин** — студент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: temka-pk@mail.ru
- Елена Васильевна Горбунова** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; научный сотрудник; E-mail: vtedina_ia@mail.ru
- Валерий Викторович Коротаев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Александр Николаевич Чертов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: a.n.chertov@mail.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

М. И. БУДАРГИНА

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЦЕЗАЩИТНЫХ ОЧКОВЫХ ЛИНЗ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ОСТРОТУ ЗРЕНИЯ

Рассчитаны значения коэффициента пропускания по спектрофотометрическим данным солнцезащитных очковых линз. Полученные значения сравниваются с требованиями ГОСТ. Рассмотрено влияние линз на остроту зрения и субъективное ощущение контрастности изображения.

Ключевые слова: солнцезащитные очковые линзы, острота зрения, спектральные и цветовые характеристики.

Согласно проведенным исследованиям европейского рынка солнцезащитных очков, основной целью ношения солнцезащитных очков является защита глаз. Солнцезащитные линзы не только снижают количество попадающего на сетчатку глаза видимого света от 100 до 10—50 %, но, что еще более важно, отфильтровывают ультрафиолетовое (УФ) излучение.

Исследования спектральных и цветовых характеристик некоторых солнцезащитных очков разных производителей с линзами различных цветовых оттенков представлены в работе.

Важным свойством солнцезащитных линз является способность влиять на остроту зрения, что подтверждается использованием при заболеваниях зрительной системы линз различного цвета для коррекции зрения, а также профессиональными спортсменами [1, 2].

Чрезвычайно важна способность таких линз к „отрезанию“ излучения УФ спектрально-го диапазона, так как при ношении солнцезащитных очков зрачки расширяются, пропуская большее количество невидимого опасного УФ-излучения. Это означает, что ношение солнцезащитных очков, не обеспечивающих надежное „отрезание“ УФ-излучения, даже более опасно для глаз, чем нахождение на солнце без очков вообще.

Многие ведущие производители — фирмы Rodenstock, Seiko, Carl Zeiss и др. — выпускают заготовки из полимерного материала для производства солнцезащитных очковых линз (далее — линз), в том числе и корригирующих. Значения коэффициентов пропускания линз в УФ-, видимой и ИК-областях спектра регламентируются, но эта информация не предоставляется потребителю, а также не известно влияние линз на защитные свойства, остроту зрения и субъективные ощущения человека. В настоящей работе исследовано влияние на остроту зрения линз разных производителей.

Исследование включало в себя следующие этапы:

- 1) изучение спектральных характеристик линз Rodenstock, Seiko, Carl Zeiss;
- 2) определение координат цветности линз;

- 3) определение интегральных коэффициентов пропускания в УФ и видимом спектральных диапазонах;
- 4) сравнение полученных данных с ГОСТ Р 51854-2001;
- 5) исследование влияния линз Rodenstock на остроту зрения и субъективное ощущение контрастности изображения.

При инструментальном измерении цвета учитываются следующие характеристики:

- 1) спектральные коэффициенты отражения $\rho(\lambda)$ и пропускания $\tau(\lambda)$;
- 2) координаты цвета X, Y, Z ;
- 3) координаты цветности x, y ;
- 4) координаты цвета L, a, b в системе CIE *Lab*, принятой в 1976 г.;
- 5) насыщенность цвета S ;
- 6) цветовой тон T .

В настоящей работе определение цветовых характеристик проводилось расчетным путем по данным, полученным на основании спектрофотометрических измерений [3—5].

Для расчета коэффициентов пропускания в УФ и видимом спектральных диапазонах использовалась методика, описанная в ГОСТ Р 51854-2001 и ГОСТ Р 12.4.230.1-2007 [6, 7].

Первоначально по стандартной методике определялась острота зрения каждого глаза и при необходимости подбирались линзы для полной коррекции зрения. Затем в пробную оправу поочередно устанавливались солнцезащитные очковые линзы из исследуемого набора фирмы Rodenstock и повторно проверялась острота зрения. Пациенту показывали опто типы, соответствующие остроте зрения 1,0 (не менее четырех знаков подряд). Если все было названо верно, то показывали более мелкие знаки, непосредственно следующие за размером 1,0 в данной таблице. Так продолжалось до тех пор, пока пациент не начинал ошибаться (не более двух ошибок в строке). Результаты проверки зрения с солнцезащитными и прозрачными линзами сравнивались.

Пациент, посмотрев через цветные линзы, должен был охарактеризовать свои ощущения контрастности изображения, мерой субъективной контрастности условно была принята единица. Идентичное восприятие опто типов как через линзу, так и без нее соответствует 1, отклонение от данного значения соответствует улучшению (>1) или ухудшению (<1) восприятия.

Исследования характеристик солнцезащитных очковых линз показали, что существуют расхождения с характеристиками, заявленными производителями. Коротковолновая граница спектра в большинстве линз, обеспечивающих защиту от ультрафиолета, сдвинута на несколько десятков нанометров.

На рис. 1 представлены спектральные характеристики некоторых линз фирмы Rodenstock, из которого видно, что линзы с разной степенью затемнения и различных цветов имеют разный коэффициент пропускания в одинаковых спектральных диапазонах (a — линза розового цвета степенью затемнения 12 %, b — линза коричневого цвета степенью затемнения 25 %, c — линза серого цвета степенью затемнения 90 %, d — линза оранжевого цвета степенью затемнения 65 %).

В ходе исследования были определены цветовые характеристики для всех солнцезащитных линз. В табл. 1 представлены результаты определения характеристик цветности для линз фирмы Rodenstock. Цветовые координаты соответствуют оттенку и окраске линз; насыщенность характеризует степень затемнения солнцезащитной очковой линзы под определенным названием. По координатам цветности, насыщенности и цветовому тону можно судить о цвете и оттенке линз.

Для анализа соответствия исследуемых солнцезащитных очковых линз требованиям стандартов были определены их интегральные коэффициенты пропускания в УФ и видимом спектральных диапазонах. Спектральная световая эффективность характеризует ощущения,

возникающие у „среднестатистического наблюдателя“ при рассматривании стандартного (МКО) источника света D_{65} [6, 7].

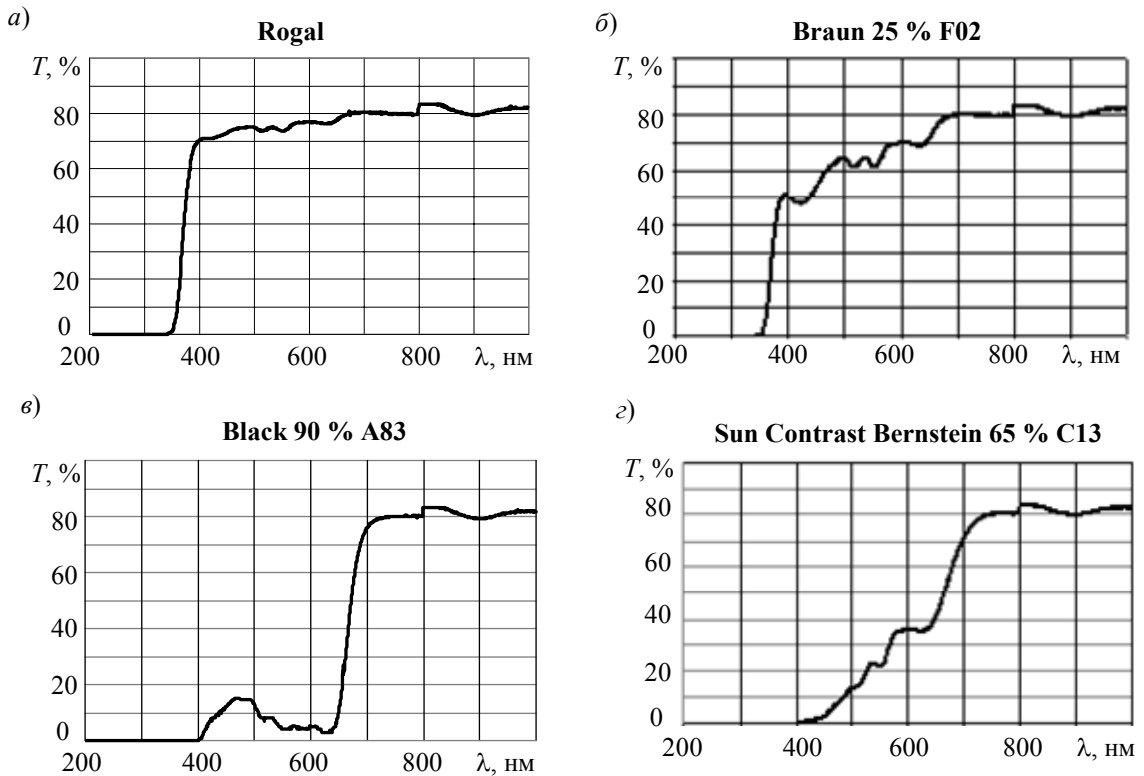


Рис. 1

Таблица 1

Характеристики цветности солнцезащитных очковых линз фирмы Rodenstock

Линза	X	Y	Z	L	a	b	S , о.е.	T , о.е.
Ametist F24	67,36	69,75	77,16	86,87	2,39	-0,94	2,57	-0,37
Bernstein 65%	26,40	25,70	5,29	57,76	8,32	54,19	54,83	1,42
Bernstein 80%	16,00	14,67	1,51	45,18	12,35	57,46	58,78	1,36
Black 90% A83	6,54	6,56	12,81	30,79	3,20	-17,34	17,63	-1,39
Blau 15% F16	70,62	74,82	83,79	89,31	-1,05	-1,70	2,00	1,02
Braun 25% F02	62,47	65,35	60,62	84,66	0,84	9,03	9,07	1,48
Braun 75% C11	20,49	20,70	9,99	52,62	4,02	28,11	28,40	1,43
Braun 85% C14	10,95	10,32	3,23	38,41	8,78	31,92	33,10	1,30
Braun 85% F29	12,23	11,51	5,11	40,43	9,21	25,15	26,78	1,22
Brunal	70,75	74,51	76,99	89,16	-0,15	3,14	3,15	-1,52
Drive C16	22,68	19,73	8,53	51,53	19,05	30,88	36,28	1,02
Grau 65% F15	30,20	31,41	32,96	62,85	1,30	1,66	2,11	0,91
Green 85%	9,51	12,10	8,50	41,38	-15,22	13,43	20,30	-0,72
Green 85% A75	10,38	11,60	10,74	40,58	-4,89	5,16	7,11	-0,81
Rogal	71,84	75,21	79,64	89,49	0,77	1,69	1,85	1,14

Коэффициент пропускания света τ_v вычисляется по формуле:

$$\tau_v = \frac{\int_{380}^{780} \Phi_{\lambda}^{D_{65}}(\lambda) \tau(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} \Phi_{\lambda}^{D_{65}}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

где $\Phi_{\lambda}^{D_{65}}$ — относительное спектральное распределение потока излучения стандартного источника излучения D_{65} ; $V(\lambda)$ — относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения в диапазоне длин волн от 380 до 780 нм; $\tau(\lambda)$ — спектральный коэффициент пропускания.

Значения произведения относительного спектрального распределения потока излучения стандартного источника излучения D_{65} на относительную спектральную световую эффективность монохроматического излучения для дневного зрения приведены в ГОСТ Р 51854-2001 и ГОСТ Р 12.4.230.1-2007.

Коэффициент пропускания в ультрафиолетовой области спектра солнечного излучения τ_{suv} в диапазоне длин волн от 280 до 380 нм определяется по формуле:

$$\tau_{\text{suv}} = \frac{\int_{280}^{380} \tau(\lambda) E_{S\lambda}(\lambda) W(\lambda) d\lambda}{\int_{280}^{380} E_{S\lambda}(\lambda) W(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

где $E_{S\lambda}(\lambda)$ — спектральная плотность энергетической облученности солнечным излучением на уровне моря, Вт·м⁻³; $W(\lambda)$ — спектральная эффективность воздействия ультрафиолетового излучения на глаз. Значения $E_{S\lambda}(\lambda)$ и $W(\lambda)$ приведены в приложении ГОСТ Р 51854-2001 [6], они должны соответствовать значениям, приведенным ГОСТ 8.332 [6, 7].

Интегральный коэффициент пропускания τ был рассчитан по спектральным характеристикам ($\lambda = 280$ — 380 нм), полученные результаты сравнивались с допустимыми значениями $\tau_{\text{д}}$, приведенными в ГОСТ Р 51854-2001 (табл. 2). Можно заметить, что все измеренные линзы соответствуют допустимым нормам и, следовательно, защищают глаза от вредного воздействия ультрафиолета.

Таблица 2

Сравнение расчетного интегрального коэффициента пропускания с требованием ГОСТ

Линза	Класс защиты	τ	$\tau_{\text{д}}$
Ametist F24	1	0,70	0,052
Bernstein 65%	2	0,26	0
Bernstein 80%	3	0,07	0
Black 90% A83	1	0,07	0
Blau 15% F16	1	0,75	0,05
Braun 25% F02	1	0,65	0,042
Braun 75% C11	2	0,21	0
Braun 85% C14	3	0,05	0
Braun 85% F29	3	0,06	0
Brunal	1	0,75	0,05
Drive C16	2	0,20	0
Grau 65% F15	2	0,31	0,002
Green 85%	3	0,06	0,001
Green 85% A75	3	0,06	0,001
Rogal	1	0,75	0,05

При сравнении спектральных характеристик солнцезащитных очковых линз разных фирм было выявлено, что линзы Rodenstock максимально отвечают требованиям [6, 7], поэтому они были выбраны для исследования остроты зрения.

На рис. 2 представлены диаграммы изменения остроты зрения (внешний круг) и субъективного ощущения контрастности изображения (внутренний круг) для линз розового (Rogal),

коричневого (Braun), серого (Black) и оранжевого (Sun Contrast Bernstein) цвета с разным процентом затемнения.

Белый цвет внешнего круга означает, что острота зрения с линзой и без нее остается неизменной (рис. 2, а), серый цвет соответствует повышению остроты на 0,2 в 10 % (б) и 15 % (г) случаев, штриховка соответствует снижению остроты зрения на 0,1 в 45 % случаев (в). Во внутреннем круге указано процентное соотношение изменения контрастности изображения (1 — повышение контрастности, 2 — без изменений, 3 — снижение).

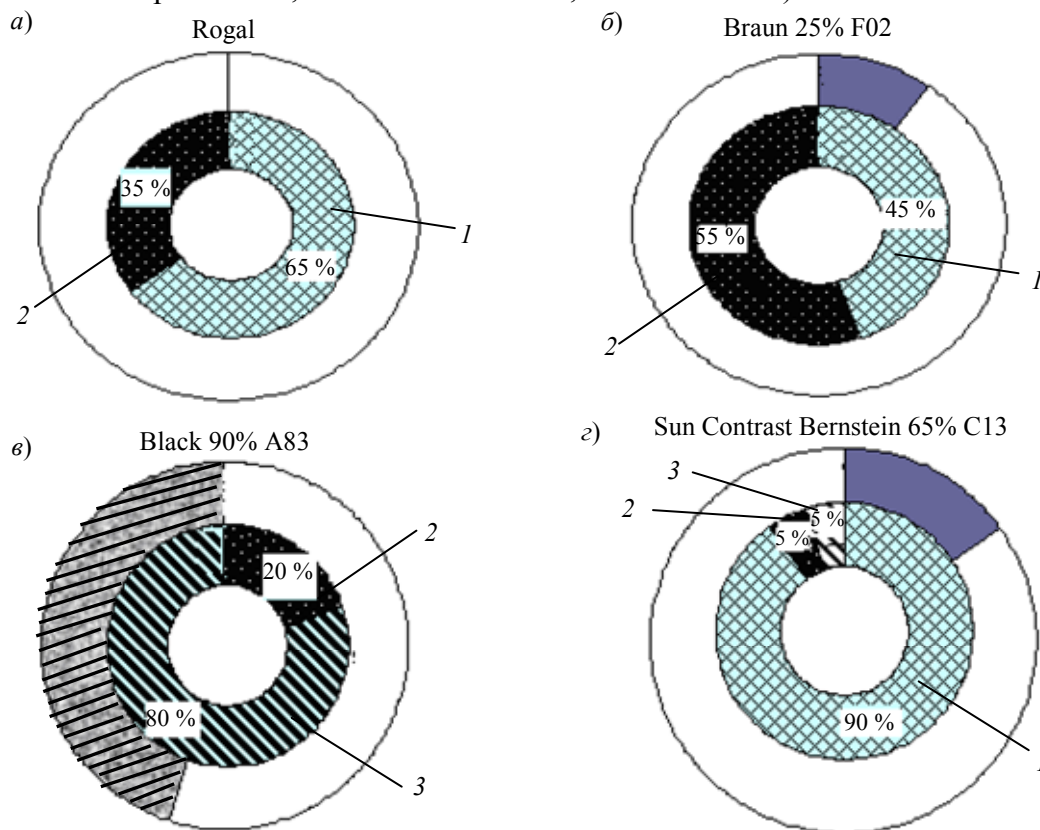


Рис. 2

Исследование других линз фирмы Rodenstock показало схожие результаты.

По результатам исследования можно утверждать, что солнцезащитные очковые линзы различных производителей разного цвета и степени затемнения по-разному влияют на остроту зрения и субъективное восприятие контрастности изображения. Поэтому при выборе очковых линз следует учитывать индивидуальные потребности и особенности каждого человека, влияние цветовой гаммы линз на изменение остроты зрения и субъективное восприятие контрастности изображения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенблюм Ю. З., Зак П. П., Островский М. А., Алиев А.-Г. Д., Смольянинова И.Л., Бора Е. В., Мамчиц И. И. Спектральные фильтры как вид лечебной коррекции // Вестник офтальмологии. 1995. Т. 3, № 3. С. 5—8.
2. Кушель Т., Сенокосов А., Бутикова Г., Васильцова Е. // Веко. 2004. № 81.
3. Бударгина М. И., Пруненко Е. К. Исследование влияния поверхностно окрашенных очковых линз на остроту зрения // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 7. С. 82—85.
4. Калининская Т. В., Доброневская С. Г., Аврутина Э. А. Окрашивание полимерных материалов. Л.: Химия, 1985. 184 с.
5. Козлов М. Г., Томский К. А. Светотехнические измерения. СПб: Изд-во „Петербургский институт печати“, 2004. 320 с.

6. ГОСТ Р 51854-2001. Линзы очковые солнцезащитные. Технические требования. Методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 2003. 7 с.
7. ГОСТ Р 12.4.230.1-2007. Средства индивидуальной защиты глаз. Общие технические требования EN 166-2001. Индивидуальная защита глаз. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2007. 35 с.

Сведения об авторе

Мария Ивановна Бударгина

— соискатель; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптических технологий; E-mail: budargina@mail.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

УДК 535.41

Г. В. НИКАНДРОВ, Э. С. ПУТИЛИН

ФАЗОКОМПЕНСИРУЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ АСФЕРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Исследован новый класс многослойных диэлектрических систем, обладающих постоянным коэффициентом отражения при изменяющейся в широких пределах оптической толщине слоев. Показано, что, используя подобные системы, можно формировать волновой фронт в оптической системе для одной или нескольких длин волн.

Ключевые слова: интерференционные покрытия, асферическая оптика, лазерный резонатор.

При формировании волнового фронта отраженной или прошедшей волны от оптического элемента с помощью интерференционных многослойных покрытий используются зависимости амплитудных коэффициентов отражения r или пропускания t от оптической толщины и показателей преломления слоев, образующих покрытия. Действительно, если представить эти коэффициенты в виде $r = |r|e^{i\rho}$ и $t = |t|e^{i\tau}$, где ρ — разность фаз между отраженной и падающей, τ — разность фаз между прошедшей и падающей волнами, то, изменив оптическую толщину одного или нескольких слоев по поверхности оптического элемента, можно увидеть, что величины ρ , τ , а также $|r|$ и $|t|$ будут изменяться. Это свойство интерференционных покрытий используется при формировании волнового фронта отраженного или прошедшего излучения [1].

При решении различных задач оптики требования к характеру изменения величин $|r|$, $|t|$, ρ и τ , следовательно, и к изменению оптической толщины слоев могут быть различными. При создании асферических поверхностей, компенсации осесимметричных дефектов поверхности подложек или формировании фронта лазерного излучения с использованием многослойных покрытий значения $|r|$ и $|t|$ должны быть постоянными для излучения с одной длиной волны (например — элементы лазерной оптики) или некоторого спектрального интервала, в то время как величины ρ и τ должны изменяться по заданному закону. При формировании волнового фронта лазерного излучения используются системы, у которых все значения $|r|$, ρ , $|t|$, τ различаются для разных точек поверхности оптического элемента — выходного зеркала лазерного резонатора [2, 3].

Фазокомпенсирующие покрытия — это диэлектрические системы слоев, у которых при изменении оптической толщины одного или нескольких слоев коэффициент отражения или пропускания (амплитудный или энергетический) остается постоянным. Нами были рассмот-

рены двух-, трех- и многослойные системы с одним градиентным слоем, а также системы с чередующимися градиентными слоями.

Пусть двуслойная система образована слоями с показателями преломления n_1 и n_2 . Оптическая толщина слоя, лежащего на подложке, — $0,25\lambda_0$, а толщина слоя, граничащего со средой, из которой поступает свет, изменяется по произвольному закону. Показатели преломления внешних (обрамляющих) сред n_0, n_m . Свет поступает из среды с показателем преломления n_0 по нормали к поверхности. Поскольку $r = \text{const}$, энергетический коэффициент отражения системы $R = |r|^2$ не зависит от толщины первого слоя для излучения с длиной волны $\lambda = \lambda_0$.

Определим значение амплитудного коэффициента отражения такой двуслойной диэлектрической системы, у которой оптическая толщина первого слоя изменяется в широких пределах, а оптическая толщина второго слоя равна $0,25\lambda_0$. Для этого воспользуемся матричным аппаратом, приведенным в работах [4, 5]:

$$r = \left[(n_0 M_{11} - n_m M_{22}) + (n_0 n_m M_{12} - M_{21}) \right] \times \\ \times \left[(n_0 M_{11} + n_m M_{22}) + (n_0 n_m M_{12} + M_{21}) \right]^{-1} = |r| e^{i\rho}, \quad (1)$$

где φ_1 — фазовая толщина 1-го слоя $M_{11} = (n_2/n_1) \sin \varphi_1$, $M_{12} = (i/n_2) \cos \varphi_1$, $M_{21} = (in_2) \cos \varphi_1$, $M_{22} = (n_1/n_2) \sin \varphi_1$, $\varphi_1 = 2\pi k (\lambda_0/\lambda)$, k — безразмерный коэффициент, определяющий оптическую толщину градиентного слоя. С учетом этого

$$R = |r|^2 = \left[(n_0 n_2 / n_1 - n_m n_1 / n_2)^2 \sin^2 \varphi_1 + (n_0 n_m / n_2 - n_2)^2 \cos^2 \varphi_1 \right] \times \\ \times \left[(n_0 n_2 / n_1 + n_m n_1 / n_2)^2 \sin^2 \varphi_1 + (n_0 n_m / n_2 + n_2)^2 \cos^2 \varphi_1 \right]^{-1}.$$

Условие отсутствия зависимости энергетического коэффициента отражения от фазовой толщины первого слоя будет выполняться при

$$\begin{cases} n_0 n_2 / n_1 - n_m n_1 / n_2 = n_0 n_m / n_2 - n_2, \\ n_0 n_2 / n_1 + n_m n_1 / n_2 = n_0 n_m / n_2 + n_2. \end{cases} \quad (2)$$

Из системы уравнений (2) получаем:

$$n_1 = n_2^2 / n_m, \quad (3)$$

с учетом (3) амплитудный коэффициент отражения

$$r = (n_0 n_m - n_2^2) / (n_0 n_m + n_2^2) = \left| (n_0 n_m - n_2^2) / (n_0 n_m + n_2^2) \right| e^{i\rho}, \\ \rho = \begin{cases} 0 & \text{при } n_0 n_m < n_2^2, \\ \pi & \text{при } n_0 n_m > n_2^2. \end{cases} \quad (4)$$

Из выражения (3) видно, что $\rho = 0$ при $n_2^2 = n_0 n_m$. Как видно из соотношения (4), разность фаз между падающим и отраженным излучением не зависит от толщины градиентного слоя и определяется показателем преломления слоя, лежащего на подложке, и показателями преломления обрамляющих сред.

