

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ИЗДАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ»

Журнал издается с января 1958 г.

ТОМ 52

ИЮНЬ 2009

№ 6

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ФОТОЭЛЕКТРОНИКИ И СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

*Под редакцией академика РАН А. Л. Асеева
и доктора технических наук, профессора В. Б. Шлишевского*

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 5

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ТЕПЛОВИЗИОННОЙ И ТЕПЛОПЕЛЕНГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЕ

- Борзов С. М., Козик В. И., Потатуркин О. И.** Коррекция тепловизионных изображений на основе статистической обработки реальных данных 11
- Голицын А. В.** Повышение эффективности лазерного локатора оптических систем .. 18
- Козик В. И., Нежевенко Е. С.** Калибровка телевизионных датчиков при расположении измеряемых объектов в труднодоступных местах 21
- Голицын А. В., Журавлев П. В., Журов Г. Е., Корякин А. В., Чихонадских А. П., Шлишевский В. Б., Яшина Т. В.** Псевдобинокулярный многоканальный прибор обнаружения потенциальных угроз 27
- Мордвин Н. Н., Попов Г. Н.** Концепция построения оптико-электронных приборов наблюдения универсального назначения 34
- Носков М. Ф., Шлишевский В. Б.** Псевдоцветной окуляр для приборов ночного видения 39

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

- Батомункуев Ю. Ц., Мещеряков Н. А.** Внеосевые объемные голограммные элементы для ближнего инфракрасного диапазона спектра 43

Олейник С. В., Хацевич Т. Н. Исследование базовых двухлинзовых компонентов светосильных объективов, предназначенных для работы с современными электронно-оптическими преобразователями	48
Егоренко М. П., Ефремов В. С. Хроматические свойства зеркала Манжена в нескольких диапазонах спектра	53
Олейник С. В., Хацевич Т. Н. Способ построения оптической системы с дискретным изменением фокусного расстояния.....	58
Чесноков В. В., Чесноков Д. В., Никулин Д. М. Интерференционные светофильтры с перестраиваемой полосой пропускания.....	63
ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР И ЭЛЕМЕНТОВ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ	
Чесноков Д. В., Чесноков В. В. Лазерное формирование наноразмерных структур....	69
Донин В. И. Высокоэффективный источник непрерывного дальнего вакуумного ультрафиолетового излучения для обработки полупроводниковых материалов.....	74
Швец В. А., Рыхлицкий С. В., Спесивцев Е. В., Михайлов Н. Н. Эллипсометрический контроль параметров выращиваемых наноразмерных гетероструктур.....	78
SUMMARY (<i>перевод Ю. И. Копилевича</i>)	89

SPECIAL ISSUE

URGENT PROBLEMS OF SEMICONDUCTOR PHOTOELECTRONICS AND OPTICAL DATA PROCESSING SYSTEMS

*By Edition of A. L. Aseev, Academician RAS
and V. B. Shlishevsky, Doctor of Technical Sciences, Professor*

CONTENTS

INTRODUCTION	5
SIGNAL PROCESSING IN THERMOVISION AND THERMOLOCATION APPARATUS	
Borzov S. M., Kozik V. I., Potaturkin O. I. Correction of Infrared Images on the Base of Real-Time Statistical Data Processing	11
Golitsyn A. V. A Gain in Efficiency of Laser Locator of Optical Systems	18
Kozik V. I., Nezhevenko E. S. Calibration of Television Measuring Devices at Inaccessible Objects	21
Golitsyn A. V., Zhuravlev P. V., Zhurov H. E., Koryakin A. V., Tchikhonadskih A. P., Shlishevsky V. B., Yashina T. V. Two-Channel Pseudobinocular Optoelectronic Device for Potential Hazard Detection	27
Mordvin N. N., Popov G. N. Conceptual Design of Universal Optical-Electronic Observation Devices	34
Noskov M. F., Shlishevsky V. B. Pseudo-Color Eyepiece for Night Vision Devices	39
OPTICAL SYSTEMS AND ELEMENTS OF OPTOELECTRONIC DEVICES	
Batomunkuev Yu. Ts., Mescheryakov N. A. Off-Axis Volume Holographic Optical Elements for Infrared	43
Oleynik S. V., Hatsevich T. N. Study of Basic Two-Lens Components of High-Apperture Objectives for Modern Image Intensifiers	48
Egorenko M. P., Efremov V. S. Chromatic Properties of Mangin Mirror Objective in Several Ranges of a Spectrum	53
Oleynik S. V., Hatsevich T. N. Development of an Optical System with Discret Change of Focal Length	58
Chesnokov V. V., Chesnokov D. V., Nikulin D. M. Tunable Multiplex Optical Filters	63

**TECHNOLOGY OF MANUFACTURING OF NANOSIZED STRUCTURES
AND OPTOELECTRONIC ELEMENTS**

Chesnokov V. V., Chesnokov D. V. Laser Application for Nanostructure Formation.....	69
Donin V. I. High-Power CW Source of Extreme VUV Radiation for Processing of Semiconductor Materials	74
Shvets V. A., Rykhlytskii S. V., Spesivtsev E. V., Mikhailov N. N. In Situ Ellipsometry of Growing MCT-Based Nanoscale Heterostructures	78
SUMMARY	89

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

ПРЕДИСЛОВИЕ

В период с 19 по 23 августа 2008 г. в Новосибирске проводилось II Совещание „Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники (Фотоника—2008)“, посвященное современному состоянию работ, проблем и путей развития в области полупроводниковой фотоэлектроники на основе полупроводниковых соединений A_3B_5 , A_2B_6 и элементарных полупроводников, оптических и фотоэлектрических явлений в полупроводниках, принципов построения фотоэлектронных устройств и оптико-электронных приборов.

Совещание было организовано Институтом физики полупроводников СО РАН при содействии Президиума СО РАН, Министерства образования и науки РФ, Научного совета РАН по проблеме „Квантовые наноструктуры“ и Российского фонда фундаментальных исследований.

В работе Совещания приняли участие 150 научных сотрудников, специалистов и руководителей 45 институтов, научно-производственных организаций, предприятий и объединений из Москвы и Московской области, Новосибирска, Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода, Киева, Львова, Минска, Омска, Томска, Иркутска, Ростова-на-Дону. Были заслушаны 135 докладов, посвященных созданию методов и технологий получения перспективных наноструктурированных материалов и фотоприемных матриц для различных диапазонов спектра, электронно-оптических преобразователей, лазеров, средств ночного видения и тепловизионных приборов, электронных систем обработки оптической информации для нужд обороны, промышленности, науки, медицины и др.

На Совещании было отмечено, что основным направлением развития фотоэлектроники в настоящее время является разработка, совершенствование и создание новых технологий основных полупроводниковых материалов, используемых в фотоприемных устройствах (ФПУ) инфракрасного (ИК) диапазона, и поиск новых принципов построения многоэлементных фоточувствительных приемников ИК-диапазона. Так, в Институте физики полупроводников СО РАН создано отечественное оборудование и разработана промышленно-ориентированная технология молекулярно-лучевой эпитаксии слоев кадмий—ртуть—теллур (КРТ) — базового стратегического материала современной ИК-техники для спектральных диапазонов 3—5 и 8—14 мкм. На основе этих слоев изготавливаются ФПУ с предельно высокими характеристиками, в том числе форматом 256×256 , 384×288 , 320×240 элементов для военных применений. В ФГУП „Гиредмет“ разработана технология и организовано опытно-промышленное производство структур КРТ методом жидкофазной эпитаксии для фотодиодов. Институтом общей физики им. А. М. Прохорова РАН и ЗАО „Матричные технологии“ создано семейство монолитных ИК-матриц на основе PtSi форматом 256×256 (ПЗС), 512×512 и 320×240 (КМОП) элементов, а также ФПУ, не уступающие по техническим параметрам изделиям, применяемым в настоящее время вооруженными силами за рубежом. В Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе разработаны фотодиоды на основе соединений A_3B_5 с высокой чувствительностью в широком спектральном диапазоне длин волн. Кроме того, имеются несомненные успехи в создании матричных приемников излучения на основе не требующих охлаждения микроболометров, двуцветных матричных фотоприемников ИК-диапазона на основе многослойных гетероструктур с квантовыми ямами (сверхрешеток), фоточувствительных элементов на основе наноструктур Ge/Si, A_3B_5 с квантовыми точками для диапазонов 1,3—1,5 и

10—20 мкм, примесных фотоприемников на основе Si:Ga для диапазона 3—16 мкм, неохлаждаемых матричных ИК-фотоприемников на основе соединений A_3B_5 .

Вместе с тем было подчеркнуто, что на сегодняшний день в стране отсутствуют экономические стимулы и крайне слабо организована работа по освоению и внедрению в производство лучших отечественных технологий и образцов фотоэлектроники, квантовых, ночных, тепловизионных, комплексированных оптико-электронных приборов и систем, в недостаточном объеме финансируются фундаментальные исследования, являющиеся основой для развития полупроводниковой фотоэлектроники.

В части, касающейся перспектив создания современных оптико-электронных приборов различного применения с использованием новейшей высокотехнологичной элементной базы, на Советании были сформулированы следующие рекомендации.

1. С целью ускорения промышленного внедрения высокотехнологичных изделий, передовых технологий создания изделий фотоэлектроники и оптико-электронных приборов и систем, а также усиления практической направленности ведущихся работ предусмотреть участие в технологических программах в качестве заказчиков организаций РАН и Минобороны России.

2. Для обеспечения импортного замещения приборов ИК-оптоэлектроники заказывающим управлениям МО РФ, используя прямое финансирование МО РФ, поддерживать разработку и серийное (мелкосерийное) изготовление ИК-приборов на основе КРТ, PtSi и микроболометров в формате приборов, разработанных за рубежом, с целью взаимозаменяемости импортной и отечественной элементной базы в разработанных средствах вооружений РФ.

3. С целью создания условий для опережающего развития элементной базы и приборов ИК-техники военного назначения создать Российский фонд прикладных исследований:

— для широкой финансовой поддержки НИР, направленных на разработку новых материалов и приборов оптоэлектроники;

— для поддержки ОКР, выполняемых на основе законченных НИР и направленных на обеспечение серийного выпуска новых материалов и приборов.

Рекомендуемое отношение числа НИР к числу ОКР — не менее 1:10, отношение средней цены ОКР к средней цене НИР — не более 10:1.

4. Создать Совет главных конструкторов по оптико-электронным системам и перспективным изделиям фотоэлектроники.

5. Просить ВПК обязать органы государственного управления промышленностью:

— в безотлагательном порядке обеспечить готовность производств ведущих отечественных предприятий под утвержденные (обеспеченные) заказы на изготовление фотоэлектронной базы, ночной и тепловизионной техники и изделий квантовой электроники;

— организовать на одном из ведущих предприятий электронной промышленности производство как опытных, так и серийных образцов специализированных кремниевых микросхем обработки фотосигнала (мультиплексоров), полностью обеспечивающее потребности фотоэлектроники;

— предусмотреть в перспективных и ведущихся программах развития фотоэлектронной компонентной базы и оптико-электронных систем средства и работы по модернизации технологического, измерительного и испытательного оборудования.

6. Определить в качестве приоритетных направлений развития фотоэлектронной компонентной базы и оптико-электронных приборов и систем на ее основе:

— разработку технологий наноструктурированных материалов и проведение исследований квантоворазмерных структур;

— разработку монолитных матричных ФПУ для ближней, средней и дальней ИК-областей спектра, в том числе на основе соединений A_4B_6 ;

— разработку неохлаждаемых многоцветных матричных ФПУ, в том числе монолитных, на основе квантовых наноструктур;

— разработку неохлаждаемых микроболометрических матриц повышенного формата 640×480 элементов с пониженным размером пикселей и повышенным температурным разрешением для прецизионных систем наблюдения и полетной ориентации космических аппаратов;

— разработку высокоэффективного охлаждающего элемента на основе автоэлектронной эмиссии для охлаждения приемников ИК-излучения вплоть до 80 К с КПД 70—80 % с предельно низкими массогабаритными характеристиками (около 1 г на 1 см² охлаждающей поверхности);

— подготовку и освоение производства разработанных изделий ИК-техники, имеющих литеру „О₁“ и вошедших в „Перечень электроизделий, разрешенных к применению при разработке (модернизации), производстве и эксплуатации аппаратуры, приборов, устройств и оборудования военного назначения“.

По мнению участников, работа Совещания прошла успешно, в творческой атмосфере и способствовала координации дальнейших научных исследований в области современной высокотехнологичной элементной базы и оптико-электронной аппаратуры на ее основе в интересах повышения безопасности и экспортного потенциала нашей страны.

В предлагаемом специальном выпуске публикуются некоторые материалы Совещания, соответствующие тематике журнала и представляющие, как нам кажется, несомненный интерес для широкого круга научной общественности, инженерно-технических работников и военных специалистов.

*Председатель Совещания
директор Института физики
полупроводников СО РАН, академик РАН
А. Л. АСЕЕВ*

*Выпускающий редактор
доктор технических наук, профессор
В. Б. ШЛИШЕВСКИЙ*

INTRODUCTION

The 2nd Meeting on „Advanced semiconductor photoelectronics (Photonics—2008)“ devoted to the present day research activities, problems and further ways of development in semiconductor photoelectronics based on A_3B_5 , A_2B_6 semiconductor compounds and elementary semiconductors, optic and photoelectric phenomena in semiconductors, principles of photoelectron and optic-electron devices structure was being held in Novosibirsk from 19 to 23 August, 2008.

The Meeting was organized by the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISP SB RAS), assisted by the SB RAS Presidium, RF Ministry for Education and Science, RAS Scientific Council on the problem of „Quantum nanostructures“ and Russian Foundation for Basic Research.

About 150 participants — specialists from 45 institutes and industry from Moscow and the Moscow region, Novosibirsk, St.-Petersburg, Nizhny Novgorod, Kiev, Lvov, Minsk, Omsk, Tomsk, Irkutsk, Rostov-on-the-Don — took part in the Meeting. 135 reports, in which the results of research activities aimed at the elaboration of the methods and technologies to fabricate perspective nanostructure materials and photodetector matrices for different spectral ranges, electron-optical intensifiers, lasers, night vision and thermovision devices, electron systems of optic information processing for the needs of defense, industry, science, medicine, etc., were presented and discussed.

It was pointed out at the Meeting that, nowadays, working out, perfection and creation of new technologies of basic semiconductor materials used in photodetectors of IR range and searching new multi-element photosensitive IR detector structuring principles are the main trends of photoelectronics development. At the ISP SB RAS, home-made equipment was fabricated and an industry-oriented technology for MBE of Cd—Hg—Te layers — the basic strategic material of modern IR devices for spectral ranges 3—5 and 8—14 μm — was developed. Enterprises of the branch deliver epitaxial Cd—Hg—Te layers for photodetector devices (PDDs) fabrication. Based on these layers, photodetector devices with extremely high characteristics, including 256×256, 384×288, 320×240 element formats for military applications, were developed and fabricated. A developed technology of production of epitaxial Cd—Hg—Te layers with the method of liquid-phase epitaxy for photodiodes was created in the Institute of Rare-Metallic Industry („GIREDMET“). A family of monolithic PtSi-based IR matrices of element formats 256×256 (CCD), 512×512 and 320×240 (CMOS), and also PDDs which are not behind the technical parameters of those used by overseas armed forces, was fabricated by A.M. Prokhorov Institute of General Physics, RAS and the Closed Joint-Stock Company „Matrix Technologies“. Highly sensitive A_3B_5 -based photodiodes with a wide spectral wavelength range were fabricated at A. F. Ioffe Physical-Technical Institute. Moreover, there are undoubted advancements in making matrix radiation detectors based on microbolometers not requiring any cooling, double-color matrix IR PDDs based on multilayer heterostructures with quantum wells (superlattices), photosensitive elements based on Ge/Si, A_3B_5 nanostructures for the range of 1,3—1,5 and 10—20 μm , Si:Ga-doped PDDs for the range of 3—16 μm , non-cooled A_3B_5 -based matrix IR photodetectors.

Alongside with this, it was specially emphasized that, for the present day, there are no economic trends in the country, and the activities on development and introduction of the best national

technologies and photoelectronic devices, quantum, night, thermovision, complex optic-electron devices and systems are very insufficiently organized in industry; extremely insufficient is the financial support for the basic research which is the main direction for semiconductor electronics development.

The following recommendations were adopted as for the fabrication perspectives of modern optic-electron devices of different applications using brand-new hi-tech element base.

1. To predetermine participation of RAS organizations and Russian Ministry of Defence as customers in development and introduction of hi-tech devices, advanced technologies for photoelectronics and optoelectronic devices, and to stimulate innovation activities.

2. To support elaboration and serial (small-scaled) fabrication of IR devices based on Cd—Hg—Te, PtSi and microbolometers for the interreplacement of imported and national equipment base in the worked out RF armament to provide the replacement of imported IR optoelectronic devices to the ordering administrative units of the Russian Ministry of Defense.

3. To establish the Russian Foundation for Applied Research to support these activities for the development of RF MD armaments to create the conditions for ahead of time development of military IR techniques element base for:

— a wide financial support of scientific-research activities aimed at the elaboration of technologies for new materials and optoelectronic devices;

— supporting organizational and technical design activities based on completed scientific-research elaborations (R and D) to provide the industrial production of new materials and devices, the recommended design : R and D ratio being not less than 1:10, average design : R and D price ratio — not less than 10:1.

4. To establish the Council of Chief Design-and-Construction Engineers on optic-electron systems and advanced photoelectronic devices.

5. To apply for the Military-Industrial Complex to oblige the state administrative industrial organs to:

— urgently provide the readiness of the leading industrial enterprises to meet the requirements of confirmed orders of componential photoelectronic base, night and thermovisional devices, and those of quantum electronics;

— to organize the production of both experimental and serial samples of specialized silicon microcircuits for photodetector signal processing (multiplexers) that would completely oblige to the needs of photoelectronics;

— to schedule the means and activities in modernization of technological, measurement and testing equipment in the perspective and current developmental programs of componential photoelectron base and optoelectronic systems.

6. To determine the following trends as prior in the development of componential photoelectron base and its connected systems:

— development of nanostructured materials technology and carrying out investigations in quantum-dimensional structures;

— development of monolithic matrix PDDs for near, mid and distant IR spectral ranges, including those based on A_4B_6 compounds;

— development of non-cooled multicolor matrix PDDs, including monolithic ones based on quantum nanostructures;

— development of non-cooled microbolometer matrices of higher format 640×480 of elements with a lower pixel size and higher temperature resolution for spacecrafts presicional observation systems and flight orientation;

— elaboration of a highly effective cooling element based on auto-electron emission for cooling IR detectors down to 80 K with production out 70—80 % and extremely low mass-dimensional characteristics (about 1 g per 1 cm² of a cooling surface);

— getting ready with and development in the production of the worked out IR devices lettered „O₁“ and registered in the „List of electrode devices allowed for use in elaboration (modernization), production and maintenance of devices, apparatuses, installations and military equipment“.

According to the viewpoint of all the participants, the Meeting was successful and arranged in a creative atmosphere that contributed to the co-ordination of the trends of further scientific research in the elaboration of modern hi-tech element base and optic-electron devices on its base to improve the security potential of our country.

Some Proceedings of the Meeting that correspond to the topics of the journal and which are, as we believe, of great concern for a wide circle of scientific public, technical engineers and military experts, are published in the proposed special issue.

*Chairman of the Meeting: A. L. ASEEV,
ISP SB RAS Director, RAS Academician*

*Editor: Doctor of Technical Sciences,
Professor V. B. SHLISHEVSKY*

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ТЕПЛОВИЗИОННОЙ И ТЕПЛОПЕЛЕНГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЕ

УДК 681.7.013

С. М. Борзов, В. И. Козик, О. И. Потатуркин

КОРРЕКЦИЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Сравниваются различные методы коррекции неоднородности чувствительности элементов линеек тепловизионных приемников, основанные на статистическом анализе изображений сцен в режиме реального времени. Рассмотрены адаптивные (основанные на анализе окрестности корректируемого элемента) и неадаптивные (с использованием статистики распределения яркости по всему кадру) варианты. Предложен метод многоточечной коррекции, основанный на аппроксимации характеристических кривых элементов фотоприемных устройств.

Ключевые слова: тепловизионный приемник, коррекция неоднородности, статистический анализ.

Введение. При разработке тепловизионных систем следует учитывать более низкие контрасты инфракрасного (ИК) излучения объектов при температуре около 300 К по сравнению с приборами видимого диапазона. По этой причине при наличии даже небольшого геометрического шума (неоднородности характеристик элементов матрицы) возникают значительные искажения изображения.

Для устранения неоднородности чувствительности элементов применяются специальные процедуры коррекции [1, 2]. Существует несколько алгоритмов двух- и трехточечной коррекции неоднородностей, основанных на выборе постоянного смещения и коэффициента усиления сигнала отдельно для каждого пиксела приемника. В этих алгоритмах используется выходной сигнал от двух и более опорных источников для вычисления коэффициентов коррекции и восстановления формы входного изображения [2]. Наиболее распространен алгоритм, заключающийся в использовании двух опорных источников, имеющих температуру T_1 и T_2 соответственно, с линейной интерполяцией выходного сигнала; он называется алгоритмом двухточечной коррекции [1]. Обычно значения температуры T_1 и T_2 ограничивают рабочий диапазон. В этом случае коррекция неоднородности осуществляется по линейной схеме

$$U_{i,c} = K_i(U_i - M_i),$$

где $U_{i,c}$ — значение сигнала i -го элемента (строки изображения) после коррекции, U_i — значение сигнала до коррекции, K_i — коэффициент чувствительности и M_i — темновой ток.

При невозможности использования опорных источников, а также для компенсации изменения характеристик элементов во времени применяются варианты оценки коэффициентов

коррекции по результатам статистического анализа последовательности регистрируемых данных. При этом учитываются некоторые предположения о характеристиках этих данных (или модель сигнала) [3—5].

Ввиду трудности изготовления матриц ИК-приемников достаточно высокого качества зачастую используются сканирующие линейки, при этом для устранения влияния бракованных элементов в качестве линейки используется матрица из четырех линеек, выходы которых объединяются [6]. При использовании линейных многоэлементных фотоприемных устройств (ФПУ) полученное вследствие имеющейся неоднородности чувствительности изображение имеет характерную горизонтальную структуру (здесь и далее предполагается вертикальное расположение линеек ФПУ с горизонтальным сканированием).

В настоящей работе анализ методов коррекции геометрического шума проводится применительно к таким сканирующим линейкам. При количественной оценке качества коррекции используются телевизионные изображения с искусственно внесенными шумами.

Методы коррекции

1. Коррекция по среднему. Простейшее предположение заключается в том, что изображение наблюдаемой сцены имеет достаточно случайный характер, поэтому усредненный по времени уровень засветки всех элементов ФПУ одинаков [7]. В этом случае можно осуществлять коррекцию регистрируемых изображений с использованием коэффициентов, обратно пропорциональных среднему значению сигнала, получаемому от каждого из элементов ФПУ за некоторый интервал времени, т. е. $K_i = a / \langle U_i \rangle$ и $M_i = 0$, где $\langle U_i \rangle$ — средний сигнал по строке, a — нормирующий коэффициент.

В общем случае коэффициент a может быть выбран из соображений обеспечения приемлемого контраста восстановленного изображения; в рамках настоящей статьи для определения качества коррекции посредством сравнения обработанного изображения с исходным он выбирался равным среднему значению сигнала по кадру: $a = \langle U \rangle$.

К сожалению, использование этого механизма требует случайного характера регистрируемых изображений. На практике подобные ситуации встречаются, например, при аэро съемке земной поверхности с хаотичным, неупорядоченным характером сцены. Однако при съемке, скажем, изображений береговой линии, статистические характеристики одних участков кадра (водная поверхность) будут отличаться от характеристик других (суша).

2. Коррекция по адаптивному среднему. Более приемлемое предположение заключается в том, что средняя яркость строки изображения есть плавная функция от номера строки [3, 7]. Данное предположение практически всегда выполняется, исключением являются лишь специальным образом построенные сцены. В этом случае средние значения сигналов по строкам сглаживаются некоторым окном, и для каждого элемента в результате деления сглаженного сигнала в окрестности данной строки на соответствующий этой строке суммарный сигнал вычисляется корректирующий коэффициент, т. е. коэффициент a зависит от i : $a_i = \langle \hat{U}_i \rangle$, где $\langle \hat{U}_i \rangle$ — сглаженный сигнал в окрестности i -й строки.

Представленные методы являются методами одноточечной коррекции, они позволяют осуществить лишь коррекцию неравномерной чувствительности в условиях равенства темновых токов элементов ФПУ (или, наоборот, коррекцию неравномерности темновых токов в условиях равенства чувствительности).

Для осуществления двухточечной коррекции необходимо узнать значения еще одной точки на кривой чувствительности элементов ФПУ. Это можно обеспечить на основе определения темнового тока (M_i) и средних ($\langle U_i \rangle$) значений сигнала каждого элемента за определенный интервал времени [8]. При этом корректирующий коэффициент K_i определяется как

$$K_i = a_i / (\langle U_i \rangle - M_i).$$

Вычислить значения M_i возможно различными способами, рассмотренными ниже.

3. *Коррекция по минимуму и среднему.* В данном случае для оценки значения темновых токов элементов ФПУ используется предположение, что за время расчета корректирующих коэффициентов каждый элемент ФПУ хотя бы один раз окажется „в темноте“ и выработает сигнал, пропорциональный темновому току или достаточно близкий к нему; тогда $a_i = \langle U \rangle$, M_i — минимальный измеренный сигнал.

Очевидно, что подобное предположение является истинным далеко не для любых изображений. Этот метод может привести к искажению получаемых изображений, особенно в ситуациях, когда ограничено время набора данных для оценки корректирующих коэффициентов.

4. *Коррекция по среднему и СКО.* Несколько более сложным в вычислительном плане является метод определения корректирующих коэффициентов на основе оценки среднего квадратичного отклонения (СКО) значений отсчетов в строках. В этом случае, как и в предыдущем, $a_i = \langle U \rangle$, а в качестве минимального для каждой строки принимается значение $M_i = \langle U_i \rangle - 3\sigma_i$, где σ_i — СКО в строке.

Данный метод основан на предположении, что распределение значений сигнала, получаемого с каждого из элементов ФПУ, близко к нормальному. Недостатком этого метода (аналогично коррекции по среднему) является чрезмерное расширение диапазона интенсивностей на участках кадра равномерной яркости и соответственно увеличение шума до уровня полезного сигнала. Чтобы устранить этот недостаток, предлагается сравнивать значения СКО по каждой строке кадра с предварительно рассчитанным СКО по всему кадру. В ситуации, когда значение СКО по строке гораздо ниже СКО по всему кадру, для данной строки при расчете M_i используется СКО по всему кадру.

Кроме того, были исследованы две вариации этого подхода, использующие адаптивное вычисление среднего и СКО.

5. *Коррекция по адаптивному среднему и СКО.* В этом случае a_i определяется по сглаженному сигналу в окрестности строки $a_i = \langle \hat{U}_i \rangle$, а минимум — как и в предыдущем случае.

6. *Коррекция по адаптивному среднему и адаптивному СКО.* Здесь $a_i = \langle \hat{U}_i \rangle$, а $M_i = \langle U_i \rangle - 3\sigma_i/\hat{\sigma}$, где σ — значение СКО по всему кадру, $\hat{\sigma}$ — СКО по окрестности строки.

Приведенные выше методы двухточечной коррекции обеспечивают компенсацию линейных искажений чувствительности элементов ФПУ. При возникновении нелинейных изменений чувствительности для определения формы искажений необходимо применять более сложные методы.

В статье [5] предлагается итерационная процедура определения коэффициентов полинома, описывающего кривую чувствительности элементов ФПУ. В основе данного метода, как и в работах [3, 7], лежит предположение о том, что среднестатистически яркость элемента изображения есть плавная функция от координат. Однако для выполнения итерационной процедуры необходим большой объем вычислений, а кроме того, такие алгоритмы очень сложно реализовать аппаратно.

7. *Многоточечная коррекция.* Предлагается алгоритм многоточечной коррекции неоднородности чувствительности элементов линейки ФПУ, при котором коэффициенты полинома вычисляются непосредственно за один такт. Для каждого элемента строки j определяется сглаженное по некоторому вертикальному окну значение сигнала \hat{U}_{ij} . Для сглаживания могут использоваться различные фильтры. Обычно это линейная [5] или медианная [6] фильтрация. Медианные фильтры дают хороший эффект при обработке изображений, искаженных импульсными помехами, но имеют относительно низкую эффективность при фильтрации флуктуационного шума, в основном имеющего место в рассматриваемых системах. При сглаживании флуктуационного шума более эффективны линейные методы фильтрации, однако здесь возможны проблемы с импульсными помехами. Если отдельные элементы линейки могут в значительной степени изменять чувствительность, они могут выступать в роли импульсной помехи.

На рис. 1 приведен пример распределения, определяющего статистику зависимости средней по вертикальной окрестности интенсивности от измеренной в точке для строки изображения с повышенной чувствительностью элемента ФПУ (здесь точки соответствуют экспериментальным данным, сплошная кривая — линейной аппроксимации, штриховая — квадратичной). Очевидно, такие строки должны исключаться из рассмотрения при сглаживании. Для этого предлагается вычислять дисперсию по окну и исходя из полученного значения задавать допустимые отклонения, а при сглаживании учитывать только те элементы, отклонение которых не превышает установленной величины. Такой подход при использовании линейного фильтра позволит устранить как флуктуационный шум, так и импульсные помехи.

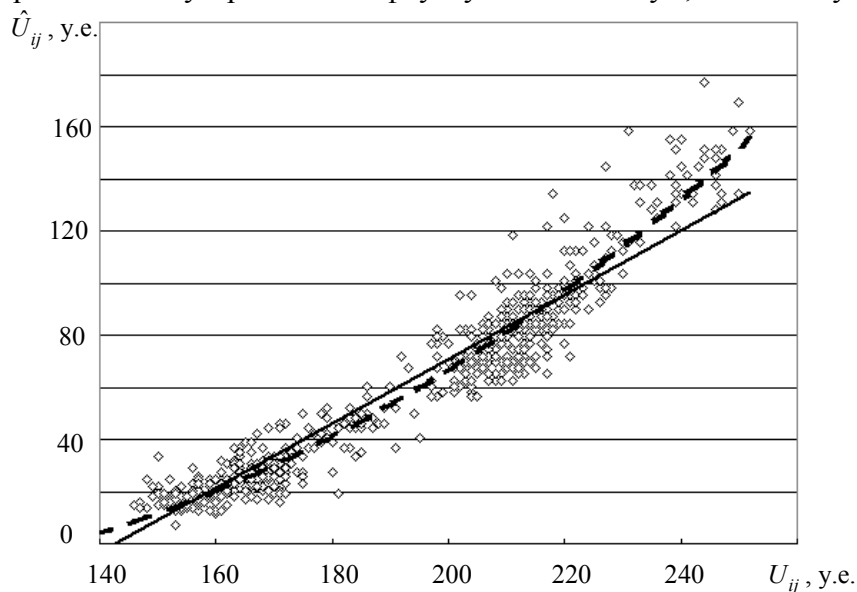


Рис. 1

Далее, в зависимости от предположения о характере изменений чувствительности элементов ФПУ проводится линейная или нелинейная аппроксимация полученного распределения. Если закон искажений кривой чувствительности известен, при аппроксимации используется конкретная формула, в общем случае — полином n -й степени

$$U_{i,c} = \sum_n a_{i,n} \times U_i^n,$$

где $a_{i,n}$ — коэффициенты, определяемые в результате аппроксимации.

При наличии на отдельных участках изображения высокочастотных фрагментов появляются точки изображения, значительно отличающиеся по яркости от ближайших соседей, что приводит к появлению „выколотых“ точек на рис. 1. Для устранения их влияния предлагается сначала проводить линейную аппроксимацию. Затем вычисляется СКО значений сглаженных сигналов относительно полученного графика. По результатам определяется „коридор“ вдоль аппроксимирующей прямой. При окончательной аппроксимации данные, не вошедшие в полученный „коридор“, отбраковываются.

Экспериментальные результаты. Исследование предложенных методов коррекции проводилось на примере обработки изображений с искусственно нанесенной неоднородностью и реальных изображений, полученных с тепловизионных приборов на основе сканирующего линейного ФПУ. В первом случае изображение регистрировалось телевизионной камерой видимого диапазона. Затем на изображение накладывался мультипликативный (N_m) или аддитивный (N_a) белый шум в соответствии с выражением

$$U_{i,\text{noise}} = U_i(1 \pm N_m) \pm N_a$$

в диапазонах изменения (0—1) и (0—100) соответственно. Далее делались попытки устранить внесенные искажения путем применения представленных процедур.

Оценка эффективности методов осуществлялась на основе сравнения результата коррекции с исходным изображением. Результаты расчетов традиционно используемого для оценки качества процедуры восстановления изображений критерия PSNR (peak signal-to-noise ratio) приведены на рис. 2 для мультипликативного (б) и аддитивного (а) шума. Номер кривой здесь совпадает с порядковым номером описываемого метода коррекции. Как видно из рисунка, при минимальных шумах в обоих случаях наилучший результат обеспечивает применение метода коррекции по адаптивному среднему. Однако, поскольку этот метод обеспечивает коррекцию только одной составляющей, при увеличении второй его качество резко падает. То же относится и к методу коррекции по среднему, однако он обеспечивает гораздо худшее качество. В целом наихудший результат получен при использовании метода по минимуму и среднему, что свидетельствует о том, что гипотеза о наличии сигнала, близкого к темновому току, далеко не всегда оправдана. Несколько лучшее качество обеспечивает метод по среднему и СКО, а далее качество восстановления двухточечными методами возрастает по мере добавления элементов адаптивности, однако максимальное качество в большом диапазоне шумов обеспечивается многоточечным методом коррекции.

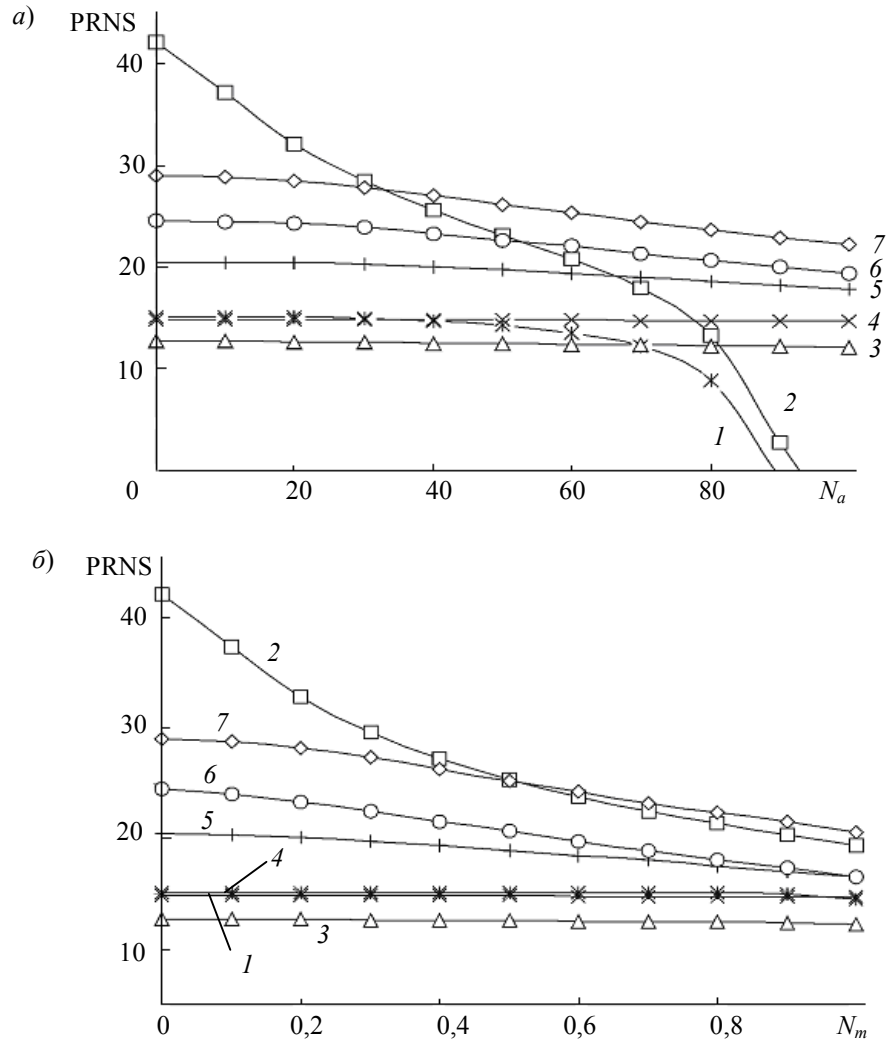


Рис. 2

В целом адаптивные методы коррекции в большинстве случаев оказываются более привлекательными. Однако результаты объективных методов оценки не всегда совпадают с визуальной оценкой качества. Так, в результате применения адаптивных методов могут оставаться отдельные не полностью скорректированные строки. Это вносит небольшой вклад в количественную оценку точности восстановления, однако отчетливо заметно для глаза.

Неадаптивные методы, напротив, практически полностью устраняют такого рода неоднородности, однако вносят собственные искажения, связанные с выравниванием контраста в различных строках. Вследствие этого на изображениях с перепадами яркости и контраста на различных участках они вносят значительные искажения, тогда как в случае хаотичного характера изображений, когда яркость и контраст в различных строках исходных изображений близки, результат данных методов выглядит более предпочтительным.

На рис. 3 приведен пример восстановления изображения неадаптивным и адаптивным методами; здесь *a* — исходное изображение, *б* — оно же с наложенным шумом ($N_m = 0,5$, $N_a = 50$), *в* — результат коррекции по среднему и СКО, *г* — результат многоточечной коррекции. Визуально неадаптивный метод имеет свои преимущества в плане полного отсутствия полос и подчеркивания слабоконтрастных фрагментов, в то время как адаптивный восстанавливает изображение, более адекватное исходному, однако на нем присутствуют хоть и слабоконтрастные, но вполне различимые полосы.

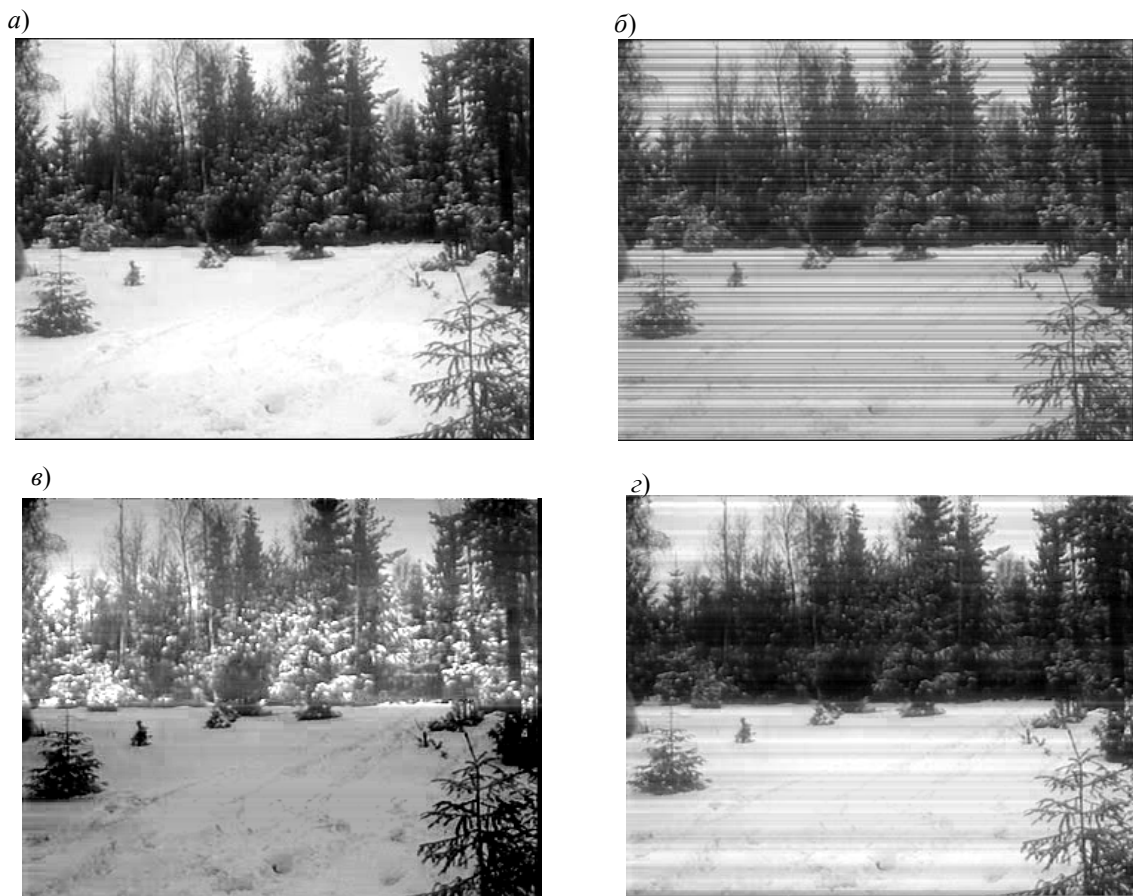


Рис. 3

Аналогичный результат дает и обработка реальных изображений. Максимально устранить внесенные искажения с сохранением исходного контраста изображения позволил только предложенный метод многоточечной коррекции при использовании линейного фильтра с удалением „выколотых“ точек.

Заключение. Практически полностью устранить внесенные искажения удастся только при применении неадаптивных методов коррекции, однако в этом случае не только устраняются внесенные искажения, но и происходит выравнивание контраста по всему изображению. При этом, как и следовало ожидать, если изображение содержит фрагменты с отличающимися в значительной мере статистическими параметрами, неадаптивные методы приводят к чрезмерному увеличению контраста, вплоть до распространения шума приемника на весь

динамический диапазон. Применение адаптивных методов не изменяет контраста, но и не обеспечивает полного устранения искажений.

Поскольку все рассмотренные процедуры основаны на ряде предположений о характеристиках входного сигнала, на различных изображениях они приводят к разным результатам. Если в качестве исходного использовать изображение, не удовлетворяющее сделанным предположениям, представленные процедуры могут привести к различным его искажениям. Однако во многих случаях они позволяют оперативно и достаточно корректно устранить неоднородность регистрируемого сигнала, вызванную неравномерной чувствительностью элементов ФПУ и их темнового тока.

Работа выполнена при поддержке Комплексных интеграционных проектов фундаментальных исследований СО РАН № 3.9, 3.20.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Milton A. Influence of nonuniformity to infrared focal plane array performance // Opt. Eng. 1985. N 24. P. 855—862.
2. Певцов Е., Чернокожин В. Матричные ИК-приемники для малогабаритных тепловых тепловизионных камер // Электронные компоненты. 2001. № 3. С. 32—36.
3. Патент РФ № 2113065. Способ выравнивания неравномерной чувствительности фотоприемников сканирующих линеек тепловизоров / В. М. Белоконев, Е. В. Дегтярев, И. В. Рудый и др. Опубл. 10.06.98. Б.И. № 16.
4. Hayat M. M., Torres S. N., Armstrong E. et al. Statistical Algorithm for Nonuniformity Correction in Focal-Plane Arrays // Appl. Opt. 1999. Vol. 38, N 5. P. 772—780.
5. Narayanan B., Hardie R. C., Muse R. A. Scene-based nonuniformity correction technique that exploits knowledge of the focal-plane array readout architecture // Appl. Opt. 2005. Vol. 44, N 17. P. 3482—3491.
6. Журавлев П. В., Попов Л. К., Терещин Е. А., Шатунов К. П. Тепловизионные системы на основе многоэлементных приемников излучения. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2005. 72 с.
7. Лебедев Д. Г., Лыонг К. Т. Моделирование адаптивного выравнивания параметров линейки фотоприемников с использованием микросканирования // Информационные процессы. 2007. Т. 2, № 2. С. 124—137.
8. Борзов С. М., Потатуркин О. И., Резник А. Л., Яковлев А. В. Принципы построения автоматизированных систем восприятия и анализа последовательности тепловизионных изображений // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47, № 9. С. 46—50.

Сведения об авторах

Сергей Михайлович Борзов

— канд. техн. наук; Институт автоматики и электрометрии СО РАН, лаборатория физико-технических проблем дистанционной диагностики, Новосибирск; E-mail: borzov@iae.nsk.su

Виктор Иванович Козик

— канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; Институт автоматики и электрометрии СО РАН, лаборатория физико-технических проблем дистанционной диагностики, Новосибирск; E-mail: kozik@iae.nsk.su

Олег Иосифович Потатуркин

— д-р техн. наук, профессор; Институт автоматики и электрометрии СО РАН, заместитель директора по научной работе, Новосибирск; E-mail: potaturkin@iae.nsk.su

Поступила в редакцию
12.01.09 г.

А. В. ГОЛИЦЫН

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ЛОКАТОРА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предложен способ повышения эффективности лазерного локатора оптических систем. Усовершенствование заключается в дополнении активно-импульсного принципа работы автоматическим сканированием дистанции по дальности в задаваемых оператором границах и перераспределении средней энергии лазерной фары с малых расстояний (где она избыточна) на большие (где ее не хватает).

Ключевые слова: активно-импульсный, вероятность обнаружения, дальность обнаружения, лазерная фара, лазерный локатор, электронно-оптический преобразователь.

Используемые в настоящее время системы локации оптических и оптико-электронных приборов (ООЭП) зондируют пространство лазерной фарой [1—4]. Часть излучения, попадая в ООЭП, отражается в обратном направлении и может быть обнаружена. Разработанные в последнее время лазерные локаторы оптических систем (ЛЛОС) и лазерные локационные каналы многоканальных систем позволяют обнаруживать ООЭП даже в условиях яркого дневного света при освещенности до 10^5 лк [2].

Дальность и вероятность обнаружения цели лазерной системой локации определяются значением отношения сигнал/фон R , которое зависит от освещенности фона, мощности и спектрального диапазона лазерной фары, параметров фотоприемников и других конструктивных особенностей ЛЛОС. Очевидно: чем ниже освещенность фона и выше мощность фары, тем больше отношение сигнал/фон при заданном расстоянии или выше дальность обнаружения при фиксированном пороговом отношении сигнал/фон. Очевидно также, что значение R возрастает при уменьшении угловой расходимости излучения лазерной фары (за счет уменьшения скорости обзора пространства). Также понятна роль согласования спектрального диапазона приемника со спектром излучения фары, габаритного расчета и величины входного зрачка. Далее полагаются постоянными значения мощности, фиксированной угловой расходимости лазерной фары.

Наибольшее отношение сигнал/фон при дневном свете обеспечивают ЛЛОС, использующие активно-импульсный (АИ) принцип подсветки цели. АИ-принцип заключается в согласовании коротких импульсов лазерной фары со стробами открытия оптико-электронного затвора в приемном канале АИ-прибора с регулируемой временной задержкой, обеспечивающей прием отраженного излучения фары только с определенного интервала расстояний; объекты, расположенные вне заданного интервала, отсекаются [5].

При использовании АИ-принципа фон подавляется пропорционально скважности открытия оптико-электронного затвора, что позволяет повысить дальность обнаружения оптики системой локации в зависимости от освещенности фона в несколько раз. Недостатком систем, использующих АИ-принцип, является необходимость поиска цели не только по азимуту и углу места, но еще и по дальности, что повышает длительность поиска неподвижной цели — в степени размерности зондируемого пространства (3-я вместо 2-й). В классической АИ-системе ночного видения можно нивелировать этот недостаток, используя метод обнаружения тени неоптической цели на светлом фоне при установке максимальной дальности строба. В АИ-системе локации оптической цели этот метод использовать, естественно, нельзя (вследствие малоразмерности оптической цели). Принимая во внимание, что оптическая цель является подвижной, нетрудно прийти к выводу, что использование классического

АИ-принципа в локации оптической цели значительно увеличивает дальность обнаружения неподвижной цели, но резко понижает поисковые характеристики.

Для повышения скорости поиска цели можно использовать автоматическое сканирование пространства по дальности в задаваемых границах.

Полное сканирование пространства по дальности может осуществляться со скоростью поступления кадров (в приемных каналах телевизионного типа) или со скоростью восприятия глаза оператора (в приемных каналах окулярного типа) — за 20—100 мс. В первом случае интегратором сигнала является приемная матрица, во втором — сетчатка глаза или экран электронно-оптического преобразователя. При этом, задав границы сканирования в пределах ширины строба, можно получить максимальное отношение сигнал/фон (такое же, как при ручном сканировании по дальности), а задав максимальную глубину просматриваемого пространства — минимальное отношение сигнал/фон (такое же, как при наблюдении с использованием непрерывной фары аналогичной мощности). Задача оператора ЛЛОС — учитывая рельеф местности, установить границы автоматического сканирования для достижения максимального отношения сигнал/фон при обеспечении просмотра всей видимой трассы.

Для лазера со средней мощностью $P_{\text{ср}}$, при непрерывной подсветке зондируемого пространства, отношение сигнал/фон составит

$$R = \frac{P_{\text{ср}}^{1/4} K_c}{B_{\text{ф}} S_{\text{фп}} K_{\text{ф}}},$$

где K_c — коэффициент, связывающий мощность излучения, отраженного от цели, с мощностью фары; $B_{\text{ф}}$ — яркость фона; $S_{\text{фп}}$ — эффективная площадь элемента фотоприемника; $K_{\text{ф}}$ — коэффициент, связывающий облученность фотоприемника единичной площади с яркостью фона.

Аналогично для АИ-локатора со стробом дальности, захватывающим цель, имеем

$$R = \frac{P_{\text{ср}}^{1/4} K_c}{B_{\text{ф}} S_{\text{фп}} K_{\text{ф}} S},$$

где S — скважность затвора.

Наконец, для АИ-локатора с автоматически перемещаемым стробом дальности справедливо выражение

$$R = \frac{P_{\text{ср}}^{1/4} K_c}{B_{\text{ф}} S_{\text{фп}} K_{\text{ф}} S k},$$

где k — количество автоматически просматриваемых зон дальности (стробов).

Таким образом, отношение сигнал/фон для АИ ЛЛОС с ручным управлением стробом дальности будет выше в $1/S$ раз, а для АИ ЛЛОС с автоматическим управлением — в $1/Sk$ раз, чем для АИ ЛЛОС с непрерывным излучателем. В частности, для локации с частотой импульсов лазерной фары $f = 5$ кГц и длительностью открывания затвора $\tau = 333$ нс (глубина строба 100 м) отношение сигнал/фон при ручном управлении стробом будет выше, чем для локации непрерывной фарой той же мощности при прочих равных параметрах, в $1/S = 1/\tau f = 600$ раз. Для локации с автоматическим просмотром $k = 10$ зон дальности, например от 100 до 1100 м, при тех же параметрах величина R будет выше в $1/Sk = 60$ раз.