Показатель преломления двуслойной диэлектрической системы может изменяться в достаточно широких пределах. Так, при $n_2 = 1,70$, $n_0 = 1$ и $n_m = 1,52$ показатель преломления первого слоя $n_1 = 1,90$, а энергетический показатель отражения $R = 9,6\%$.

На рис. 1 представлена зависимость энергетического коэффициента отражения R (цифры на рисунке) от длины волны и $n_1 d_1$ для двуслойной системы с параметрами $n_0 = 1$,

$n_1 = 1,90$, $n_2 = 1,70$, $n_m = 1,52$, $\lambda_0 = 550$ нм. Как видно из этого рисунка, коэффициент отражения системы не меняется при изменении оптической толщины первого слоя в интервале длин волн порядка 5 нм.

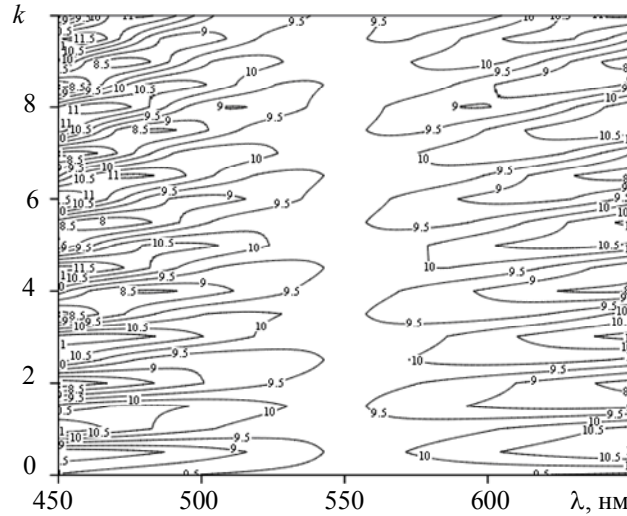


Рис. 1

На рабочей длине волны 550 нм энергетический коэффициент отражения $R = 9\%$, а например, для подложки с показателем преломления $n_m = 2$ — $R = 3\%$.

При возрастании показателя преломления подложки значение энергетического коэффициента отражения системы, содержащей слой с выбранными параметрами, уменьшается. Следовательно, указанные системы могут быть использованы для решения задач асферизации оптических элементов, работающих как в пропускании, так и в отражении.

Дальнейший интерес представляет рассмотрение трехслойных и многослойных систем с одним градиентным слоем, а также систем с чередующимися градиентными слоями, которые могут обладать подобными свойствами. Следует определить, могут ли такие системы содержать несколько слоев, параметры которых (оптическая толщина слоев) не влияют на коэффициент отражения системы.

Рассмотрим трехслойные четвертьволновые системы, у которых показатели преломления слоев равны n_1 , n_2 и n_3 . Оптическая толщина второго и третьего слоев по ходу луча равна 0,25, а оптическая толщина первого слоя может изменяться. С учетом этого для трехслойной системы $M_{11} = (n_3/n_2)\cos\varphi_1$, $M_{12} = (n_2/n_1n_3)\sin\varphi_1$, $M_{21} = (n_1n_3/n_2)\sin\varphi_1$, $M_{22} = (n_2/n_3)\cos\varphi_1$.

Энергетический коэффициент отражения системы $R = |r|^2$ равен:

$$R = \left[(n_0n_3/n_2 - n_2/n_3)^2 \cos^2 \varphi_1 + \left((n_0n_m n_2)/(n_1n_3) - n_1n_3/n_2 \right)^2 \sin^2 \varphi_1 \right] \times \\ \times \left[(n_0n_3/n_2 + n_2/n_3)^2 \cos^2 \varphi_1 + \left((n_0n_m n_2)/(n_1n_3) + n_1n_3/n_2 \right)^2 \sin^2 \varphi_1 \right]^{-1}. \quad (5)$$

Здесь так же, как и для двуслойной системы, отсутствие зависимости энергетического коэффициента отражения будет выполняться при условии

$$\begin{cases} n_0n_3/n_2 - n_2/n_3 = (n_0n_m n_2)/(n_1n_3) - n_1n_3/n_2, \\ n_0n_3/n_2 + n_2/n_3 = (n_0n_m n_2)/(n_1n_3) + n_1n_3/n_2. \end{cases} \quad (6)$$

Из соотношения (6) получаем значение показателя преломления градиентного слоя

$$n_1 = (n_2^2 n_m) / n_3^2. \quad (7)$$

С учетом (7) амплитудный коэффициент отражения

$$r = (n_0 n_3^2 - n_2^2) / (n_0 n_3^2 + n_2^2) = \left| (n_0 n_3^2 - n_2^2) / (n_0 n_3^2 + n_2^2) \right| e^{i\rho},$$

$$\rho = \begin{cases} 0 & \text{при } n_0 n_3^2 > n_2^2, \\ \pi & \text{при } n_0 n_3^2 < n_2^2. \end{cases}$$

Для подложки с показателем преломления $n_m = 1,52$ были исследованы трехслойные системы (см. таблицу).

Система	n_1	n_2	n_3	$R, \%$ (рабочая длина волны)
1	1,70 (MgO)	2 (SiO)	1,89 (Y ₂ O ₃)	7
2	1,89 (Y ₂ O ₃)	1,54 (Al ₂ O ₃)	1,38 (MgF ₂)	9,5
3	2,10 (Ta ₂ O ₅)	2 (SiO)	1,7 (MgO)	12,2

Как видно из таблицы, для трехслойной системы, как и для двуслойной, можно получить различные значения энергетического коэффициента отражения.

На рис. 2 приведена зависимость коэффициента отражения R от длины волны и оптической толщины градиентного слоя $n_1 d_1$ для трехслойной системы с параметрами $n_0 = 1, n_1 = 1,89, n_2 = 1,54, n_3 = 1,38, n_m = 1,52, \lambda_0 = 550 \text{ нм}$.

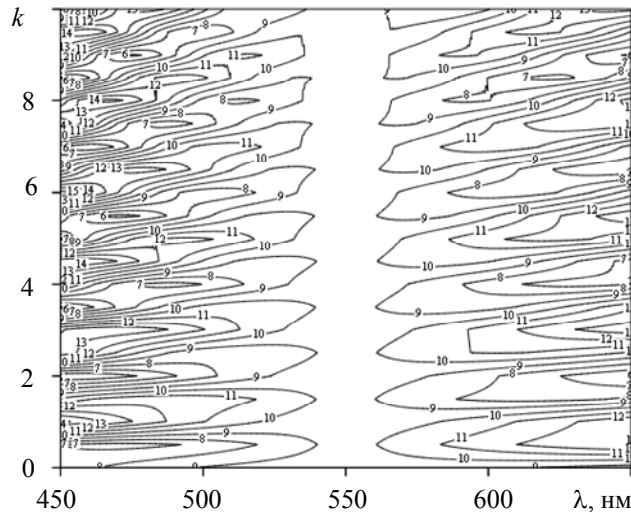


Рис. 2

Было исследовано зеркальное покрытие, состоящее из девятнадцати чередующихся слоев $0,25\lambda_0$. В этом случае для фазокомпенсирующей системы, содержащей один градиентный слой, величина показателя преломления n_1 определяется следующим выражением: $n_1 = n_{2i}^{18} / n_{2i+1}^{18}$, где i — число пар чередующихся слоев.

Далее были рассмотрены системы с чередующимися градиентными слоями. Примером такой системы, содержащей четное количество слоев, является четырехслойное покрытие, у которого 2-й и 4-й слои — четвертьволновые, а 1-й и 3-й — переменной толщины. Показатель преломления 3-го слоя находится согласно выражению (3): $n_3 = n_4^2 / n_m$, а первого слоя — $n_1 = n_2^2 n_m / n_4^2$. Коэффициент отражения такой системы равен нулю при $n_0 n_2^2 = n_m n_4^2$.

Для диэлектрических систем, содержащих пять слоев, 2-й, 4-й и 5-й слои — четвертьволновые, а 1-й и 3-й — переменной толщины. Показатель преломления 3-го слоя находится согласно выражению (7) для трехслойной системы $n_3 = n_4^2 n_m / n_5^2$, а показатель преломления 1-го слоя — $n_1 = n_2^2 n_5^2 / n_4^2 n_m$.

Исследован новый класс многослойных диэлектрических систем, обладающих постоянным коэффициентом отражения при изменении в широких пределах значений оптической толщины одного или нескольких слоев. Показано, что, используя подобные системы, можно формировать волновой фронт в оптической системе для одной длины волны или интервала длин волн. С использованием систем, содержащих слои, толщина которых не влияет на величину коэффициента отражения, можно создавать асферические поверхности, управляя распределением толщины по поверхности оптического элемента, компенсировать осесимметричные дефекты по поверхности подложек и уменьшать расходимость пучков в лазерных резонаторах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губанова Л. А., Путилин Э. С. Интерференционные покрытия, формирующие энергетические и волновые параметры излучения. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006.
2. Губанова Л. А. Градиентные интерференционные системы. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008.
3. Фимин П. Н. Разработка и исследование градиентных лазерных зеркал. СПб: СПбГУ ИТМО, 2001.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
5. Хасс Г., Тун Р. Физика тонких пленок. М.: Мир, 1967. Т. 2.

Сведения об авторах

- Георгий Васильевич Никандров** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптических технологий; E-mail: nikandrov.spb@mail.ru
- Эдуард Степанович Путилин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптических технологий; E-mail: putilin@otd.ifmo.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

УДК 535.4, 535.8

Л. А. ГУБАНОВА, В. А. ЗВЕРЕВ

СОЗДАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ С УЛУЧШЕННЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ НА ОСНОВЕ СМЕСОВЫХ ПЛЕНОК

Рассмотрены возможности создания новых пленкообразующих материалов с улучшенными, по сравнению с традиционными материалами, механическими свойствами (адгезия к подложке, механические напряжения, твердость и т.д.) на основе смесовых пленок.

Ключевые слова: смесовые пленки, вакуумное напыление, механические напряжения, адгезия, микротвердость.

Основным для получения заданной спектральной характеристики осаждаемого покрытия параметром пленкообразующего материала (ПОМ) является показатель преломления. Однако при практическом применении покрытий не менее важную роль играет адгезия к подложке, стойкость к воздействию окружающей среды, механическая прочность. Лишь немногие материалы в достаточной степени удовлетворяют всем предъявляемым требованиям. При

создании систем слоев, формирующих интерференционное покрытие, требуется большая разница между показателями преломления ПОМ, формирующих данное покрытие. Для создания различных типов интерференционных покрытий с требуемыми оптическими характеристиками используются материалы с предельным значением показателя преломления: высоким показателем преломления обладает диоксид титана (TiO_2), низким — фторид кальция (CaF_2), пленки, образованные из диоксида кремния (SiO_2), отличаются стабильностью показателя преломления при формировании их любым методом. Перечисленные ПОМ характеризуются отсутствием поглощения в видимой области спектра. Ряд других ПОМ характеризуется сильно выраженными механическими свойствами: хорошей адгезией к подложке — диоксид кремния (SiO_2), высокой твердостью — диоксид гафния (HfO_2) и т.д.

Для создания покрытий с нужным сочетанием оптических и механических свойств используются смесовые пленки, т.е. оптически однородные материалы, образованные двумя или более ПОМ. Смесью материалов можно считать оптически однородной, если размер неоднородностей в ней не превышает $1/10$ длины волны.

В общем случае зависимость механических свойств от состава смесовой пленки меняется нелинейным и довольно сложным образом. Особого внимания заслуживает тот факт, что небольшие изменения состава могут приводить к значительным изменениям механических свойств.

Снижение механических напряжений осаждаемых пленок. Механические напряжения, возникающие в осаждаемых пленках, могут приводить к негативным последствиям, таким как отслаивание осажденных покрытий, деформация или даже разрушение подложки. При синтезе многослойных систем это требует ограничения геометрической толщины слоев, формирующих интерференционное покрытие, и ограничения их числа.

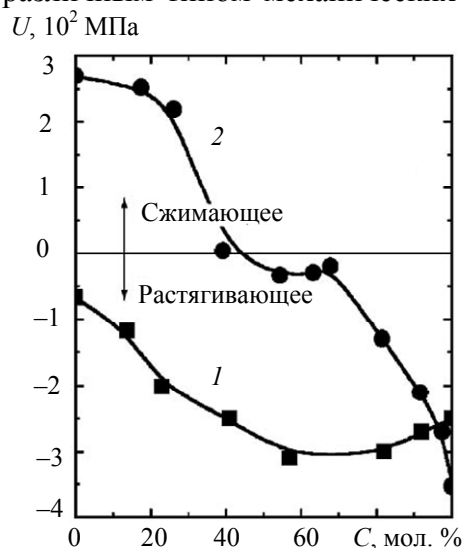
Различают два типа механических напряжений: сжимающие и растягивающие. Наличие напряжений в пленке может привести к искажению поверхности оптического элемента и разрушению покрытия. Для устранения этого дефекта целесообразно использовать слои, у которых напряжения имеют противоположные знаки, и подбирать конструкцию покрытия такую, чтобы в нем происходила взаимная компенсация напряжений.

Можно выделить два подхода к снижению остаточных напряжений при осаждении смесовых пленок: смешивание материалов с одинаковым или различным типом механических напряжений. В обоих случаях чаще всего возникает сильно нелинейная зависимость напряжений смесовых пленок от их состава.

При смешивании материалов с одинаковым типом механических напряжений остаточное напряжение U смесовой пленки может и уменьшаться ($\text{SiO}_2\text{—ZrO}_2$ [1], $\text{MgF}_2\text{—Ta}_2\text{O}_5$ см. рисунок, кривая 1 [2]), и увеличиваться ($\text{SiO}_2\text{—Ta}_2\text{O}_5$ [3]) по сравнению с чистыми компонентами (C — концентрация MgF_2).

При смешивании материалов с различным типом механических напряжений всегда возможно получить состав, при котором происходит полная взаимная компенсация напряжений и остаточное напряжение смесовой пленки равно нулю ($\text{MgF}_2\text{—ZnS}$, кривая 2 [2], Si—ZnSe [4]).

Возникающие в многослойных системах механические напряжения пропорциональны разнице в значениях напряжения образующих их пленок. В ряде работ [4, 5] сравнивались остаточные напряжения в двуслойных системах с различными значениями показателя преломления. Было установлено, что чем больше разница показателей преломления образующих эти системы пленок, тем выше возникающие механические напряжения.



Повышение твердости материалов. Фториды магния (MgF_2) и кальция (CaF_2) — материалы с низким показателем преломления. Однако их низкая твердость снижает механические свойства получаемых покрытий. Для повышения твердости было предложено [7, 8] смешивать их с материалами с высокой твердостью. Однако стоит учитывать, что добавление других материалов не должно приводить к значительному увеличению показателя преломления, так как в этом случае теряется основное преимущество этих материалов. Для повышения твердости данной смеси были предприняты попытки добавления HfO_2 [7] и TiO_2 [8] к MgF_2 .

Добавление 16 % по массе диоксида гафния (HfO_2) к фториду магния (MgF_2) приводит к увеличению показателя преломления на 5 % по сравнению с чистым MgF_2 (с 1,380 до 1,447). Твердость таких пленок возрастает на 75 % (с 1920 до 3407 МПа). Однако дальнейшее увеличение содержания HfO_2 нецелесообразно, так как в этом случае образуется материал, показатель преломления которого больше, чем у SiO_2 (1,45), который обладает отличными механическими свойствами.

Твердость смесовых пленок MgF_2 — TiO_2 [8] может быть даже больше, чем у исходных материалов. Аналогичная зависимость наблюдается для смесовой пленки из диоксида титана и фторида кальция [9]. Однако и в этих случаях возможности применения ПОМ с высоким значением показателя преломления ограничены показателем преломления SiO_2 .

Получение аморфной структуры. Для практического использования тонкопленочных структур предпочтительно аморфное состояние пленок. По сравнению с аморфными микрокристаллические пленки обладают большей площадью свободной поверхности, на которой происходит адсорбция воды, при этом возможно достаточно существенное изменение оптических свойств пленок. Кроме того, шероховатость аморфных пленок ниже, чем микрокристаллических, что приводит к уменьшению рассеяния света. Зачастую поглощение в пленках с аморфной структурой также меньше, в основном за счет меньшего количества ненасыщенных связей.

Особый интерес представляет тот факт, что при совместном осаждении двух материалов, один из которых образует аморфную фазу, а второй — микрокристаллическую, возможно формирование полностью аморфной смесовой пленки. Для этого доля компонента, образующего микрокристаллическую пленку, должна быть достаточно малой. При дальнейшем увеличении содержания компонента, осаждающегося в микрокристаллической фазе, происходит образование структуры, в которой микрокристаллы расположены в аморфной матрице [8].

Стабилизация в определенной кристаллохимической фазе. Кристаллохимическое состояние материалов в смесовой пленке может отличаться от состояния, характерного для чистых веществ.

Например, при добавлении TiO_2 к CaF_2 происходит смена преимущественного направления роста с (311) на (220) [9].

Некоторые ПОМ могут иметь несколько стабильных кристаллохимических модификаций и/или стехиометрических составов с различным значением показателя преломления. Это приводит к непредсказуемой погрешности показателя преломления осаждаемых пленок. Известно [10], что добавка различных компонентов может приводить к стабилизации таких материалов в определенной кристаллохимической фазе.

Оксид магния стабилизирует диоксид циркония в кубической фазе, а оксид алюминия — в тетрагональной. Одновременное добавление обоих оксидов в определенном соотношении приводит к формированию аморфной структуры на основе диоксида циркония [11].

Улучшение адгезии пленок и подложки. Одной из эксплуатационных характеристик интерференционных покрытий является адгезия, на нее оказывают влияние не только качество поверхности оптического элемента и его чистота, но и совместимость ПОМ с материалом подложки. Поскольку оптические стекла являются многокомпонентными материалами, то для увеличения адгезии необходимо вводить в состав ПОМ химические соединения, присутствующие в материале, из которого изготовлен оптический элемент.

Фторид кальция обладает очень плохой адгезией с большинством оптических материалов, что является причиной малого использования при конструировании интерференционных покрытий, несмотря на его уникальные оптические свойства: прозрачность в ультрафиолетовой области спектра и низкий показатель преломления.

Для улучшения адгезии применяется диоксид титана: например, добавка 6 % диоксида титана к фториду кальция по массе приводит к увеличению показателя преломления смешанной пленки с 1,198 до 1,297, при этом адгезия к подложке возрастает с 19,1 до 64,1 Н/мм² [9].

Таким образом, смешанные пленки являются перспективным материалом для создания всех видов интерференционных покрытий, а также для получения покрытий, обладающих выдающимися сочетаниями оптических и механических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pond B. J., DeBar J. I., Carniglia C. K., Raj T. Stress reduction in ion beam sputtered mixed oxide films // *Applied Optics*. 1989. Vol. 28, N 14/15. P. 2800—2805.
2. Tae Uk Ryu, Sung Hong Hahn, Sok Won Kim, Eui Jung Kim. Optical, mechanical and thermal properties of MgF₂-ZnS and MgF₂-Ta₂O₅ composite thin films deposited by coevaporation // *Opt. Eng.* 2000. Vol. 39, N 12. P. 3207—3213.
3. Chien-Jen Tang, Cheng-Chung Jaing, Kai Wu, Cheng-Chung Lee. Residual stress of graded-index-like films deposited by radio frequency ion-beam sputtering // *Thin Solid Films* 517 (2009) 1746—1749.
4. Gluck N. S., Taber D. B., Heuer J. P., Hall R. L., Gunning W. J. Properties of mixed composition Si/ZnSe and ZnSe/LaF₃ infrared optical thin films // *Applied Optics*. 1992. Vol. 31, N 28. P. 6127—6132.
5. Chien-Jen Tang, Cheng-Chung Jaing, Kun-Hsien Lee, Cheng-Chung Lee. Effect of thermal annealing on the optical properties and residual stress of graded-index-like films deposited by radio-frequency ion-beam sputtering // *Applied Optics*. 2011. Vol. 50, N 9. P. C62—C68.
6. Chien-Jen Tang, Cheng-Chung Jaing, Kuan-Shiang Lee, Cheng-Chung Lee. Residual stress in Ta₂O₅-SiO₂ composite thin-film rugate filters prepared by radio frequency ion-beam sputtering // *Applied Optics*. 2008. Vol. 47, N 13. P. C167—C171.
7. Tsou Y., Ho F. C. Optical properties of hafnia and coevaporated hafnia:magnesium fluoride thin films // *Applied Optics*. 1996. Vol. 35, N 25. P. 5091—5094.
8. Rung-Ywan Tsai, Mu-Yi Hua. Microstructural, optical, and mechanical properties of reactive electron-beam-coevaporated TiO₂-MgF₂ composite films // *Applied Optics*. 1996. Vol. 35, N 25. P. 5073—5079.
9. Rung-Ywan Tsai, Sen-Chrong Shiau, Doris Lin, Fang Chuan Ho, and Mu-Yi Hua. Ion-assisted codeposition of CaF₂-rich CaF₂-TiO₂ composites as infrared-transmitting films // *Applied Optics*. 1999. Vol. 38, N 25. P. 5152—5457.
10. Shih Chao, Wen-Hsiang Wang, and Cheng-Chung Lee. Low-loss dielectric mirror with ion-beam-sputtered TiO₂-SiO₂ mixed films // *Applied Optics* 2001. Vol. 40, N 13. P. 2177—2182.
11. Sahoo N. K. and Shapiro A. P. MgO-Al₂O₃-ZrO₂ amorphousternary composite: a dense and stable optical coating // *Applied Optics*. 1998. Vol. 37, N 34. P. 8043—8056.

Сведения об авторах

- Людмила Александровна Губанова** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптических технологий;
E-mail: LA7777@mail.ru
- Василий Александрович Зверев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптических технологий; E-mail: zverev.vasily35530@gmail.com

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

Г. В. МАКАРИЧЕВ

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЕВ, ФОРМИРУЮЩИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗЕРКАЛО, НА ЕГО ЛУЧЕВУЮ ПРОЧНОСТЬ

Определено влияние отклонения толщины слоев на лучевую прочность зеркала и порог его разрушения. Проанализированы ошибки в определении толщины слоев образцов диэлектрических зеркал и рассмотрено влияние распределения вектора электрической напряженности во внешних слоях этих зеркал на лучевую прочность.

Ключевые слова: резонатор лазера, лучевая прочность, диэлектрическое зеркало.

С начала 1990-х гг. лазеры, работающие в ближнем инфракрасном диапазоне, получили широкое распространение. В медицине лазерные системы с длиной волны 1,56 мкм оказались эффективными для нехирургической коррекции зрения, а также лазерной термопластики хрящей, в дальнометрии и для дистанционного зондирования такие лазеры применяются благодаря окну прозрачности атмосферы в диапазоне $\approx 1,5\text{—}1,75$ мкм.