На рис. 1 приведен график зависимости отношения сигнал/фон R от глубины сканируемого пространства D в АИ ЛЛОС лазерным локатором с непрерывно излучающей фарой. Из рисунка видно, что возможно компромиссное повышение отношения сигнал/фон в условиях полного сохранения скорости поиска непрерывным излучением фары за счет автоматического сканирования в границах, обусловленных ландшафтом.

Усовершенствовать АИ ЛЛОС также возможно, повышая мощность фары на ближних дистанциях. Для больших дистанций мощность мала, для малых — избыточна. Поэтому целесообразно восполнить недостаток мощности на дальних дистанциях за счет ближних.

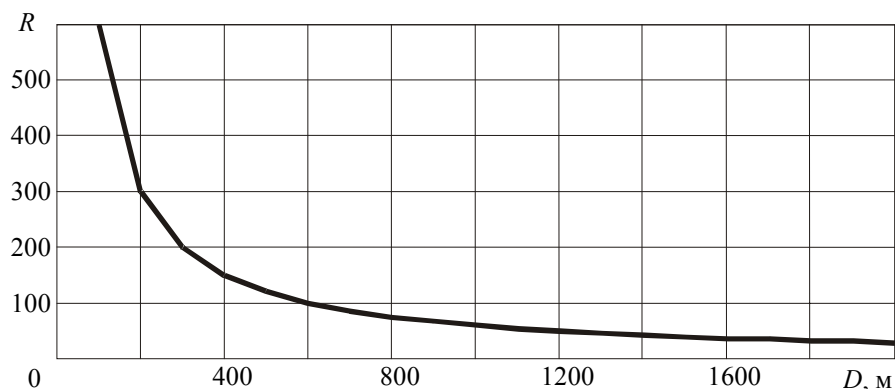


Рис. 1

Максимальная и средняя мощность лазера ограничена и не может быть увеличена без снижения его ресурса. Однако средняя мощность, выделяемая на определенную зону участка пространства, может быть изменена за счет выравнивания количества импульсов в секунду, выделяемых для данной зоны. Выделение импульса именно для данной зоны дальности заключается в задании соответствующей задержки строба открывания затвора приемника относительно импульса лазерной фары. Таким образом, не изменяя фактической мощности лазерного импульса, можно распределять среднюю воспринимаемую мощность по дальности (иными словами, распределять „внимание“ системы „фара—затвор“).

Расчеты показывают, что распределение импульсов по дальности, обеспечивающее одинаковую яркость идентичных целей на всей глубине зондируемого пространства, может либо дополнительно повысить яркость наиболее удаленных целей в 4 раза в одних и тех же границах автоматически сканируемой дальности, либо соответственно повысить дальность обнаружения в $4^{1/4} = 1,4$ раза.

Например, при частоте лазерных импульсов 5 кГц и частоте кадров приемного канала 25 Гц общее количество импульсов фары на кадр (n) составит 208. Гистограммы равномерного (1) и пропорционального 4-й степени (2) распределения импульсов по стометровым зонам дальности (L) от 100 до 2000 м, представленные на рис. 2, демонстрируют, что второй вид распределения дает выигрыш в средней энергии на максимальной дистанции в 4,6 раза. Линейное распределение при тех же условиях дает выигрыш в 1,8 раз, а квадратичное — в 2,7 раза.

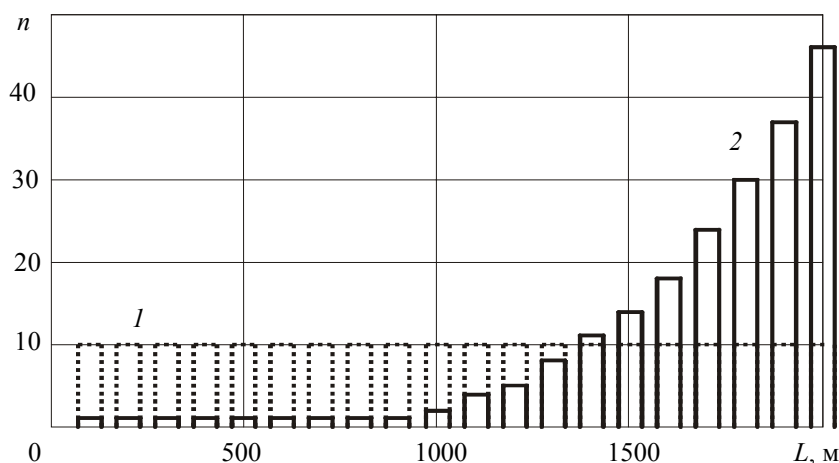


Рис. 2

Способ автоматического просмотра можно комбинировать со способом распределения профиля средней мощности фары по дальности, с умножением выигрыша.

Эффективность использования комбинации двух способов экспериментально подтверждена в двухканальном приборе наблюдения с лазерным локационным каналом [2]. Прибор имеет четыре профиля распределения энергии фары по дальности при автоматическом сканировании — равномерный, линейно возрастающий, квадратичный и пропорциональный четвертой степени.

Таким образом, существует способ компромиссного повышения дальности обнаружения оптических систем за счет использования АИ-принципа с автоматическим сканированием в заданных границах дальности и измененным профилем распределения средней мощности лазерной фары по дальности, при скорости обзора пространства, характерной для лазерных локаторов с непрерывно излучающей фарой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков В. Г. Приборы ночного видения для обнаружения бликующих элементов // Специальная техника. 2004. № 2. С. 2—9.
2. Голицын А. В., Журавлев П. В., Журов Г. Е., Корякин А. В., Чихонадских А. П., Шлишевский В. Б., Яшина Т. В. Псевдобинокулярный многоканальный прибор обнаружения // Тез. докл. совещ. „Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники (Фотоника—2008)“. Новосибирск, 2008. С. 141.
3. Патент РФ № 2239205. Устройство для обнаружения оптических и оптико-электронных приборов / А. В. Голицын, П. Г. Голубев, Ю. А. Сеницын, С. Д. Питик, Г. Н. Попов, И. Б. Южик. 2002.
4. Малогабаритная лазерная локационная аппаратура „Антиснайпер“ // Оружие и технологии России. Энциклопедия. XXI век. Оптико-электронные системы и лазерная техника. М.: Изд-во „Оружие и технологии“, 2005. Т. 11. С. 81.
5. Волков В. Г. Активно-импульсные приборы ночного видения // Специальная техника. 2002. № 3. С. 2—11.

Сведения об авторе

Андрей Вячеславович Голицын — филиал Института физики полупроводников СО РАН, Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники, заведующий отделом моделирования оптико-электронных приборов, Новосибирск; E-mail: golitsyn@oesd.ru

Поступила в редакцию
12.01.09 г.

УДК 621.397.4:681.515

В. И. КОЗИК, Е. С. НЕЖЕВЕНКО

КАЛИБРОВКА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ДАТЧИКОВ ПРИ РАСПОЛОЖЕНИИ ИЗМЕРЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ В ТРУДНОДОСТУПНЫХ МЕСТАХ

Предложен метод калибровки телевизионных датчиков технического зрения, основанный на использовании графических эталонов, помещаемых в труднодоступном месте. Разработанный метод позволяет производить калибровку без точного позиционирования эталона как по ориентации, так и по координатам.

Ключевые слова: калибровка, графические эталоны, телевизионный датчик.

Введение. Во многих случаях необходимо измерять параметры объектов, расположенных в труднодоступных местах, при отсутствии непосредственного контакта. В такой ситуации особенно эффективны телевизионные датчики, позволяющие производить измерения,

даже если, например, объект можно видеть только через иллюминатор. Однако если при этом требуется высокая точность измерений, возникает проблема с калибровкой датчика: выдержать все параметры датчика с необходимой точностью, как правило, невозможно, правильно ориентировать калибр (эталон) в труднодоступном месте также весьма затруднительно.

В качестве примера приведем установку для роста кристаллов, где измерительный прибор — телевизионный датчик диаметра растущего кристалла [1, 2]. Наблюдение производится через иллюминатор. Датчик крепится на колпаке ростовой установки и даже небольшие перекосы крепления, а также изменения оптического пути (например, из-за толщины стекла иллюминатора) приводят к недопустимым погрешностям измерения.

Калибровка широко применяется, например, в фотограмметрии [3], однако калибровка телеизмерительных средств имеет определенную специфику. В настоящей статье предложен метод калибровки, основанный на использовании графических тестов, помещаемых в труднодоступное место (в частности, внутри ростовой установки — на месте локализации мениска растущего кристалла). Разработанный метод позволяет производить калибровку без точного позиционирования эталона как по ориентации, так и по координатам. Метод обеспечивает вычисление всех коэффициентов, входящих в алгоритм вычисления размеров по двум координатам, по его телевизионному изображению.

Схема телевизионного измерения и калибровки. Калибровка требуется, если погрешности параметров датчика выше допустимой погрешности измерения. Например, при измерении диаметра выращенного кристалла требования к отклонению измеряемого значения от заданного таковы, что возможна погрешность на уровне десятых долей процента. Погрешности параметров телевизионного датчика — фокусного расстояния объектива телевизионной камеры и геометрических параметров ее установки — существенно превышают это значение.

Определим число параметров, требуемых для калибровки телевизионных измерительных средств. В случае использования в качестве фотоприемника ПЗС-матрицы координатными искажениями на фотоприемнике можно пренебречь, поскольку геометрические параметры матрицы выдерживаются с очень высокой точностью. Настоящая работа посвящена компенсации искажений, обусловленных ракурсными преобразованиями и разбросом параметров оптической системы, а также параметрами позиционирования датчика, без учета дисторсии и других геометрических искажений. В этом случае можно считать, что плоскость P_1 (плоскость изображения) линейно преобразуется в плоскость P_2 (плоскость фотоматрицы), а их взаимное положение, как известно, определяется шестью параметрами: тремя координатами точек и тремя углами Эйлера. Следовательно, необходимо иметь шесть независимых параметров для установления взаимно однозначного соответствия между точками в плоскостях P_1 и P_2 .

Для калибровки в плоскость наблюдения P_1 помещается изображение с известными геометрическими параметрами (эталон), и из его телевизионного изображения вычисляются параметры преобразования, которые затем вводятся в алгоритм обработки.

Общая схема телевизионного измерения и калибровки представлена на рис. 1. В плоскости P_1 , в которой находится объект, при калибровке помещается эталон. Его изображение объективом L проецируется в плоскость телевизионного фотоприемника P_2 . Ось оптической системы образует угол β с нормалью к плоскости P_1 . В качестве эталона выбран прямоугольник с перекрестиями (рис. 2, а).

Толщина линий эталона выбирается из тех соображений, чтобы в плоскости фотоматрицы она соответствовала размеру элемента матрицы. Это позволяет проводить квадратичную интерполяцию по трем точкам в окрестности линий с целью повышения точности определения их координат. Поскольку ось камеры не перпендикулярна плоскости наблюдения, его телевизионное изображение представляет собой трапецию, показанную в системе координат ПЗС-матрицы на рис. 2, б.

Обозначим координаты в плоскости эталона (сцены) X, Y , а в плоскости фотоматрицы — x, y . Пусть координаты пересечения левой и правой сторон эталона с осями абсцисс будут X_2, X_1 и x_2, x_1 , а верхней и нижней с осями ординат — Y_1, Y_2 и y_2, y_1 в плоскостях сцены и фотоматрицы соответственно. В идеальном случае, когда центр эталона совпадает с центром матрицы и он сориентирован по координатным осям, к указанным параметрам достаточно вычислить угол наклона боковой грани трапеции. Тогда преобразование по координате X из плоскости фотоматрицы в плоскость сцены можно представить в виде

$$X = \frac{xX_1}{x_1 + y \operatorname{tg} \alpha},$$

а по координате Y

$$Y = \frac{yk_1}{1 - yk_2},$$

где α — угол наклона боковой грани трапеции в плоскости фотоматрицы,

$$k_1 = \frac{Y_1(1 - y_1k_2)}{y_1} = \frac{Y_2(1 - y_2k_2)}{y_2}, \quad k_2 = \frac{y_2Y_1 - y_1Y_2}{y_1y_2(Y_1 + Y_2)}.$$

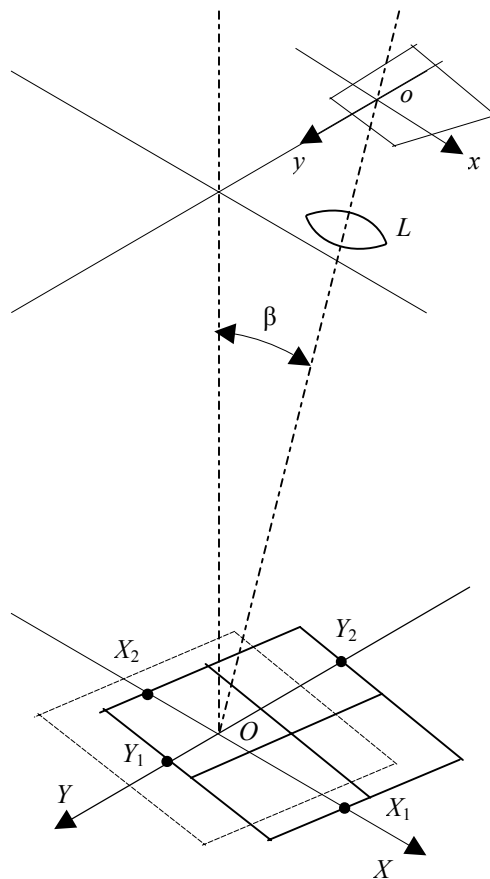


Рис. 1

Однако, учитывая, что эталон может помещаться в зоне, труднодоступной для его ориентации (например, внутри установки для роста кристаллов), алгоритм обработки должен быть таков, чтобы отклонения положения и ориентации эталона не влияли на точность калибровки. Для того чтобы не было необходимости в точном позиционировании эталона, в плоскости фотоматрицы вместо координат точек пересечения линий эталона с осями x, y , определяются координаты точек пересечения двух горизонтальных и двух вертикальных линий с линиями

эталона $(x_{l,up}, y_{up}, x_{m,up}, y_{up}, x_{r,up}, y_{up})$, $(x_{l,d}, y_d, x_{m,d}, y_d, x_{r,d}, y_d)$, $(x_{l,y_{l,m}}, x_{l,y_{l,d}}, x_{l,y_{l,m}}, x_{l,y_{l,d}})$, $(x_{r,y_{r,m}}, x_{r,y_{r,d}}, x_{r,y_{r,m}}, x_{r,y_{r,d}})$. Здесь индексы „*l*“ — левый, „*up*“ — верхний, „*m*“ — средний, „*r*“ — правый, „*d*“ — нижний (см. рис. 2, б).

По координатам точек $x_{m,up}, y_{up}, x_{m,d}, y_d, x_{l,y_{l,m}}, x_{r,y_{r,m}}$ вычисляется смещение центра эталона относительно центра матрицы (на первом этапе без учета ракурсных преобразований ввиду отсутствия калибровочных коэффициентов), по координатам пересечения вертикальных линий эталона с горизонтальными $(x_{l,y_{l,m}}, x_{l,y_{l,d}}, x_{r,y_{r,m}}, x_{r,y_{r,d}})$ определяется его наклон. Затем влияние наклона и сдвига эталона компенсируется, и вычисляются приведенные координаты y_1, y_2 и Y_1, Y_2 .

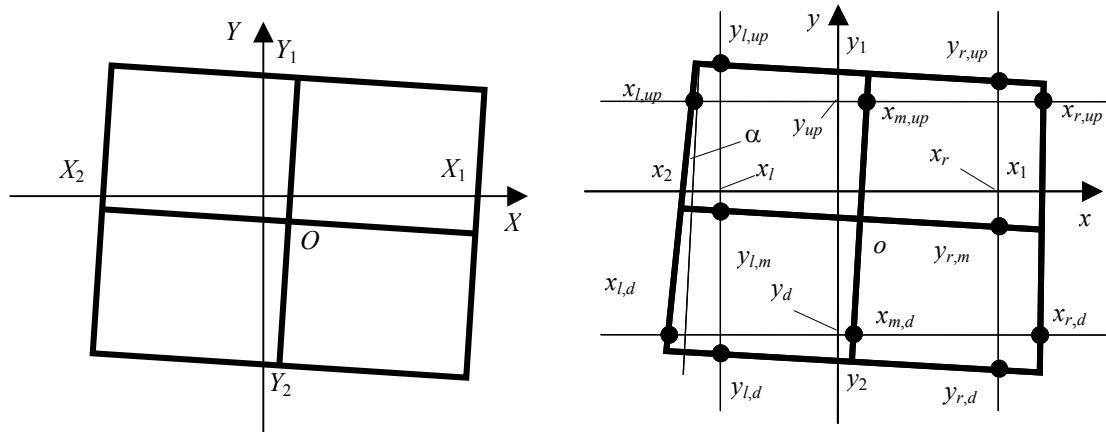


Рис. 2

Аналогичным образом по координатам пересечения горизонтальных секущих с вертикальными линиями эталона $(x_{l,up}, y_{up}, x_{m,up}, y_{up}, x_{r,up}, y_{up}, x_{l,d}, y_d, x_{m,d}, y_d, x_{r,d}, y_d)$ определяются приведенный угол наклона боковых граней трапеции в плоскости фотоматрицы α и приведенные координаты x_1, x_2 и X_1, X_2 . После этого по полученным данным вычисляются калибровочные коэффициенты k_1 и k_2 . Однако, поскольку при определении смещения центра эталона ракурсные преобразования не учитывались, далее проводится итерационная процедура по уточнению координат центра и калибровочных коэффициентов.

Программа калибровки написана на языке C++, блок-схема ее алгоритма представлена на рис. 3. При проверке „Допустимы ли значения“ сравниваются расстояния между найденными точками пересечения секущей с линиями эталона и допустимыми значениями исходя из размеров эталона и возможными масштабными преобразованиями. Если эталон развернут на слишком большой угол (в нашем случае на $\pm 10^\circ$), центральная линия эталона может пересечь секущие линии, что приведет к неверно найденным точкам, расстояние между которыми не будет удовлетворять заданным условиям. В этом случае приходит сообщение „Поверните эталон на 5° “.

Выполняется программа в том же микропроцессоре, который выполняет программу измерения. Калибровка проводится автоматически: оператор должен лишь разместить калибровочный эталон в плоскости объекта и запустить программу калибровки. По ее завершении данные калибровки передаются в алгоритм измерения. Алгоритм измерения координат точек изображения объекта в настоящей статье не описывается, поскольку он существенно зависит от характера объекта измерения. Перечислим некоторые его особенности, часто встречающиеся на практике.

1. В случае, если размер элемента ПЗС-матрицы больше допустимой погрешности измерения, необходимо вводить в алгоритм субпиксельность, например, посредством интерполяции сигнала.

2. Часто по той или иной причине изображения краев объекта измерения оказываются малококонтрастными. В этом случае необходима цифровая обработка изображения объекта (оконтуривание, выравнивание контраста и т. д.).

3. Если в поле наблюдения присутствуют другие объекты (например, датчик диаметра растущего кристалла „видит“ и ростовые кольца, похожие на измеряемый объект — мениск), перед измерением требуется предварительно проводить процедуру распознавания.

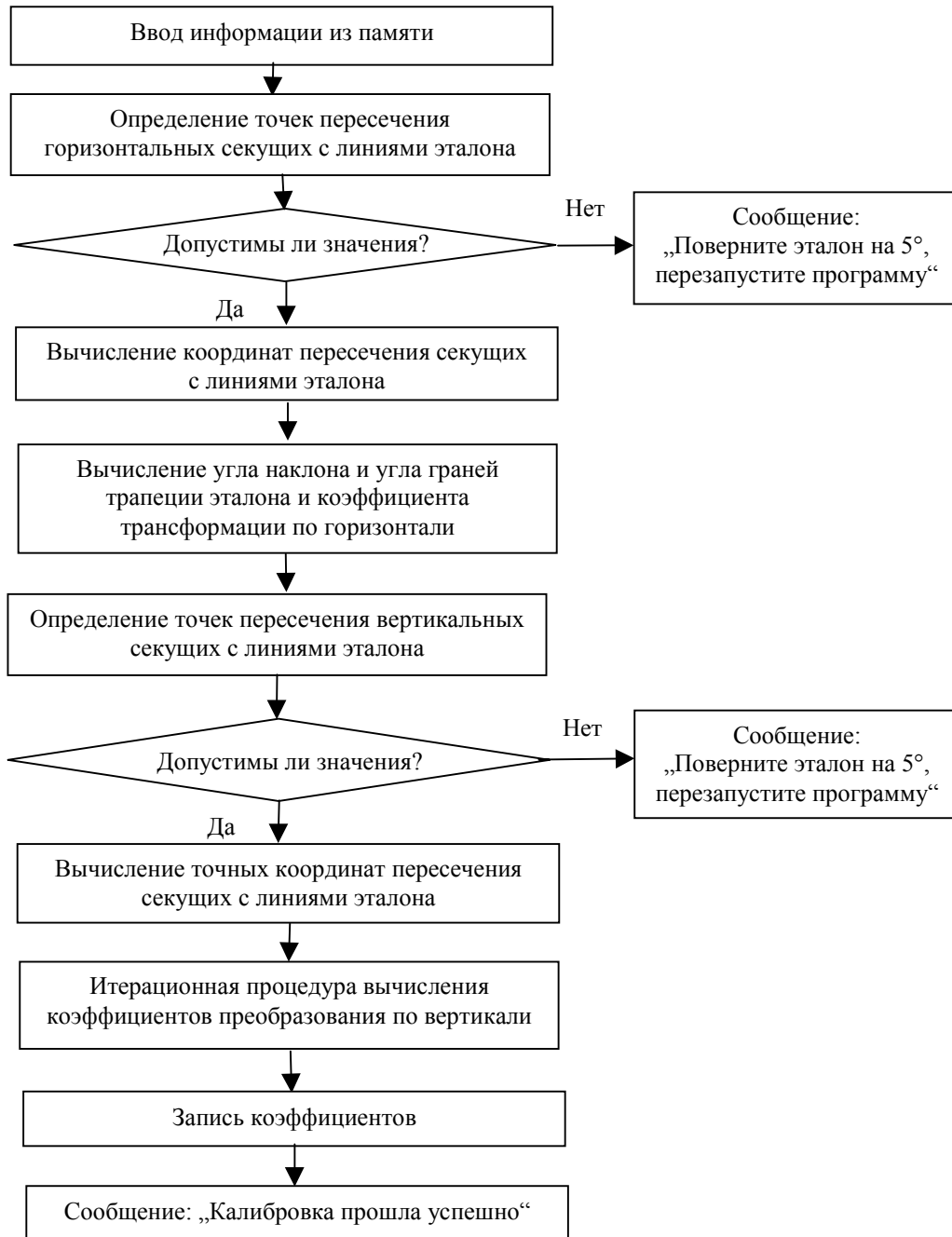


Рис. 3

Экспериментальные результаты. Эффективность предложенного метода калибровки оценивалась путем метрологического исследования откалиброванного по предложенному методу датчика в режиме измерения диаметра тестовых объектов, представляющих собой кольцо (при малом диаметре — круги), начерченные на лавсановой подложке. Диаметр тестовых объектов от 5 до 200 мм. Изображения „рисовались“ на двухкоординатном плоттере, после чего их диаметр измерялся на инструментальном микроскопе. Использовалась фотоматрица размерностью 576×640 элементов. Размер элемента, приведенный к объектной плоскости, составлял 0,12×0,18 мм для объектов диаметром до 25 мм и 0,4×0,6 мм — для объектов диаметром более 25 мм (применялись объективы с разными фокусными расстояниями).

Тестовые объекты помещались в плоскость объекта измерения, в процессе эксперимента их центры смещались на допустимое значение сдвига объекта в плоскости P_1 . Результаты метрологических испытаний представлены в таблице.

Диаметр объекта, мм	Измеренный диаметр, мм			Максимальное отклонение, мм
	без смещения	смещение по оси X	смещение по оси Y	
5,12	5,10—5,14	5,09—5,13	5,08—5,14	-0,04—+0,02
10,12	10,09—10,15	10,08—10,15	10,08—10,16	-0,04—+0,04
20,13	20,11—20,17	20,08—20,15	20,08—20,17	-0,05—+0,04
49,71	49,66—49,76	49,61—49,77	49,65—49,76	-0,10—+0,06
99,90	99,87—99,92	99,87—100,01	99,92—100,02	-0,03—+0,12
149,37	149,33—149,41	149,35—149,47	149,30—149,40	-0,07—+0,10
198,70	198,57—198,61	198,58—198,77	198,67—198,85	-0,13—+0,15

В первом столбце приведены значения диаметра тестовых объектов, измеренные с помощью микроскопа, далее представлены показания датчика при смещении центра теста ± 20 мм по двум координатам в поле наблюдения. Из таблицы видно, что максимальная погрешность не превышает $\pm 0,05$ мм для объектов диаметром до 25 мм и $\pm 0,15$ мм — для объектов диаметром более 25 мм.