Одним из ключевых элементов лазера являются многослойные диэлектрические зеркала (лазерные резонаторы). Существенной проблемой, возникающей при изготовлении таких зеркал, является нестабильность их лучевой прочности от партии к партии. По ОСТ-11 070.802-80 [1] лучевая прочность — свойство оптического материала (элемента) выдерживать кратковременное воздействие лазерного излучения и при этом выполнять функции и сохранять свои параметры после воздействия. Лучевая прочность характеризуется порогом лазерного повреждения при однократном или многократном (стойкость) воздействии лазерного излучения на один и тот же участок. Порог лазерного повреждения — статистически подтвержденное значение плотности энергии (мощности) лазерного излучения, при котором повреждение образцов происходит с заданной вероятностью.

В работах [2—4] исследовано влияние на лучевую прочность способов полировки деталей перед нанесением покрытия, способов чистки деталей перед установкой в вакуумную камеру, способов нанесения покрытия, а также технологических факторов, состояния вакуумной камеры, чистоты исходных пленкообразующих веществ и их стехиометрического состава, способов оплавления пленкообразующего материала, обработки деталей после нанесения покрытия. В настоящей работе совокупность перечисленных воздействующих факторов была принята постоянной. Целью работы являлось определение влияния ошибок при контроле толщины осаждаемых слоев, формирующих диэлектрическое зеркало, работающее на длине волны 1540 нм, на его лучевую прочность W . Также оценивалось влияние поглощения в слоях на лучевую прочность исследуемых зеркал. Рассмотренное зеркало состоит из слоев, сформированных диоксидами кремния и гафния на кварцевой подложке, конструкторская толщина слоев кратна $\frac{1}{4}\lambda_0$, толщина крайнего слоя кварца на границе воздух—система $\frac{1}{2}\lambda_0$, общее число слоев — 28. Двенадцать партий опытных образцов зеркал были изготовлены на установке Balzers ВАК-760, контроль при формировании слоев осуществлялся методом „кварцевого резонатора“.

Все образцы прошли глубокую шлифовку-полировку для удаления трещиноватого слоя, перед установкой в камеру они были очищены спиртоэфирной смесью. Детали в вакуумной камере подвергались прогреву до 230 °С, перед нанесением покрытия в течение пяти минут производилась обработка тлеющим разрядом. Диоксид гафния осаждался в атмосфере кисло-

рода при давлении в камере $P = 5 \cdot 10^{-5}$ мбар со средней скоростью 0,5 нм/с. Диоксид кремния (кварц) осаждался при давлении $P = 2 \cdot 10^{-5}$ мбар со средней скоростью 0,7 нм/с.

Измерения лучевой прочности проводились на испытательном стенде ИСПП-1-01-800 ЛЗ с использованием лазера ЛТС-154 (рабочая длина волны 1,54 мкм). Диаметр пятна воздействия $d = 0,28$ мм, площадь воздействия $S = 6,16 \cdot 10^{-4}$ см².

Измерения спектральных характеристик проводились на спектрофотометрах СФ-256-УВИ и СФ-256-БИК, для измерения отражения использовалась приставка зеркального отражения (ПЗО-10).

Поскольку показатель преломления кварца практически не зависит от условий осаждения ($n_{\text{SiO}_2} = 1,43 - 1,46$), по имеющимся спектральным кривым можно оценить дисперсию показателя преломления диоксида гафния. На рис. 1 приведены спектральные характеристики отражения R (кривая 2) и пропускания T (кривая 1). При изготовлении образцов измерялась масса осажденного вещества (метод „кварцевого резонатора“), поэтому значение расчетной длины волны (λ_{0p}) не совпадает с фактическим ($\lambda_{0ИК}$).

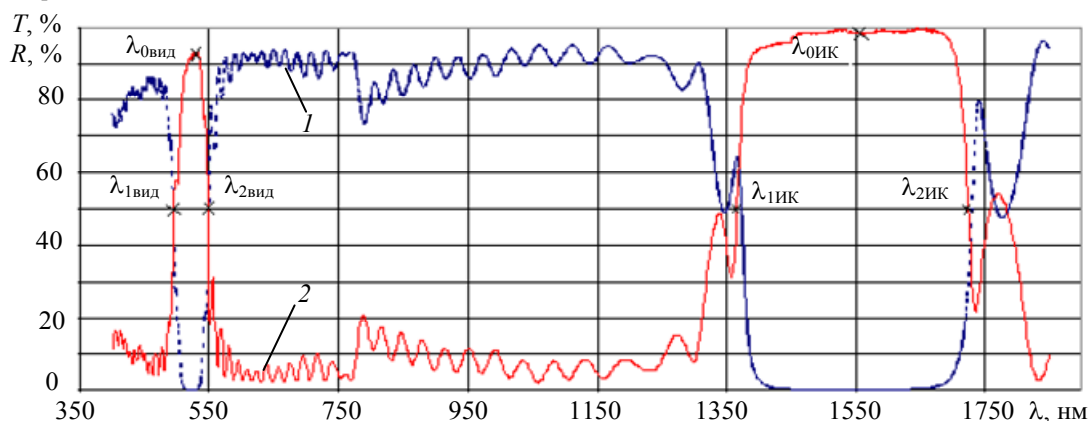


Рис. 1

Значение λ_0 определяется из соотношения $\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} = \frac{2}{\lambda_0}$, где λ_1 и λ_2 — длина волны, соответствующая 50 % значению коэффициента отражения вблизи зоны максимального отражения в инфракрасной и видимой области соответственно. Длина волны, соответствующая $\lambda_{0ИК}$, определяется из того же соотношения. Полученные значения $\lambda_{0ИК}$ и отклонения от ее расчетного значения $\lambda_{0p} = 1540$ нм приведены в табл. 1.

Таблица 1

Длина волны, нм	$W, \text{ ГВт/см}^2$					
	2,5	2,0	2,1	2,4	1,85	1,80
$\lambda_{0ИК}$	1528,8	1546,7	1555,9	1546,0	1589,6	1555,6
$\lambda_{0p} - \lambda_{0ИК}$	11,2	-6,7	-15,9	-6,0	-49,6	-15,6
$\lambda_{0вид}$	515,1	523,3	523,1	521	535	520,9
$\frac{1}{3} \lambda_{0вид} - \lambda_{0вид}$	-1,8	-10	-9,8	-7,7	-21,7	-7,6
Длина волны, нм	$W, \text{ ГВт/см}^2$					
	1,40	1,20	1,1	1,0	0,65	0,65
$\lambda_{0ИК}$	1548	1577	1609,1	1592,5	1637,4	1583
$\lambda_{0p} - \lambda_{0ИК}$	-8	-37	-69,1	-52,5	-97,4	-40,3
$\lambda_{0вид}$	527,1	538,3	540,6	534,5	548,9	550,8
$\frac{1}{3} \lambda_{0вид} - \lambda_{0вид}$	-13,8	-25	-27,3	-21,2	-35,6	-37,5

Видно, что разница в величине λ_0 не превышает 7 %, однако лучевая прочность различается более чем в четыре раза.

На рис. 2 приведена зависимость лучевой прочности от смещения центра зоны максимального отражения от расчетной длины волны $\Delta\lambda_0$ (точки — $\Delta\lambda_{0\text{ИК}}$, крестики — $\Delta\lambda_{0\text{вид}}$).

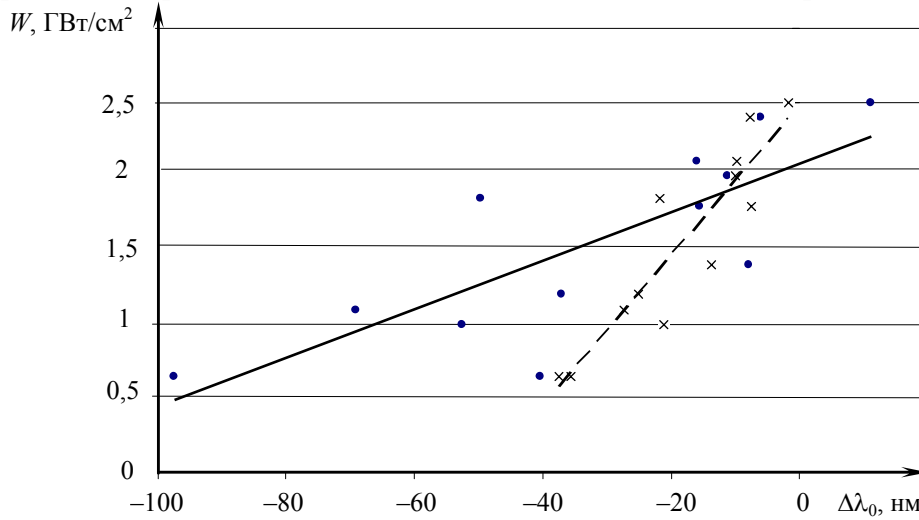


Рис. 2

Из табл. 1 и рис. 2 видно, что при больших смещениях максимумов отражения Δ от $\lambda_0=1540$ нм наблюдается корреляция между лучевой прочностью и смещением, а при малых смещениях необходимо искать параметр, который позволил бы установить его связь с лучевой прочностью.

Образцы были изготовлены с использованием диоксида гафния из разных партий. Оценка изменения показателя преломления в зависимости от конкретной партии диоксида гафния была проведена следующим образом. Для зоны высокого отражения в видимой области было рассчитано значение $\lambda_{0\text{вид}}$ аналогично тому, как это было сделано ранее для $\lambda_{0\text{ИК}}$. Так как известно, что центр следующей зоны высокого отражения находится на длине волны, равной $\frac{1}{3}\lambda_0$, сравнив отношение $\lambda_{0\text{ИК}}/\lambda_{0\text{вид}}$ с числом 3, можно оценить разницу в показателях преломления (1,88—2,0) диоксида гафния из различных партий.

Поглощение можно оценить, сравнив смещение экстремумов отражения и пропускания в зеркалах, поскольку наличие поглощения в слоях приводит к смещению Δ по шкале длин волн экстремумов отражения R и пропускания T . Для непоглощающих материалов $T + R = 1$, положения экстремумов совпадают $\frac{dT}{d\lambda} + \frac{dR}{d\lambda} = 0$ и, следовательно, если $\frac{dT}{d\lambda} = 0$, то и $\frac{dR}{d\lambda} = 0$.

Для поглощающих материалов

$$T + R + A = 1, \quad \frac{dT}{d\lambda} + \frac{dR}{d\lambda} + \frac{dA}{d\lambda} = 0,$$

где A — коэффициент поглощения, если $\frac{dT}{d\lambda} = 0$, то $\frac{dR}{d\lambda} + \frac{dA}{d\lambda} = 0$, следовательно

$\frac{dT}{d\lambda} = -\frac{dA}{d\lambda} \neq 0$. Оценка поглощения проводилась путем измерения смещения ярко выраженных экстремумов отражения и пропускания в диапазонах 700—800 нм и 1300—1400 нм,

которое составляет для различных образцов 0,1—1,0 % при допустимой абсолютной погрешности установки длин волн на спектрофотометре ± 1 нм. На основе полученной оценки можно сделать вывод, что поглощение в образцах примерно одинаково и не объясняет разброса в значениях лучевой прочности.

Контроль толщины слоев по массе осаждаемого вещества является косвенным методом, поэтому его использование приводит к отклонению полученных значений оптической толщины слоев от заданных значений (в свою очередь, спектральные кривые отражения и пропускания искажаются). Эти искажения не влияют на значение коэффициента отражения на длине волны 1540 нм (λ_0), поэтому они не учитываются. Разброс значений порога разрушения при примерно постоянных технологических факторах не может быть объяснен. В настоящей работе была предпринята попытка связать нарушения в конструкции и лучевую прочность зеркал. Нарушения конструкции зеркал характеризуют отклонения в положении коротковолновых ($\lambda_{0\text{вид}}$) и длинноволновых ($\lambda_{0\text{ИК}}$) экстремумов отражения (см. рис. 2). Как видно из этого рисунка, существует корреляция между лучевой прочностью и величинами $\lambda_{0\text{вид}}$, $\lambda_{0\text{ИК}}$; $\Delta\lambda_{0\text{вид}}$ лучше описывает эту связь: $W_{\text{ИК}} = -0,02\Delta - 128$, $W_{\text{вид}} = -0,05\Delta - 50$. Этот параметр, хотя хорошо описывает процесс разрушения, не позволяет определить, что влияет на него.

Известно, что в зеркалах происходит наложение падающей волны на отраженную, возникает стоячая волна, обладающая характерным расположением чередующихся максимумов (пучностей) и минимумов (узлов) амплитуды [5]. Отклонение оптической толщины слоев от $\frac{1}{4}\lambda_0$ приводит к тому, что значение амплитуды электрической напряженности на границах раздела слоев в поверхностных слоях увеличивается, существенно повышая вероятность пробоя (и, следовательно, уменьшая значение лучевой прочности). Наибольший интерес представляют внешние слои, поскольку с удалением от граничащего с воздухом слоя значение амплитуды электрической напряженности резко падает. Для оценки влияния отклонения оптической толщины слоев от заданных значений на лучевую прочность необходимо, рассмотрев спектральные зависимости отражения и пропускания, для каждого образца внести такие изменения в расчетную толщину слоев, чтобы приблизить теоретическую кривую (рис. 1) к полученным. Для этого был рассмотрен некоторый набор наиболее вероятных предпосылок, позволяющих моделировать возникновение ошибок, и были получены „модифицированные“ конструкции, спектральные кривые которых приближены к полученным экспериментально. Полученные конструкции позволили оценить значение вектора напряженности электрического поля на границах крайних слоев исходя из известных граничных условий (табл. 2).

Таблица 2

Образец	W , ГВт/см ²	E , о.е.			
		воздух—1-й слой	1-й слой—2-й слой	2-й слой—3-й слой	3-й слой—4-й слой
1	2,5	0,09	0,02	0,75	0,03
2	2,4	0,17	0,01	0,73	0,01
3	2,1	0,23	0,02	0,74	0,01
4	2,0	0,41	0,09	0,74	0,06
5	1,85	0,29	0,09	0,73	0,07
6	1,8	0,37	0,03	0,72	0,02
7	1,4	0,60	0,13	0,69	0,09
8	1,2	0,46	0,22	0,73	0,16
9	1,1	0,48	0,23	0,76	0,17
10	1,0	0,47	0,19	0,73	0,18
11	0,65	0,68	0,41	0,72	0,24
12	0,65	0,71	0,07	0,72	0,05

Как видно из табл. 2, наибольшее влияние на лучевую прочность оказывает вектор напряженности электрического поля на границе раздела воздух—первый слой зеркала. На рис. 3 приведена зависимость лучевой прочности W (а) и $\lg(W)$ (б) от относительной напряженности E электрического поля стоячей волны на границе раздела воздух—

диэлектрическая система. Как видно из рис. 3, величина лучевой прочности экспоненциально зависит от амплитуды напряженности электрического поля. Линейная зависимость на рис. 3, б позволяет утверждать, что $\lg(W) = 1,13E + 0,6$.

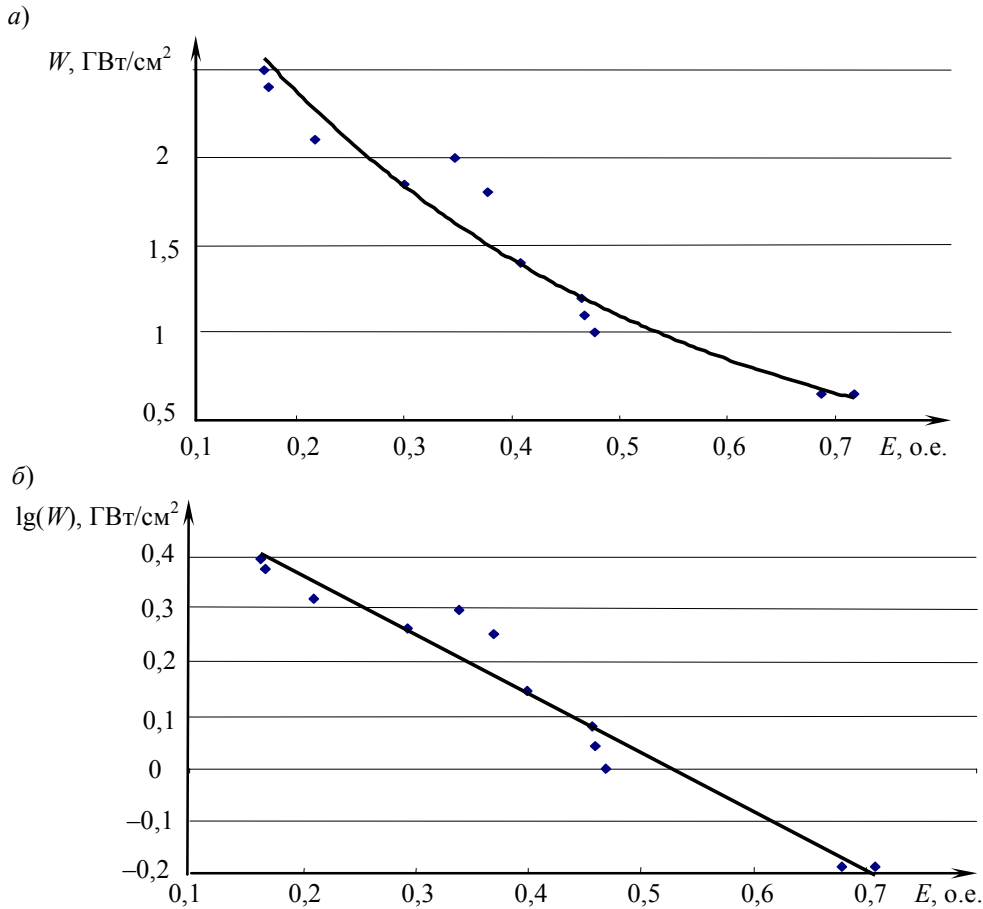


Рис. 3

В работе были исследованы спектральные кривые пропускания и отражения образцов диоксида гафния из 12 партий 28-слойных диэлектрических зеркал. Результаты анализа кривых позволяют сделать выводы о величине и дисперсии показателей преломления пленкообразующих материалов и определить принадлежность диоксида гафния к определенной партии. Расчеты показали, что дисперсия показателя преломления пленкообразующего материала из разных партий не оказывает влияния на пороговое значение лучевой прочности образцов. Проведенная оценка поглощения по смещению экстремумов отражения и пропускания позволяет утверждать, что в рассмотренных образцах оно незначительно и не оказывает существенного влияния на лучевую прочность, поскольку значения поглощения близки для всех образцов.

Наличие характерных искажений спектральных кривых, вызванных особенностями контроля толщины слоев в процессе осаждения, позволило определить экспериментально реализованную конструкцию покрытия. С использованием полученных конструкций и известных граничных условий были рассчитаны значения вектора напряженности на границах первых трех слоев, начиная от среды, из которой падает свет. Полученные значения напряженности электрического поля на первых четырех границах раздела многослойного диэлектрического зеркала позволяют судить о влиянии ошибок в полученной толщине слоев, допущенных в процессе осаждения. Установлена связь между величиной смещения экстремумов $\Delta\lambda_0$ и напряженностью электрического поля на границе воздух—диэлектрическая система.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОСТ11-070.802-80. Материалы оптические и элементы твердосплавных лазеров. Метод определения лазерной прочности.
2. *Milam D., Lowdermilk W. Rainer H., F., Swain J. E., Carniglia C. K., and Hart T. T.* Influence of deposition parameters on laser-damage threshold of silica-tantala AR coatings // *Appl. Opt.* 1982. Vol. 21. P. 3689—3694.
3. *Зверев Г. М., Сидорюк О. Е., Скворцов Л. А.* Влияние процессов адсорбции воды на лазерную прочность покрытий из двуокиси титана // *Квантовая электроника.* 1981. Т. 8, № 10. С. 2274—2276.
4. *Walker T. W., Guenther A. H., Nielsen P. E.* Induced Damage to Thin Film Optical Coatings // *IEEE J. of Quantum Electronics.* 1981. Vol. QE-17, № 10.
5. *Зверев Г. М., Колодный Г. Я., Порядин Ю. Д.* О стойкости интерференционных зеркал к действию лазерного излучения // *Квантовая электроника.* 1978. Т. 5, № 1. С. 44—49.

Сведения об авторе

Глеб Вячеславович Макаричев — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптических технологий; E-mail: g_retired@bk.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

А. Н. Зленко, А. К. Колпаков, Н. Д. Толстоба, М. А. Злобина

ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЦЫ ОПТИМИЗАЦИИ РЕШЕНИЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Предложен метод автоматического подбора способа крепления оптических деталей путем применения матрицы оптимизации решения.

Ключевые слова: матрица оптимизации решений, автоматизация процесса конструирования, способ крепления.

Введение. Активное развитие систем автоматизированного проектирования способствует их внедрению в различные области науки и производства, применительно к оптике основной задачей является автоматизация конструирования отдельных узлов оптического прибора.

К основным способам крепления линз и других осесимметричных оптических деталей относятся: завальцовка, приклеивание, крепление резьбовым кольцом. Когда необходимо учитывать особые условия и требования, связанные с габаритными размерами, назначением, условиями эксплуатации оптических деталей, могут использоваться вспомогательные способы крепления: проволочным или накладным кольцом, прижимными планками, специальными элементами или специальной конструкцией оправы. Одной из первоочередных задач при конструировании узла оптического прибора является выбор способа крепления линз.

Как правило, у конструктора имеется некоторый набор проверенных практикой возможных решений и требуется путем перебора этих решений найти наиболее подходящее по условиям поставленной задачи. Рассмотрим условия, определяющие особенности процесса такого поиска.

В повседневной практике конструирования оптико-механических узлов многие задачи решаются методом аналогии на основе опыта конструктора. Так как задачу выбора типов соединений конструктору необходимо решать регулярно, этот процесс не должен быть длительным, поэтому, если уже имеется набор решений, эмпирический метод аналогии следует считать приемлемым и достаточно эффективным.

В. В. Кулагиным [1] была предложена методика анализа вариантов крепления на основе матрицы оптимизации решения: составляется матрица, по которой можно оптимизировать процесс выбора типа крепления при наличии набора конкурирующих вариантов путем определения интегрального показателя качества. Конструктором определяется совокупность возможных вариантов решений, из которых предстоит выбрать оптимальный.

В настоящей работе для организации автоматического принятия решений за основу взята матрица для четырех наиболее распространенных вариантов крепления [1], в которую были добавлены следующие графы: показатели качества — разъемность и герметичность;

способы крепления — резьбовым и промежуточным кольцами, приклеивание, крепление эластичными материалами.

Матрицу составляют оценочные коэффициенты, выбор осуществляется на основании опыта конструктора и проведенных исследований.

Крепление резьбовым и промежуточным кольцами — надежный способ разъемного крепления, обеспечивающий простоту сборки и демонтажа. Но такая конструкция теряет в технологичности, так как требуется использовать дополнительные детали, крепежную резьбу в оправе, необходимо предохранять резьбовое кольцо от самоотвинчивания. Помимо того, узел имеет увеличенные размеры; затруднена автоматизация сборки соединения; невозможна юстировка линзы в оправе в процесс сборки; при работе соединения в условиях перепада температур из-за жесткости могут возникать либо деформации линзы, либо смещения вследствие уменьшения усилия прижатия или возникающего зазора между линзой и резьбовым кольцом [2, 3].

Крепление приклеиванием характеризуется конструктивной простотой, а также снижением массы и габаритных размеров крепления; отсутствием деформаций и напряжений в оптической детали при внешних воздействиях на узел крепления (например, при изменении температуры) благодаря упругим свойствам клеящих веществ; также обеспечиваются герметизация соединения, относительная простота автоматизации процесса сборки. Однако при таком креплении увеличение объема или усадка клеящего вещества после отвердевания могут вызвать напряжение в линзе.

Поскольку зазор между линзой и оправой заполнен клеящим веществом, то при перепадах температур из-за различной степени расширения этих деталей возможно разрушение или возникновение напряжений и деформаций. Крепление, как правило, неразборное, поэтому не подлежит восстановлению.