Заключение. Разработан метод калибровки телевизионных датчиков технического зрения, основанный на обработке эталонного изображения, с помощью которого можно компенсировать ракурсные преобразования, а также погрешности фокусного расстояния объектива и расстояния до измеряемого объекта. При этом нет необходимости точно позиционировать эталон. Экспериментальные результаты, полученные на стенде, показали, что предложенный метод калибровки обеспечивает высокую точность последующего измерения (причем за счет введения субпиксельности погрешность измерения меньше размера элемента используемой ПЗС-матрицы), а апробация его на установке для роста кристаллов показала, что он действительно весьма эффективен в случае, если эталон располагается в труднодоступном месте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kozik V. I., Nezhevenko E. S. Monitoring of monocrystal diameter in growing vessel // Proc. IASTED Int. Conf. on Automation, Control and Information Technology — ACIT'2005. Novosibirsk, 2005. P. 59—62.
2. Kozik V. I., Nezhevenko E. S. Measuring silicon monocrystal diameters during melt growth // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2008. Vol. 44, N 5. P. 392—402.
3. Manual of Photogrammetry / Ed. by M. M. Thomson. Speert American Society of Photogrammetry, 1970.

Сведения об авторах

Виктор Иванович Козик

— канд. техн. наук; Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, лаборатория физико-технических проблем дистанционной диагностики, Новосибирск; E-mail: kozik@iae.nsk.su

Евгений Семенович Нежевенко

— д-р техн. наук; Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, лаборатория физико-технических проблем дистанционной диагностики, Новосибирск; E-mail: nejevenko@iae.nsk.su

Поступила в редакцию
12.01.09 г.

А. В. ГОЛИЦЫН, П. В. ЖУРАВЛЕВ, Г. Е. ЖУРОВ, А. В. КОРЯКИН,
А. П. ЧИХОНАДСКИХ, В. Б. ШЛИШЕВСКИЙ, Т. В. ЯШИНА

ПСЕВДОБИНОКУЛЯРНЫЙ ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ПРИБОР ОБНАРУЖЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ УГРОЗ

Представлен двухспектральный прибор обнаружения потенциальных угроз для подвижных дозорных войсковых групп и спецподразделений силовых структур. Прибор содержит тепловизионный и лазерный локационный каналы.

Ключевые слова: тепловизионный, микроболометрический, многоканальный, электронно-оптический преобразователь, активно-импульсный, суперпохромат, реконфигурируемая система высокой производительности, слияние изображений, обработка изображений.

В последние десятилетия интенсивное развитие получили многоканальные (многоспектральные) оптико-электронные приборы (МОЭП) [1, 2], в которых объединение и одновременное использование нескольких спектральных каналов позволяет с большей вероятностью (и достоверностью) обнаруживать и распознавать цели различного характера, в том числе тщательно замаскированные и закамуфлированные. Однако в силу необходимости удовлетворения целому ряду противоречивых требований — повышение дальности обнаружения, увеличение вероятности опознавания и идентификации целей при снижении массогабаритных параметров — в каждом из отдельных каналов МОЭП обычно не реализуются предельные значения, достижимые в существующих узкоспециализированных приборах. Так, любая комбинация двух каналов в одном МОЭП имеет следствием увеличение его массогабаритных характеристик по сравнению с обычным одноканальным вариантом. С другой стороны, при создании МОЭП (прежде всего, с небольшой массой) в рамках массогабаритных характеристик одного канала включение второго канала неизбежно приводит к уменьшению либо оптической апертуры каналов, либо фокусных расстояний приемных объективов, что влечет за собой снижение дальности наблюдения в каждом отдельном канале. В этих условиях основная нагрузка по повышению качества изображения МОЭП ложится на систему интегрирования изображений всех каналов.

В настоящей статье описывается двухспектральный прибор [3], предназначенный для подвижных дозорных войсковых групп и спецподразделений силовых структур и позволяющий им обнаруживать людей и технику (в том числе возможные засады, проявления нежелательной активности и другие потенциальные угрозы) на маршруте в любое время суток до приближения на расстояние эффективного поражения стрелковым оружием.

Прибор содержит тепловизионный канал (ТпВК) на базе неохлаждаемой 384×288-матрицы микроболометров с шагом 35 мкм и лазерный локационный канал (ЛЛК) на основе электронно-оптического преобразователя (ЭОП), сопряженного с ПЗС-матрицей формата 756×582 элементов (с шагом 8,6×8,3 мкм) посредством проекционной оптической системы. Назначение ТпВК, работающего в спектральной области 8—12 мкм, — обнаружение живых объектов и транспортной техники. ЛЛК, оснащенный лазерной импульсной фарой, синхронизированной с ЭОП, в активном режиме решает задачу обнаружения оптико-электронных средств, а в пассивном — дает телевизионное изображение объектов наблюдения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра.

Для вывода изображения использован псевдобинокулярный микродисплей на двух цветных матрицах органических диодов формата 800×600 элементов с оптической системой

типа „виртуальный сферический экран“ [4], которая снимает необходимость регулировки межзрачкового расстояния и диоптрийной подстройки, упрощая тем самым конструкцию и снижая массу выходного блока без потери его функциональности и герметичности. При этом каждый канал представляется отдельным цветом, который может задаваться оператором (красный, зеленый, синий), что в значительной степени помогает ослабить взаимные помехи каналов. Значения общей и относительной яркости каналов регулируются. Изображение в каналах может быть представлено и в черно-белой палитре, в которой различимо больше оттенков.

Кроме изображения на микродисплей выводится служебная информация, отображающая в процессе работы текущее состояние и настройки каналов, а в процессе подготовки к работе — вспомогательную информацию, позволяющую осуществить тонкую выверку каналов по вертикали и горизонтали, горизонтальное масштабирование, калибровку измеряемой дальности, цветовую палитру и относительные значения яркости каждого из каналов. Микродисплей на двух матрицах является достаточно энергозатратным блоком (2 Вт), что, однако, компенсируется высокой яркостью изображения и малой массой — не более 200 г.

Изображение также может выводиться на внешний стандартный дисплей формата VESA SVGA или на компьютер через порт Ethernet.

Внешний вид прибора показан на рис. 1. Его штатное рабочее положение — на треноге, однако сравнительно небольшая масса (5 кг) допускает возможность работы „с рук“ в течение, как минимум, 15 мин. Общее энергопотребление не превышает 8 Вт; длительность непрерывной работы от аккумулятора — до 4 ч.



Рис. 1

Основные проблемы, которые пришлось решать в процессе разработки прибора, были связаны с необходимостью обеспечения единого масштаба изображений каналов (с учетом технологических допусков и температурного диапазона применения), высоких поисковых характеристик ЛЛК и устойчивости его работы в условиях яркой дневной освещенности (до 10^5 лк), широкого спектрального диапазона работы объектива (0,45—0,85 мкм) и малого энергопотребления при использовании микродисплеев и процессоров обработки и слияния изображений.

Для удержания сигнала в пределах входного диапазона 14-разрядного аналого-цифрового преобразователя при отказе от температурной стабилизации микроболометрической матрицы встроенным термоэлектрическим регулятором (вызывающим расход энергии при низких температурах около 10 Вт) был разработан метод балансировки сигнала с помощью регулировки напряжений смещения на матрице на основании анализа его частотных гистограмм, выполняемого в процессоре изображения. Применение метода обеспечило малое энергопотребление ТпВК (в пределах 1,5 Вт) при сохранении высокой температурной чувствительности — до 0,08 К.

При использовании объектива, имеющего фокусное расстояние $f = 80$ мм и относительное отверстие 1:1, дальность опознавания ростовой фигуры человека в ТпВК составляет 650 м, а дальность обнаружения движущихся транспортных средств — более 5 км (в пределах видимости).

Масса отдельно взятого ТпВК равна ≈ 1200 г, в том числе объектива ≈ 800 г (микроболометрические матрицы с шагом 20—25 мкм, позволяющие снизить массу объектива примерно вдвое при той же дальности действия, на момент разработки не были доступны).

Процессор изображений ТпВК построен с использованием перспективных принципов реконфигурируемых систем высокой производительности (High Performance Reconfigurable

Computing — HPRC). Ресурсозатратная параллельная обработка видеопотока ведется в программируемой логической интегральной схеме, а анализ сигнала — в сигнальном процессоре. За счет обработки изображения в высокопроизводительном процессоре ТпВК не требует каких-либо настроек, кроме регулировки яркости относительно ЛЛК и вывода служебной информации на экран микродисплея.

На рис. 2 приведена принципиальная оптическая схема ЛЛК. Зондирование пространства производится лазерной фарой ближнего инфракрасного диапазона. Оптические и оптико-электронные средства, попадающие в зондируемую зону, дают отклик (за счет переотражения), который четко виден на естественном фоне, имеющем диффузный характер отражения излучения фары. Изображение с экрана ЭОП переносится на ПЗС-матрицу проекционной системой с линейным увеличением $-0,446\times$ и относительным отверстием 1:1,6. Увеличение может регулироваться в пределах $\pm 10\%$ при сохранении расчетного диаметра пятна рассеяния (4 мкм) менее шага микроканалов ЭОП (7 мкм). В канале предусмотрена возможность управления мощностью лазерной фары, задания диапазона просматриваемых дальностей в автоматическом режиме сканирования по глубине пространства, установки протяженности и положения строба дальности в ручном режиме, а также переключения режимов работы.

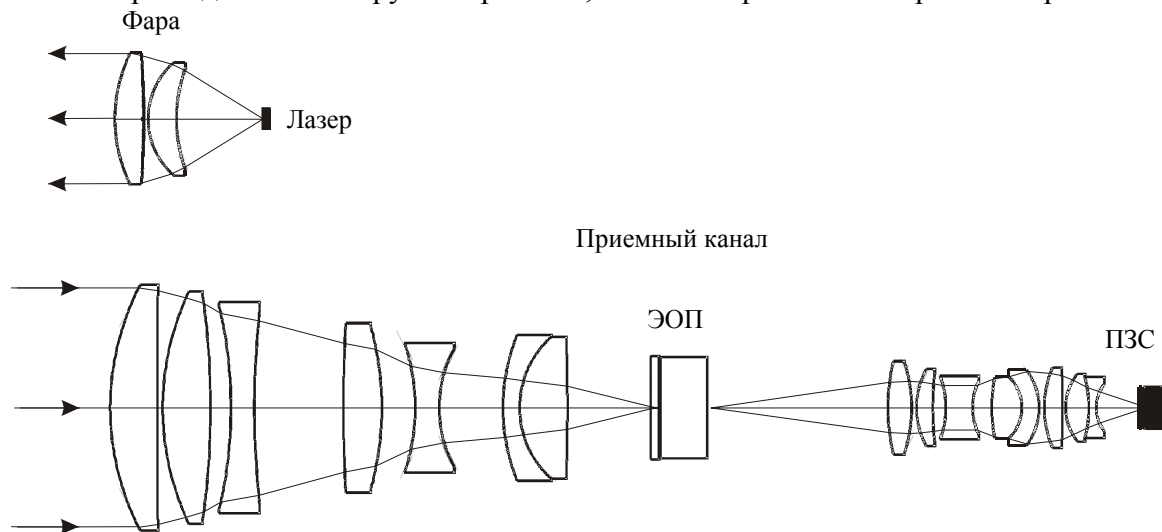


Рис. 2

Поскольку в дневное время суток отношение сигнал/фон на требуемых значениях дальности снижается на несколько порядков (диапазон рабочих освещенностей составляет от 0 до 10^5 лк, а освещенностей, на которых различаются цель и фон, — от 10^{-4} до 10^5 лк), для поддержания необходимого уровня превышения сигнала был разработан модифицированный активно-импульсный принцип, позволяющий существенно подавить фон. Обычно классический активно-импульсный прибор ночного видения (ПНВ) имеет узкое поле подсвета — до 1° , а также ручную регулировку положения строба дальности [1]. Такая комбинация предопределяет его крайне низкие поисковые возможности, особенно если иметь в виду, что в момент попадания обнаруживаемого объекта одновременно в поле подсвета и строб дальности объект решает собственные задачи и не обязательно обращен в сторону локатора. Предложенная и использованная здесь модификация активно-импульсного принципа заключается в автоматическом сканировании строба по всему диапазону значений дальности за время каждого кадра ЛЛК. Оператор может выбрать один из четырех профилей распределения средней мощности фары по глубине сканирования, что существенно повышает дальность обнаружения при сохранении высоких поисковых характеристик. Более подробно этот вопрос рассмотрен в отдельной статье настоящего тематического выпуска.

ЭОП (на базе серийного вакуумного блока ЭПМ44Г-А) оснащен специально спроектированным импульсным источником питания, стробирующим его с частотой 5 кГц и длительностью

переднего и заднего фронтов 50 и 25 нс соответственно, что обеспечивает одновременно как круглосуточный активно-импульсный режим работы ЛЛК, так и возможность его пассивной работы днем или в присутствии ярких световых помех в поле зрения.

Следует отметить, что в данном случае ЭОП выполняет, прежде всего, роль затвора, повышающего отношение сигнал/фон, поскольку дальность обнаружения цели в канале ограничена не собственным шумом приемника, а низким значением отношения сигнал/фон в светлое время суток. Расчеты дальности действия демонстрируют достаточный уровень чувствительности ПЗС-матрицы для обнаружения обратно отраженного излучения в отсутствие солнечной засветки. Функция отображения фоновой обстановки, для которой в темное время суток необходим именно ЭОП, является вторичной и может быть возложена на ТпВК.

Для решения задачи отображения четкого точечного отклика бликующего объекта в интервале значений длины волны 0,83—0,85 мкм через оптическую систему, которую оператор может фокусировать, наблюдая обстановку только в видимом диапазоне спектра, был разработан специальный широкоспектральный линзовый объектив-суперапохромат с исправленным хроматизмом положения для четырех длин волн. Объектив имеет фокусное расстояние $f = 85$ мм, относительное отверстие 1:2 и размер абберационного пятна рассеяния в диапазоне значений длины волны 0,48—0,85 мкм менее 4 мкм по всей площади фотокатода ЭОП, что почти соответствует дифракционному пределу и значительно меньше шага микроканалов ЭОП (7 мкм). Такие параметры позволяют полностью реализовать рабочий спектральный диапазон ЭОП поколения 2⁺ без применения каких-либо дополнительных отрезающих фильтров.

Бликующие объекты обнаруживаются с помощью ЛЛК на расстоянии от 50 до 2000 м. В частности, дневной телескопический снайперский прицел ПСО-1 уверенно обнаруживается на расстоянии 1 км при освещенности до 1000 лк. Заметим, что, как и у аналогичных систем, с уменьшением освещенности дальность действия ЛЛК возрастает.

При создании любого МОЭП с совмещенным изображением каналов в едином информационном поле всегда возникают серьезные проблемы, связанные с взаимными помехами изображений, потерей разрешения при слиянии разнородных дискретных растров, а также технологическими и эксплуатационными неточностями элементов каналов. В МОЭП с небольшой массой возникают дополнительные трудности — совмещение должно производиться в реальном масштабе времени, не должно быть затратным по вычислительным ресурсам (из-за ограничений по весу и энергопотреблению), а результат должен выводиться на малоформатный дисплей, что исключает возможность некрatного электронного масштабирования каналов без потери пространственного разрешения. Поэтому достаточно хорошо проработанные способы совмещения разнородных изображений различных каналов [5—7], действенные при неограниченных временных и вычислительных ресурсах, оказываются практически непригодными для компактных приборов с малым энергопотреблением.

Не касаясь здесь всех подробностей [8], укажем только, что в нашем случае проблема была решена за счет точного оптического масштабирования изображения ТпВК по отношению к изображению ЛЛК по вертикали в пропорции 1:2 с использованием проекционной системы между ЭОП и ПЗС-матрицей в качестве компенсатора технологических отклонений, а также дополнительным масштабированием изображения ТпВК по горизонтали во fusion-процессоре в пределах 1/20—1/30, не приводящим к потере разрешения. Тем самым было учтено и различие в отношении размеров элементов матриц по вертикали и горизонтали (1:1 — в микроболометрической матрице и 1,036:1 — в ПЗС-матрице).

На рис. 3 представлена функциональная схема управления и обработки данных. Fusion-процессор реализован на принципах HPRC и работает под управлением операционной системы реального времени вытесняющего типа для микроконтроллеров scmRTOS [9, 10]. Помимо решения задач обработки изображений он осуществляет управление каналами, синтез цифро-

алфавитной служебной информации и взаимодействие с Ethernet-каналом передачи данных на дополнительный внешний компьютер, а также обеспечивает интерфейс с двумя джойстиками и шестью кнопками управления. Энергопотребление процессора составляет 1 Вт.

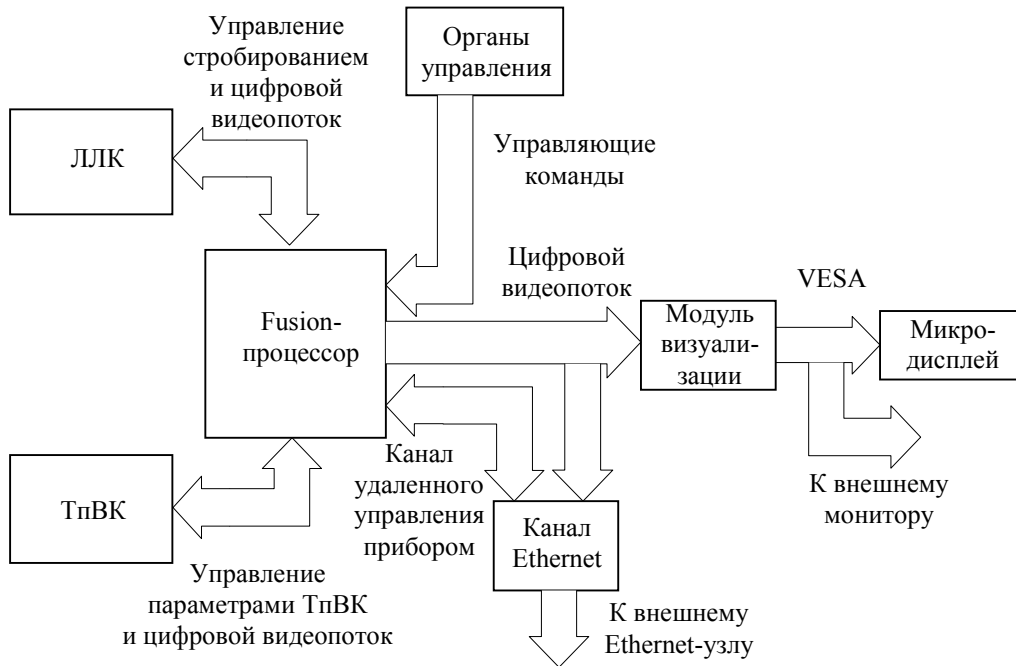


Рис. 3

На рис. 4 показана модификация прибора с приводом, работающим по командам, поступающим от внешнего компьютера. Компьютер принимает изображение и служебную информацию по встроенному каналу Ethernet и может осуществлять управление по интерфейсу RS432. Программное обеспечение поддерживает ручное и автоматическое управление приводом, а также автоматическое обнаружение тепловых и бликующих целей по настраиваемым оператором критериям с выработкой звуковых и графических сигналов при обнаружении цели.



Рис. 4

Полевые испытания опытных образцов, проведенные в разных климатических зонах (Сибирь и Северо-Западный регион), при различной освещенности (день, сумерки, ночь) и в различных метеоусловиях (теплая и прохладная ясная безоблачная погода, морозящий дождь, туман, снег), подтвердили надежность и устойчивость совместного отображения различных

каналов, представленных разными цветами, без взаимного зашумления, но при некоторой потере числа воспринимаемых градаций яркости по сравнению с черно-белым изображением.

На рис. 5 приведен характерный пример получаемых изображений: *а* — изображение в ТпВК, *б* — изображение в ЛЛК (блик от обнаруженного объекта — в центре), *в* — совмещенное изображение. В поле зрения ТпВК достаточно хорошо просматриваются рельеф и детали ландшафта местности, но совершенно не заметно замаскированное оптико-электронное устройство наблюдения. В поле зрения ЛЛК, наоборот, отчетливо виден яркий блик от этого устройства. Тот же блик, хотя и с несколько меньшим контрастом, присутствует в совмещенном изображении. Еще раз подчеркнем, что на микродисплее изображения из обоих каналов и служебная информация представлены разными цветами, и лишь черно-белый формат иллюстраций не позволяет показать совмещенное изображение в цветовой палитре.



Рис. 5

В ходе испытаний образцы безотказно и оперативно обеспечивали все предусмотренные установки: наблюдательного канала (ТпВК, ЛЛК или обоих одновременно), цвета и яркости каждого канала, режима работы лазерного осветителя (непрерывного или импульсного), уровня мощности его излучения, режима стробирования (ручного или автоматического), положения передней границы строба дальности, шага строба дальности в пределах от 3 до 300 м (с дискретностью 3 м) и его глубины (15, 100 или 300 м).

В целом полевые испытания и опытная эксплуатация приборов продемонстрировали хорошее соответствие их основных технико-эксплуатационных характеристик проектным, а главное — способность эффективно решать задачи круглосуточного наблюдения и поиска людей, животных, транспорта, оптических и оптико-электронных средств наблюдения и при-

целивания. Все это оказалось возможным, в первую очередь, благодаря разработанным и использованным новым принципиальным и техническим решениям, таким как:

- способ сохранения высокой чувствительности микроболометрической матрицы без термоэлектрической стабилизации ее температуры,
- способ совмещения изображений разноспектральных каналов, комбинирующий оптический габаритный расчет с электронным масштабированием,
- модифицированный активно-импульсный режим с автоматическим сканированием дальности и регулируемым профилем распределения энергии лазера по глубине сканирования,
- широкоспектральный линзовый объектив-суперапохромат с относительным отверстием 1:2,
- специализированный параллельный процессор изображений с использованием принципов HPRC.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешин Б. С., Бондаренко А. В., Волков В. Г., Драб Э. С., Цибулькин Л. М. Оптические приборы наблюдения, обработки и распознавания объектов в сложных условиях. М.: Гос. НИИ авиационных систем, 1999. 139 с.
2. Журавлев П. В. Разработка оптико-электронных приборов для дистанционного контроля объектов специального назначения и природной среды. Автореф. докт. дисс. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 35 с.
3. Голицын А. В., Журавлев П. В., Журов Г. Е., Корякин А. В., Чихонадских А. П., Шлишевский В. Б., Яшина Т. В. Псевдобинокулярный многоканальный прибор обнаружения // Тез. докл. Совещ. „Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники (Фотоника—2008)“. Новосибирск, 2008. С. 141.
4. Ковалев А. М. О способе отображения объектов в сферической перспективе // Автометрия. 2000. № 4. С. 76.
5. Hall D. L., Llinas J. Handbook of multisensor data fusion. CRC Press LLC, 2001. 537 p.
6. Павлов Н. И., Ясинский Г. И. Малогабаритный оптико-электронный сканирующий прибор для аэросъемки в видимом и инфракрасном диапазонах // Оптич. журнал. 2003. Т. 70, № 4. С. 11—14.
7. Иванов Е. Л., Смагин М. С. Слияние изображений в многоканальной системе наблюдения местности // Датчики и системы. 2006. № 11. С. 6—12.
8. Войтов В. А., Голицын А. В., Дегтярев Е. В., Журавлев П. В., Журов Г. Е., Шлишевский В. Б. Способ формирования единого информационного поля в приборе наблюдения // Тез. докл. Совещ. „Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники (Фотоника—2008)“. Новосибирск, 2008. С. 140.
9. Журов Г. Е. Операционная система реального времени. [Электронный ресурс]: <http://scmrtos.sourceforge.net/old/files/Doc/scmRTOS_v2.pdf>.
10. [Электронный ресурс]: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Операционная_система_реального_времени>.

Сведения об авторах

- Андрей Вячеславович Голицын** — филиал Института физики полупроводников СО РАН, Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники, заведующий отделом моделирования оптико-электронных приборов, Новосибирск; E-mail: golitsyn@oesd.ru
- Петр Васильевич Журавлев** — филиал Института физики полупроводников СО РАН, Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники, Новосибирск
- Гарри Евгеньевич Журов** — филиал Института физики полупроводников СО РАН, Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники, Новосибирск; заведующий сектором отдела электронных систем и испытаний
- Александр Викторович Корякин** — д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник; Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем, Санкт-Петербург; E-mail: koral_spb@email.ru
- Александр Павлович Чихонадских** — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем, Санкт-Петербург; E-mail: spchih@mail.ru

- Виктор Брунович Шлишевский** — д-р техн. наук, профессор; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра фотограмметрии и дистанционного зондирования, Новосибирск; E-mail: svb_dom@ngs.ru
- Татьяна Владимировна Яшина** — филиал Института физики полупроводников СО РАН, Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники, Новосибирск; ведущий инженер-конструктор отдела конструирования опико-электронных приборов

Поступила в редакцию
12.01.09 г.

УДК 681.7.014

Н. Н. Мордвин, Г. Н. Попов

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ НАБЛЮДЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Представлена концепция построения опико-электронных приборов наблюдения универсального назначения. Обоснован состав каналов перспективной многоканальной опико-электронной системы (ОЭС). Рассматривается возможность работы системы в дневных и ночных условиях, а также сложных погодных условиях и при наличии помех. Затронуты вопросы повышения информативности работы ОЭС, получаемого изображения и, в частности, обнаружения замаскированных объектов.

Ключевые слова: многоканальные опико-электронные приборы, сложные условия, состав каналов, повышение информативности, обнаружение замаскированных целей.