Крепление эластичными материалами позволяет не повышать габаритных размеров приборов в целом; при таком креплении отсутствуют напряжения в стекле. Однако для разъема соединения требуются дополнительные материалы и время.

На основании таких данных заполняются пустые графы матрицы (см. таблицу, курсивом выделены добавленные в классическую матрицу сведения).

Показатель качества	Способ крепления						
	завальцовкой	резьбовым кольцом	проволочным кольцом	резьбовым и пружинным кольцами	<i>резьбовым и промежуточными кольцами</i>	<i>приклеиванием</i>	<i>эластичным материалом</i>
Точность положения объектива	8	4	3	6	6	2	3
Надежность крепления	9	10	4	8	10	2	7
Отсутствие натяжений	6	2	5	8	5	5	6
Нечувствительность к колебаниям температуры	8	2	4	8	4	6	8
Конструктивность	10	5	6	3	4	8	8
Технологичность	4	8	8	6	6	4	4
Стоимость	6	5	7	4	5	7	7
<i>Разъемность соединения</i>	0	10	10	10	10	2	2
<i>Герметичность</i>	10	8	2	8	8	8	10

Программная реализация. На основе предложенной матрицы (см. таблицу) был разработан пакет программ в среде САПР (см. рисунок, а). Диалоговый интерфейс программы обеспечивает возможность корректировать значения матрицы: если конструктор не согласен

с предложенным в таблице вариантом, он может изменить их, сохранить и использовать в дальнейшем свои значения.

а)

Матрица оптимизации выбора способа крепления линзы

Проверьте оценочные коэффициенты, при необходимости измените значения (max=10)

Показатели	Завальцовка	Резбовое к.	Проволочное к.	Пружинное к.	Промежут. к.	Приклеивание	Герметик
Точность	8	4	3	6	6	2	3
Надежность	9	10	4	8	10	2	7
Натяжения	6	2	5	8	5	5	6
Температура	8	2	4	8	4	6	8
Конструктивность	10	5	6	3	4	8	8
Технологичность	4	8	8	6	6	4	4
Стоимость	6	5	7	4	5	7	7
Разъемность	0	10	10	10	10	2	2
Герметичность	10	8	2	8	8	8	10

Buttons: >> Далее >>, Сохранить матрицу, Прочитать матрицу, Помощь, Отмена

б)

Весовые коэффициенты

Типичные варианты

Для выбора способа крепления линзы необходимо назначить весовые коэффициенты. Выберите один из следующих вариантов

- Неответственный узел прибора массового производства
- Тяжелые климатические условия, качество изображения высокое
- Линза осветительной системы (н.р. прожектор)
- Сложные динамические и температурные режимы, роль объектива невысока
- Назначить коэффициенты самостоятельно

Buttons: >> Далее >>, Помощь, << Назад <<, Отмена

в)

Назначение весовых коэффициентов

Весовые коэффициенты

Проверьте весовые коэффициенты, при необходимости измените значения (sum=1)!

точность	0.05
надежность	0.1
отсутствие натяжений	0.05
нечувствительность к температуре	0.05
конструктивность	0.2
технологичность	0.3
стоимость	0.2
разъемность	0.05
герметичность	0

Buttons: >> В файл >>, Сохранить, Помощь, Рассчитать, Прочитать, << Назад <<, Записка, Отмена

Представленное на рисунке, б диалоговое окно позволяет выбрать типовые весовые коэффициенты, здесь представлены наиболее часто встречающиеся случаи. На рисунке, в про-

демонстрированы возможности работы с полученными значениями k , которые при решении задачи накладываются на матрицу, отражая относительную важность каждого параметра.

Результатом работы программы является вектор, рассчитанный на основе матрицы и весовых коэффициентов k . Полученное численное значение показывает относительную применимость способов креплений для заданных с помощью k ситуаций. Максимальное значение отражается в сообщении вида: „Наиболее подходящий способ крепления — завальцовка 6,9“.

Конструктор может провести расчеты снова, изменив коэффициенты. По завершении работы в файл записывается протокол, который содержит рабочую матрицу, весовые коэффициенты и наиболее подходящий способ крепления, предложенный программой. Результат всех действий записывается в протокол в формате .txt.

Пример 1. Требуется закрепить объектив диаметром 40 мм, расположенный в ответственном узле прибора для массового производства для широкого круга потребителей.

Назначаем весовые коэффициенты k_1 — k_9 . В данном случае важны такие показатели, как технологичность, конструктивность и стоимость. Именно они характеризуют массовое производство. Так как узел является неответственным и круг потребителей широкий, качество изображения может быть средним, поэтому весовые коэффициенты для таких показателей качества, как точность положения объектива, отсутствие натяжений, нечувствительность к колебаниям температуры, назначаются довольно низкими. Таким образом, получим $k_1=0,05$; $k_2=0,15$; $k_3=0,05$; $k_4=0$; $k_5=0,2$; $k_6=0,3$; $k_7=0,2$; $k_8=0,05$; $k_9=0$. После обработки матрицы получаем протокол № 1, в котором предлагается использовать „крепление резьбовым кольцом: (6.7)“.

Пример 2. Необходимо закрепить объектив диаметром 40 мм, работающий в тяжелых климатических условиях, качество изображения должно быть очень высоким.

Назначаем весовые коэффициенты. В этом случае гораздо более существенны показатели, отвечающие за качество изображения: $k_1=0,25$; $k_3=0,3$. Тяжелые климатические условия указывают на необходимость более надежного крепления, нечувствительности к колебаниям температуры и герметичности: $k_2=0,1$; $k_4=0,1$; $k_9=0,1$. Чем выше качество изображения, тем дороже будет прибор, а значит, должна быть возможность замены его элементов: $k_8=0,1$.

После обработки матрицы получаем протокол № 2, в котором предлагается использовать „крепление с помощью резьбового и пружинного колец: (7.05)“, что вполне соответствует сложившейся практике.

Пример 3. Требуется закрепить конденсор в прожекторе.

Так как в этом случае качество изображения не играет главной роли, а требуется в основном только технологичность и конструктивность крепления, то весовые коэффициенты могут быть назначены следующим образом: $k_1=0$; $k_2=0,05$; $k_3=0$; $k_4=0,05$; $k_5=0,2$; $k_6=0,2$; $k_7=0,35$; $k_8=0,15$; $k_9=0$.

После обработки матрицы получаем протокол № 3, который предлагает использовать „крепление проволочным кольцом: (7.15)“, на практике для подобных случаев действительно часто используют такое крепление.

Таким образом, представленная матрица принятия решений является жизнеспособной, а разработанный математический аппарат и программное обеспечение могут использоваться в автоматизированном конструировании на этапе выбора способа крепления оптических деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулагин В. В. Основы конструирования оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1976. 304 с.
2. Ключникова Л. В., Ключников В. В. Проектирование оптико-механических приборов. СПб: Политехника, 1995. 208 с.
3. Латыев С. М. Конструирование точных (оптических) приборов. СПб: Политехника, 2007. 579 с.

- Андрей Николаевич Зленко** — *Сведения об авторах*
аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: anikspb@mail.ru
- Андрей Константинович Колпаков** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: group6300@gmail.com
- Надежда Дмитриевна Толстова** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: nadinet@mail.ru
- Марина Андреевна Злобина** — „Артилед“, Санкт-Петербург; инженер; E-mail: kuzya-spb@yandex.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

УДК 681.78

А. О. ВОЗНЕСЕНСКАЯ

АМПЛИТУДНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

Представлены результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования амплитудного волоконно-оптического преобразователя отражательного типа для датчика давления.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, датчик давления.

Введение. В настоящее время интенсивно развиваются автоматизированные системы контроля и управления различными технологическими процессами. Функционирование таких систем требует использования надежных высокоточных датчиков для измерения различных физических величин. В настоящее время для решения этой задачи все более широко применяются волоконно-оптические датчики (ВОД), которые позволяют с высокой точностью измерять разнообразные физические величины (температуру, давление, перемещение, вибрацию, акустические волны, электрические и магнитные поля, уровень жидкости и др.) и, кроме того, обладают малыми габаритами, массой, они невосприимчивы к электромагнитным помехам, а также совместимы с современными волоконно-оптическими системами передачи информации [1, 2].

Для использования в измерительной технике наиболее подходят ВОД с амплитудной модуляцией светового сигнала, которые от фазовых и поляриметрических ВОД отличаются наиболее простой и технологичной конструкцией и требуют минимальных материальных и временных затрат на монтаж и эксплуатацию. Во многих типах амплитудных ВОД воздействия приводят к изменению положения или формы подвижного (или деформирующегося) элемента волоконно-оптического преобразователя (ВОП), это, в свою очередь, вызывает изменение (модуляцию) выходного оптического сигнала ВОД [3]. Таким образом, обеспечиваются удобная для последующей обработки форма представления информации и однозначная взаимосвязь входной и выходной величин.

Численная модель ВОП. Традиционно в задачах оптического согласования изменение оптических потерь ВОП $A=f(z)$ при изменении расстояния z между оптическими волокнами и отражающим элементом рассчитывают по приближенным формулам, приведенным, например, в работах [4, 5], при этом рассматривается только случай равномерно освещенного плоского отражающего элемента:

$$A = -10 \lg \left[\frac{1}{1 + 2 \left(\frac{z}{2a} \right) \operatorname{tg}(\arcsin(NA))} \right]^2, \quad A = -10 \lg \left[\frac{a}{a + 2z(NA)} \right]^2,$$

где a — радиус сердцевины оптического волокна, NA — его числовая апертура.

Следует отметить, что приближенные формулы применимы только при малых значениях z [3]. Тем не менее при проектировании ВОП необходимо получить универсальную модель, позволяющую рассчитывать функции пропускания преобразователей различной геометрии, в том числе ВОП, имеющих отражающий элемент с различными радиусами кривизны поверхности R . В модели должны быть учтены особенности волноводного распространения оптического излучения.

Как правило, в схемах амплитудных ВОП используются многомодовые оптические волокна, что позволяет сформировать численную модель ВОП в геометрическом приближении. Расчет оптических потерь ВОП производился методом элементарных площадок [3]. Поверхность торца входного оптического волокна разбивалась на ряд элементарных площадок $M \times N$. При этом предполагалось, что каждой площадкой излучается световой конус, определяемый числовой апертурой волокна. Внутри каждого светового конуса формируется W лучей, различающихся направлением и имеющих равную световую энергию j_{0i} , при равномерном распределении интенсивности на торце входного оптического волокна. Для каждого i -го входного луча, отраженного от поверхности оптического элемента, определялись координаты (x'_i, y'_i) точки пересечения с плоскостью торца приемного оптического волокна и затем лучи, попавшие в каждую площадку с координатами центра (x'_m, y'_n) , суммировались. Оптические потери ВОП рассчитывались следующим образом:

$$A = -10 \lg \left[\frac{\left(\sum_{i=0}^{W' \times M' \times N'} j_i \right)}{\left(\sum_{i=0}^{W \times M \times N} j_{0i} \right)} \right].$$

Здесь j_i — световая энергия, переносимая единичным отраженным лучом при соблюдении двух условий:

1) $x'^2 + y'^2 \leq (2a)^2$ — отраженные лучи попадают в область сердцевины приемного волокна;

2) $0 \leq \sin \theta \leq NA$ — свет распространяется в приемном волокне, где θ — угол падения отраженного луча на торец приемного волокна.

Предполагалось также, что отражающий элемент не вносит дополнительных потерь, т.е. энергия, переносимая единичным лучом, не изменяется при отражении.

С целью нахождения схемы ВОП, обеспечивающей наибольшую чувствительность ВОД $S=dA/dz$ и динамический диапазон измерений ΔA выполнено компьютерное моделирование и произведена оптимизация ВОП, предназначенных для применения в ВОД давления.

Оптимизация ВОП для датчиков давления. Отражающим элементом в ВОП давления служит тонкая плоская мембрана, прогиб которой определяется воздействующим на нее давлением [6]. Таким образом, в ВОП давления изменение оптических потерь происходит как за счет изменения расстояния z при прогибе мембраны, так и за счет изменения радиуса кривизны самой мембраны R . В настоящей работе при компьютерном моделировании

рассматривалась отражающая мембрана из латуни ЛС-68 толщиной $h=0,1$ мм, широко используемая в ВОП для датчиков давления в диапазоне изменений $(0—10) \cdot 10^5$ Па.

На рис. 1 приведены расчетные зависимости изменения оптических потерь A от изменения расстояния z за счет увеличения кривизны отражающей мембраны $1/R$ для одноволоконных и двухволоконных ВОП отражательного типа для ВОД давления (нормальное атмосферное), установленных на различном расстоянии от отражающей мембраны z_0 , толщина мембраны $h=0,1$ мм, диаметр 15 мм: 1 и 2 — одноволоконный, $2a=50$ мкм, $z_0=1000$ и 3000 мкм соответственно; 3 и 4 — двухволоконный, $2a_{\text{вх}}=50$ мкм, $z_0=1000$ и 3000 мкм. Очевидно отсутствие значительного различия в поведении кривых 1 и 2, а также 3 и 4. Однако при критическом расстоянии $z_{\text{кр}} \sim 500$ мкм для двухволоконного ВОП характерно резкое изменение характеристики, поскольку отраженный свет перестает попадать на торец выходного оптического волокна. Полученные данные показывают, что при малых начальных расстояниях z_0 (1 и 3) характеристика потерь ВОП обеспечивает большую чувствительность $S \sim 0,012$ дБ/мкм, чем при увеличенных начальных расстояниях (2 и 4). В то же время схемы ВОП с увеличенным начальным расстоянием z_0 обеспечивают больший динамический диапазон, а следовательно, позволяют проводить измерения изменения давления в более широком диапазоне.

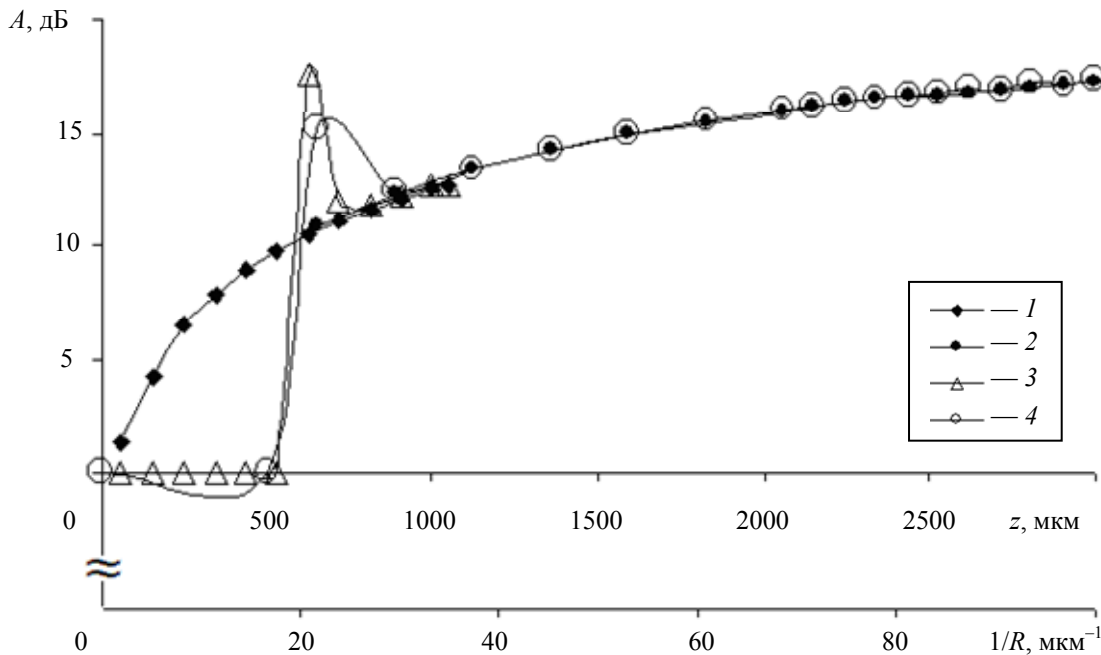


Рис. 1

Экспериментальное исследование пространственной зависимости оптических потерь ВОП и проверка результатов компьютерного моделирования проводились на лабораторном стенде (рис. 2). В качестве источника излучения использовался передающий блок оптического тестера ОТМ-1 на основе лазерного диода ($\lambda=850$ нм), а в качестве измерителя мощности — приемный блок ОТМ-1, включающий $p-i-n$ -фотодиод. На многомодовые оптические волокна с сердцевинной различного диаметра ($2a=100$ и 200 мкм) с одной стороны были установлены оптические соединители. На противоположных свободных торцах волокон были сделаны прецизионные сколы ($90 \pm 1^\circ$). Выровненные волокна попарно закреплялись в держателе, установленном на микропозиционере (Standa 7T801). При помощи микропозиционера осуществлялось продольное (вдоль оси z) перемещение оптических волокон относительно отражающего элемента, при этом регистрировалось изменение мощности выходного оптического

сигнала. Микропозиционер позволял осуществлять перемещение волокон с точностью 5 мкм, измерение оптической мощности проводилось с точностью 0,02 дБ.

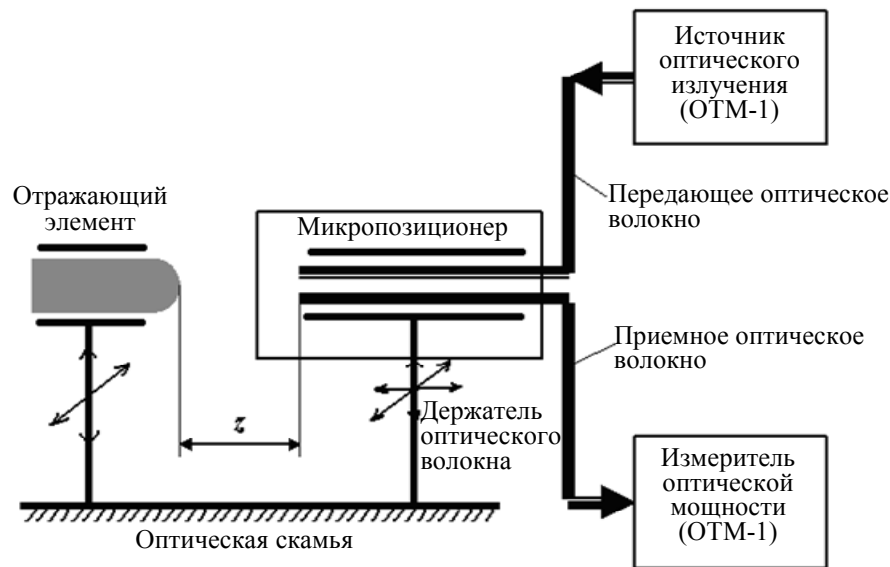


Рис. 2

На рис. 3 приведены расчетные и экспериментальные зависимости изменения оптических потерь ВОП от изменения расстояния z ($z_0 = 300$ мкм) при $R=300$ мкм: 1 — одноволоконный ВОП, $2a = 100$ мкм; 2 — двухволоконный ВОП, $2a=200$ мкм; 3 — двухволоконный ВОП: передающее волокно — $2a=200$, приемное — 100 мкм. Видно, что наибольшей чувствительностью обладают двухволоконные ВОП, у которых передающее и приемное оптические волокна различаются диаметрами сердцевин, а отражающий элемент имеет сферическую поверхность. При этом установлено, что расхождение результатов компьютерного моделирования (кривые) и эксперимента (точки) составило менее 10 % для всех рассмотренных образцов ВОП. Таким образом, предложенная численная модель расчета оптических потерь ВОП хорошо описывает экспериментальные зависимости.

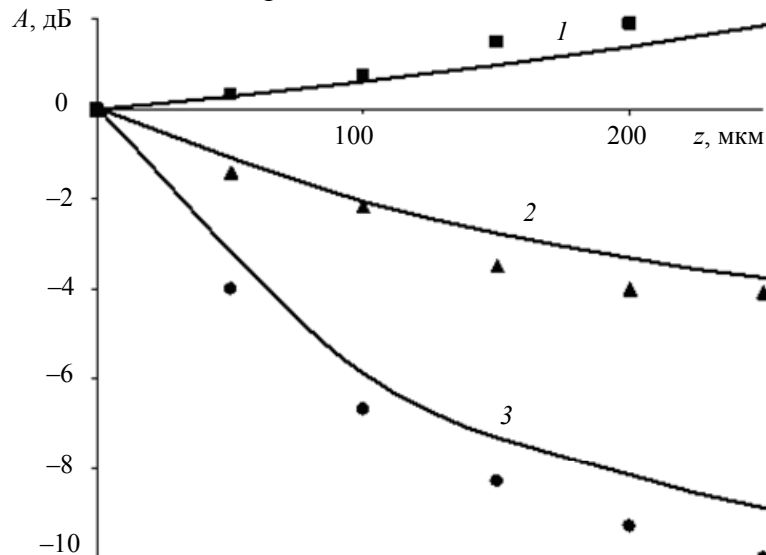


Рис. 3

Заключение. В работе исследованы амплитудные одноволоконные и двухволоконные ВОП отражательного типа для ВОД давления. Компьютерное моделирование ВОП при варьировании геометрических и оптических параметров ВОП, а также экспериментальное исследование оптических потерь ВОП позволило сделать вывод о том, что для ВОД давления наибольшую чувствительность и максимальный динамический диапазон измерений обеспечивают

одноволоконные ВОП, в схеме которых отражающий элемент — тонкая мембрана — изменяет свою кривизну под действием давления. Экспериментальные результаты хорошо коррелируют с результатами компьютерного моделирования, что подтверждает правильность построения численной модели и ее компьютерной реализации.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Санкт-Петербурга ПСП № 090085 2009 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Optical Fiber Sensors: System and Applications / Ed. by *B. Calshaw, J. Dakin*. Boston: Artech House, 1989.
2. *Гармаш В. Б., Егоров Ф. А., Коломиец Л. Н., Неугодинов А. П., Поспелов В. И.* Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении // Фотон-Экспресс. 2005. № 6. С. 128—140.
3. *Вознесенская А. О., Мешковский И. К., Миронов С. А., Попков О. С.* Оптимизация схемы амплитудного волоконно-оптического преобразователя отражательного типа // Оптич. журн. 2007. Т. 74, № 6. С. 31—35.
4. *Убайдуллаев Р. Р.* Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендз, 2000.
5. *Бутусов М. М., Галкин С. Л., Орбинский С. П., Пал Б. П.* Волоконная оптика и приборостроение. Л.: Машиностроение, 1987.
6. *Миронов С. А., Орбинский С. П., Богатырев А. И., Цветков А. В.* Волоконно-оптический датчик давления // Электросвязь. 1992. № 5. С. 32—33.

Сведения об авторе

Анна Олеговна Вознесенская — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: annavmail@mail.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

А. В. БАХОЛДИН, Г. И. ЦУКАНОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ НЕСВЕТСИЛЬНЫХ ОРТОСКОПИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВОВ

Проведены исследование, расчет и сравнительный анализ трехзеркальных систем с промежуточным изображением после отражения от двух зеркал, имеющих следующие оптические характеристики: относительное отверстие 1:30, угловое поле $2\omega=1^\circ$, фокусное расстояние — несколько десятков метров.

Ключевые слова: зеркальные объективы, астрономические объективы, дисторсия, оптический расчет.

Центрированным трехзеркальным системам с промежуточным изображением после отражения от двух зеркал, а только по этой схеме и может быть построена малогабаритная система с относительным отверстием 1:30 и угловым полем $2\omega = 1^\circ$, свойственна зависимость между степенью исправления дисторсии, относительным отверстием главного зеркала и величиной экранирования входного зрачка.

В системах этого типа экранирование входного зрачка вызывается двумя разными элементами. Первое экранирование — это экранирование вторым зеркалом, как в системах Кассегрена и Ричи—Кретьена, которое не зависит от относительного отверстия и углового поля системы. Второе экранирование входного зрачка возникает из-за промежуточного изображения. В зависимости от конструкции системы экранирование происходит или из-за отверстия в наклонном зеркале, расположенном после третьего зеркала, или из-за плоского зеркала, расположенного вблизи промежуточного изображения и ломающего оптическую ось третьего зеркала на 90° . Второе экранирование прямо пропорционально зависит от относительного отверстия и углового поля системы.

Относительное отверстие главного зеркала определяет сложность изготовления зеркала с высокой степенью точности и допуски на изготовление и сборку.

Цель настоящего исследования — получение оптимального варианта оптической системы с исправленной дисторсией и приемлемыми значениями экранирования и относительного отверстия главного зеркала. Поскольку второе экранирование зависит от относительного отверстия и углового поля, рассмотренные ранее системы с относительными отверстиями 1:10, 1:15 [1, 2] не могут быть использованы в качестве прототипов.

В работе рассматриваются только центрированные системы, работающие полным полем. В таблице приведены основные параметры системы: K_1 — диафрагменное число главного зеркала, d_1 — расстояние между первым и вторым зеркалом при $f' = 1$, d_2 — расстояние между вторым и третьим зеркалом при $f' = 1$, α_3 — увеличение третьего зеркала, h_3 — отношение диаметра осевого пучка третьего зеркала к диаметру входного зрачка, S_5 — коэффициент дисторсии 3-го порядка (если $S_5 = 7,27$, то при $2\omega = 1^\circ$ дисторсия составляет 0,03 %, если $S_5 = 5,29$ — 0,02 %), h_2 — экранирование по диаметру зрачка, вносимое вторым зеркалом, ε — экранирование, вносимое промежуточным изображением при $2\omega=1^\circ$. Из таблицы видно, что получить систему со строгим исправлением дисторсии при относительном отверстии главного зеркала 1:2,2 и экранированием, не превышающим 0,4, невозможно.

Была рассчитана и оптимизирована система № 4 с коэффициентом дисторсии $S_5 = 5,29$ и экранированием $\varepsilon = 0,4$ (рис. 1, где 1 — главное зеркало эллиптической формы, близкой к параболоиду, 2 — вторичное зеркало гиперболической формы, 3 — третье зеркало эллиптической формы, 4 — плоское зеркало с отверстием для пространственного разделения световых

потоков, 5 — плоскость изображения; остальные нумерованные плоские зеркала необходимы для компоновки заднего отрезка в наименьшем объеме). Осевая длина системы при $f' = 30$ м составляет 4,14 м, дисторсия при $2\omega = 1^\circ$ равна 0,02 % (в линейной мере 0,053 мм), при $2\omega = 45'$ дисторсия равна 0,01 % (в линейной мере 0,022 мм). Качество изображения точек по всему полю дифракционное.

Параметры рассчитанных вариантов систем

№ системы	K_1	d_1	d_2	α_3	h_3	S_5	h_2	ε
1	2,2	-0,053	0,126	5,0	-0,35	6,33	0,280	0,37
2	2,2	-0,052	0,130	4,9	-0,35	5,98	0,286	0,38
3	2,2	-0,052	0,134	4,8	-0,35	5,64	0,292	0,39
4	2,2	-0,051	0,138	4,7	-0,35	5,29	0,299	0,40
5	2,2	-0,051	0,142	4,6	-0,35	4,96	0,305	0,41
6	2,2	-0,053	0,126	4,6	-0,30	5,07	0,280	0,48
7	2,0	-0,046	0,132	5,0	-0,35	5,12	0,311	0,37
8	2,0	-0,046	0,136	4,9	-0,35	4,82	0,317	0,38
9	2,0	-0,045	0,140	4,8	-0,35	4,53	0,323	0,39
10	2,0	-0,045	0,144	4,7	-0,35	4,24	0,329	0,40
11	2,0	-0,044	0,149	4,6	-0,35	3,94	0,335	0,41
12	2,0	-0,046	0,132	4,6	-0,30	3,79	0,309	0,48
13	1,8	-0,039	0,139	5,0	-0,35	4,03	0,345	0,37
14	1,8	-0,039	0,143	4,9	-0,35	3,78	0,351	0,38
15	1,8	-0,039	0,147	4,8	-0,35	3,53	0,357	0,39
16	1,8	-0,038	0,152	4,7	-0,35	3,27	0,363	0,40
17	1,8	-0,038	0,156	4,6	-0,35	3,03	0,369	0,41
18	1,8	-0,039	0,139	4,6	-0,30	2,63	0,341	0,48
19	1,6	-0,033	0,147	5,0	-0,35	3,06	0,383	0,37
20	1,6	-0,033	0,151	4,9	-0,35	2,84	0,389	0,38
21	1,6	-0,032	0,155	4,8	-0,35	2,63	0,395	0,39
22	1,6	-0,032	0,160	4,7	-0,35	2,41	0,401	0,40
23	1,6	-0,032	0,165	4,6	-0,35	2,19	0,407	0,41
24	1,6	-0,033	0,147	4,6	-0,30	1,58	0,378	0,48
25	1,4	-0,027	0,155	5,0	-0,35	2,17	0,426	0,37
26	1,4	-0,026	0,159	4,9	-0,35	1,99	0,432	0,38
27	1,4	-0,026	0,164	4,8	-0,35	1,80	0,437	0,39
28	1,4	-0,026	0,169	4,7	-0,35	1,61	0,443	0,40
29	1,4	-0,026	0,174	4,6	-0,35	1,42	0,450	0,41
30	1,4	-0,027	0,156	4,6	-0,30	0,61	0,420	0,48
31	1,2	-0,021	0,165	5,0	-0,35	1,36	0,474	0,37
32	1,2	-0,021	0,169	4,9	-0,35	1,21	0,480	0,38
33	1,2	-0,021	0,174	4,8	-0,35	1,05	0,486	0,39
34	1,2	-0,020	0,179	4,7	-0,35	0,89	0,492	0,40
35	1,2	-0,020	0,184	4,6	-0,35	0,72	0,498	0,41
36	1,2	-0,021	0,167	4,6	-0,30	-0,275	0,467	0,48
37	1,2	-0,021	0,170	4,614	-0,31	-0,0006	0,473	0,466
38	1,2	-0,020	0,179	4,5	-0,32	0,0002	0,486	0,466

Если принять допустимым значение экранирования $\varepsilon = 0,47$, тогда при относительном отверстии главного зеркала 1:1,2 получается система со строгим исправлением дисторсии для $2\omega = 1^\circ$ и дифракционным качеством изображения (система № 37), ее осевая длина 5,1 м при $f' = 30$ м, диаметр главного зеркала 1 м.

При уменьшении углового поля до $40\text{--}45'$ можно получить системы со строгим исправлением дисторсии при относительных отверстиях главного зеркала $1:1,6\text{--}1:1,5$ и экранировании не более $0,4$. Одна из таких систем с $f' = 30$ м, диаметром главного зеркала 1 м и угловым полем $2\omega = 40'$ приведена на рис. 2 (обозначения те же, что и на рис. 1). Осевая длина системы 4 м.

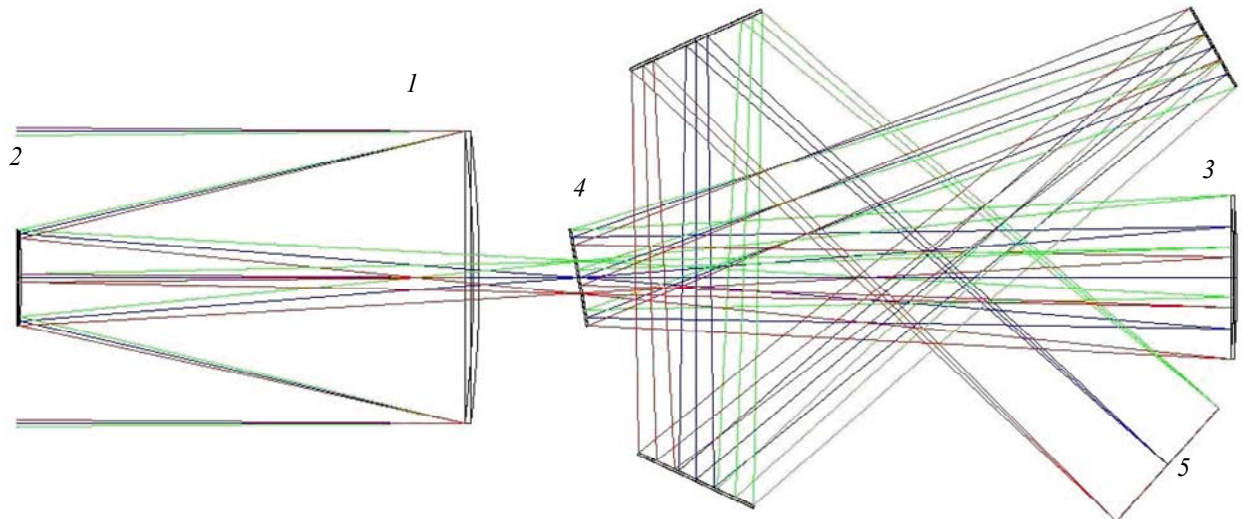


Рис. 1

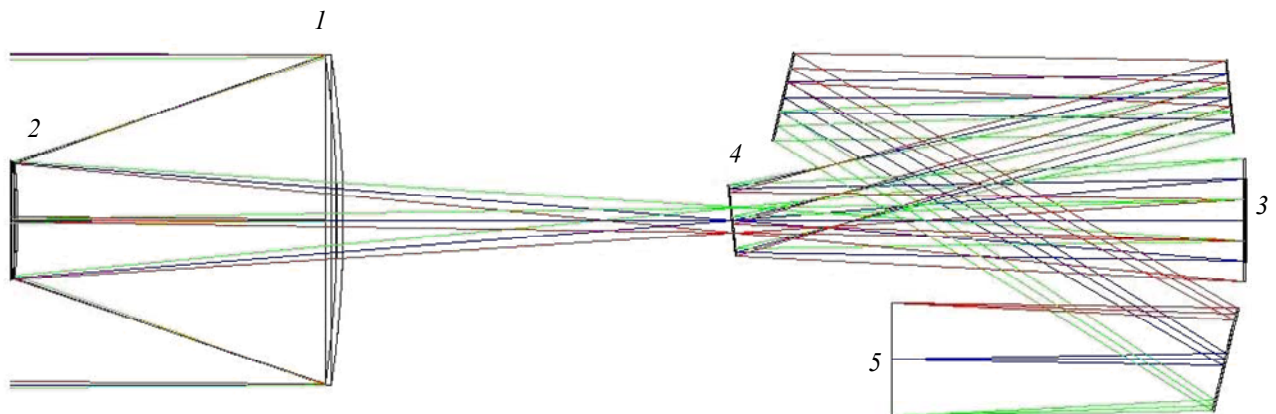


Рис. 2

Анализ результатов, полученных в работе, позволяет сделать следующие выводы: при небольших относительных отверстиях главного зеркала порядка $1:2,2\text{--}1:1,6$ можно сделать равным нулю S_5 при $2\omega = 1^\circ$, но тогда экранирование получается больше $0,5$. Если угловое поле $2\omega = 45'$, тогда экранирование уменьшится приблизительно в $1,3$ раза. Увеличение относительного отверстия главного зеркала ведет к медленному уменьшению S_5 , но при этом возрастает первое экранирование и становится равным второму.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чубей М. С., Цуканова Г. И., Бахолдин А. В. Специфика расчета оптической системы астрографа для проекта „Межпланетная солнечная стереоскопическая обсерватория“ // Оптич. журн. 2007. Т. 74, № 7. С. 37—41.
2. Чубей М. С., Цуканова Г. И., Бахолдин А. В. Защита от прямых засветок в системе астрографа для Межпланетной солнечной стереоскопической обсерватории // Оптич. журн. 2009. Т. 76, № 8. С. 70—73.

Сведения об авторах

- Алексей Валентинович Бахолдин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики;
E-mail: bakholdin@aco.ifmo.ru
- Галина Ивановна Цуканова** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики;
E-mail: ZukanovaGI@aco.ifmo.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

УДК 535.317 + 611.844

А. В. БАХОЛДИН, Н. Ф. КОРШИКОВА, Д. Н. ЧЕРКАСОВА

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГЛАЗА ИНДИВИДУУМА**

Предложен алгоритм компьютерного моделирования оптической системы глаза индивидуума. Показана возможность применения алгоритма в офтальмологической практике. Приведен пример создания модели глаза с пресбиопией.

Ключевые слова: зрительный анализатор, оптическая система глаза, аметропия, пресбиопия, расчет оптических систем.

Биологическая оптическая система — зрительный анализатор человека — это предельно сложный для компьютерного моделирования объект. В частности, оптические характеристики глаз в норме даже у одного человека (парные глаза) различны и находятся в пределах биологической изменчивости (закон нормального распределения) [1, 2]. Две области знания требуют учета индивидуальных характеристик зрительного анализатора: эргономика зрительной деятельности и офтальмология как область медицины. Однако обращение к компьютерному моделированию роговицы, хрусталика или оптической системы глаза индивидуума в целом актуально именно в офтальмологии. Это связано с развитием контактной и интраокулярной коррекции, а также с появлением индивидуальных однофокальных и мультифокальных (прогрессивных) очковых линз [2].

Этап схематизации устройства оптической системы глаза индивидуума пока неизбежен [1—4]. Для разработки алгоритма компьютерного моделирования глаза индивидуума используют результаты врачебных метрологических исследований данного глаза и численные характеристики выбранной математической модели „Схематический глаз“ по Гульстранду [1, 3, 5]. Аметропия подразделяется на эмметропию (соразмерность), миопию (близорукость), гиперметропию (дальнозоркость) в покое аккомодации и пресбиопию (утрата способности к аккомодации). Индивидуумов с соответствующей оптической системой глаз называют эмметропами, миопами, гиперметропами и пресбиопами. Только у эмметропов при изменении одного из оптических параметров глаза остальные характеристики изменяются соразмерно, а задний фокус всегда совмещен с сетчаткой (в покое аккомодации) [2—4]. Эти принятые в офтальмологии принципы схематизации оптической системы глаза положены в основу приведенных на блок-схеме (рис. 1) алгоритмов компьютерного моделирования глаз индивидуумов.

В качестве исходных данных принимаются сведения о характере изменения оптической системы каждого из парных глаз на протяжении жизни человека, получаемые из анамнеза, как это принято в офтальмологической практике.



Рис. 1

Необходимые метрологические сведения об аметропии оптической системы парных глаз и оптических параметрах роговицы получают в результате оптометрических исследований стандартизованными методами рефрактометрии (с помощью рефрактометра, проектора знаков, набора пробных очковых линз) и офтальмометрии (с помощью офтальмометра) соответственно [3, 4].

В качестве математических моделей выбраны: асферическая компьютерная модель соразмерный „Схематический глаз“ по Гульстранду (далее — „Соразмерный глаз“) и стандартизованная составная система очковая линза I — асферическая компьютерная модель „Схематический глаз“ по Гульстранду с аметропией (далее — „Глаз с аметропией“) II (рис. 2). В обеих моделях глаза полностью сохранены композиция и параксиальные оптические характеристики схемы Гульстранда (в состоянии покоя аккомодации), а именно: 1 — роговица, 2 — зрачок глаза (апертурная диафрагма), 3 — хрусталик, 4 — сетчатка; H_{II} , H_{II}' — передняя и задняя главные плоскости глаза; F_{II} , F_{II}' — передний и задний фокусы модели глаза; f_{II} , f_{II}' — переднее и заднее фокусные расстояния глаза; ПЗО — переднезадний отрезок (длина глазного яблока); a_{II} , a_{II}' — передний и задний отрезки; R_{II} — дальнейшая точка ясного видения глазом [5]. В результате оптимизации угол поля 2ω моделей составил 60° .

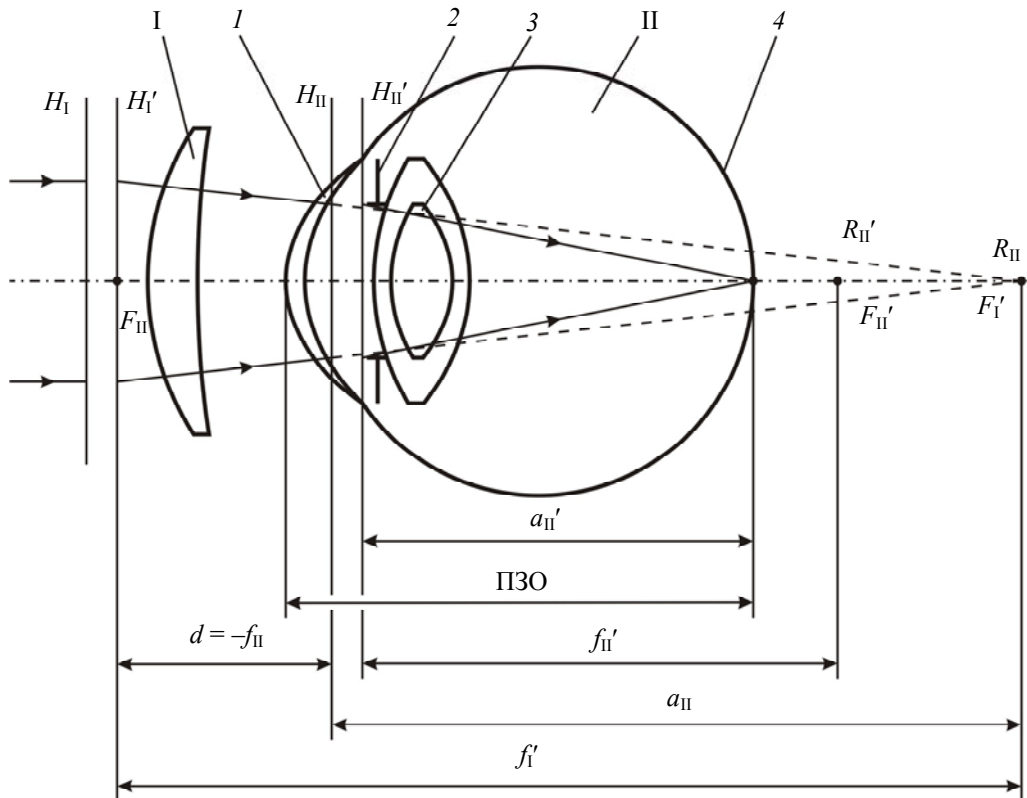


Рис. 2

В композиции стандартизованной составной оптической системы очковой линзы I и модели „Глаз с аметропией“ II (рис. 2) соблюдено следующее условие: $d = -f_{II}$ — очковая линза I располагается в передней фокальной плоскости глаза II, в этом случае оптическая сила системы в целом Φ_{I-II} при любом значении оптической силы линзы Φ_I равна оптической силе глаза Φ_{II} :

$$\Phi_{I-II} = \Phi_I + \Phi_{II} - \Phi_I \Phi_{II} d = \Phi_{II}.$$

На рис. 2 также указаны H_I , H_I' — передняя и задняя главные плоскости линзы, F_I' — задний фокус очковой линзы, f_I' — заднее фокусное расстояние линзы. При данной композиции системы отсутствует эффект изменения масштаба изображения на глазном дне.

Стандартизованная составная система из очковой линзы I и модели „Глаз с аметропией“ II (рис. 2) использовалась на этапах габаритного расчета и оптимизации различных вариантов модели „Глаз с аметропией“. На этапе оптимизации компьютерных моделей поверхности системы задавались как асферические поверхности вращения высшего порядка.

При расчете по алгоритму (см. рис. 1) необходимо также учесть данные о состоянии рефракционного равновесия пресбиопы в возрасте 18—45 лет. В качестве критерия адекват-

ности полученных компьютерных моделей „Соразмерный глаз“ и „Глаз с аметропией“ выбрана длина ПЗО (рис. 2), измеренная врачом-офтальмологом [3].

Алгоритм (рис. 1) построен на основе следующих допущений.

1. Выбрав оптическую схему модели „Соразмерный глаз“ и измерив один из оптических параметров глаза эметропа, остальные можно рассчитать через коэффициент пересчета $K_{II} = R_{1 \text{ изм}} / R_{1 \text{ ср}}$, как это принято в технической оптике, где $R_{1 \text{ изм}}$, $R_{1 \text{ ср}}$ — радиус измеренной передней поверхности роговицы и модели „Соразмерный глаз“ соответственно.

2. Близорукость (миопия) или дальнозоркость (гиперметропия) возникают из-за несоответствия соразмерной оптической системы 1—3 глаза II и длины ПЗО. Поэтому в случае аметропии строится и оптимизируется компьютерная модель „Соразмерный глаз“, затем производится расчет длины ПЗО с учетом измеренной степени аметропии и выполняется оптимизация в схеме с параксиальной очковой линзой.

3. Пресбиопия возникает вследствие стойкого нарушения соразмерности оптических систем хрусталика 3 и глаза II в целом. Вначале строятся модели „Соразмерный глаз“ или „Глаз с аметропией“ по результатам анамнеза. Считается, что при пресбиопии соразмерно изменяются оптические параметры хрусталика 3, оптическая система глаза утрачивает соразмерность с длиной ПЗО. Поэтому в случае пресбиопии строится модель соразмерного хрусталика с коэффициентом пересчета $K_3 = f'_3 / f'_{3 \text{ ср}}$, где f'_3 — расчетное заднее фокусное расстояние хрусталика, $f'_{3 \text{ ср}}$ — заднее фокусное расстояние хрусталика по данным моделей „Соразмерный глаз“ или „Глаз с аметропией“.

На этапе оптимизации компьютерных моделей „Глаз с аметропией“ используется составная схема с параксиальной очковой линзой I (рис. 2).

Алгоритм моделирования оптической системы глаза индивидуума расширен этапами ввода в модели измеренного правильного астигматизма (разность аметропий в двух взаимно перпендикулярных главных меридианах глаза) и моделирования оптической системы глаз в состоянии аккомодации.

В качестве примера рассмотрим моделирование оптической системы парных глаз пресбиопиа [3]. Анамнестический опрос выявил, что до 45 лет пациент был эметропом. Измерения показали, что после 45 лет он стал пресбиопом: максимальная острота зрения вдаль правого глаза (OD): $V_{OD} = 0,7 + sph + 2,0$ дптр = 1,6; левого глаза (OS): $V_{OS} = 1,0 + sph + 1,75$ дптр = 1,6; рефракция стигматической очковой линзы для правого глаза (OD): $\Phi_1 = sph + 2,0$ дптр, рефракция стигматической очковой линзы для левого глаза (OS): $\Phi_1 = sph + 1,75$ дптр; рефракция роговицы 3 (рис. 2): 44,5 дптр (OD), 44,0 дптр (OS); радиус кривизны $R_{1 \text{ изм}}$ роговицы 7,6 мм (OD), 8,1 мм (OS); длина ПЗО 24,5 мм (OD) (расчет 25,0 мм); 24,1 мм (OS) (расчет 24,3 мм) [3].

Последовательность габаритного расчета, выполненного с использованием программы *MathCad*, соответствует блок-схеме (рис. 1). При этом два этапа компьютерного моделирования парных глаз (эметроп, возраст 18—45 лет и гиперметроп) заканчиваются оптимизацией. Оптимизированные оптические параметры каждого глаза используются в расчете конструктивных параметров соразмерно изменившегося хрусталика.

Оптимизация полученной модели выполнена в пакете прикладных программ *Zemax* в схеме с параксиальной очковой линзой за счет асферизации поверхностей хрусталика, а оптические параметры роговицы берутся как результат измерений с использованием офтальмометра.