Введение. Потребность вооруженных сил в современных опико-электронных средствах разведки и наблюдения высока и особенно остро она ощущается в приборах, позволяющих вести разведку как днем, так и ночью. Наиболее эффективны для ведения круглосуточной разведки многоканальные опико-электронные системы (МОЭС). Каждый канал МОЭС работает в собственном спектральном диапазоне и имеет ограничения по информативности, накладываемые внешними условиями: уровнем освещенности, влажностью воздуха, задымленностью атмосферы и т. д. Однако в целом расширение общего спектрального диапазона и синтез изображений, полученных в различных спектральных оптических диапазонах, существенно повышают информативность получаемых разведданных, что позволяет вести непрерывное наблюдение даже в сложных условиях.

К приоритетным направлениям совершенствования вооружения относится развитие интегрированных систем и средств разведки. Опыт боевых действий в Персидском заливе, Югославии и на Северном Кавказе показал, что в военном противоборстве одерживает верх та сторона, средства поражения которой быстрее реагируют на проявление активности противника. Минимизировать время реакции современных средств поражения можно только путем их комплексирования со средствами разведки.

ОЭС наиболее полно отвечают указанным требованиям и являются в настоящее время наиболее динамично развивающимся направлением военной техники, оставаясь одним из основных средств артиллерийской и общевойсковой разведки.

Развитие оптико-электронных приборов (ОЭП) военного назначения привело к созданию комплексных систем разведки, в которых применяются приборы, основанные на использовании различных физических принципов — приборы ночного видения, приборы с телевизионными (ТВ), тепловизионными (ТпВ) и лазерными каналами. Основной предпосылкой комплексирования ОЭП является различное воздействие факторов естественного и искусственного происхождения на различные каналы получения видеоинформации, поскольку каждый из упомянутых каналов, взятый в отдельности, не в состоянии удовлетворять возросшим техническим требованиям в условиях плохой видимости, тщательной маскировки целей, активного применения средств радиоэлектронного противодействия.

При комплексировании ОЭП эффективность системы по дальности обнаружения целей оказывается выше эффективности каждого из каналов. При этом комплексирование происходит не только на основе конструктивно-технического объединения различных каналов, но и на основе частичного совмещения оптических осей, совместной обработки информации с целью ее одновременного представления на общем дисплее в виде единого изображения.

В комбинированных системах механически объединены оптико-электронные каналы, регистрирующие физически независимые устойчивые отличительные признаки целей и фона. Объединение происходит по конструктивно-техническому принципу, без совместной обработки информации. Представление информации обеспечивается отдельными дисплеями или одним дисплеем, снабженным переключателем каналов. Эффективность комплекса не уступает эффективности оптимального для данных условий канала. Создание комбинированных систем является первым этапом интеграции ОЭП.

Обоснование состава каналов многоканальных ОЭС. На эффективность применения ОЭС основное влияние оказывают три фактора: параметры атмосферы, освещенность местности, параметры фоноцелевой обстановки.

Параметры атмосферы и освещенность в основном определяют значения дальности работы ОЭС. Параметры цели определяют как дальность обнаружения, так и информативность разведки. В ТпВ-диапазоне (с длиной волны излучения свыше 3 мкм) температурный контраст цели с фоном оказывает особое влияние на дальность работы оптико-электронных средств.

Параметры атмосферы. Хорошо известно [1—3], что максимальная эффективность работы ОЭС достигается только в „окнах“ прозрачности атмосферы. При этом в различных участках спектра основные потери, связанные с поглощением излучения толщей атмосферы вдоль трассы наблюдения, определяются различными составами газовых сред и примесей. Так, если в диапазоне 1—2 мкм коэффициент пропускания определяется, главным образом, величиной концентрации углекислого газа (CO_2), то в диапазонах 3—5 и 8—12 мкм основные потери происходят из-за поглощения излучения водяными парами (H_2O), концентрация остальных примесей влияет меньше.

Стоит отметить, что использование рабочего ТпВ-диапазона 8—12 мкм более эффективно при задымлении поля боя, чем диапазона 3—5 мкм, который более эффективен при повышенной влажности, в том числе за счет более высоких температурных контрастов.

Таким образом, при различных соотношениях концентраций газов и паров воды в атмосфере эффективность ОЭС различного диапазона будет различаться.

Фактором, ограничивающим дальность действия ОЭС, являются также потери на рассеянии излучения на частицах и молекулах [2, 3]. Наиболее критичным к молекулярному и аэрозольному рассеянию (рассеянию на частицах) является ультрафиолетовый (УФ) диапазон работы ОЭС, наименее критичным — длинноволновый ТпВ-диапазон (8—14 мкм).

Рассеяние и поглощение в атмосфере определяют метеорологическую дальность видимости — основной параметр, использующийся при оценке дальности действия ОЭС.

Комплексирование ОЭС, работающих в разных участках спектра, позволяет вести стабильную (устойчивую) разведку при различных состояниях прозрачности атмосферы.

Освещенность объекта фоновым излучением. Освещенность объекта излучением атмосферы определяет уровень интенсивности отраженного излучения от объекта, фиксируемого ОЭС. Уровень освещенности определяет эффективность работы ОЭС УФ-, видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов (УВИ-область спектра) [2].

Так, ОЭС, работающие в видимой части спектра с использованием ТВ-камер, а также ОЭС УФ-диапазона спектра эффективны при достаточно больших уровнях освещенности начиная от 10—50 лк и заканчивая десятками тысяч люкс. При этом для ОЭС УФ-диапазона спектра более предпочтительно прямое солнечное облучение объекта.

Для ОЭС ближнего ИК-диапазона на основе электронно-оптических преобразователей минимальный уровень рабочей освещенности составляет 10^{-3} — 10^{-4} лк, что существенно расширяет диапазон их применения.

Эффективность работы ОЭС ТпВ-диапазона не зависит от освещенности на местности, так как определяющую роль в данном случае играет собственное тепловое излучение объекта и фона. Таким образом, ОЭС ТпВ-диапазона обладают возможностью круглосуточной работы, но более низкой информативностью, чем ОЭС видимого и ближнего ИК-диапазонов. Поэтому комплексирование ОЭС различных спектральных диапазонов позволяет добиться непрерывного круглосуточного ведения разведки.

Параметры фоноцелевой обстановки. Одним из основных параметров фоноцелевой обстановки можно считать контраст между объектом разведки и подстилающим фоном.

Для ОЭС УВИ-области спектра контраст определяется различием коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) объектов и фонов. В условиях одной и той же фоноцелевой обстановки ОЭС различного диапазона показывают различную эффективность. Объекты разведки при смене рабочего спектрального диапазона ОЭС изменяют величину контраста с фоном вплоть до смены знака. В различных фоноцелевых условиях преимущества имеют ОЭС различных спектральных диапазонов.

Для ОЭС ТпВ-диапазона контраст (температурный контраст) определяется разностью температуры объекта и фона. Для диапазона 3—5 мкм температурный контраст между объектами и фоном выше, и в соответствии с законом Планка более отчетливо видны тела с большой температурой. В диапазоне 8—14 мкм более информативна подстилающая поверхность местности [1]. Следовательно, одновременное использование обоих диапазонов будет увеличивать вероятность правильного обнаружения целей по сравнению со случаем использования одного канала.

Таким образом, задача обеспечения круглосуточности и всепогодности боевого применения ОЭС разведки в широком диапазоне внешних условий наиболее эффективно решается путем комплексирования данных, полученных в различных спектральных диапазонах работы ОЭС.

Повышение информативности ОЭС. Задача повышения информативности ОЭС решается путем синтеза изображения нескольких оптико-электронных каналов. Изображение, поступающее от каждого из каналов, работающих в своем спектральном диапазоне, обладает индивидуальными особенностями и характерными признаками.

Характерными отличительными признаками ОЭС УВИ-области спектра являются различные значения контраста объекта и фона, которые зависят от облученности объекта и коэффициента спектральной яркости объекта и фона в рабочих диапазонах длин волн ОЭС. Характерным признаком ОЭС ТпВ-диапазона является тепловая отметка объекта на тепловом фоне местности.

В результате наблюдений психофизиологов было установлено, что человек при распознавании образов пользуется, главным образом, принципом предпочтительности тех или иных признаков. С этой целью он сопоставляет объекты одного класса, выделяя их общие и разделяющие признаки.

Психофизиологической особенностью восприятия зрительной (оптической) информации у высших животных и человека [4] является декорреляция изображений в пространстве и времени в целях устранения статистических избыточных связей соседних элементов изображения и последовательных кадров уже в системе первичной обработки информации. Это позволяет использовать только наиболее информативные признаки распознаваемых образов и наиболее экономно кодировать информацию для передачи ее в систему вторичной обработки — мозг.

Синтезируя в едином изображении отличительные признаки изображения различных каналов и акцентируя на них внимание, можно резко повысить информативность и эффективность ведения разведки. Таким образом, чем больше оптико-электронных каналов различного диапазона будет задействовано для ведения разведки, тем лучше результат.

Однако в процессе разведки возможна ситуация, при которой основные характерные признаки наблюдаемого объекта во всех спектральных диапазонах не выявляются либо выявляются слабо, что не позволяет распознать или даже обнаружить объект разведки. Такая ситуация характерна для работы по замаскированным целям.

Задача обнаружения замаскированных целей. В настоящее время в состав прицельно-наблюдательных комплексов образцов вооружения и военной техники сухопутных войск традиционно входят оптико-электронные каналы разведки, наблюдения и прицеливания видимого, ближнего и дальнего ИК-диапазонов.

При использовании противником качественной маскировки обнаружение и распознавание объекта затруднено, соответственно вероятность обнаружения и распознавания замаскированного объекта на типовых тактических дальностях может быть близка к нулю.

В рамках современной концепции ведения боевых действий в период подготовки к наступлению объекты противника в первом эшелоне обороны должны быть укрыты и замаскированы. Полевой устав армии США содержит предписание передовым подразделениям сохранять маскировку до тех пор, пока не возникнет необходимость выдвинуться на открытую местность для проведения атаки или контратаки.

В соответствии с тактической описательной моделью боевых действий, разработанной Научно-исследовательским центром ракетных войск и артиллерии вооруженных сил РФ и предназначенной для проведения оценки эффективности ведения разведки из подвижного разведывательного пункта (ПРП), в качестве типового объекта разведки рассматривается окопанный танк в первой линии обороны противника (на расстоянии 2 км от ПРП) — танк в лобовой проекции с разворотом пушки в пределах $\pm 30^\circ$ с неработающим двигателем, расположенный в окопе глубиной до 1 м с высотой брустера до 0,5 м, замаскированный под фон местности маскировочной сетью типа МКТ-Л, готовый к ведению огня.

ОЭП, входящие в состав подвижных разведывательных пунктов, обеспечивают дальность распознавания окопанных и замаскированных объектов бронетанковой техники менее чем 1—1,5 км, что не удовлетворяет возросшим современным требованиям.

В этой связи проведение работ, направленных на выявление новых демаскирующих признаков, создание оптико-электронных каналов разведки, использующих данные признаки с целью повышения эффективности разведки замаскированных целей, крайне важно.

Предлагаемые пути решения задачи. При построении МОЭС планируется реализовать концепцию обнаружения и распознавания с большой степенью вероятности замаскированного объекта по дополнительным демаскирующим признакам, которыми могут являться:

1) блик — обратное отражение лазерного излучения фокальными элементами (сеткой, фотокатодом) ОЭП при сканировании пространства лазерным лучом;

2) отличия в КСЯ объектов (в том числе замаскированных) и естественного фона в узких зонах УВИ-диапазона спектра;

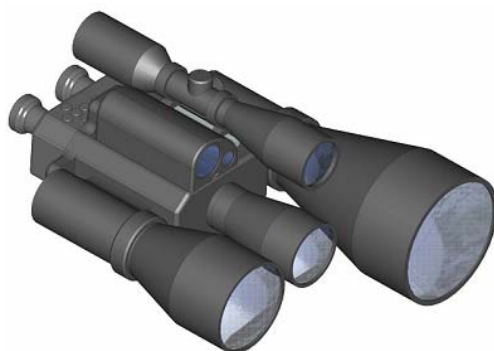
3) тепловая отметка от объекта, распознать который в сложившихся условиях наблюдения невозможно.

Таким образом, если в некоторой точке в полосе наблюдения обнаружены перечисленные признаки, то можно утверждать, что в данной точке распознана цель с достаточной степенью вероятности.

В таблице приведены состав, спектральный диапазон, основное назначение и специфика разведанных каналов переносного многоспектрального прибора разведки (ПМПР), позволяющие решать поставленные задачи. Возможный внешний облик соответствующей МОЭС представлен на рисунке.

Состав, спектральный диапазон, основное назначение и специфика разведанных каналов ПМПР

Канал	Спектральный диапазон, мкм	Основное назначение	Характерные признаки
ТВ-канал УФ-диапазона	0,2—0,38	Обнаружение замаскированных целей Обнаружение пуска ракет	Контраст КСЯ объектов и фонов Световая отметка факела ракеты
Дневной ТВ-канал	0,35—0,8	Разведка открыто расположенных целей в дневных условиях	Контраст КСЯ объектов и фонов
Ночной ТВ-пассивно-активный канал	0,4—1,1	Разведка открыто расположенных целей в ночных условиях в пассивном и активно-импульсном режимах Обнаружение замаскированных целей по блику от ОЭС	Контраст КСЯ объектов и фонов Световая отметка оптики ОЭС (блик)
Оптико-электронный канал коротковолнового ИК-диапазона	0,8—2,5	Обнаружение замаскированных целей	Контраст КСЯ объектов и фонов
ТпВ-канал средневолнового диапазона	3—5	Разведка открыто расположенных целей в дневных и ночных условиях Обнаружение замаскированных целей	Температурный контраст объектов и фонов Тепловая отметка
ТпВ-канал длинноволнового диапазона	8—14	Разведка открыто расположенных целей в дневных и ночных условиях Обнаружение замаскированных целей	Температурный контраст объектов и фонов Тепловая отметка
Лазерный дальномер с системой определения собственных координат	1,54	Определение координат цели	Координаты цели



В настоящее время макетный образец подобной системы находится на этапе разработки и изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы „смотрящего“ типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
2. Вольф У., Цисис Г. Справочник по инфракрасной технике. Т. 1. М.: Мир, 1995. 606 с.

3. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). М.: Сов. радио, 1977. 368 с.
4. Шашилов Б. А. Цвет и цветовоспроизведение. М.: Книга, 1986. 286 с.

Сведения об авторах

- Николай Николаевич Мордвин** — Центральное конструкторское бюро точного приборостроения, Новосибирск; начальник научно-исследовательского отделения;
E-mail: post@tochpribor.com
- Геннадий Николаевич Попов** — Центральное конструкторское бюро точного приборостроения, Новосибирск; директор; E-mail: post@tochpribor.com

Поступила в редакцию
12.01.09 г.

УДК 621.384.3:681.7.067.3

М. Ф. Носков, В. Б. Шлишевский

ПСЕВДОЦВЕТНОЙ ОКУЛЯР ДЛЯ ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

Предложен псевдоцветной окуляр для приборов ночного видения различного назначения. Окуляр содержит дополнительное устройство с подсветкой, направляющее в глаз наблюдателя полимонохроматический световой пучок с равномерно распределенной по полю зрения яркостью.

Ключевые слова: прибор ночного видения, окуляр, прицел, смешение цветов.

В настоящее время одним из перспективных направлений усовершенствования приборов ночного видения (ПНВ) является разработка и применение систем, обеспечивающих получение высокодетальных изображений местности в псевдоцветах [1]. Это связано с тем, что чувствительность глаза человека к изменениям цвета более чем на два порядка превосходит его чувствительность к изменениям интенсивности излучения [2]. Значимость работ, связанных с проектированием псевдоцветовых ПНВ, обусловлена качественно новыми информационными возможностями таких приборов по сравнению с оптико-электронной аппаратурой, построенной по традиционным схемам и предназначенной для получения монохроматических изображений.

Совершенствование технических средств и методов с использованием псевдоцветного изображения является чрезвычайно актуальным в связи с высокой эффективностью их применения в целом ряде военных задач, среди которых особо следует выделить:

- ведение прицельной стрельбы из индивидуального стрелкового оружия, артиллерийского и танкового вооружения;
- наблюдение за полем боя и разведку (обнаружение, распознавание и определение координат) целей (личного состава, боевой техники, инженерных сооружений и др.);
- идентификацию объектов фоноцелевой обстановки и проведение ночных инженерных работ.

При псевдоцветовом кодировании массива монохроматических изображений замаскированных целей вероятность их обнаружения и распознавания существенно выше, чем при использовании обычных монохроматических изображений. Во многих случаях предлагаемые устройства могут являться единственным источником информации, который позволяет идентифицировать объекты, скрытые посредством применения маскирующих свойств местности или средств пассивной маскировки. По тонким различиям в интенсивности изображения,

преобразованным в цветовые характеристики, можно осуществлять селекцию макетов, имитирующих военные объекты, а также оценивать состояние вооружения и военной техники.

Существующие в настоящее время системы с созданием псевдоцветного изображения могут использовать либо поочередное во времени, либо одновременное смешение цветов, при этом для образования видимых изображений принято использовать красный (*R*), зеленый (*G*) и синий (*B*) цвета с длиной волны 700, 546 и 436 нм соответственно [3]. Эти же принципы могут быть реализованы применительно к ПНВ с электронно-оптическими преобразователями.

Цветной ЭОП прямого переноса излучения состоит из входного волоконно-оптического элемента, спрессованного из тонких оптических волокон, конструкция которых такова, что позволяет являться и передатчиком излучения, и оптическим фильтром [4]. На торцы этих оптических волокон наклеен фотокатод с равномерной чувствительностью по всему видимому спектру. На некотором расстоянии от фотокатода установлена микроканальная пластина, размер канала которой соответствует диаметру волокна входного волоконно-оптического элемента. На выходное окно преобразователя нанесены элементы *RGB*-люминофора.

Основной недостаток системы — высокая стоимость, более чем на два порядка превышающая стоимость оружия, для которого она предназначена. По данной причине практического применения как ПНВ для стрелкового оружия система не получила.

Существуют и другие схемы получения цветного изображения с одновременным смешением монохроматических составляющих. Например, изображение, построенное объективом, разделяется на три отдельных изображения, которые затем пропускаются через три светофильтра. Эти три изображения затем поступают на три отдельных ЭОП, затем — на три светофильтра *RGB*, затем при помощи оптической системы изображения сводятся вместе [5]. Таким образом можно получить цветное изображение.

Основные недостатки системы — почти трехкратное увеличение веса и габаритов аппаратуры, а также повышенная чувствительность к разьюстировкам под воздействием ударных нагрузок и вибраций. Стоимость такой системы — около 6000 долларов.

По аналогичному принципу действует и ЭОП с последовательным смешением цветов [6]. Отличие состоит в том, что на один и тот же ЭОП последовательно при помощи трех различных светофильтров поступает изображение, представляющее собой сочетание трех значений длины волны, а после ЭОП эти же три изображения через светофильтры *RGB* последовательно попадают на сетчатку глаза человека. На уровне психофизического восприятия и формируется псевдоцветное изображение.

В ряде систем используются жидкокристаллические дисплеи (ЖКД). Работа ЖКД основана на изменении двулучепреломления жидкого кристалла под действием приложенного электрического поля и изменении поляризации светового пучка, прошедшего сквозь жидкий кристалл. Изменение состояния поляризации затем при помощи поляроида-анализатора переводят либо в изменение интенсивности монохроматической картины, либо в изменение цвета картины полихроматической.

Наиболее известны разработки компании CRL (Central Research Lab, Великобритания) [1]. Цветной ЖК-дисплей RXA1C имеет следующие характеристики.

Размер по диагонали, мм.....	15
Формат, пикселей	1024×768
Размер пикселя, мкм.....	12×12
Габаритные размеры, мм.....	128×52×15
Потребляемая мощность, Вт.....	4
Рабочий диапазон температур, °С	+10—+50

Дисплей создавался для военных действий в тропическом и субтропическом климате. Применение такого дисплея с подогревом в условиях минусовых температур проблематично из-за отпотевания прибора. Дисплеи типа RXA1C, работающие в условиях низких темпера-

тур, неизвестны.

Фирма Kaiser Elektro-Optics (США) выпускает микродисплеи с псевдоцветным изображением с достаточно высокими характеристиками [7], но масса дисплея превышает 2 кг, что делает его неприменимым в ПНВ для стрелкового вооружения.

Приведенные примеры подтверждают, что разработка и создание новых ПНВ является одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений оптико-электронного приборостроения. Приборы этого типа имеют инвестиционную привлекательность, так как, обладая возможностями двойного применения, создают условия для получения прибыли за счет коммерческих продаж на рынке аналитических средств.

С целью упрощения конструкции и повышения устойчивости системы организации псевдоцветного изображения к внешним воздействиям нами предлагается использовать методы, разработанные для преобразования монохроматической интерференционной картины в псевдоцветную [8, 9], поместив в окуляр дополнительное устройство, позволяющее направить в глаз наблюдателя псевдомонохроматический световой поток с равномерно распределенной по полю зрения яркостью [10].

В качестве дополнительной подсветки возможно использовать светодиоды с максимумом излучательной способности на длине волны 420 или 620 нм. Для улучшения качества изображения в систему вводится узкополосный дисперсионный светофильтр, склеенный из цветных оптических стекол различных марок. Изменяя соотношение толщины указанных стекол, возможно изменять длину волны максимума пропускания светофильтра в требуемом спектральном диапазоне.

Один из возможных вариантов практической реализации такой системы заключается в том, что на выходную поверхность экрана фотокатода наносят матовое покрытие с диффузным рассеянием, дополнительно помещают оптическую систему с передним апертурным углом, меньшим угла диффузного рассеивания матового покрытия, и освещают дополнительную оптическую систему вторым субтрактивным цветом. В результате такого смещения двух цветов на сетчатке глаза человека и появляется ощущение псевдоцвета.

Принципиальные основы построения предлагаемых устройств проверены и подтверждены экспериментами, проведенными на лабораторном стенде, собранном на базе оптической скамьи ОСК-2. Использовался ЭОП типа ЭПМ 105Г-01-22А со следующими основными параметрами:

- максимум спектральной чувствительности на длине волны 850 нм;
- яркость свечения экрана 2 кд/м²;
- разрешающая способность 42 штр./мм.

Предлагаемый окуляр конструктивно сравнительно прост, не содержит дополнительных подвижных элементов, не требует импортных комплектующих и допускает возможность модернизации уже находящихся на вооружении ПНВ. При этом его масса дополнительно возрастает предположительно не более чем на 50—80 г, что не препятствует возможности работы прибора „с рук“, а энергопотребление ПНВ увеличивается ориентировочно на 0,1 Вт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы „смотрящего“ типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
2. Луизов А. В. Глаз и свет. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 132 с.
3. Кривошеев М. И., Кустарев А. К. Цветовые измерения. М.: Энергоатомиздат, 1990. 240 с.
4. Здобников А. Е., Тарасов В. В., Груздев В. В., Илюхин В. А., Лысов А. Б. Возможные пути построения ЭОП цветного изображения. [Электронный ресурс]: <<http://www.leds.ru/an132.htm>>.
5. Здобников А. Е., Тарасов В. В., Груздев В. В., Лысов А. Б., Илюхин В. А. Электронно-оптический преобразователь. Заяв. № 2000105071 от 02.03.2000.

6. *Здобников А. Е., Тарасов В. В., Груздев В. В., Лысов А. Б., Илюхин В. А.* Устройство для получения цветного изображения в условиях низкой освещенности. Заяв. № 2000125659 от 12.10.2000.
7. *Jiang H., Lin J.* Microdisplays based on III-nitride wide band-gap semiconductors put the future in our hands // SPIE OE Magazine. 2001. N 7. P. 28—29.
8. Патент РФ № 2166730. Способ интерференционного измерения формы поверхности оптических деталей / *М. Ф. Носков*. Оpubл. 10.05.2001. Б.И. № 13.
9. Патент РФ № 2224982. Способ интерференционного измерения формы поверхности оптических деталей / *М. Ф. Носков*. Оpubл. 27.02.2004. Б.И. № 6.
10. *Носков М. Ф., Шлишевский В. Б.* Псевдоцветной окуляр для прицелов ночного видения // Тез. докл. Совещ. „Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники (Фотоника—2008)“. Новосибирск, 2008. С. 144.

Сведения об авторах**Михаил Федорович Носков**

— д-р техн. наук; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра радиоэлектроники, Новосибирск

Виктор Брунович Шлишевский

— д-р техн. наук, профессор; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра фотограмметрии и дистанционного зондирования, Новосибирск; E-mail: svb_dom@ngs.ru

Поступила в редакцию
12.01.09 г.

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

УДК 535.417

Ю. Ц. БАТОМУНКУЕВ, Н. А. МЕЩЕРЯКОВ

ВНЕОСЕВЫЕ ОБЪЕМНЫЕ ГОЛОГРАММНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

Рассмотрены особенности записи внеосевого объемного голограммного оптического элемента (ГОЭ), используемого в качестве однокомпонентного объектива для ближней инфракрасной области спектра. Экспериментально показано, что средние волновые aberrации опорной и объектной волн, возникающие на стадии записи ГОЭ, меньше длины волны лазера более чем на порядок. Измеренные значения поперечной aberrации внеосевого объемного ГОЭ близки к расчетным, повышение его отношения сигнал/шум позволяет увеличить дальность обнаружения источников инфракрасного излучения.

Ключевые слова: голограммный оптический элемент, инфракрасный диапазон спектра.