Исходя из предположения, что поверхности оптических элементов 1, 3, 4 глаза II (рис. 2) являются асферическими, определялся порядок асферичности, достаточный для получения дифракционного качества изображения. Оказалось, что для достижения углового поля $2\omega = 60^\circ$ достаточно применить асферические поверхности десятого порядка на компонентах 1, 3 и 4,

а для $2\omega = 90^\circ$ — шестнадцатого порядка. По результатам компьютерного моделирования в пакете прикладных программ *Zemax* рассчитана функция передачи модуляции (рис. 3) правого глаза (*OD*) пресбиопса с параксиальной линзой (*sph*+2,0 дптр). Расчетная длина ПЗО близка к измеренной.

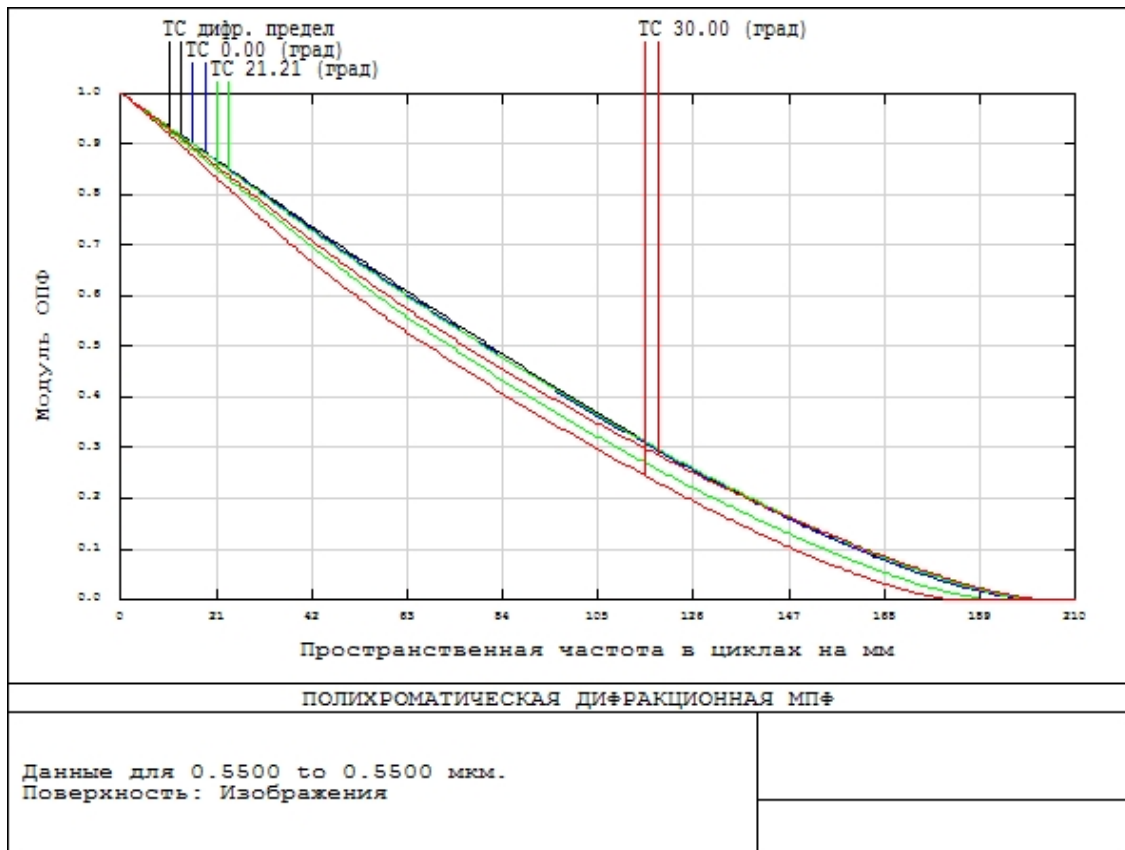


Рис. 3

Предложенный алгоритм позволяет строить компьютерные модели оптической системы соразмерных глаз и глаз с аметропией на основе анамнеза, оптометрических исследований аметропии и измерений параметров роговиц. Это подтверждается на примере создания моделей парных глаз с пресбиопией.

Использование данных анамнеза расширит возможности практического применения компьютерного моделирования оптической системы глаз индивидуумов в офтальмологической практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mütze K., Rochlter F. *Praktische Augenoptik. Formelsammlung und Tabellenbuch.* Berlin: Verlagstechnik, 1968.
2. Волков В. В., Горбань А. И., Джалиашвили О. А. *Клиническая визо- и рефрактометрия.* Л.: Медицина, 1976.
3. Черкасова Д. Н. *Оптические офтальмологические приборы: Учеб. пособие.* СПб: СПбГУ ИТМО, 2003.
4. Черкасова Д. Н., Бахолдин А. В. *Оптические офтальмологические приборы и системы: Учеб. пособие. Ч. 1.* СПб: СПбГУ ИТМО, 2010.
5. ГОСТ 14934-88. *Офтальмологическая оптика. Термины и определения.*

Сведения об авторах

Алексей Валентинович Бахолдин — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики;
E-mail: bakholdin@aco.ifmo.ru

- Наталья Федоровна Коршикова** — студентка; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: ganasha_sun@mail.ru
- Дина Николаевна Черкасова** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

УДК 535.317

М. Г. ФИСЕНКО, К. В. ЕЖОВА, Ф. В. МОЛЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАРЕГИСТРИРОВАННОГО МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ПРИЕМНИКАМИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Рассмотрен способ регистрации цветного изображения многоэлементным оптическим приемником по принципу мозаики Байера, а также программно реализованы такие алгоритмы интерполяции, как билинейный, ближайших соседей, метод Киммела. Проведен анализ полученных результатов.

Ключевые слова: регистрация изображения, ПЗС-матрица, мозаика Байера, интерполяция, билинейный метод, метод ближайших соседей, метод Киммела.

Технологии обработки изображения играют одну из центральных ролей в процессе визуализации информации. И эта роль по мере увеличения числа носителей с ПЗС-матрицами неуклонно возрастает. В настоящее время для регистрации изображения наиболее широко используются полупроводниковые приемники изображения, например, ПЗС-матрицы. ПЗС-, или CCD-матрица (Charge-Coupled Device), представляет собой специализированную аналоговую интегральную микросхему, состоящую из светочувствительных фотодиодов, выполненную на основе кремния [1].

Фоточувствительные приборы с зарядовой связью (ФПЗС) сами по себе не могут регистрировать цвета. Разница в длине волн, которая и определяет цвет попадающих на ФПЗС фотонов, регистрируется как разница в значениях энергии. Поэтому на выходе ФПЗС получается монохромное изображение, т.е. градации серого. Чтобы зарегистрировать цветное изображение, сенсору нужны дополнительные элементы, например, светофильтр, установленный над каждым пикселом сенсора по принципу мозаики Байера (иначе — RGBG-фильтр) [2—7].

Для решения задачи интерполяции было предложено множество методов, например использование стандартных алгоритмов восстановления (таких как билинейный, бикубический), а также использование избыточности зеленых сенсоров в мозаике Байера. Так как зеленые сенсоры в мозаике расположены более плотно, то, согласно теореме Котельникова, по зеленой компоненте можно восстановить более высокие частоты, чем по синей и красной.

На основе проведенного анализа существующих методов интерполяции цветного изображения на ПЗС-матрице был разработан программный комплекс, который позволяет сравнить результаты работы представленных ранее методов и выбрать оптимальный. Программный комплекс создавался на основе дружественного графического, интуитивно понятного интерфейса.

В качестве входных данных можно использовать либо уже готовые изображения форматов bmp, png, jpg, либо сгенерировать растр по выбранным параметрам. Затем необходимо

смоделировать мозаику Байера путем применения соответствующего фильтра. Существует возможность выбора размера ячеек, изменение которых существенно влияет на четкость изображения и количество муара (чем больше ячейка, тем меньше муара и меньше четкость). Затем получившуюся мозаику можно интерполировать любым из вышеописанных методов, после чего появляется возможность сравнить полученные результаты как между собой, так и с изначальным изображением или растром.

В настоящее время производятся работы по добавлению возможности компенсации цветового муара на изображении, а также реализуется дополнительный бикубический алгоритм интерполяции.

Анализ интерполируемых различными методами изображений показал, что наименьшую точность, „блочность“ и большее количество цветового муара показывает метод ближайших соседей. Однако данный метод позволяет получить четкие границы между цветами. Билинейный метод показывает меньшее количество муара, чем у метода ближайших соседей, однако изображение довольно размыто. Наиболее точным является метод Киммела, показывающий удовлетворительное качество и по уровню цветового муара и по четкости результирующего изображения, он пригоден для использования там, где нужна быстрая и качественная визуализация полученного изображения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. История создания цифровой фотографии [Электронный ресурс]: <http://www.litedigit.ru/up_menu/theory/ist_foto>.
2. Приборы с зарядовой связью. Устройство и основные принципы работы [Электронный ресурс]: <<http://st.ess.ru/publications/articles/nikulin2/nikulin.htm>>.
3. Тенденции в цифровой фотографии. Ч. 3 (ПЗС-матрицы) [Электронный ресурс]: <<http://www.3dnews.ru/guide/photo-matrix/>>.
4. iXBT. Твердотельные сенсоры изображения: как получается цвет [Электронный ресурс]: <<http://www.ixbt.com/digimage/sens.shtml>>.
5. Homepage of Alexey Lukin [Электронный ресурс]: <<http://audio.rightmark.org/lukin/graphics/demosaicing.rus.htm>>.
6. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., and Flannery B. P. Numerical Recipes in C++: The Art of Scientific Computing. NY: Cambridge University Press, 2002.
7. Acharya T., Tsai S. Computational Foundations of Image Interpolation Algorithms [Электронный ресурс]: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1317488&coll=portal&dl=ACM>>.

Сведения об авторах

- Михаил Григорьевич Фисенко** — студент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: fmg989@gmail.com
- Ксения Викторовна Ежова** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: EzhovaKV@aco.ifmo.ru
- Федор Владимирович Молев** — ЦНИИ „Электрон“, Санкт-Петербург; ведущий инженер-конструктор; E-mail: mfvfred@yandex.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

К. В. ЕЖОВА, Е. В. ОШУРОК

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Рассмотрен способ формирования геометрической модели поверхности, приведен принцип расчета билинейной и гранично-линейной поверхности.

Ключевые слова: трехмерная поверхность, сегмент, линейная интерполяция, билинейная поверхность.

В настоящее время требуется решать задачи, в той или иной степени связанные с построением некоторой плоскости в трехмерном пространстве, для этого используются специализированные системы, позволяющие строить поверхности разной степени сложности.

Для того чтобы создать модель поверхности, необходимо выполнить несколько подготовительных этапов: поиск корректного подхода к моделированию, детальное исследование этого подхода, поиск программных средств, с помощью которых можно будет графически отобразить поверхность, реализация.

Существует множество программных средств, позволяющих создавать поверхности и работать с ними, но такие средства не всегда подходят для решения некоторых задач. Для трехмерного моделирования поверхности необходимо выбрать метод построения: кусочный, сплайновый, фрактальный, графический, линейчатый, нелинейчатый, квадратичный и т. д.

Сложную поверхность лучше всего формировать из отдельных геометрических сегментов. Такой подход позволяет построить кусочно-определенную поверхность. Сложная поверхность сначала формируется по частям, а затем из этих частей создается сама поверхность. Наиболее простой в построении является билинейная кусочная поверхность, которая задается четырьмя узловыми точками u_{00} , u_{01} , u_{10} , u_{11} [1].

Были построены алгоритмы, которые использовались при создании пакета прикладных программ, предназначенных для восстановления трехмерного изображения предмета по его двумерным изображениям [2, 3]. Для получения набора двумерных изображений с помощью проектора когерентного излучения предмет освещался и на него накладывались интерференционные полосы под углом 30° . Затем изображение регистрировалось (рис. 1).

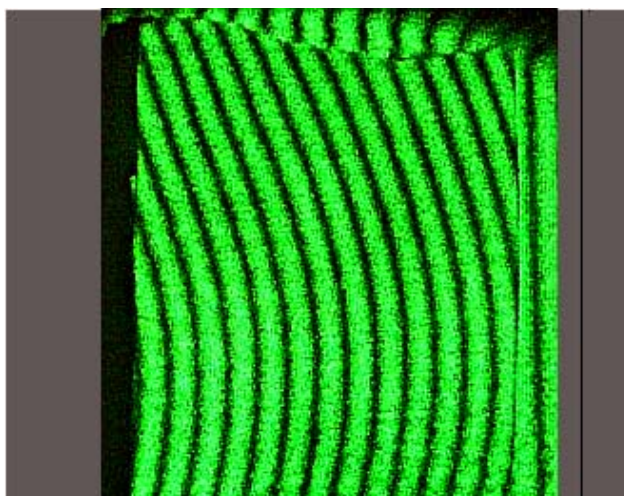


Рис. 1

При наложении полос на исходный объект происходит их искажение в местах изгиба формы объекта. По характеру искажения полос в разных точках объекта можно судить о его реальной форме в этих точках.

Изображения, сформированные различными оптико-электронными системами и зарегистрированные с помощью приемников, искажаются помехами различного характера. Чтобы ослабить действие помех, проводится фильтрация изображения. При фильтрации яркость (сигнал) каждой точки исходного изображения, искаженного помехой, заменяется некоторым другим значением яркости, которое признается в наименьшей степени искаженным помехой. Фильтрация изображения происходит путем нахождения интерференционных полос заданного цвета и преобразованием цвета каждой такой полосы к уникальному. Градация цветов при этом начинается с черного, и при нахождении каждой новой полосы код ее цвета увеличивается на один бит. Такой подход способствует быстрому программному распознаванию преобразованных интерференционных полос, поскольку каждая такая полоса становится уникальной и поиск полосы упрощается. Фактически происходит бинаризация изображения, но не классическая (2 цвета), а модифицированная, полутоновая, с плавным переходом и окрашиванием полос в соответствии с их номером.

Для того чтобы представить геометрию объекта, вычислялись изгибы интерференционных полос, а затем, в соответствии с изгибом каждой полосы, был произведен „подъем“ части плоскости в трехмерном пространстве на число, характеризующее удаление каждой точки изгиба.

Далее производилось возвышение каждой полосы за счет подъема каждой ее точки на некоторое число и формировалась трехмерная модель объекта. Результаты работы программы представлены на рис. 2.

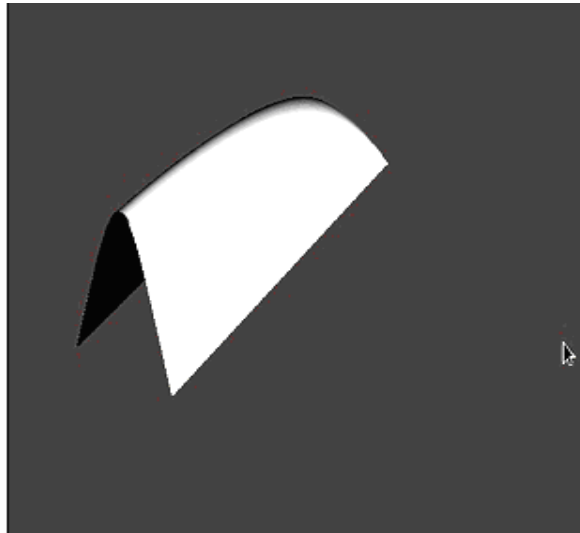


Рис. 2

Такой метод, в частности, может применяться в медицине для выявления деформаций позвоночника. На спину пациента проецируются интерференционные полосы, которые фиксируются видеокамерой и передаются на компьютер. Далее с помощью специализированной программы воспроизводится трехмерное изображение поверхности спины. Изображение выводится в трех плоскостях: фронтальной, сагитальной и горизонтальной. Таким образом, выявляются отклонения формы позвоночника от нормы [4].

Кусочное представление бывает необходимо для описания нерегулярных поверхностей с нарушениями непрерывности или гладкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никулин Е. А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики. СПб: БХВ-Петербург, 2003. 560 с.
2. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2002. 1069 с.

3. Ву М., Девис Т., Нейдер Дж., Шрайнер Д. OpenGL Руководство по программированию. Библиотека программиста. СПб: Питер, 2006. 624 с.
4. Демьянкова Н. Отражение вместо просвечивания // Наука и жизнь. 2011. № 2. С. 61.

Сведения об авторах

- Ксения Викторовна Ежова** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики;
E-mail: EzhovaKV@aco.ifmo.ru
- Екатерина Витальевна Ошурок** — студентка; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики;
E-mail: kittennet@mail.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

УДК 531.7.082.5:535.42/44

В. Н. НАЗАРОВ, Ю. А. СОКОЛОВ

ДИФРАКЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ УГЛОВЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Рассмотрена схема дифракционного контроля угловых и линейных перемещений, использующая амплитудно-фазовые распределения частотных спектров контролируемых объектов. Получено математическое выражение, описывающее распределение интенсивности света в плоскости регистрации. Результаты расчетов подтверждают предположение о высокой чувствительности схемы к угловым и линейным перемещениям. Приведено экспериментальное подтверждение работы модели.

Ключевые слова: дифракция, интерференция, измерения.

Дифракционные методы контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов наиболее часто используют в измерительной технике, когда требуются высокая точность, бесконтактность и автоматизация измерительного процесса [1, 2]. В реализующих дифракционный метод измерений приборах контролируемый объект освещают когерентным излучением лазера и получают в дальней области дифракционную картину (ДК) Фраунгофера. По интенсивности в ее характерных точках или расстоянию между ними судят о размерах, пространственном положении или физических свойствах объектов.

Для расширения функциональных возможностей методов и повышения точности измерений используются схемы с последовательной [3, 4] и параллельной дифракцией [5, 6], а также метод регистрации точек перегиба интенсивности [7].

В работе [6] для контроля малых угловых величин была предложена схема на основе двух щелевых апертур, расположенных с двух сторон от тонкой линзы. Получено математическое выражение, описывающее распределение интенсивности в фокальной плоскости линзы. Теоретическая чувствительность данной схемы к изменению угла падения излучения составила порядка 0,01". В настоящей работе исследуется упрощенный вариант такой схемы, представленный на рис. 1 (1, 2 — щелевые апертуры, 3 — линза, 4 — приемник излучения).

Здесь перед линзой расположены две щелевые апертуры, на которые падает излучение от лазерного источника. Известно, что при расположении щели перед линзой ее амплитудно-фазовое распределение (фурье-спектр) локализовано на сфере, пересекающейся с оптической осью в точке заднего фокуса линзы [8]. При продольном перемещении щели от линзы к ее переднему фокусу радиус такой сферы увеличивается, и если щель расположена в точке переднего фокуса, плоскость локализации ее фурье-спектра совпадает с задней фокальной плоскостью линзы. При поперечном смещении щели происходит разворот поверхности, на которой локализован ее фурье-образ, вокруг точки заднего фокуса линзы. При изменении угла па-

дения излучения на щель происходит смещение фурье-спектра щели по поверхности его локализации. В общем случае, когда поверхность, на которой формируется амплитудно-фазовое распределение фурье-спектра объекта, не совпадает с фокальной плоскостью линзы, между ними образуется переменный фазовый сдвиг, зависящий от расположения щели относительно линзы. При наличии перед линзой второй щели ее фурье-образ будет выступать в качестве опорного и интерферировать с амплитудно-фазовым распределением от первой щели. Это позволяет использовать результат интерференции для измерений перемещения щели или угла падения излучения на систему.

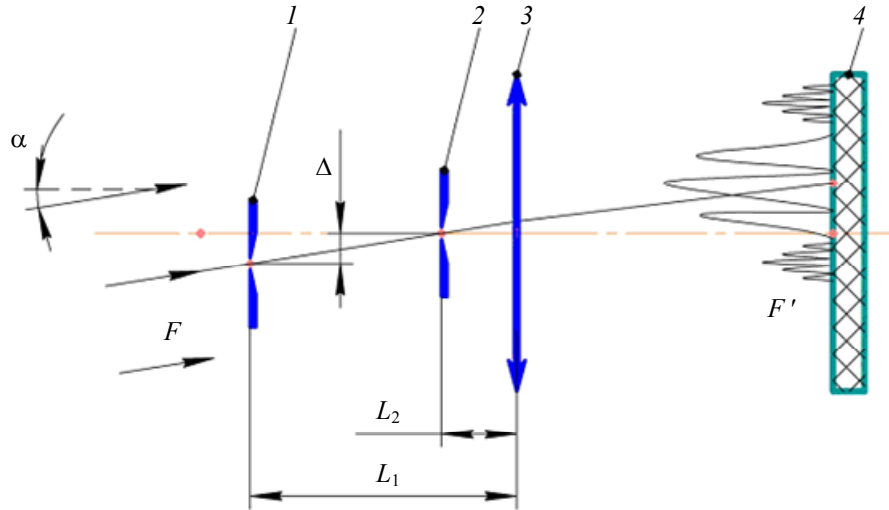


Рис. 1

Для исследуемой схемы было получено математическое выражение, описывающее распределение интенсивности в фокальной плоскости линзы:

$$I(x) = \left(\frac{1}{\pi f}\right)^2 \left[\left\{ \text{sinc} \left[\frac{\pi a_1}{\lambda} \left(\frac{x}{f} - \sin \alpha \right) \right] \right\}^2 + \left\{ \text{sinc} \left[\frac{\pi a_2}{\lambda} \left(\frac{x}{f} - \sin \alpha \right) \right] \right\}^2 + \right. \\ \left. + 2 \text{sinc} \left[\frac{\pi a_1}{\lambda} \left(\frac{x}{f} - \sin \alpha \right) \right] \text{sinc} \left[\frac{\pi a_2}{\lambda} \left(\frac{x}{f} - \sin \alpha \right) \right] \times \right. \\ \left. \times \cos \left\{ \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{x^2}{f^2} (L_2 - L_1) + \left(\frac{x}{f} - \sin \alpha \right) [2\Delta + (L_2 - L_1) \text{tg} \alpha] \right] \right\} \right]$$

где $\text{sinc} x = \sin x / x$; a_1, a_2 — размер щелей; f — фокусное расстояние линзы; α — угол падения излучения; Δ — поперечное расстояние между щелями; L_1, L_2 — расстояние от щелей до линзы.

Анализ результатов, полученных с помощью данной модели, подтвердил предположение о высокой чувствительности схемы к угловым α и линейным L перемещениям. Так, например, при следующих параметрах модели $L_1=80$ мм, $L_2=0$, $\Delta=40$ мм, $\alpha=30^\circ$, $a_1=a_2=100$ мкм, $f' = 90$ мм в случае изменения угла падения излучения $\Delta\alpha$ на $1,5''$ в центральной части главного максимума дифракционной картины происходит полный перепад интенсивности. При разрешающей способности приемника в 1 % максимальная чувствительность такой схемы достигает $\Delta\alpha=0,015''$. При дальнейшем изменении угла падения излучения наблюдаются периодические колебания интенсивности в области главного максимума дифракционной картины. По достижении максимальных и минимальных значений интенсивности указанная чувствительность снижается.

Установлено также, что при данных параметрах схемы и указанном выше способе регистрации теоретическая чувствительность к продольным перемещениям составляет 20 нм.

Для экспериментальной проверки данной модели была собрана установка, схема которой приведена на рис. 2 (1 — автоколлиматор АК-1У; 2 — зеркало; 3 — поворотный столик с микрометрической подвижкой; 4, 5 — щелевые апертуры; 6 — одиночная линза; 7 — ПЗС-матрица). Для исключения взаимного экранирования щели были разнесены в вертикальной плоскости на полуширину пучка лазерного источника, ближняя к источнику излучения щель помещена над осью вращения столика 3. С помощью автоколлиматора 1 контролировался задаваемый угол падения излучения α .

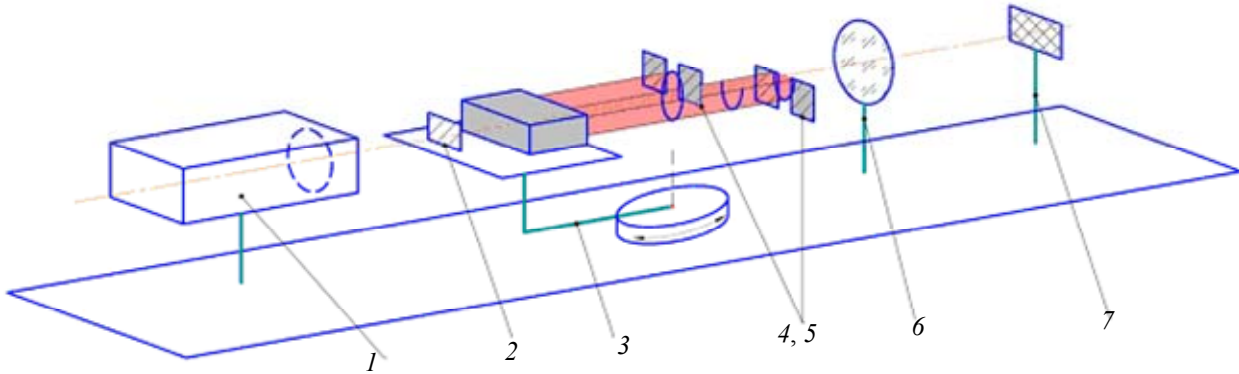


Рис. 2

В опыте была получена серия фотографий дифракционных картин в фокальной плоскости линзы 6 при увеличении угла α падения излучения от 0 до 13' с шагом в 30". Наблюдалось периодическое вертикальное перемещение полос в главных максимумах дифракционных картин. На рис. 3 представлены полученные фотографии с шагом в 1', инвертированные по интенсивности (темные области соответствуют большей интенсивности).

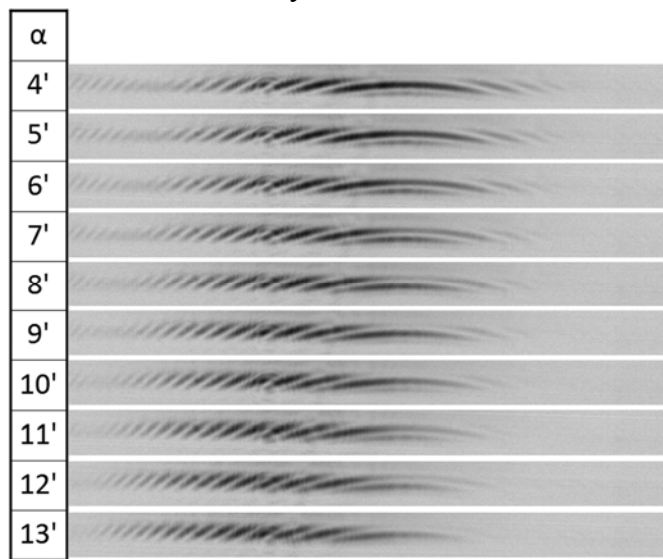


Рис. 3

На рис. 4, а, представлены графики интенсивности, полученные в среде MathCad из экспериментальных фотографий на одном и том же уровне по высоте дифракционной картины. Для нейтрализации шума центральные области главного максимума были аппроксимированы полиномами 12-й степени по методу наименьших квадратов (рис. 4, д, е). На рис. 4, б, г представлены графики интенсивности, полученные по теоретической модели на основе измеренных параметров установки: $a_1=86$, $a_2=54$ мкм, $L_1=286,5$, $L_2=121$ мм, $\Delta=0$, $f=320$ мм, $\alpha=0$, $\lambda=650$ нм.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает корректную работу модели. Следует отметить, что полученные дифракционные картины имеют протяженность по высоте (рис. 3), поэтому возможен одновременный анализ нескольких горизонтальных „сре-

зов“ дифракционной картины. Это позволяет сохранить чувствительность измерений при достижении максимального или минимального значения интенсивности в анализируемом срезе дифракционной картины. На основе полученных данных можно также сделать вывод, что для сохранения чувствительности схемы размеры щелей можно уменьшить так, чтобы на краях ПЗС-приемника был расположен участок главного максимума с интенсивностью, близкой к интенсивности в его центральной области.

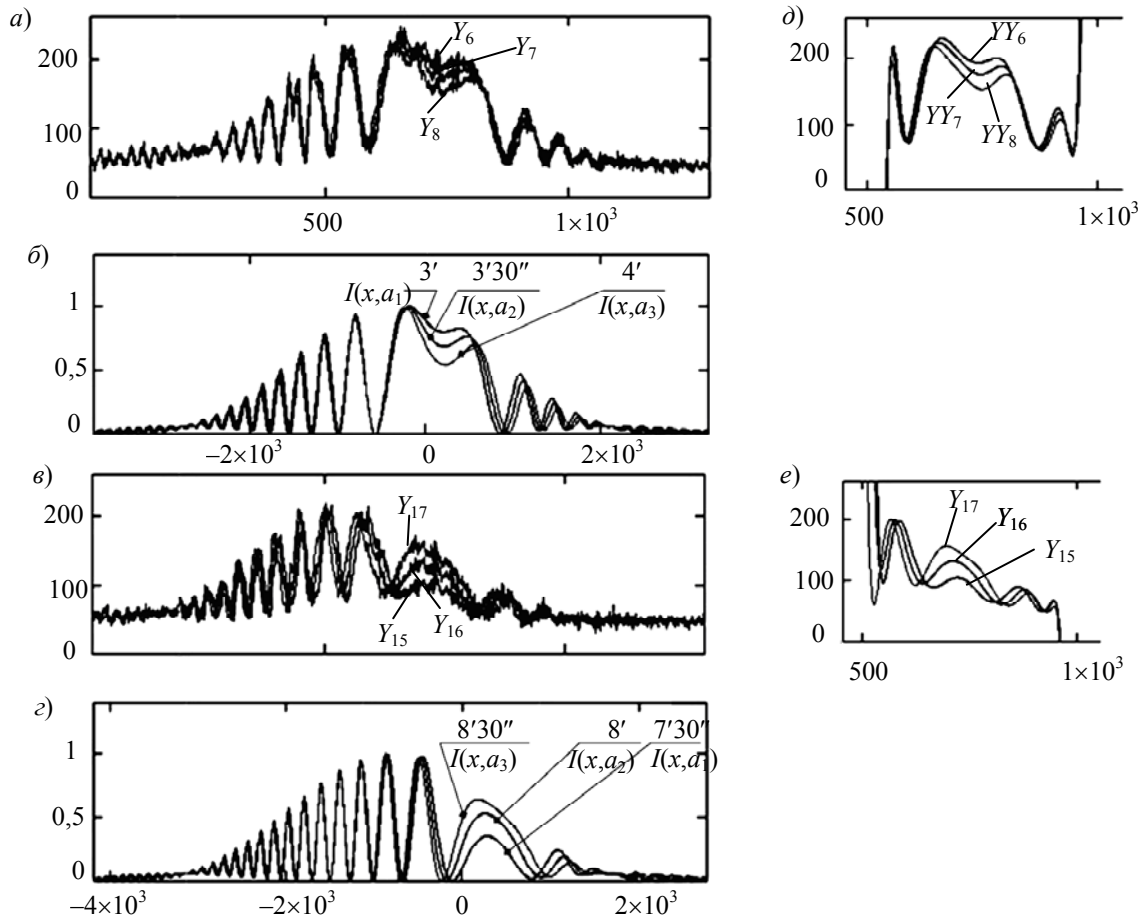


Рис. 4

В работе предложена схема дифракционного контроля угловых и линейных величин, использующая амплитудно-фазовую информацию фурье-спектров двух вторичных источников излучения, расположенных перед линзой. Получено математическое выражение, описывающее распределение интенсивности света в фокальной плоскости линзы. Представленные результаты расчетов подтверждают предположение о высокой чувствительности данной схемы. Представлены результаты экспериментального исследования, количественно подтверждающие правильность исследуемой модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крылов К. И., Прокопенко В. Т., Митрофанов А. С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. Л.: Машиностроение, 1978.
2. Иваницкий Г. Р., Куниский А. С. Исследование микроструктуры объектов методами когерентной оптики. М.: Энергия, 1981.
3. Назаров В. Н., Линьков А. Е. Дифракционные методы контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптич. журн. 2002. Т. 69, № 2. С. 76—81.
4. Комоцкий В. А., Корольков В. И., Соколов Ю.М. Исследование датчика малых линейных перемещений на основе двух фазовых дифракционных решеток // Автометрия. 2006. Т. 42, № 6. С. 105—112.

5. Назаров В. Н., Иванов А. Н. Использование явления муара для увеличения точности дифракционных методов контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптич. журн. 2009. Т. 76, № 1. С. 46—50.
6. Назаров В. Н., Соколов Ю. А. Дифракционный метод контроля пространственного положения объектов с изменяющимся масштабом спектра Фурье // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 11. С. 53—56.
7. Иванов А. Н. Контроль геометрических параметров объекта по положению точек перегиба дифракционной картины Фраунгофера // Там же. С. 49—53.
8. Гудмен. Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970.
9. Коронкевич В. П., Кривенков Б. Е., Михляев С. В., Чугуй Ю. В. Оптико-геометрический метод расчета дифракции Фраунгофера на объемных телах // Автометрия. 1980. № 2. С. 25—35.

Сведения об авторах

- Виктор Николаевич Назаров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: naz_1946@mail.ru
- Юрий Александрович Соколов** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; лаборант; E-mail: sokolov-juri@yandex.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

УДК 535.80

А. П. СМОРНОВ, С. М. ЛАТЫЕВ, Д. В. МАРКОВ, С. А. ЧУГУНОВ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДОПУСКОВ НА ПЕРВИЧНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ МИКРООБЪЕКТИВОВ ПО МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО

Проведено сравнение допусков на первичные погрешности микрообъективов с использованием компьютерной модели оптической системы в среде MathCad. Качество объектива оценивалось по пятну изображения точечного объекта. Допуски назначались исходя из соотношения размеров абберационного геометрического и дифракционного пятен.

Ключевые слова: допуск, погрешность, оптическая система, модель, микрообъектив, абберация, дифракция.

Важной задачей оптического производства является автоматизация сборки оптико-механических узлов и функциональных устройств, в частности, микрообъективов (МО). Автоматизация сборки микрообъективов предполагает создание роботизированной линии, включающей операции транспортировки, сбора банка данных и адаптивно-селективной сборки МО на основе информации по виртуальной сборке МО [1]. Такая линия разрабатывается в НИУ ИТМО совместно с Техническим университетом Ильменау [2].

Эффективность автоматизации сборки определяется уровнем допусков, рассчитанных по одному из критериев качества изображения, подтвержденных проверочным расчетом и требуемых для полной взаимозаменяемости сборочных единиц. В этом случае поля рассеяния первичных погрешностей находятся в пределах допусков и сборка выполняется без дополнительных операций переборки, обработки и юстировки. Однако при производстве микро-

объективов принцип взаимозаменяемости не используется в силу невозможности обеспечения требуемого уровня допусков. Сборка в этом случае требует дополнительной обработки деталей и многочисленных юстировок. Задачей разрабатываемой линии автоматизированной сборки является минимизация или полное исключение дополнительных операций за счет предварительного сбора информации о технологических погрешностях параметров МО и взаимной компенсации [3] возникающих в процессе сборки скалярных и векторных погрешностей.

Следует различать два вида допусков:

1) технологические допуски на конструктивные параметры элементов оптической системы. Например, погрешности характеристик материала формы и размеров оптических деталей. Они не зависят от конструкции крепления элементов устройства;

2) погрешности положения оптических элементов. Они зависят от выбранной конструкции крепления линз МО и связаны размерными цепочками с погрешностями конкретной конструкции устройства (эксцентриситеты, наклоны рабочих и базовых элементов, торцевые биения опорных плоскостей, зазоры и овальность в отверстиях). Если размерная цепочка достаточно длинна, то допуск на положение оптического элемента может оказаться невыполнимым из-за чрезмерно высоких требований к допускам на первичные погрешности элементов конструкции (последние тем жестче, чем длиннее размерная цепочка).

Для исследования зависимости качества изображения микрообъективов от допусков на их первичные погрешности зададимся единым уровнем допуска на суммарную погрешность положения оптических поверхностей. При этом для удобства построения модели оптической схемы микрообъектива децентрировку поверхности, вызванную смещением центра кривизны, будем рассматривать как поперечное смещение вершины поверхности и наклон нормали в этой точке. В модели под оптической осью будем понимать направление, совпадающее с декартовой осью аппликата во внешней системе координат и совпадающее с оптической осью номинальной оптической системы. Вершины поверхностей номинальной оптической системы находятся в соответствующих точках оси аппликата, нормали к поверхностям в точках вершин также лежат на оси аппликата.

Кроме погрешности децентрировки поверхности будем учитывать погрешности формы поверхностей: общую погрешность радиуса и местную погрешность цилиндричности как разность радиусов по ортогональным направлениям, погрешности материала, толщины и показателей преломления сред.

В настоящей работе влияние допусков на качество изображения в микрообъективе оценивается по двум уровням: предельно выполнимый в заданных условиях производства, условно названный „технический“ уровень, второй — более мягкий — „экономический“ (табл. 1).

Таблица 1

№	Погрешность	Единицы измерения	„Экономический“ уровень	„Технический“ уровень
1	Общая погрешность формы	полоса	2	0,5
2	Неплоскостность	полоса	3	0,5
3	Местная погрешность формы, цилиндричность	полоса	0,5	0,05
4	Децентрировка поверхности (с учетом крепления)	мкм	10	2
5	Погрешность толщин и воздушных промежутков	мкм	20	5
6	Погрешность показателя преломления	10^{-4}	10	2

Основным параметром для расчета первичных допусков является критерий качества изображения, в качестве которого используют различные aberrации (волновые, лучевые, поперечные, продольные, осевые, полевые, третьего порядка, интегральные, отнесенные к

гауссовой плоскости или к плоскости наилучшего наведения), функцию рассеяния точки или изображения мира.

В разрабатываемой линии сборки качество изображения оценивается по реальному пятну рассеяния, которое определяется суммарной поперечной абберацией. Если пятно, полученное в результате трассировки лучей, не превышает дифракционного пятна, то в качестве порогового размера пятна рассеяния выбираем диаметр кружка Эри. Если абберационное пятно превышает дифракционное, то кроме размера пятна будем учитывать его структуру, определяющую среднее квадратическое отклонение (СКО). Суммарную погрешность в этом случае определим как заданную величину, например, 130 % от СКО интегральной поперечной остаточной абберации, не имеющей первичных погрешностей системы, на основной линии спектра в плоскости наилучшего наведения по минимуму СКО.

Как было отмечено в работе [4], практика проектирования объективов показала, что наиболее удобным и близким к условиям производства способом расчета допусков является так называемый метод попыток, согласно которому на технологические погрешности конструктором предварительно устанавливаются те допустимые величины отклонений, которые еще могут быть получены в заданных условиях производства.

Математическая модель оптической системы разработана в среде MathCad [5]. Модель позволяет выполнять все необходимые операции для построения пятна рассеяния и определения характеристик изображения и расчета допусков.

Допуски δq рассчитываются по методу соответствия коэффициентам влияния:

$$\delta q = \frac{\Delta_{\Sigma}}{A(K + C)\lambda}, \quad (1)$$

где Δ_{Σ} — допустимое значение суммарной погрешности, A — передаточный коэффициент, K — относительный коэффициент рассеяния, учитывающий отступление закона рассеяния погрешности от нормального и величину поля допуска, C — приведенный коэффициент асимметрии, учитывающий сдвиг центра группирования поля рассеяния от центра поля допуска, λ — коэффициент влияния совокупности первичных погрешностей, учитывающий их число и тип.

На первом шаге расчетов формула (1) упрощается: $K = 1$, $C = 0$, $\lambda = \sqrt{n}$, где n — общее число случайных первичных погрешностей. На втором шаге допуски корректируются в соответствии с заданными границами (см. табл. 1): более мягкий рассчитанный допуск, выходящий за выбранные пределы, заменяется допуском „экономического“ уровня, а более жесткий, невыполнимый, смягчается до уровня „технического“. Для исследуемых в качестве примера микрообъективов распределение допусков преимущественно находилось на „техническом“ уровне.

На третьем шаге осуществляется проверка полученных допусков методом Монте-Карло. Значения полученных допусков на первичные погрешности служат границами, в которых случайным образом для заданного числа реализаций задаются текущие значения отступлений параметров от их номинального значения, генерируются реальные первичные погрешности.

В работе [4] исследован характер функций распределения вероятности погрешностей объективов. Показано, что погрешности радиусов, толщины и воздушных промежутков распределены по нормальному закону. Модули поперечных смещений и наклонов поверхностей распределены по закону Рэлея, а их азимутальные углы — по равномерному закону. Если вычисленное значение СКО превышено более чем на значение суммарной погрешности, то схема считается условно неудовлетворительной (брак).

Описанная методика использована для сравнительного анализа микрообъективов марки ОСХ с увеличениями и апертурами 5×0,12, 20×45, 63×85 и иммерсионного объектива 100×1,4 с тубусом „бесконечность“. Конструктивные параметры микрообъективов представлены в табл. 2.

Таблица 2

ОСХ 5×0,12				ОСХ 20×0,045			
Деталь	R, мм	t, мм	Марка, среда	Деталь	R, мм	t, мм	Марка, среда
Покровное стекло	∞	—	Воздух К14	Покровное стекло	∞	—	Воздух К14
Фронтальная линза	35,65 10,99	26,091 6,0	Воздух ТФ2	Фронтальная линза	∞ -5,035	26,091 6,0	Воздух СТК12
Линза	11,342 -20,23	0,3 6,0	Воздух БК6	Линза	-22,8 8,63 -11,272	0,3 1,4 4,5	Воздух ТФ5 ЛК3
Тубусная линза	214,8 -46,99	100,0 5,0	Воздух БК8	Линза	18,923 -23,23	5,0 3,5	Воздух ЛК3
Тубусная линза	-46,88 -113,24	0,3 3,0	Воздух БФ12	Линза	9,863 7,907	6,0 2,0	Воздух ТФ5
ОСХ 63 × 0,85				Тубусная линза	214,8 -46,99	100,0 5,0	Воздух БК8
Покровное стекло	∞	—	Воздух К14	Тубусная линза	-46,88 -113,24	0,3 3,0	Воздух БФ24
Фронтальная линза	-2,377 -1,977	0,35 2,33	Воздух СТК19	ОСХ 100 × 1,4			
Линза	25,7 5,834 -4,786	0,2 1,3 3,0	Воздух ТФ3 ЛК3	Покровное стекло	∞	—	Кедровое масло К14
Линза	101,16 5,834 -8,166	0,1 1,2 3,6	Воздух ТФ5 ЛК3	Фронтальная линза	∞ -0,832	0,1 1,0	Кедровое масло К8
Линза	5,834 4,13	16,9 3,44	Воздух ТФ5	Линза	-3,631 -2,291	0,1 1,7	Воздух ЛК3
Тубусная линза	214,8 -46,99	90,0 5,0	Воздух БК8	Линза	37,24 5,943 4,365	0,1 1,0 3,2	Воздух ТФ1 ЛК3
Тубусная линза	-46,88 -113,14	0,3 3,0	Воздух БФ24	Линза	16,069 4,365 -29,31	0,1 1,0 2,3	Воздух ТФ3 ЛК3
—	—	—	—	Линза	5,943 4,13	17,9 4,0	Воздух ТФ5

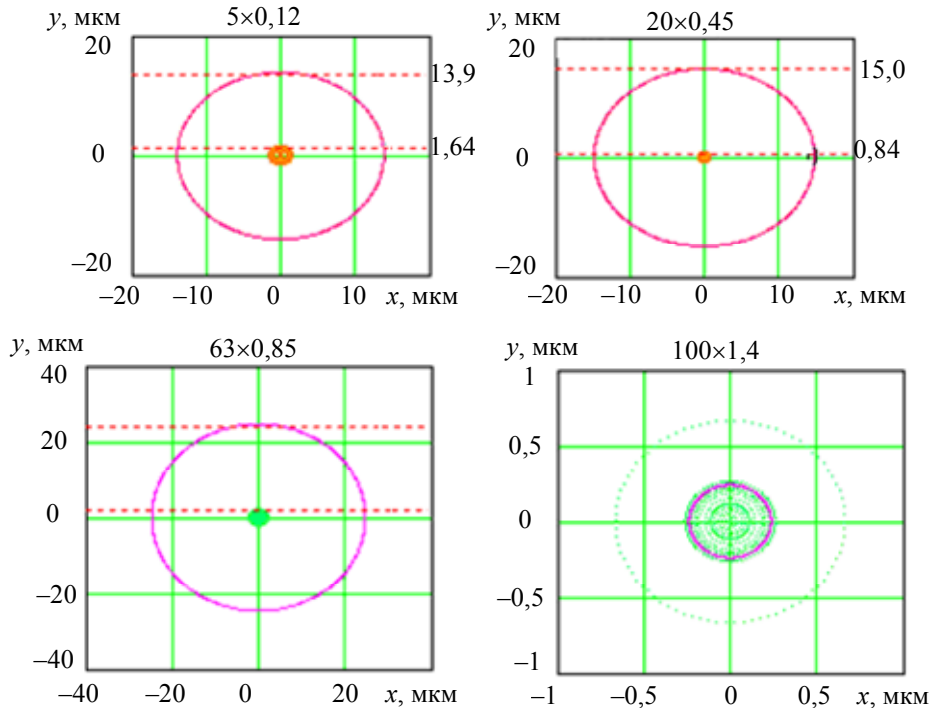
Исследуемый микрообъектив в плоскости изображения строит пятно рассеяния, размер которого определяется абберациями. Сравнение проводится на основе размера пятна рассеяния микрообъектива в плоскости наилучшей установки с размером кружка Эри. Радиус дифракционного пятна определяется длиной волны $\lambda=0,546$ мкм, на которой происходит оптимизация системы, и передней апертурой объектива A . В пространстве изображения (в передней фокальной плоскости окуляра) он увеличивается в соответствии с линейным увеличением V объектива:

$$\rho_{\text{Э}} = \frac{0,61\lambda}{A} V. \quad (2)$$

Для исследуемых микрообъективов на рисунке представлено отношение радиусов дифракционного и абберационного пятен в случае нахождения точки предмета на оси.

Согласно дифракционной теории аббераций [6], при увеличении аббераций истинное изображение приближается к изображению, рассчитанному в соответствии с законами

геометрической оптики. Оно пересекается интерференционными полосами, возникшими из-за дифракции на диафрагмах оптической системы. В рассматриваемых объективах с увеличением до $100\times$ радиус кружка Эри примерно на порядок больше радиуса абберрационного пятна, поэтому расширение абберрационного пятна из-за увеличения первичных погрешностей до размеров дифракционного пятна приведет к модуляции интенсивности пятна и к увеличению его размеров. Снижение разрешения микроскопа при увеличении абберрационного пятна до размеров дифракционного с данным объективом не произойдет.



Допустимое значение суммарной погрешности определяется размером абберрационного пятна, приравненного к размеру дифракционного или увеличенного на 30 % абберрационного пятна, если оно больше абберрационного. Для каждого объектива генерируется 100 реализаций со случайными значениями первичных погрешностей в заданных пределах (см. табл. 1). Процент реализаций, при которых размер абберрационного пятна выходит за границы дифракционного пятна, растет с увеличением сложности микрообъектива. Для объектива 100×1,4 абберрационное пятно изначально было больше дифракционного, для части реализаций (примерно 4 %) СКО пятна рассеяния оказалось меньше рассчитанного. Это указывает на тот факт, что параметры объектива не являются оптимальными и требуют дальнейшей оптимизации.