В последнее время интенсивно развиваются методы определения пространственного расположения лазерных источников инфракрасного (ИК) излучения. Одной из основных трудностей реализации этих методов является повышение отношения сигнал/шум. Стекло-вые линзы, используемые для фокусировки детектируемого лазерного излучения, пропускают широкий спектр излучения, и для выделения из этого спектра лазерного излучения с требуемой длиной волны необходимы дополнительные узкополосные спектральный и пространственный фильтры. На практике их применение приводит к относительно низкому уровню сигнал/шум и к ограничению расстояния, с которого может быть определено местоположение источника ИК-излучения [1].

В работе [2] в качестве монохроматического объектива инфракрасного излучения был предложен осевой объемный голограммный оптический элемент (ГОЭ) — фокусатор, представляющий собой голограмму объемной зонной пластины Френеля, зарегистрированную в светочувствительном материале реоксан [3]. Известно, что такой голограммный элемент может быть представлен как совокупность локальных объемных решеток, обладающих спектральной и угловой селективностью [4].

Расположение источников опорной и объектной волн при записи (а) и восстановлении (б) осевого объемного ГОЭ в [2] представлено на рис. 1 (z_r , z_o , z_i — координаты источников

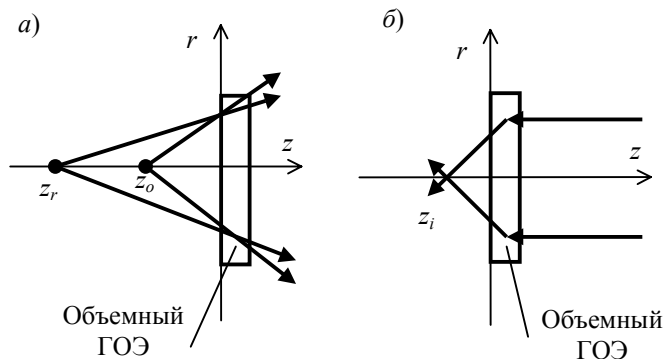


Рис. 1

опорной, объектной и восстановленной волны соответственно). Длина волны записи (0,514 мкм) существенно отличалась от рабочей длины (1,06 мкм). Особенностью записанного ГОЭ было восстановление плоской волны, направленной противоположно записывающим волнам.

Недостатками осевого объемного ГОЭ являются наличие недифрагировавшего излучения (нулевой порядок дифракции) и низкая спектральная селективность центральной части ГОЭ, что создает фоновую засветку при регистрации сигнала от ИК-источника и снижает отношение сигнал/шум. Увеличение отношения сигнал/шум может быть достигнуто путем применения внеосевых объемных ГОЭ, которые одновременно выполняют функции фокусирующей линзы, отклоняющего зеркала, спектрального, углового и пространственного фильтров [4].

На рис. 2 представлена схема записи (а) и восстановления (б) пропускающего внеосевого объемного ГОЭ (P_r, P_o, P_i — источники опорной, объектной и восстановленной волн; d_r, d_o, d_i — соответственно расстояния от них до ГОЭ). В нем отсутствуют отмеченные недостатки, присущие осевому объемному ГОЭ, так как точка фокусировки P_i восстановленной волны пространственно расположена вне недифрагировавшей волны. Внеосевой объемный ГОЭ обладает высокой спектральной, угловой и пространственной селективностью, что обеспечивает возможность пространственной и спектральной локализации источников фонового излучения.

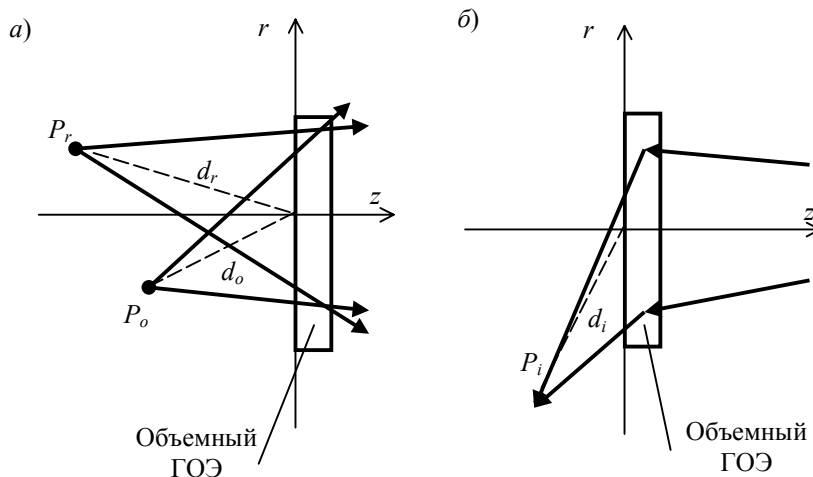


Рис. 2

Отношение сигнал/шум внеосевого объемного ГОЭ определяется слабым фоновым светом, возникающим из-за отражения излучения от корпуса и оправ объектива, рассеяния на пыли и неоднородностях воздуха. Так как практический интерес представляет регистрация очень слабых сигналов от ИК-источников, необходимо учитывать шум, возникающий при дифракции фонового рассеянного света на самом ГОЭ. Одной из причин рассеяния служит появление в объеме ГОЭ в процессе его изготовления паразитных решеток. В работе [5] предложен способ контроля дифракционной эффективности паразитных решеток непосредственно в процессе изготовления ГОЭ.

На рис. 3 представлены характерные графики роста дифракционной эффективности η_n паразитных „шумовых“ решеток (кривая 1, эксперимент) и дифракционной эффективности этих решеток (кривая 2, расчет), рассчитанной по формуле

$$\eta_n = 1 - \frac{i_o I_o + i_r I_r}{I_o + I_r},$$

где i_o — относительная интенсивность объектной волны, I_o — начальная интенсивность объектной волны, i_r — относительная интенсивность опорной волны, I_r — начальная интенсивность опорной волны. Под относительной интенсивностью подразумевается отношение интенсивности волны к начальному значению.

На рис. 4 представлен график величины рассогласования α интерференционной картины и регистрируемой в объеме полимерных сред типа реоксан дифракционной структуры, рассчитанной по формуле [5]

$$\alpha = \arcsin \frac{i_o I_o I_r - i_r I_o I_r - \eta I_r^2 + \eta I_o^2}{2 \{ \eta I_o I_r (I_o + I_r) [i_o I_o + i_r I_r - \eta (I_o + I_r)] \}^{1/2}},$$

где η — дифракционная эффективность объемного ГОЭ. Величина рассогласования α зависит от изменения наклона и дополнительного искривления интерференционных полос, сдвига и изменения их периода. Экспериментально получено, что средняя величина рассогласования α много меньше 180° , что позволяет прийти к выводу о том, что возникающие в процессе записи волновые aberrации опорной и объектной волн существенно меньше длины волны и после первой минуты записи не превышают одной десятой длины волны лазера. Это подтверждается известным фактом, что сдвиг максимума угловой селективности существенно меньше угла селективности. Величина рассогласования α также может служить критерием оценки имеющих место фото- и термоиндуцированных волновых aberrаций в процессе записи.

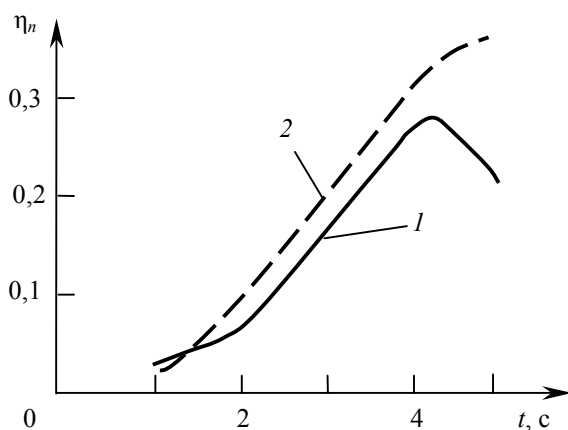


Рис. 3

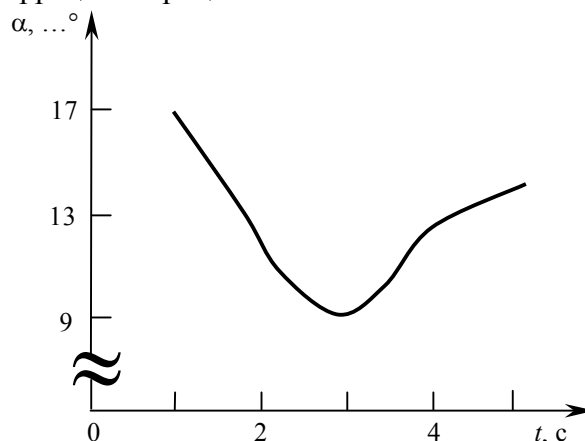


Рис. 4

Расчет схемы записи внеосевого объемного ГОЭ был выполнен в приближении зеркально-линзовой модели [6, 7], в соответствии с которой ГОЭ может быть представлен в виде тонкой линзы (тонкого ГОЭ) и сферического зеркала. Координаты источников схемы записи определялись из выполнения в меридиональной и сагиттальной плоскости условий дифракции Брэгга и формулы объемного ГОЭ

$$\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} = \frac{1/d_1 + 1/d_2}{Q} = \frac{1}{F},$$

где d_1 и d_2 — расстояние от центра объемного ГОЭ до предмета и изображения соответственно, F — фокусное расстояние объемного ГОЭ, Q — параметр, равный отношению фокусных расстояний объемного ГОЭ к сферическому зеркалу [6]. В расчетах также учитывалось условие отсутствия сферической aberrации на рабочей длине волны. Остаточные aberrации объемного ГОЭ могут быть определены как сумма aberrаций тонкой линзы и сферического зеркала [6, 7].

Стандартная схема записи внеосевого ГОЭ сферическими волнами представлена на рис. 5, она включает в себя лазер 1, микрообъектив с микродиафрагмой 2, объективы 3, полупрозрачное зеркало 4, отражающие зеркала 5, механический затвор 6, объемный ГОЭ 7, фотодиоды (типа ФД-7К) 8, миллиамперметры 9. Полупрозрачное зеркало, отражающие зеркала и голографическая среда объемного ГОЭ устанавливались по схеме интерферометра Маха—Цендера. Угол между осями падающих на среду сферических волн измерялся теодолитом. Голографическая среда закреплялась в оправе на вращающемся основании, позволяющем

устанавливать различные относительные углы падения волн на среду. Значения интенсивности прошедших среду волн регистрировались с помощью фотодиодов ФД-7К и миллиамперметров. Все элементы схемы, за исключением миллиамперметров, закреплялись на жестком стальном основании. В качестве светочувствительной среды использовалась голографическая среда типа реоксан [3, 8]. Среда типа реоксан [8, 9] была разработана в ГОИ им. С. И. Вавилова на основе полиметилметакрилата введением в него различных светочувствительных красителей. Известно, что эти голографические среды прозрачны в ближней инфракрасной области спектра. Длина волны аргонового лазера составляла 0,514 мкм. Экспозиция превышала 2,5 Дж/см² (по прошедшим пучкам). Для измерения дифракционной эффективности одна из падающих на среду волн перекрывалась механическим затвором. Диаметр ГОЭ составлял 20 мм и был ограничен мощностью используемого лазера. Расчетное значение поперечной aberrации ГОЭ на рабочей длине волны 1,06 мкм составляло 0,15 мм. Измеренное значение поперечной aberrации на рабочей длине волны было равно 0,2 мм. Дифракционная эффективность записанных ГОЭ на рабочей длине волны превышала 50 %.

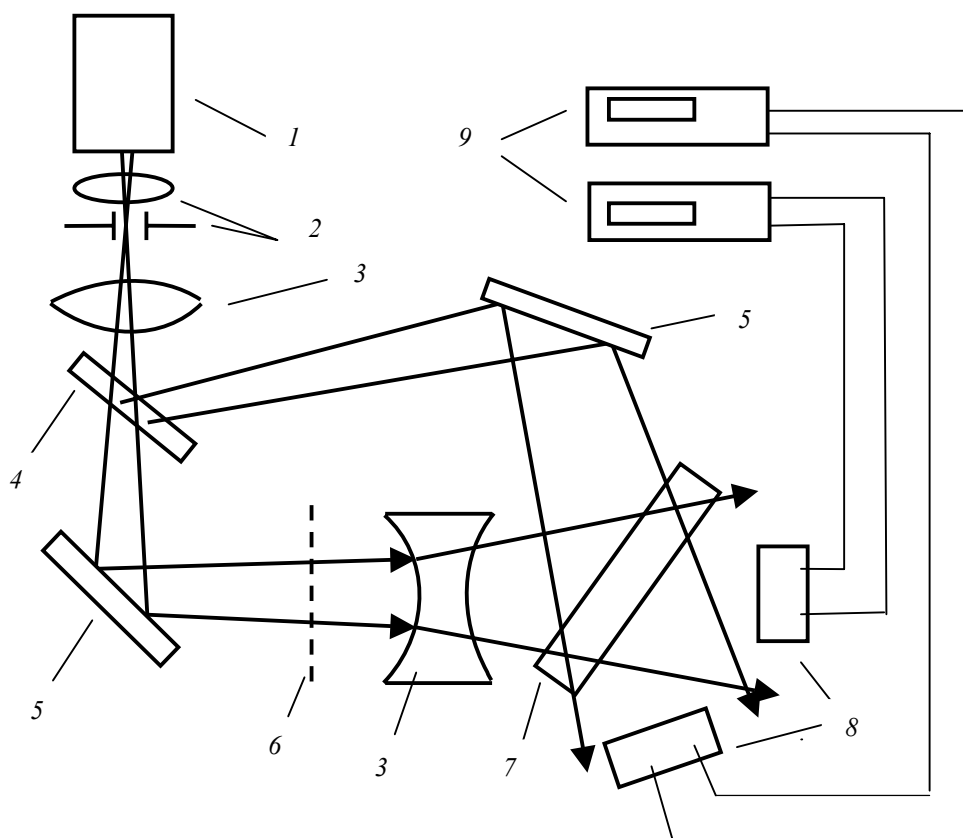


Рис. 5

Таким образом, внеосевые объемные ГОЭ являются перспективными оптическими элементами для ближнего ИК-диапазона спектра, особенно если иметь в виду, что в настоящее время разработаны объемные голографические среды с повышенной стабильностью [10, 11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Южик И. Б., Малинин В. В., Попов Г. Н. Приборы для обнаружения и подавления оптических и оптико-электронных средств // Сб. мат. IV Междунар. науч. конгр. „ГЕО-СИБИРЬ-2008“. Новосибирск, 2008. Т. 4, ч. 1. С. 148—152.
2. Батомункуев Ю. Ц., Сандер Е. А., Шойдин С. А. Аберрации объемных голограмм // Тез. Всесоюз. семинара „Автоматизация проектирования оптических систем“. М., 1989. С. 101—112.

3. Суханов В. И., Лашков Г. И., Петников А. Е., Ащеулов Ю. В., Резникова И. И., Черкасов А. С. Запись фазовых голограмм на органическом полимерном материале с дисперсией, изменяющейся вследствие триплет-сенситивизированных процессов // Оптическая голография. Л.: Наука, 1979. С. 24—42.
4. Ган М. А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов. Л.: ГОИ им. С. И. Вавилова, 1984. 144 с.
5. Батомункуев Ю. Ц., Мецержаков Н. А. Метод измерения отношения сигнала к шуму рассеяния голографического оптического элемента из реоксана // Автометрия. 2003. № 2. С. 30—35.
6. Батомункуев Ю. Ц. Особенности расчета схем записи объемных осевых голографических оптических элементов с неизотропной усадкой // Автометрия. 2002. № 2. С. 108—114.
7. Корешев С. Н., Ратушный В. П. Полифункциональность рельефно-фазовых отражательных голограммных оптических элементов // Оптич. журн. 2001. № 12. С. 28—32.
8. Вениаминов А. В., Bartsch E., Понов А. П. Постэкспозиционное развитие фотоиндуцированной решетки в полимерном материале с фенантренхином // Опт. и спектр. 2005. Т. 99, № 5. С. 776—782.
9. Андреева О.В., Бандюк О.В., Парамонов А.А., Черкасов А.С., Гаврилюк Е.Р., Андреев П.В. Объемные пропускающие голограммы в полимерной среде с фенантренхином // Оптич. журн. 2000. № 12. С. 27—33.
10. Sazonov Yu. A., Shelkovnikov V. V., Pen E. F., Gerasimova T. N. Photopolymer material for recording reflection holograms by He-Ne and Kr lasers // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4149. P. 100—106.
11. Щеулин А. С., Вениаминов А. В., Корзинин Ю. Л., Ангервакс А. Е., Рыскин А. И. Высокостабильная голографическая среда на основе кристаллов $\text{CaF}_2 : \text{Na}$ с коллоидными центрами окраски. III. Свойства голограмм // Опт. и спектр. 2007. Т. 103, № 4. С. 668—672.

Сведения об авторах

Юрий Цыдытович Батомункуев

— канд. техн. наук, доцент; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра физики, Новосибирск;
E-mail: opttechnic@mail.ru

Николай Анатольевич Мецержаков

— д-р физ.-мат. наук, профессор; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра метрологии, стандартизации и сертификации, Новосибирск; E-mail: opttechnic@mail.ru

Поступила в редакцию
12.01.09 г.

С. В. ОЛЕЙНИК, Т. Н. ХАЦЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ БАЗОВЫХ ДВУХЛИНЗОВЫХ КОМПОНЕНТОВ СВЕТОСИЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАБОТЫ С СОВРЕМЕННЫМИ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Для российских марок стекол был проведен расчет величин относительной частотной и средней дисперсии в диапазоне от 0,6 до 0,9 мкм и составлены базовые пары. Получен набор базовых двухлинзовых объективов с относительным отверстием 1:3—1:2,5, ахроматизированных для указанного спектрального интервала, которые могут служить основой для расчета светосильных объективов приборов ночного видения, работающих с современными электронно-оптическими преобразователями II и III поколений.

Ключевые слова: двухлинзовые компоненты, светосильные объективы, приборы ночного видения.

При разработке приборов ночного видения (ПНВ) с ограничениями по массогабаритным характеристикам необходимо использовать объективы с большим относительным отверстием. Возможность расчета светосильного объектива во многом определяется его базовыми (силовыми) компонентами. Двухлинзовый объектив остается основным силовым компонентом в большинстве оптических систем современных объективов ПНВ. Возможность увеличения относительного отверстия оптической системы во многом определяется степенью коррекции сферической и хроматической аберрации.

В настоящей работе была поставлена задача определения оптимальных сочетаний марок стекол в двухлинзовом объективе, ахроматизированном в спектральном диапазоне, соответствующем чувствительности современных электронно-оптических преобразователей (ЭОП), с одновременным устранением (минимизацией) в нем сферической аберрации. Фактически для разных сочетаний марок стекол определялось наибольшее значение относительного отверстия двухлинзового компонента, при котором качество получаемого с его помощью изображения сопоставимо с разрешающей способностью современных ЭОП.

В качестве критерия допустимой величины остаточных аберраций использовались предварительно полученные значения коэффициентов передачи контраста объектива в диапазоне частот, соответствующих рабочему диапазону пространственных частот ЭОП. Для этого исходя из допустимого снижения предела разрешения ПНВ по сравнению с пределом разрешения используемого в нем ЭОП определялись предельные значения коэффициентов передачи контраста объектива, и далее эти требования переносились на базовый компонент объектива. Без учета влияния остальных компонентов ПНВ с использованием свойства мультипликативности частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) ПНВ

$$T(\nu)_{\text{ПНВ}} = T(\nu)_{\text{ЭОП}} T(\nu)_{\text{об}},$$

где $T(\nu)_{\text{ЭОП}} = \exp(-\pi^2 \nu^2 a^{-2})$ — ЧКХ ЭОП [1, 2], во всем диапазоне пространственных рабочих частот ЭОП (ν) были вычислены значения ЧКХ объектива $T(\nu)_{\text{об}}$, при которых ЧКХ ПНВ снижается соответственно до $0,9T(\nu)_{\text{ЭОП}}$, $0,8T(\nu)_{\text{ЭОП}}$, $0,7T(\nu)_{\text{ЭОП}}$ и $0,6T(\nu)_{\text{ЭОП}}$ (табл. 1). Более низкие значения $T(\nu)_{\text{ПНВ}}$ не представляют практического интереса из-за малого разрешения и низкого уровня контрастности изображения.

Свойства двухлинзовых базовых компонентов исследованы при 10 %-ном уровне снижения ЧКХ ПНВ в сравнении с ЧКХ ЭОП.

Таблица 1

Значения $T(v)_{об}$ в соответствии с допустимым снижением ЧКХ ПНВ

$T(v)_{ПНВ}$	$T(v)_{об}$, при частоте				
	10 мм ⁻¹	20 мм ⁻¹	30 мм ⁻¹	40 мм ⁻¹	50 мм ⁻¹
0,9 $T(v)_{ЭОП}$	0,98	0,91	0,82	0,70	0,6
0,8 $T(v)_{ЭОП}$	0,95	0,81	0,62	0,44	0,3
0,7 $T(v)_{ЭОП}$	0,91	0,68	0,41	0,22	0,1
0,6 $T(v)_{ЭОП}$	0,84	0,52	0,23	0,10	0

Как известно, в оптической системе, состоящей из двух близко расположенных компонентов, ахроматическая коррекция в определенном спектральном интервале осуществляется при выполнении условий

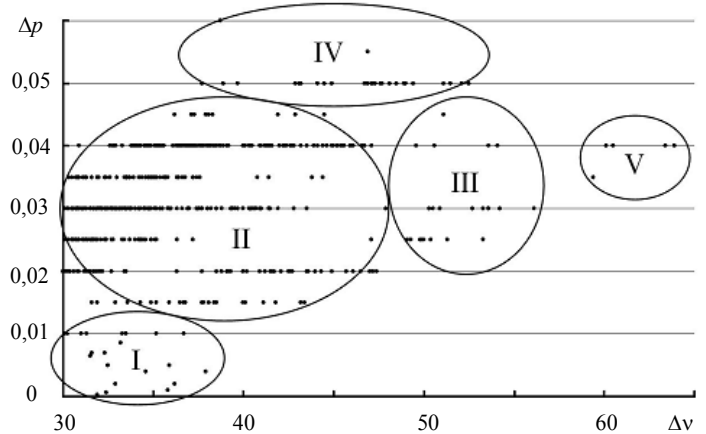
$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2; \quad \Phi_1 = \Phi v_1 / (v_1 - v_2); \quad \Phi_2 = \Phi v_2 / (v_2 - v_1), \quad (1)$$

связывающих оптические силы Φ_1 , Φ_2 первого и второго компонентов и всей системы Φ с величиной коэффициентов средних дисперсий v_1 и v_2 материалов линз. Одновременное уменьшение вторичного спектра $\Delta s'_{\lambda_1, \lambda_0}$, значение которого в двухлинзовом объективе-ахромате определяется как

$$\Delta s'_{\lambda_1, \lambda_0} = -f'_{\lambda_0} (p_1 - p_2) / (v_1 - v_2), \quad (2)$$

возможно при соблюдении равенства относительных частных дисперсий p_1 и p_2 используемых марок стекол. Значения относительных частных p и средних v дисперсий определялись для российских марок стекол в диапазоне от 0,6 до 0,9 мкм, показатели преломления рассчитывались по дисперсионной формуле. Выбранный спектральный диапазон работы соответствует области чувствительности современных поколений ЭОП.

Далее по формулам (1) и (2) определялись параметры линз, комбинация которых позволяет скорректировать в двухлинзовом базовом компоненте хроматизм положения и сферическую aberrацию. Общее число исследованных сочетаний марок стекол — более пятисот. Исследованные комбинации разбиты на пять групп (см. рисунок), для каждой из которых на втором этапе работы методом оптимизации в соответствии с принятым выше критерием определены наибольшие величины относительного отверстия. Диаграмма распределения исследованных двухлинзовых базовых компонентов по группам в зависимости от соотношения средних и частных дисперсий материалов представлена на рисунке. Оценка качества изображения проводилась для осевой точки изображения и в пределах малых угловых полей — до 2,5°.



К группе I относятся пары оптических материалов, обладающие малой разностью относительных частных дисперсий Δp , что позволяет существенно уменьшать вторичный спектр при разработке базового компонента. В эту группу включены 22 пары, составленные из следующих оптических материалов: ОК1–БФ16, ОК2–БФ27, ОК1–БФ8, ОК1–БФ25, ОК1–ЛФ11, ОК1–БФ32, ОК1–ОФ7, ОК1–ЛФ10, ОК2–ОФ3, ОК2–ОФ8, ОК2–ОФ4, ОК1–ЛФ12, ОК2–ЛФ5, ОК2–ЛФ7, ОК2–ОФ5, ОК1–ТБФ9, ОК1–ОФ3, ОК1–ОФ8, ОК1–ОФ4, ОК1–ЛФ5, ОК2–ЛФ5 и ОК1–ОФ5. Значение разности средних дисперсий Δv в этой группе материалов находится

в довольно узком промежутке от 30,1 до 37,9, что вызывает некоторые трудности при расчетах двухлинзовых базовых компонентов с увеличенным относительным отверстием.

Оптические пары группы V обладают весьма большой разностью коэффициентов средней дисперсии Δv , что способствует уменьшению кривизны преломляющих поверхностей в двухлинзовом компоненте, а следовательно, и увеличению его относительного отверстия. В эту группу входит всего пять комбинаций оптических материалов: ОК1–СТФ11, ОК1–СТФ3, ОК2–СТФ11, ОК2–СТФ3 и ОК1–СТФ2. Значительная разность относительных частных дисперсий Δp в указанных комбинациях материалов ограничивает величину вторичного спектра в двухлинзовом склеенном объективе, и лишь введение дополнительного коррекционного параметра — радиуса кривизны преломляющей поверхности — позволяет улучшить абберационную коррекцию в расклеенном двухлинзовом компоненте.

Наиболее многочисленные комбинации оптических материалов отнесены к группам II–IV. В качестве примеров приведем по десять характерных комбинаций марок стекол из указанных групп: II группа — ОК2–ТФ12, ОК1–ТФ3, ОК1–ТФ8, ОК2–ТФ4, ОК1–ТФ11, ОК2–ТФ14, ОК1–ТФ2, ОК2–ТФ3, ОК1–ТБФ10, ОК1–ТФ1; III группа — ЛК3–СТФ11, ЛК6–СТФ3, К1–СТФ11, ЛК8–СТФ2, ЛК6–СТФ2, ЛК4–СТФ2, ЛК8–ТБФ14, ЛК4–ТБФ14, ЛК5–ТФ10, ЛК5–ТФ13; IV группа — ОК1–Ф13, ОК1–ТБФ25, ОК1–ЛФ9, ОК2–Ф13, ОК2–БФ24, ОК1–ЛФ5, ОК2–БФ26, ОК2–БФ21, ОК2–ЛФ7, ТК9–ТФ10. Оптические пары из этих групп могут иметь при большой разности частных относительных дисперсий Δp достаточно большую разность средних дисперсий Δv , что позволяет одновременно с уменьшением вторичного спектра повысить величину относительного отверстия $D:f'$ в двухлинзовом базовом компоненте. В системах с большим значением Δv (от 40 до 64) применяемых материалов оправдано введение воздушного промежутка между компонентами. При малых значениях Δv увеличиваются оптические силы линз и соответственно уменьшаются радиусы кривизны преломляющих поверхностей.

В табл. 2 приведены некоторые варианты исследованных двухлинзовых компонентов, обеспечивающие в спектральном диапазоне от 0,6 до 0,9 мкм высокие значения коэффициентов передачи контраста при относительных отверстиях вплоть до 1:3—1:2,5.

Таблица 2

Конструктивные параметры			$D:f'$	ЧКХ	
I группа					
1	2	3	4	5	6
$r_1 = 58,22$	$d_1 = 7,5$	ОК1	1:3	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -39,4$	$d_2 = 0,2$			15	0,93
$r_3 = -39,4$	$d_3 = 2,5$	ОФ5		30	0,81
$r_4 = -144,54$	$d_4 = 94,2$			50	0,64
$r_1 = 54,22$	$d_1 = 7,5$	ОК1	1:3	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -32,2$	$d_2 = 0,2$			15	0,91
$r_3 = -32,2$	$d_3 = 2,5$	ЛФ11		30	0,76
$r_4 = -322,1$	$d_4 = 93,4$			50	0,53
$r_1 = 60,55$	$d_1 = 9$	ОК1	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -41,1$	$d_2 = 0$			15	0,89
$r_3 = -41,1$	$d_3 = 2$	БФ16		30	0,73
$r_4 = -135,97$	$d_4 = 94,2$			50	0,56
$r_1 = 46,7$	$d_1 = 10,5$	ОК2	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -51,5$	$d_2 = 2,1$			15	0,9
$r_3 = -44,3$	$d_3 = 2$	ЛФ5		30	0,73
$r_4 = \infty$	$d_4 = 86,05$			50	0,52
$r_1 = 58,35$	$d_1 = 12$	ОК2	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -35,9$	$d_2 = 0$			15	0,69
$r_3 = -35,9$	$d_3 = 2$	ОФ3		30	0,52
$r_4 = -263,8$	$d_4 = 91,6$			50	0,49

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6
II группа					
$r_1 = 60,33$	$d_1 = 10$	ОК1	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -46,55$	$d_2 = 0$			15	0,94
$r_3 = -46,55$	$d_3 = 2$	ТБФ8		30	0,85
$r_4 = -102,35$	$d_4 = 94,03$			50	0,72
$r_1 = 60,4$	$d_1 = 10$	ОК1	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -40,6$	$d_2 = 0$			15	0,89
$r_3 = -40,6$	$d_3 = 2$	ТФ2		30	0,74
$r_4 = -134,7$	$d_4 = 93,6$			50	0,56
$r_1 = 60,5$	$d_1 = 10,0$	ОК1	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -41,3$	$d_2 = 0$			15	0,91
$r_3 = -41,3$	$d_3 = 2$	ТФ8		30	0,77
$r_4 = -129,4$	$d_4 = 93,7$			50	0,6
$r_1 = 62,2$	$d_1 = 10$	ОК2	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -43,5$	$d_2 = 0$			15	0,93
$r_3 = -43,5$	$d_3 = 2$	ТФ3		30	0,82
$r_4 = -145,02$	$d_4 = 93,6$			50	0,67
$r_1 = 62,1$	$d_1 = 10$	ОК2	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -42,2$	$d_2 = 0$			15	0,91
$r_3 = -42,2$	$d_3 = 2$	ТФ14		30	0,79
$r_4 = -154,9$	$d_4 = 93,5$			50	0,62
III группа					
$r_1 = 57,3$	$d_1 = 10$	ЛК3	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -45,9$	$d_2 = 0$			15	0,93
$r_3 = -45,9$	$d_3 = 2$	СТФ11		30	0,82
$r_4 = -77,4$	$d_4 = 94,5$			50	0,67
$r_1 = 57,5$	$d_1 = 10$	ЛК5	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -43,0$	$d_2 = 0$			15	0,91
$r_3 = -43,0$	$d_3 = 2$	ТФ10		30	0,77
$r_4 = -88,02$	$d_4 = 94,2$			50	0,59
$r_1 = 56,5$	$d_1 = 10$	ЛК8	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -44,02$	$d_2 = 0$			15	0,91
$r_3 = -44,02$	$d_3 = 2$	ТБФ14		30	0,78
$r_4 = -76,9$	$d_4 = 94,5$			50	0,60
$r_1 = 58,03$	$d_1 = 10$	К1	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -45,4$	$d_2 = 0$			15	0,94
$r_3 = -45,4$	$d_3 = 2$	СТФ11		30	0,84
$r_4 = -80,7$	$d_4 = 94,5$			50	0,70
$r_1 = 57,1$	$d_1 = 10$	ЛК6	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -44,5$	$d_2 = 0$			15	0,92
$r_3 = -44,5$	$d_3 = 2$	СТФ2		30	0,79
$r_4 = -79,5$	$d_4 = 94,4$			50	0,63
IV группа					
$r_1 = 60,4$	$d_1 = 10$	ОК1	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -45,7$	$d_2 = 0$			15	0,94
$r_3 = -45,7$	$d_3 = 2$	ТБФ25		30	0,84
$r_4 = -107,65$	$d_4 = 93,9$			50	0,70
$r_1 = 60,52$	$d_1 = 8$	ОК1	1:3	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -31,8$	$d_2 = 0$			15	0,94
$r_3 = -31,8$	$d_3 = 2$	ЛФ9		30	0,86
$r_4 = -180,9$	$d_4 = 94,5$			50	0,76

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6
$r_1 = 61,2$	$d_1 = 8$	ОК1	1:3	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -35,4$	$d_2 = 0$			15	0,96
$r_3 = -35,4$	$d_3 = 2$	Ф13		30	0,9
$r_4 = -149,0$	$d_4 = 94,7$			50	0,83
$r_1 = 61,1$	$d_1 = 12$	ОК2	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -38,8$	$d_2 = 0$			15	0,86
$r_3 = -38,8$	$d_3 = 2$	БФ26		30	0,68
$r_4 = -181,7$	$d_4 = 92,1$			50	0,52
$r_1 = 62,2$	$d_1 = 10$	ОК2	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -45,9$	$d_2 = 0$			15	0,95
$r_3 = -45,9$	$d_3 = 2$	ТБФ9		30	0,86
$r_4 = -124,1$	$d_4 = 93,8$			50	0,74
V группа					
$r_1 = 59,3$	$d_1 = 9$	ОК1	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -49,4$	$d_2 = 0,05$			15	0,95
$r_3 = -49,4$	$d_3 = 2$	СТФ11		30	0,87
$r_4 = -89,55$	$d_4 = 94,7$			50	0,75
$r_1 = 59,5$	$d_1 = 9$	ОК1	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -49,5$	$d_2 = 0$			15	0,95
$r_3 = -49,5$	$d_3 = 2,5$	СТФ3		30	0,87
$r_4 = -83,48$	$d_4 = 95,2$			50	0,75
$r_1 = 61,4$	$d_1 = 9$	ОК2	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -51,5$	$d_2 = 0$			15	0,95
$r_3 = -51,5$	$d_3 = 2$	СТФ11		30	0,87
$r_4 = -99,16$	$d_4 = 94,8$			50	0,75
$r_1 = 60,98$	$d_1 = 9$	ОК2	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -52,3$	$d_2 = 0$			15	0,95
$r_3 = -52,3$	$d_3 = 2$	СТФ3		30	0,87
$r_4 = -93,1$	$d_4 = 94,9$			50	0,75
$r_1 = 60,15$	$d_1 = 9,0$	ОК1	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	T
$r_2 = -48,1$	$d_2 = 0$			15	0,95
$r_3 = -48,1$	$d_3 = 2,0$	СТФ2		30	0,87
$r_4 = -95,4$	$d_4 = 94,8$			50	0,75

Исходя из целей исследования было выявлено следующее: наилучшие результаты получаются при компоновке объектива по схеме „положительный крон—отрицательный флинтовый мениск“; первый элемент выполняет силовую функцию и в большей степени определяет фокусное расстояние объектива; толщина по оси коррекционно-силового мениска является мощным коррекционным параметром; выбор марок стекла имеет важное значение для проектирования форсированных по светосиле объективов, при этом отсутствие необходимых оптических материалов можно, до определенной степени, компенсировать за счет изменения величины воздушного промежутка между компонентами.

Одновременное использование при расчете объективов ПНВ двух базовых двухлинзовых компонентов из числа приведенных в табл. 2 позволяет увеличивать относительные отверстия до 1:1,5 и выше, а включение дополнительных коррекционных компонентов — развить угловое поле [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутслов М. М., Степанов Б. М., Фанченко С. Д. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. М.: Наука, 1978. 431 с.

2. Волосов Д. С. Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1971. 671 с.

3. Патент РФ № 2239855. Линзовый объектив / Т. Н. Хацевич, С. В. Олейник. 2004.

Сведения об авторах

- Сергей Викторович Олейник** — аспирант; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра оптических приборов, Новосибирск; E-mail: sol2000@ngs.ru
- Татьяна Николаевна Хацевич** — канд. техн. наук, доцент; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра оптических приборов, Новосибирск; E-mail: shafrai@risp.ru

Поступила в редакцию
12.01.09 г.

УДК 681.7

М. П. ЕГОРЕНКО, В. С. ЕФРЕМОВ

ХРОМАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЪЕКТИВА С ЗЕРКАЛОМ МАНЖЕНА В НЕСКОЛЬКИХ ДИАПАЗОНАХ СПЕКТРА

Рассмотрены хроматические свойства объектива с зеркалом Манжена в визуальном и тепловизионных (3—5 и 8—12 мкм) диапазонах спектра при различных комбинациях конструктивных параметров. Построены графики зависимости хроматических сумм от значений толщины и радиуса кривизны поверхностей. Определены области наименьшего изменения хроматических сумм от конструктивных параметров с целью наилучшей компенсации хроматических аберраций в системе „положительная линза и зеркало Манжена + мениск“.

Ключевые слова: многоспектральный, зеркально-линзовый, зеркало Манжена, хроматические аберрации.

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

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

Исследования хроматических свойств зеркала Манжена ранее проводились Д. Д. Максуповым [2] и Д. В. Гавриловым [3], однако рассматривался только визуальный диапазон спектра. Попытка исследования хроматизма увеличения объектива была предпринята в работе [4], которая показала, что он не зависит от материала оптических деталей, а определяется оптической силой составляющих объектив компонентов.

В настоящей статье проведено дальнейшее исследование хроматических свойств объектива численными методами с целью определения области возможных решений и интервалов

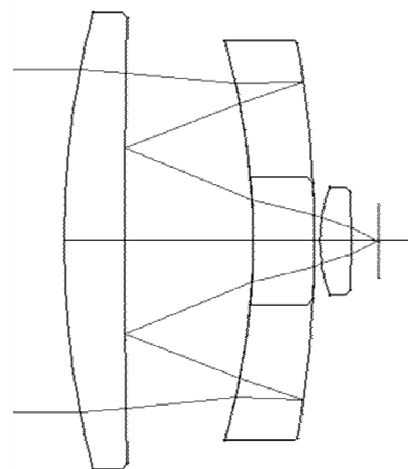


Рис. 1

изменения отдельных конструктивных параметров объектива. Рассматривается изменение хроматических сумм: S_{Ixp} — в зависимости от толщины, S_{Ixp} и S_{IIxp} — в зависимости от оптической силы компонентов объектива.

Поскольку на качество изображения систем с фотоприемниками большее значение оказывает хроматизм увеличения, то в качестве примера для объектива, выполненного из фтори-стого бария [1], на рис. 2 приведены графики изменения S_{Ixp} в зависимости от толщины линзы (d) и системы „зеркало Манжена + мениск“. Здесь и на последующих рисунках принята единая система обозначений кривых: 1, 2, 3 — линза, рабочий диапазон соответственно $\Delta\lambda = 0,5—0,9$; 3—5; 8—12 мкм; 4, 5, 6 — система „зеркало Манжена + мениск“, $\Delta\lambda = 0,5—0,9$; 3—5; 8—12 мкм.

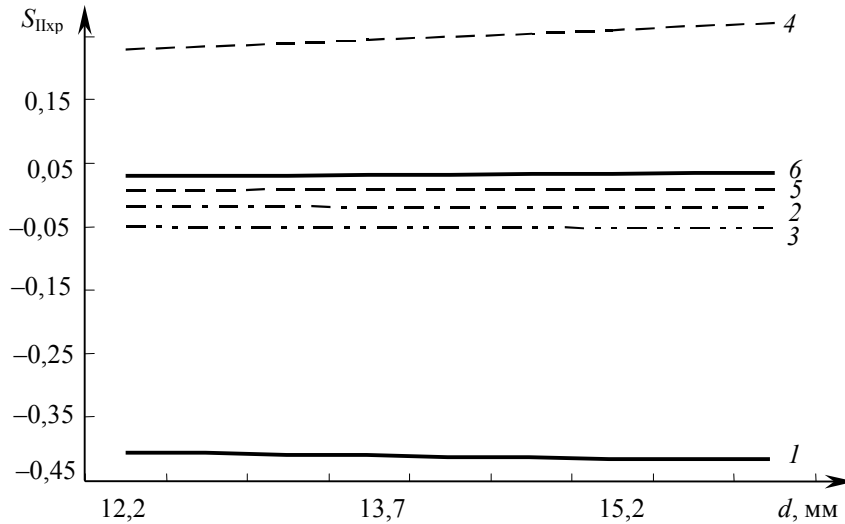


Рис. 2

Видно, что изменение толщины оптических деталей объектива практически не влияет на хроматизм увеличения объектива. Более значительное влияние на изменение хроматической суммы S_{Ixp} , согласно [4], должны оказывать оптические силы линзы и зеркала Манжена и мениска.

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

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

Это позволит представить на одном графике влияние изменения оптических сил отдельно взятых линзы и системы „зеркало Манжена + мениск“ на S_{Ixp} и S_{IIxp} соответственно.

Чтобы оптические силы линзы и зеркала Манжена оставались положительными, а мениска — отрицательной, область изменения коэффициентов K_1 и K_2 должна находиться в интервале от 0,1 до 1 (из соотношения радиусов кривизны линзы и зеркала Манжена).

На рис. 3 приведены графики изменения S_{Ixp} в зависимости от изменения радиусов кривизны поверхностей линзы и системы „зеркало Манжена + мениск“. Из рисунка следует, что в области значений коэффициентов K_1 и K_2 от 0,35 до 0,45 имеется разрыв функции S_{Ixp} , но только для системы „зеркало Манжена + мениск“ при изменении K_2 . Функция S_{Ixp} линзы при изменении K_1 в интервале значений от 0,1 до 1 разрывов не имеет, что хорошо видно на рис. 4, воспроизводящем часть рис. 3 в увеличенном масштабе.

Численные результаты расчета S_{Ixp} для рассматриваемых спектральных диапазонов при $K_1 = K_2$ приведены в табл. 1.

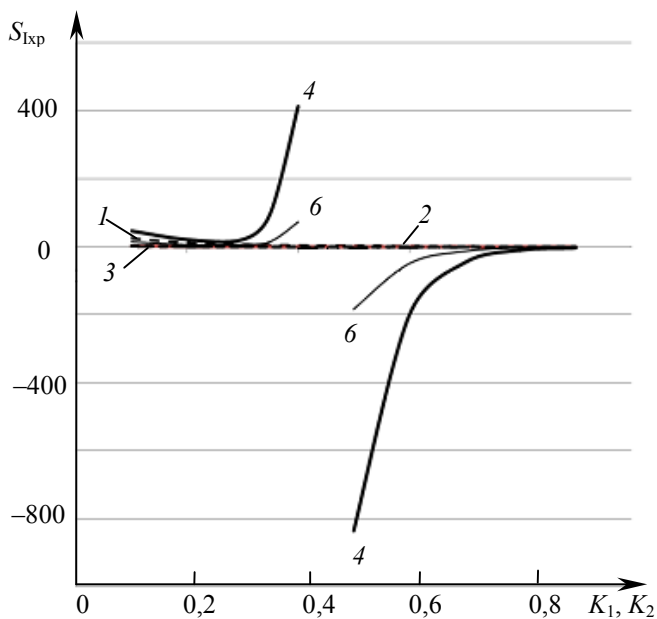


Рис. 3

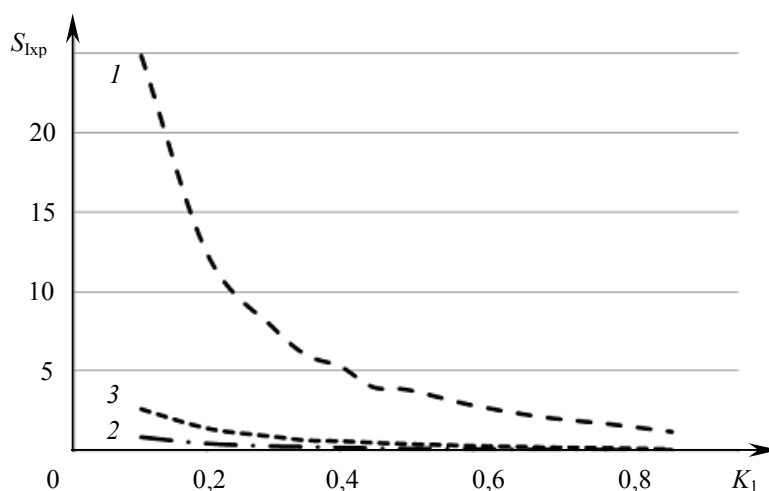


Рис. 4

Таблица 1

K_1, K_2	S_{Ixp} по компонентам (по трем диапазонам спектра)					
	Линза			Зеркало Манжера + мениск		
	0,5—0,9 мкм	3—5 мкм	8—12 мкм	0,5—0,9 мкм	3—5 мкм	8—12 мкм
0,1	24,872	0,8951	2,6581	46,2701	1,9081	13,9827
0,2	12,353	0,4838	1,4483	20,8132	0,9095	5,9488
0,3	7,7148	0,3111	0,9344	20,8213	1,0264	6,4726
0,35	6,5342	0,2734	0,7851	98,5243	—	15,5482
0,4	5,3133	0,2174	0,6538	412,874	-5,3462	72,6254
0,45	4,6442	0,1825	0,5542	—	-4,2001	—
0,5	3,8465	0,1588	0,4782	-836,512	-3,8853	-184,725
0,6	2,8579	0,1187	0,3575	-202,321	-2,7584	-49,7143
0,7	2,1466	0,0895	0,2697	-47,11	-1,3712	-13,6224
0,8	1,7078	0,0714	0,2152	-10,54	-0,4115	-3,5613
0,9	1,1915	0,0499	0,1506	-3,998	-0,1692	-1,5614

В интервале значений K_1 и K_2 от 0,1 до 0,35 $S_{\text{ИХР}}$ имеют один знак для линзы и системы „зеркало Манжена + мениск“. В интервале значений K_1 и K_2 от 0,45 до 0,9 $S_{\text{ИХР}}$ для линзы и системы „зеркало Манжена + мениск“ имеют разные знаки, но значительно отличаются по абсолютной величине. Из этого можно заключить, что хроматизм положения в объективе исправить невозможно.

На рис. 5 приведены графики изменения $S_{\text{ИХР}}$ в зависимости от изменения радиусов кривизны поверхностей линзы и системы „зеркало Манжена + мениск“. Из графиков следует, что в области значений коэффициентов K_1 и K_2 от 0,33 до 0,43 имеется разрыв функции $S_{\text{ИХР}}$. Численные результаты расчета для рассматриваемых спектральных диапазонов приведены в табл. 2.

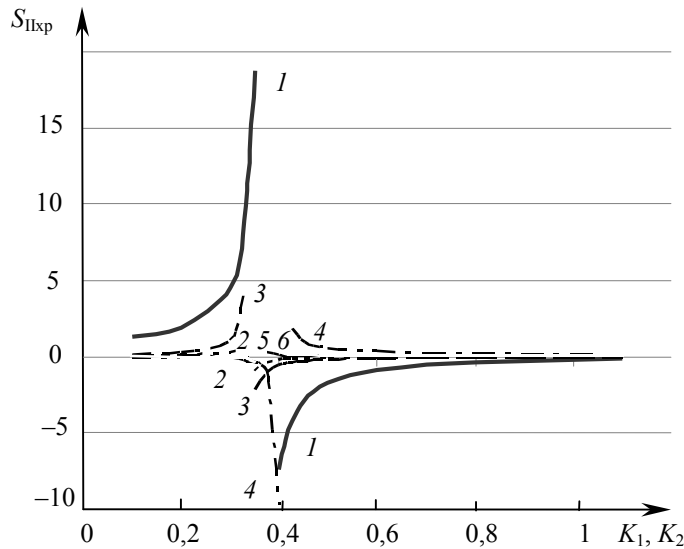


Рис. 5

Таблица 2

K_1, K_2	$S_{\text{ИХР}}$ по компонентам (по трем диапазонам спектра)					
	Линза			Зеркало Манжена + мениск		
	0,5—0,9 мкм	3—5 мкм	8—12 мкм	0,5—0,9 мкм	3—5 мкм	8—12 мкм
0,1	1,3460	0,0555	0,1682	0,0724	0,0034	0,0105
0,2	1,9316	0,0941	0,2918	0,0687	0,0025	0,0073
0,3	4,4655	0,3219	1,0851	-0,0748	-0,0068	-0,0225
0,325	8,1262	0,9336	4,0533	-0,2023	-0,0144	-0,0634
0,337	12,2240	—	—	-0,3106	-0,0220	-0,0925
0,35	18,7360	-0,9942	-2,2012	-0,3785	—	-0,3676
0,375	—	-0,4357	-1,2327	-0,9345	0,2810	—
0,4	-7,4121	-0,1805	-0,5144	-9,6832	0,1526	0,4302
0,412	-5,4474	-0,1234	-0,4543	—	0,0752	0,2543
0,425	-4,2364	-0,1138	-0,3812	1,7843	0,0376	0,1655
0,45	-2,9437	-0,0825	-0,3258	0,9502	0,0345	0,1468
0,5	-1,7435	-0,0629	-0,1861	0,5682	0,0242	0,0738
0,6	-0,8906	-0,0349	-0,1042	0,3638	0,0164	0,0486
0,7	-0,5485	-0,0223	-0,0669	0,2467	0,0108	0,0337
0,8	-0,3945	-0,0163	-0,0494	0,2195	0,0097	0,0294
0,9	-0,2485	-0,0105	-0,0316	0,1517	0,0068	0,0206
1	-0,1695	-0,0072	-0,0218	0,1015	0,0047	0,0143

Для дальнейшего анализа выберем часть графиков $S_{\text{ИХР}}$ на рис. 5, расположенную справа от линии разрыва с диапазоном изменения K_1 и K_2 от 0,5 до 1 (где возможно получить минимальный хроматизм увеличения). Изменение $S_{\text{ИХР}}$ в зависимости от оптической силы линзы и системы „зеркало Манжена + мениск“ в указанном интервале значений K_1 и K_2 показано на рис. 6.

Характер зависимостей на рис. 6 в целом соответствует данным для видимой области спектра [5], согласно которым зеркало Манжена компенсирует примерно треть хроматической aberrации положительной линзы. Примерно такое же соотношение наблюдается и в спектральных интервалах 3—5 и 8—12 мкм, но сама величина $S_{\text{Икр}}$ в инфракрасной области спектра существенно меньше (примерно в 10 раз — для диапазона 3—5 мкм и примерно в 20 раз — для диапазона 8—12 мкм).