Существует понятие „полезное увеличение“, определенное для случая, когда наблюдатель полностью использует разрешающую силу микроскопа. Наблюдатель должен применить окуляр с таким увеличением, при котором изображение радиуса кружка Эри через окуляр в среднем составляло бы с глазом наблюдателя при расстоянии 250 мм угловую величину 3 мин [7], равную в линейном измерении Δ , тогда максимальное увеличение окуляра будет ограничено размером дифракционного пятна. Разрешающая сила микроскопа в этом случае максимально возможная, дифракционная. Если абберрационное пятно в K раз больше дифракционного, то во столько же раз уменьшается полезное эффективное увеличение микроскопа и определяется формулой:

$$V_M = V\Gamma_{ок} = V \frac{\Delta}{\rho_{Э}K} = \frac{655A}{K}, \quad (3)$$

где V_M — линейное увеличение микроскопа, $\Gamma_{ок}$ — видимое увеличение окуляра. Результаты расчетов максимального увеличения микроскопа с исследуемыми микрообъективами приведены в табл. 3.

Таблица 3

Микрообъектив	Полезное увеличение	K	Эффективное увеличение
5×0,12	78,6	2,7	29,1
20×0,45	294,75	4,6	64,1
63×0,85	556,75	3,6	154,7
100×1,4	917	28	32,7

Проведенное модельное исследование продемонстрировало:

- 1) возможность точностного анализа микрообъективов с помощью разработанной модели оптической системы и возможность выявления ситуации, при которой параметры объектива не являются оптимальными;
- 2) эффективность использования метода Монте-Карло для количественного анализа характеристик микрообъектива в составе микроскопа. Снижение полезного увеличения микроскопа сопровождается уменьшением разрешающей способности микрообъектива;
- 3) необходимость в дополнительных операциях (юстировка, обработка) при заданных уровнях допусков. Она пропорциональна доли реализаций проверочного расчета микрообъективов, имеющих пятна рассеяния больше дифракционного пятна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Smirnov A. P.* Mathematicsches Modell zur virtuellen Montage von Mikroskopobjektiven // Interner Workshop "Flexible Montage". Technische Universitat Ilmenau. 2010. Marz.
2. *Латыев С. М., Смирнов А. П., Табачков А. Г., Фролов Д. Н., Шухат Р. В.* Проект линии автоматизированной сборки микрообъективов // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 11. С. 7—13.
3. *Schuchk K.* Methodik Messung der Zentrierungssysteme // Optik. 1959. N 16.
4. *Крынин Л. И.* Основы проектирования конструкций объективов. СПб: ГУ ИТМО, 2006.
5. *Смирнов А. П.* Модель оптической системы в среде MathCAD // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 4. С. 56—62.
6. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970.
7. *Панов В. А., Андреев Л. Н.* Оптика микроскопов. М.: Машиностроение, 1976. С. 27.

Сведения об авторах

- Александр Павлович Смирнов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: apsmirmov@bk.ru
- Святослав Михайлович Латыев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; заведующий кафедрой; E-mail: latyev@grv.ifmo.ru
- Данил Владимирович Марков** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов
- Сергей Александрович Чугунов** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

О. А. АБАКШИНА, Г. В. ЕГОРОВ, С. М. ЛАТЫЕВ, С. С. МИТРОФАНОВ

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА, ОСНОВАННЫЕ НА ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПРИЕМНИКАХ

Исследованы фотоэлектрические приборы и устройства для измерения линейных и угловых размеров, в которых использованы позиционно-чувствительные приемники типа „мультискан“.

Ключевые слова: фотоэлектрические приборы, позиционно-чувствительные приемники.

Введение. В течение длительного времени в оптическом приборостроении предпринимаются попытки создания простых и надежных фотоэлектрических устройств, способных автоматически измерять линейные и угловые размеры [1]. Работы в данном направлении не привели пока к созданию достаточно простых и дешевых приборов, которые удовлетворяли бы требованиям машиностроителей при работе в условиях как лаборатории, так и цеха. Большинство таких устройств построено на приборах с зарядовой связью [2] и оптических растрах, которые требуют применения довольно сложной электронной аппаратуры для обработки измерительного сигнала и имеют ограниченный динамический диапазон.

Значительная часть проблем, возникающих при разработке аппаратуры такого класса может быть решена при использовании разработанного в РАН позиционно-чувствительного фотоприемника „мультискан“, позволяющего непосредственно регистрировать положение светового пятна. Данный фотоприемник обладает теми же возможностями, что и ПЗС-строка, при большем быстродействии.

„Мультискан“ является многофункциональным фотоприемным устройством. Опрос его фоточувствительных элементов — кремниевых фотодиодов — производится при помощи пар встречновключенных коммутационных диодов меньшей площади за счет перемещения вдоль структуры эквипотенциальной линии электрического поля. В процессе сканирования токи со всех приемных элементов постоянно поступают во внешнюю цепь, а информация о пространственном распределении освещенности формируется с учетом весовых коэффициентов, с которыми суммируются фототоки отдельных элементов. Режим коммутации, исключающий накопление заряда на элементных емкостях, обеспечивает регистрацию мгновенного распределения освещенности [3], при этом выходной сигнал мультискана $U_{\text{вых}}$ связан с линейным перемещением измеряемого объекта y выражением

$$U_{\text{вых}} = U_0 \frac{y}{L}, \quad (1)$$

где L — длина светочувствительной площадки „мультискана“, U_0 — опорное напряжение, подаваемое на „мультискан“.

На кафедре компьютеризации и проектирования оптических приборов НИУ ИТМО в течение последних лет исследовались характеристики „мультискана“ с целью определения возможности использовать его в фотоэлектрических приборах для контроля геометрических параметров.

Авторами настоящей статьи была предложена функциональная схема фотоэлектрического индикатора на базе позиционно-чувствительного приемника „мультискан“ (рис. 1).

При перемещении измерительного штока l происходит смещение центра светового пятна, создаваемого светодиодом 2 , на светочувствительной площадке „мультискана“ 3 , с которого с помощью электронного блока 4 снимается аналоговый электрический сигнал U , выводимый на цифровой дисплей 5 .

Искомое перемещение y и величина электрического сигнала связаны выражением

$$y = \frac{L_0}{U_0} U, \quad (2)$$

где U — измеряемое напряжение.

На основе предложенной схемы спроектирован и изготовлен макет индикатора (рис. 2, 1 — фотоэлектрический индикатор, 2 — измеряемая концевая мера). С целью определения точностных характеристик были проведены исследования индикатора.

Измерялась предельная величина погрешности индикатора методом сравнения с концевыми мерами длины кл. 1 (ГОСТ 9083-73).

Погрешность составила $\Delta y = 0,02$ мм, а среднее квадратическое отклонение $\sigma = 0,007$ мм.

Предложенный индикатор может быть применен в устройстве для контроля радиуса сферических поверхностей, внешний вид сферометра на основе „мультискана“ приведен на рис. 3 (1 — индикатор, 2 — сферическая опора).

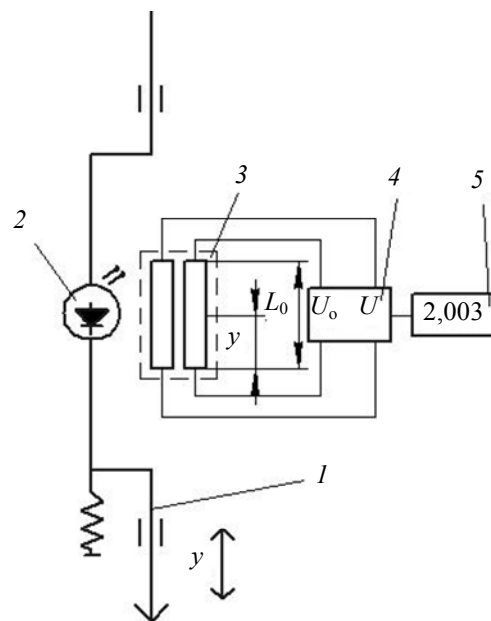


Рис. 1

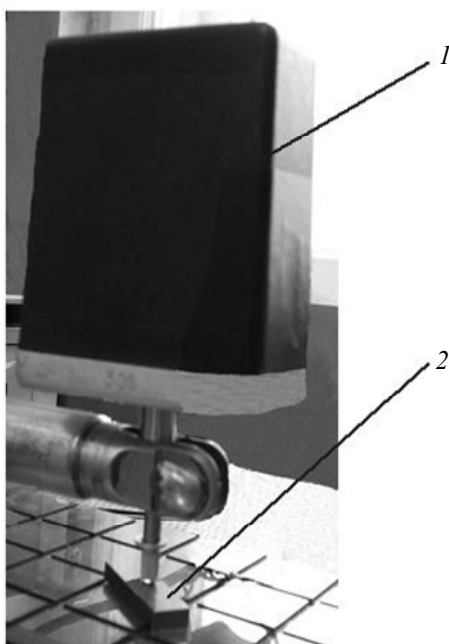


Рис. 2

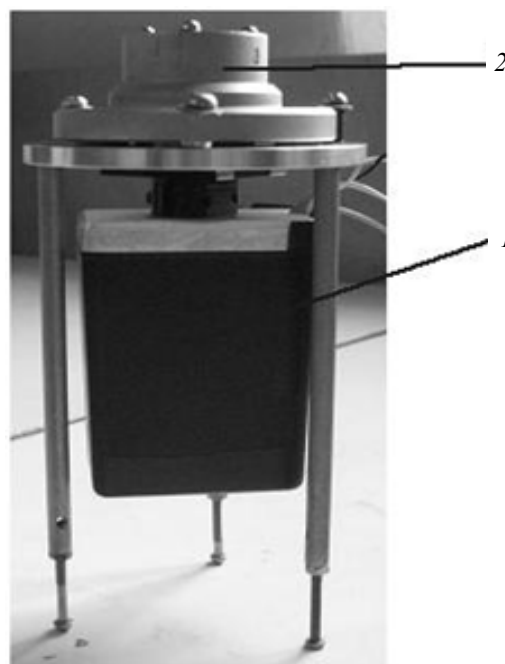


Рис. 3

Радиус поверхности вычисляется по следующему закону:

$$R = \frac{D^2}{8y} + \frac{l}{2} \pm r = \frac{D^2}{8nA} + \frac{nA}{2} \pm r, \quad (1)$$

где D — диаметр опорного кольца, r — радиус сферической опоры-шара (для вогнутой поверхности знак плюс, для выпуклой — минус), l — стрелка прогиба измеряемой линзы, n —

число электрических счетных импульсов, вырабатываемых индикатором линейных перемещений, A — цена импульса.

Индикаторы на основе „мультискана“ могут быть использованы для контроля линейных размеров с возможностью алгоритмической коррекции [4]. Предварительный анализ погрешностей показал, что точность этого устройства не ниже точности аналогов.

На собранном макете устройства были произведены измерения поверхностей образцовой выпуклой линзы радиуса $R_{\text{вып}} = 80,17$ мм ($\sigma = 0,0013$ мм) и образцовой вогнутой линзы $R_{\text{вог}} = 131,83$ мм ($\sigma = 0,0007$ мм).

Предложенные устройства на основе „мультискана“ целесообразно использовать в качестве сферометров для контроля радиуса деталей оптических приборов и радиуса сферических поверхностей деталей газодинамических опор гироскопических приборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернштейн А. С. Фотоэлектрические измерительные микроскопы. М.: Машиностроение, 1976.
2. Онегин Е. Е. Точное машиностроение для микроэлектроники. М.: Радио и связь, 1986.
3. Берковская К. Ф. и др. // ЖТФ. 1983. Т. 53, № 10. С. 2015—2045.
4. Латыев С. М. Конструирование точных (оптических) приборов: Учеб. пособие. СПб: Политехника, 2007.

Сведения об авторах

- Ольга Алексеевна Абакишина** — студентка; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов
- Геннадий Васильевич Егоров** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; доцент
- Святослав Михайлович Латыев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; заведующий кафедрой; E-mail: latyev@grv.ifmo.ru
- Сергей Сергеевич Митрофанов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: m1990s@mail.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.

SUMMARY

P. 9—11.

STUDY OF BASIC UNIT SCHEMATIC FOR OPTOELECTRONIC DEFLECTOMETER

Three possible schemes of basic unit of dual-channel optoelectronic deflectometer are considered. Two of the schemes relate to prismatic systems with single videocamera, and one scheme includes two oppositely directed cameras. Sensitivity of the devices to basic unit turns is investigated.

Keywords: deflection, optoelectronic deflectometer, dual-channel optoelectronic scheme.

Data on authors

- Alexey M. Aleev* — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; Engineer of the 2-nd category; E-mail: lexmaister@yandex.ru
- Alexey A. Gorbachev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: gorbachev@grv.ifmo.ru
- Valery V. Korotaev* — Dr. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru

P. 12—16.

SUPERPOSITION OF THERMAL AND TELEVISION IMAGES IN EXAMINATION OF BUILDING UNITS AND CONSTRUCTIONS

A possibility is considered of superposition of images obtained in different spectral ranges for increased reliability of revealing of thermal deformations and anomalies in building envelopes. Qualitative and quantitative analysis of measured distribution of temperature over the building surface is carried out with the use of described method of calculation of thermal condition of building envelope.

Keywords: temperature of building envelope internal surface, infrared survey, superposition of thermal and TV images.

Data on authors

- Alexander S. Vasiliev* — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: yoshikawa06@gmail.com
- Valery V. Korotaev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Andrey V. Krasnyaschikh* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: crus@mail.ru
- Oleg Yu. Lashmanov* — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: o.lashmanov@gmail.com
- Oleg N. Nenarokomov* — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; Assistant Lecturer; E-mail: 4307_globl@mail.ru

P. 17—22.

STUDY OF MULTISPECTRAL SELECTION METHOD UNDER CROSS-IMPACTS IN COLOR VIDEOCAMERA CHANNELS

Algorithms are proposed for multispectral image processing over a unitary matrix area with the account for cross-impacts between elements of optical-electronic system of anthropogenic catastrophe warning by spatial position of construction elements. The proposed method of multispectral measurement of coordinates of active referent marks in color matrix photo receiver field of view allows for account of impact of thermal gradient in atmospheric tract on optical-electronic control process.

Keywords: multispectral method, optical-electronic system, estimation of mark image coordinates.

Data on authors

- Anton A. Maraev* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: antoshka87@gmail.com
- Alexander N. Timofeev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: timofeev@grv.ifmo.ru
- Sergey N. Yaryshev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: ysn63@mail.ru

P. 22—28.

PHYSICAL BACKGROUND OF PHOTODIODE OPERATION IN PHOTOVOLTAIC AND PHOTODIODE MODES

Peculiarities of heterojunction p-n diode operation in photovoltaic and photodiode modes are considered. An expression for full photodiode current is derived. Advantages and disadvantages of the photodiode operation in photovoltaic and photodiode modes are analyzed.

Keywords: photodiode, voltaic sensitivity, photovoltaic mode, photodiode mode.

Data on authors

- Gennady G. Ishanin* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: Ishanin@mail.ru
- Vladimir P. Chelibanov* — Cand. Chem. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Ecological Instrument-Making and Monitoring; E-mail: chelibanov@gmail.com

P. 28—32.

APPLICATION OF RICE PROBLEM TO SIGNAL DETECTION IN OPTICAL LOCATION

A new signal detection approach based on analysis of level-crossing intervals is proposed. Detection of weak signal in the presence of heavy noise is shown to be possible when the signal is detected during interval between two successive level crossings.

Keywords: Rice problem, random process outpulsing, optical location, signal detection.

Data on authors

- Mariya G. Serikova* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: serikovamg@gmail.com
- Evgeny G. Lebedko* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: eleb@rambler.ru

P. 33—36.

BASIC PRINCIPLES OF INDUSTRIAL COLOR VISION SYSTEM ADJUSTMENT

Features of color rendering in industrial color vision systems are studied. Key principles of the system adjusting are considered.

Keywords: color rendering, industrial vision system, television system, adjustment, test table.

Data on authors

- Artem A. Alekhin* — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: temka-pk@mail.ru
- Elena V. Gorbunova* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: vredina_ia@mail.ru
- Valery V. Korotaev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Alexander N. Chertov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: a.n.chertov@mail.ru

P. 37—42.

RESEARCH IN CHARACTERISTICS OF SUN-PROTECTION LENSES AND THEIR IMPACT ON VISUAL ACUITY

Results of sunglass transmissivity calculation from spectrophotometry data are presented and compared with requirements of All-Union State Standard 51854-2001. The effect of the lenses on vision acuity and subjective image contrast perception is considered.

Keywords: sun-protection lenses, visual acuity, spectral and color characteristics.

Data on author

- Mariya I. Budargina* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Technologies; E-mail: budargina@mail.ru

P. 42—46.

PHASE-COMPENSATING COATING FOR ASPHERICAL OPTICS

A new class of multilayered dielectric systems, possessing a constant reflectance over a wide range of optical thickness of one or several layers is investigated. The system is shown to allow for optical system to construct a wavefront for single wavelength or for a given spectral interval.

Keywords: interference coating, aspherical optics, laser cavity.

Data on authors

- Georgiy V. Nikandrov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Technologies; E-mail: nikandrov.spb@mail.ru
- Edward S. Putilin* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Technologies; E-mail: putilin@otd.ifmo.ru

P. 46—49.

DEVELOPMENT OF INTERFERENCE COATING WITH IMPROVED MECHANICAL PROPERTIES ON THE BASE OF MIXED FILMS

The possibility of creation of new film-forming materials with improved non-optical properties (such as adhesion to a substrate, mechanical stress, hardness, etc.) is considered.

Keywords: mixed films, vacuum deposition, mechanical stress, adhesion, micro hardness.

Data on authors

Ludmila A. Gubanova — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Technologies; E-mail: LA7777@mail.ru

Vasily A. Zverev — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Technologies; E-mail: zverev.vasily35530@gmail.com

P. 50—55.

EFFECT OF LAYERS THICKNESS ON RADIATION RESISTANCE OF DIELECTRIC MIRROR

The effect of layers thicknesses deviation on laser-damage threshold of dielectric mirror is considered. An analysis of layers thicknesses flaws in 12 mirror samples is carried out, the influence of electric intensity vector distribution over external layers of the mirrors on their radiation resistance is studied.

Keywords: laser cavity, radiation resistance, dielectric mirror.

Data on author

Gleb V. Makarichev — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Technologies; E-mail: g_retired@bk.ru

P. 56—60.

APPLICATION OF SOLUTION OPTIMIZATION MATRIX TO AUTOMATED DESIGN OF OPTICAL INSTRUMENT

A method is proposed for automated choice of manner of optical detail fastening. The method is based on application of solution optimization matrix.

Keywords: solution optimization matrix, automated design, manner of fastening.

Data on authors

Andrey N. Zlenko — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: anikspb@mail.ru

Andrey K. Kolpakov — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: group6300@gmail.com

Nadezhda D. Tolstoba — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: nadinet@mail.ru

Marina A. Zlobina — “Artiled”, St. Petersburg; Engineer; E-mail: kuzya-spb@yandex.ru

P. 60—64.

AMPLITUDE FIBER OPTIC REFLECTOR-TYPE CONVERTER FOR PRESSURE SENSOR

Results of computer simulation and experimental study of amplitude reflector-type fiber optic converter for a pressure sensor are presented.

Keywords: fiber optic sensor, pressure sensor.

Data on author

Anna O. Voznesenskaya — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;
E-mail: annavmail@mail.ru

P. 65—68.

STUDY OF SMALL-APERTURE DISTORTION-FREE MIRROR LENS

Research, calculation, and comparative analysis of three-mirror systems with intermediate image after reflection from two mirrors is carried out. The system under consideration has the following optical characteristics: relative aperture is 1:30, angular field of view $2\omega = 1^\circ$, focal length comprises several tens of meters.

Keywords: mirror lens, astronomical lens, distortion, optical systems design.

Data on authors

Alexey V. Bakholdin — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;
E-mail: bakholdin@aco.ifmo.ru

Galina I. Zukanova — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;
E-mail: ZukanovaGI@aco.ifmo.ru

P. 68—73.

COMPUTER MODELING OF HUMAN EYE OPTICAL SYSTEM

An algorithm of computer modeling of optical system of human is proposed. Possibility of the algorithm application in ophthalmologic practice is demonstrated. An example of model for human eye with presbyopia is presented.

Keywords: visual analyzer, optical system of human eye, ametropia, presbyopia, optical system design.

Data on author

Alexey V. Bakholdin — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;
E-mail: bakholdin@aco.ifmo.ru

Natalya F. Korshikova — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;
E-mail: ganesha_sun@mail.ru

Dina N. Cherkasova — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics

P. 73—74.**COMPUTER MODELING OF IMAGE OBTAINED WITH MULTI-ELEMENT OPTICAL IMAGE RECEIVER**

The method of color image recording with multi-element optical receiver of Bayer mosaic type is considered. Program realization of several interpolation algorithms (bilinear, nearest neighbor, Kimmel) is proposed. Analysis of obtained results is presented.

Keywords: recording images, CCD matrix, Bayer mosaic, interpolation, bilinear method, nearest neighbor method, Kimmel interpolation.

Data on authors

- Mikhail G. Fisenko** — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;
E-mail: fmg989@gmail.com
- Kseniya V. Ezhova** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;
E-mail: EzhovaKV@aco.ifmo.ru
- Fedor V. Molev** — Central Research Institute “Electron”, St Petersburg; Leading Engineer-Designer;
E-mail: mfvfred@yandex.ru

P. 75—77.**THREE-DIMENSIONAL SURFACE MODELING**

A method for creation of three-dimensional model of a surface is proposed. Examples of model calculation for piecewise bilinear surface and surface with piecewise-linear boundary are presented.

Keywords: three-dimensional surface, segment, linear interpolation, bilinear surface.

Data on authors

- Kseniya V. Ezhova** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;
E-mail: EzhovaKV@aco.ifmo.ru
- Ekatherine V. Oshurok** — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;
E-mail: kittennet@mail.ru

P. 78—82.**DIFFRACTION METHOD FOR MEASUREMENT OF ANGULAR AND SPATIAL DISPLACEMENTS**

A diffraction method of angular and spatial displacements of controllable object is proposed. The method is based on application of amplitude-phase distribution of frequency spectrum of the object. Mathematical formula for irradiance distribution in the image plane is derived. Results of calculations and experiments demonstrate high sensitivity of the method to angular and spatial displacement of controllable object.

Keywords: diffraction, interference, measurement.

Data on authors

- Viktor N. Nazarov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design;
E-mail: naz_1946@mail.ru
- Yury A. Sokolov** — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design; Laboratory Assistant; E-mail: sokolov-juri@yandex.ru

P. 82—87.

COMPARATIVE ANALYSIS OF TOLERANCES ON MICROLENS PRIMARY ERRORS BY MONTE CARLO METHOD

Tolerances on primary errors of microlens are compared with the use a computer model of the optical system in MathCad environment. The lens quality is estimated by image size of a point object. The tolerance is placed using the relationship between the sizes of aberration geometric and diffraction spots.

Keywords: tolerance, error, optical system, model, microlens, aberration, diffraction.

Data on authors

- Alexander P. Smirnov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: apsmirnov@bk.ru
- Svyatoslav M. Latyev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: latyev@grv.ifmo.ru
- Danil V. Markov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design
- Sergey A. Chugunov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design

P. 88—90.

PHOTOELECTRIC INSTRUMENTS AND DEVICES BASED ON POSITION-SENSITIVE DETECTORS

Photoelectric instruments for measurement of linear dimension and angular size with the use of position-sensitive detectors of Multiscan type are studied.

Keywords: photoelectric instrument, position-sensitive detectors.

Data on authors

- Olga A. Abakshina* — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design
- Gennady V. Egorov* — Associate Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design
- Svyatoslav M. Latyev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: latyev@grv.ifmo.ru
- Sergey S. Mitrofanov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: m1990s@mail.ru