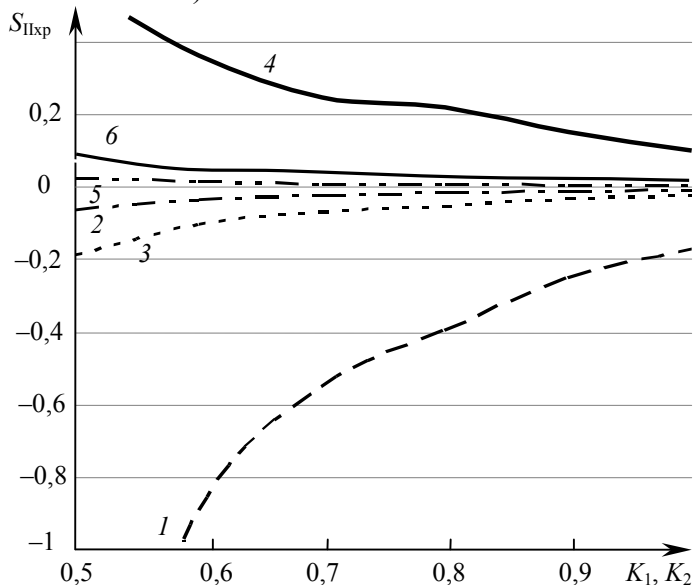


Рис. 6

Таким образом, в объективах рассмотренного типа система „зеркало Манжена + мениск“ компенсирует примерно половину хроматической aberrации положительной линзы, что открывает реальные возможности для дальнейшего уменьшения хроматизма, в частности, заменой зеркальной части первой линзы на второе зеркало Манжена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. СССР № 10768558. Зеркально-линзовый объектив / В. С. Ефремов, Л. Н. Павлюшенко. Опубл. 10.08.84. Б.И. № 8.
2. Максудов Д. Д. *Астрономическая оптика*. Л.: Наука, 1979. 395 с.
3. Гаврилов Д. В. Расчет простой линзы с одной отражающей поверхностью // *Опт. и спектр*. 1962. Т. 13. С. 436—431.
4. Егоренко М. П. Расчет хроматизма увеличения многоспектрального зеркально-линзового объектива // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2007. Т. 50, № 2. С. 65—69.
5. Слюсарев Г. Г. *Расчет оптических систем*. Л.: Машиностроение, 1975. 640 с.

Сведения об авторах

- Марина Петровна Егоренко** — Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра оптико-электронных приборов, Новосибирск; ассистент;
E-mail: kaf.oep@ssga.ru
- Виктор Сергеевич Ефремов** — канд. техн. наук, доцент; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра оптико-электронных приборов, Новосибирск;
E-mail: ews49@mail.ru

Поступила в редакцию
12.01.09 г.

С. В. ОЛЕЙНИК, Т. Н. ХАЦЕВИЧ

СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ДИСКРЕТНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ

Предложен способ построения оптической системы с дискретным изменением фокусного расстояния и сохранением величины заднего апертурного угла. Разработана и исследована параметрическая модель, на основе которой рассчитаны реальные объективы.

Ключевые слова: дискретное изменение фокусного расстояния, светосильные объективы для тепловизоров, спектральный диапазон 8—12 мкм.

Повысить эффективность оптической системы при решении ряда задач можно путем изменения величины углового поля зрения в системах наблюдательных приборов. При этом широкое поле зрения объективов (малое увеличение) используется для обнаружения цели в относительно большой области, при наблюдении с малым полем (большое увеличение) возможны тщательный осмотр, классификация и идентификация обнаруженной цели. В большинстве случаев изменение увеличения в три—четыре раза является достаточным, диапазон увеличений может быть расширен при работе на максимальных дистанциях. При изменении углового поля в системе необходимо сохранить высокое качество изображения объектов.

В настоящее время в связи с отработанными технологиями изготовления преломляющих поверхностей сложных форм вопрос о качестве изображения в системе с изменяемым увеличением перестает быть определяющим, и на первый план выходят вопросы технологичности и массогабаритные характеристики. Применение несферических поверхностей позволяет сократить общее число элементов системы, но вместе с тем и значительно увеличивает ее стоимость. В этой связи представляется интересным рассмотреть способ построения оптической схемы объектива на базе исключительно сферических преломляющих поверхностей с минимальным числом компонентов, обеспечивающий дискретную смену фокусного расстояния в широком диапазоне, постоянство величины относительного отверстия и длины системы вдоль оптической оси, а также стабильно высокое качество изображения при переключении полей зрения.

Рассмотрим оптическую систему с фокусным расстоянием f_1' , обладающую оптимальной коррекцией aberrаций и формирующую изображение высокого качества. Пусть задний апертурный угол равен α_1' , и в системе выполнено условие синусов. Если при смене фокусного расстояния сохранить ход апертурного луча на выходе системы без изменения, то положение плоскости изображения и качество изображения не изменятся. Равенство апертурных углов $\alpha_{II}' = \alpha_1'$ обеспечивает постоянство величины относительного отверстия при смене фокусных расстояний, а значения последних удовлетворяют условию $h_1/f_1' = h_1/f_{II}' = \text{const}$ (здесь h — высота апертурного луча на входном зрачке).

На рис. 1 представлена отвечающая вышеназванным условиям параксиальная модель системы, состоящая из четырех компонентов 1—4. Внутренние компоненты 2 и 3 в положении, показанном на рис. 1, а, образуют систему, эквивалентную плоскопараллельной пластине. При расчете реальной системы действие плоскопараллельной пластины используется для компенсации сферической aberrации внешних компонентов 1 и 4, выполняющих силовую роль. Подвижки компонентов 2 и 3 рассчитываются из условия постоянства положения точки

F'_{1-3} — заднего фокуса системы компонентов 1—3. Во втором положении, показанном на рис. 1, б, оптическая сила компонентов 1—3 совместно с компонентом 4 обеспечивает второе значение фокусного расстояния системы f''_{II} .

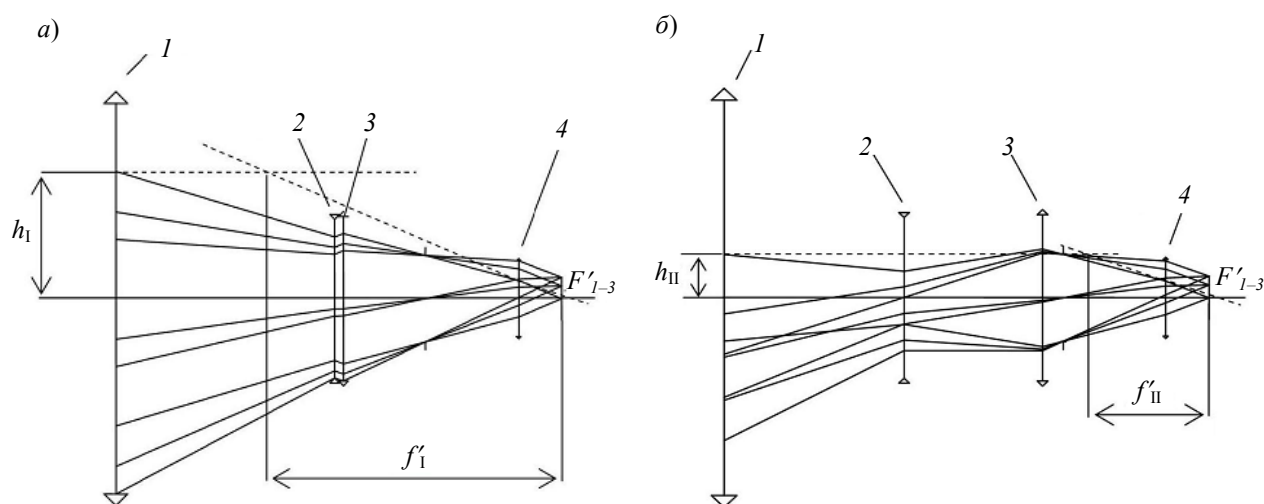


Рис. 1

Если в оптической системе предусматривается перемещение компонентов 2 и 3, то апертурная диафрагма может быть выполнена с возможностью изменения своих размеров. Если положение компонента 3 и размер диафрагмы зафиксированы, как на рис. 2, то изменение фокусного расстояния осуществляется перемещением только компонента 2, что позволяет реализовать четырехкомпонентную систему с одним внутренним перемещающимся компонентом.

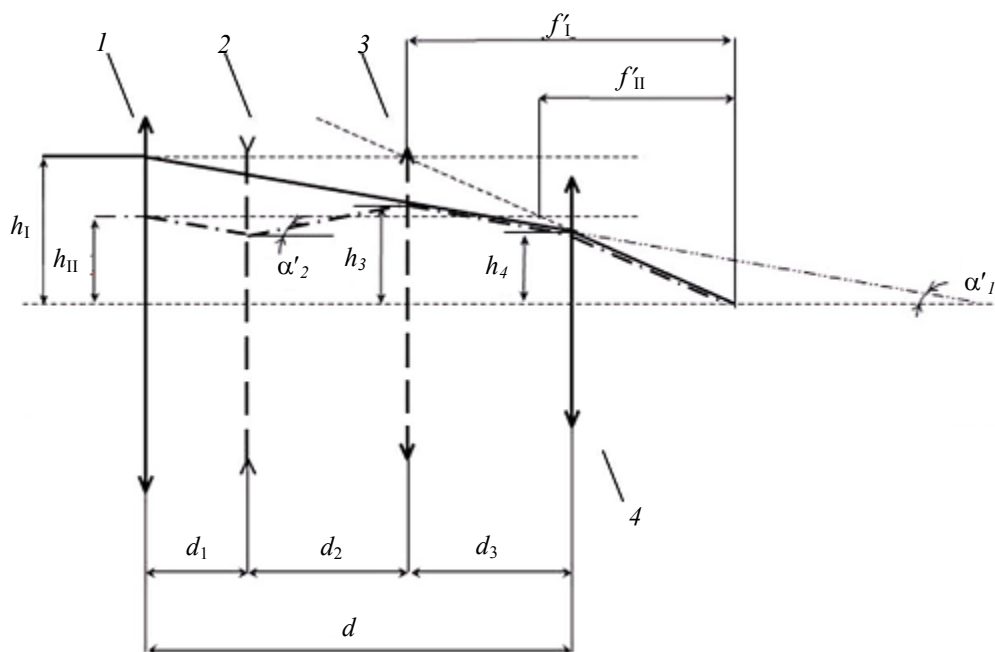


Рис. 2

Согласно представленной на рис. 2 схеме, в тонких компонентах определяются оптические силы компонентов 1—4, величина перемещений и граничные значения воздушных промежутков при переходе от фокусного расстояния f'_I к f''_{II} . Длина системы d от первого до четвертого компонента постоянна при изменении фокусного расстояния и равна

$$d = d_1 + d_2 + d_3,$$

где d_1, d_2, d_3 — величины воздушных промежутков между компонентами оптической системы.

Чтобы первый паракиальный луч в положении компонентов, соответствующих фокусному расстоянию f'_{II} , имел на выходе из системы тот же угол, что и в положении, соответствующем фокусному расстоянию f'_I , он должен упасть на последний компонент на той же высоте и под тем же углом, т. е. должно выполняться условие $(h_4)_{II} = (h_4)_I$ и $(\alpha_4)_{II} = (\alpha_4)_I$. Необходимым условием для этого является равенство высот падения первых паракиальных лучей на компонент 3 в каждом из двух дискретных положений, что обеспечивается размещением апертурной диафрагмы между компонентами 3 и 4. Изменение фокусного расстояния происходит за счет изменения воздушного промежутка между компонентами 2 и 3.

В общем случае относительно расположения апертурной диафрагмы можно отметить следующее: в первом положении, соответствующем фокусному расстоянию f'_I , действие компонентов 2 и 3 эквивалентно действию плоскопараллельной пластины, и последние могут находиться в любом месте в промежутке между компонентами 1 и 4, т. е. область размещения апертурной диафрагмы ограничена величиной воздушного промежутка d . Величина последнего определяется по формуле оптической силы Φ_I двухкомпонентной системы при известных значениях оптических сил компонентов Φ_1 и Φ_4

$$\Phi_I = \Phi_1 + \Phi_4 - \Phi_1 \Phi_4 d. \quad (1)$$

При определении оптических сил компонентов 2 и 3 следует учесть, что

$$\Phi_3 = -\Phi_2; \quad \alpha'_3 = \alpha'_1; \quad (h_3)_{II} = (h_3)_I. \quad (2)$$

В таком случае эквивалентную оптическую силу Φ_{II} рассматриваемой системы во втором положении можно записать в виде

$$\begin{aligned} \Phi_{II} = & \Phi_1 + \Phi_2^2 d_2 - \Phi_1 \Phi_2^2 (d - d_3 - 1) d_2 + \Phi_4 - \\ & - \left[\Phi_1 \Phi_4 + \Phi_1 \Phi_2^2 d_2 - \Phi_4 \Phi_1 \Phi_2^2 (d - d_3 - 1) d_2 \right] d, \end{aligned} \quad (3)$$

при этом отношение высот падения рассматриваемых лучей на первом компоненте пропорционально отношению фокусных расстояний системы:

$$\frac{h_I}{h_{II}} = \frac{f'_I}{f'_{II}}. \quad (4)$$

Для начальных условий $\Phi_1 = 1$; $h_1 = 1$; $\alpha'_1 = \alpha'_3 = \Phi_1$; $d_{1-2} = d_1 + d_2 = \text{const}$; $(d_2)_I = 0$ и $(h_2)_I = (h_3)_I = 1 - d_{1-2} \Phi_1$ с учетом выражений (2), (3) составлены следующие параметрические уравнения, связывающие оптические силы компонентов 2 и 3 и величину воздушного промежутка $(d_2)_{II}$ между ними с изменением высоты h_{II} , падения апертурного луча на первый компонент во втором положении, а следовательно, согласно соотношению (4), — и с изменением фокусного расстояния оптической системы:

$$h_{II} = 1 - d_{1-2} (\Phi_1 + \Phi_3); \quad (d_2)_{II} = \frac{\Phi_1}{\Phi_3} (d_{1-2} - 2) + \frac{1}{\Phi_3} + d_{1-2} \Phi_1 + 1.$$

В таблице приведены параметры объектива, включая общую длину L от первого компонента до плоскости изображения, для частного случая, когда фокусное расстояние первого

компонента зафиксировано (150 мм) и неизменно во всем диапазоне изменения фокусного расстояния объектива.

f'_I / f'_{II}	f'_1	d_1	f'_2	d_2	f'_3	d_3	f'_4	d_4	L
100/50	150	100/79,3	-29,3	0/20,7	29,3	22,5	54,9	18,3	140
100/33	150	100/63,4	-31,7	0/36,6	31,7	19,6	60,7	20,2	140
100/25	150	100/50,0	-33,3	0/50,0	33,3	20,0	59,9	20,0	140
100/20	150	100/38,2	-34,5	0/61,8	34,5	20,2	59,6	19,8	140
100/16,6	150	100/27,3	-35,5	0/72,7	35,5	19,6	60,9	20,3	140
100/14,3	150	100/17,8	-36,3	0/82,2	36,3	19,6	60,8	20,3	140
100/12,5	150	100/8,7	-36,9	0/91,3	36,9	19,4	61,1	20,4	140
100/11,9	150	100/4,5	-37,2	0/95,5	37,2	19,3	61,4	20,5	140
100/10	150	100/0	-34,8	0/100	34,8	19,4	61,2	20,6	140

На рис. 3 показаны графики, иллюстрирующие для этого случая изменение оптических сил (Φ) и диафрагменных чисел (D) компонентов в зависимости от перепада фокусных расстояний (Δf) в объективе с относительным отверстием 1:1, обеспечивающим размер изображения, равный $0,16 f'_I$ ($I=4$ — номера компонентов). При этом значения оптических сил компонентов приведены относительно Φ_I .

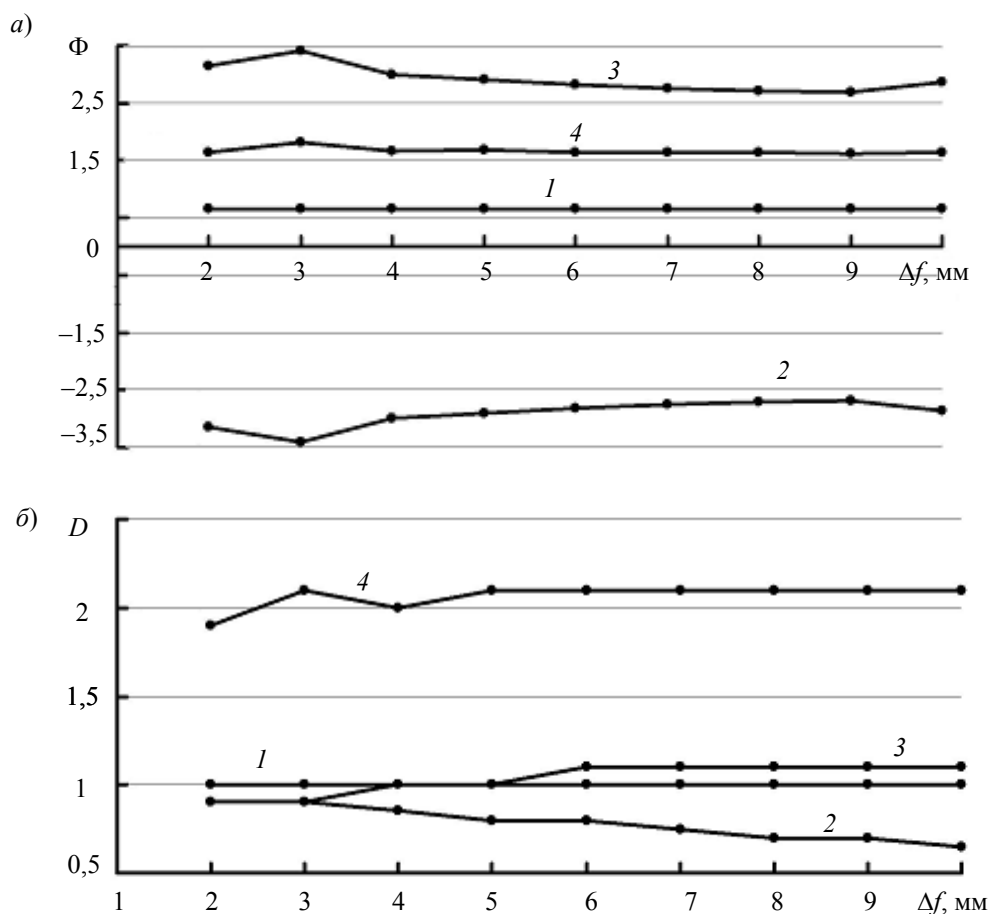


Рис. 3

Анализ графиков на рис. 3 позволяет судить о том, насколько сложной будет конструкция компонентов в зависимости от требуемого перепада фокусных расстояний объектива f'_I / f'_{II} . Например, для трехкратного перепада увеличений оптическая сила и относительное отверстие соответственно составляют: для компонента 1 — 0,7 и 1:1; для 2 — 3,5 и 1:0,85; для 3 — 3,5 и 1:1; для 4 — 1,6 и 1:2. При расчете объективов для области спектра от 8 до 12 мкм каждый компонент может быть выполнен в виде одиночной линзы, если его относительное

отверстие менее 1:1. Однако в случае, если относительное отверстие нескольких компонентов близко к указанной величине, то для достижения качества изображения, близкого к дифракционному, требуется усложнение хотя бы одного компонента.

На основе паракиальной модели были разработаны светосильные объективы с дискретной сменой фокусного расстояния, схемы которых представлены на рис. 4 [1, 2]. Здесь K — коэффициент передачи контраста, l — дифракционная ЧКХ, 2 — осевая точка, 3 — $2y' = 5$ мм, 4 — $2y' = 8$ мм, a — $f' = 60$, b — 240, v — 40, z — 120 мм; a, b — $D/f' = 1:1,5$, v, z — 1:1,2; a, b — $2y' = 12$ мм, v, z — 16 мм. Все преломляющие поверхности в объективах сферические. В схемах a, b используются два подвижных компонента, в схемах v, z — один. Увеличение числа линз в схеме рис. 4, a, b обусловлено необходимостью реализации панкратической смены фокусного расстояния.

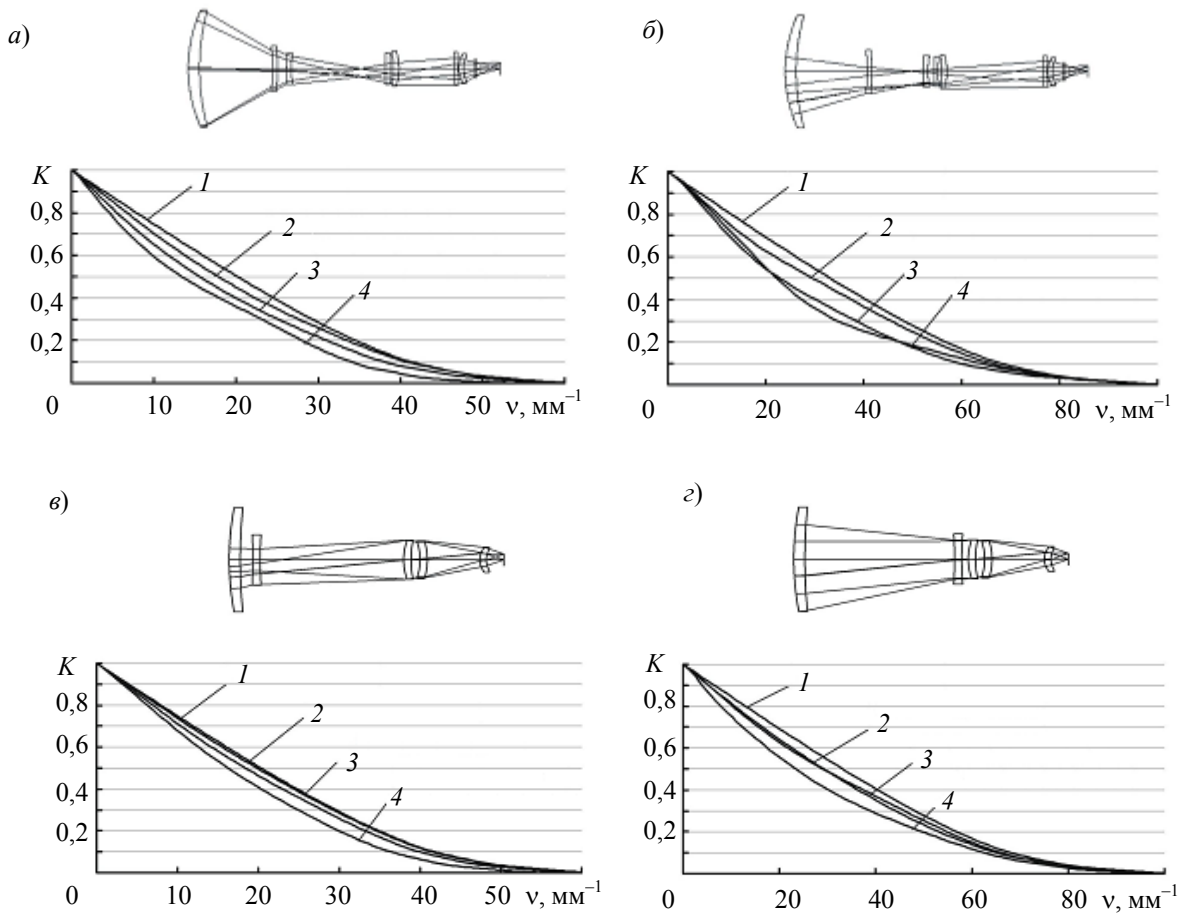


Рис. 4

Объективы являются частью тепловизионного комплекса и предназначены для построения изображений объектов на светочувствительной неохлаждаемой матрице.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 2316797. Линзовый объектив с изменяемым фокусным расстоянием для работы в ИК-области спектра / С. В. Олейник. 2008.
2. Патент РФ № 2339983. Линзовый объектив с изменяемым фокусным расстоянием для работы в ИК-области спектра / С. В. Олейник, Т. Н. Хацевич. 2008.

- Сергей Викторович Олейник** — *Сведения об авторах*
— аспирант; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра оптических приборов, Новосибирск; E-mail: sol2000@ngs.ru
- Татьяна Николаевна Хацевич** — канд. техн. наук, доцент; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра оптических приборов, Новосибирск; E-mail: shafrai@risp.ru

Поступила в редакцию
12.01.09 г.

УДК 535.4

В. В. ЧЕСНОКОВ, Д. В. ЧЕСНОКОВ, Д. М. НИКУЛИН

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ СВЕТОФИЛЬТРЫ С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ПОЛОСОЙ ПРОПУСКАНИЯ

Рассчитаны параметры микромеханических мультиплекс-светофильтров, перестраиваемых во всей полосе видимого диапазона спектра управляющим напряжением 3—5 В с расчетной шириной полосы пропускания около 10 Å.

Ключевые слова: мультиплекс-светофильтр, субмикронный эквидистантный воздушный зазор, перестраиваемая полоса пропускания.

Интерференционные светофильтры находят широкое применение в физических исследованиях, измерительной технике, промышленности [1, 2]. Их достоинством является простота и удобство в работе, высокая степень монохроматичности выделяемого излучения. Дополнительные преимущества этим элементам принесет выполнение их перестраиваемыми по выделяемой полосе спектра, что может быть достигнуто при использовании микро- и нанотехнологий [3, 4]. В перестраиваемых интерференционных светофильтрах [3, 4] изменяется воздушный зазор между зеркалами резонатора Фабри—Перо, соответствующий первому порядку интерференции в видимом диапазоне спектра. Полоса пропускания при перестройке в видимом диапазоне спектра может иметь значение $2\delta\lambda \approx \lambda/50$ Å, если в качестве зеркала применяются металлические пленки на стеклянных подложках.

В статье рассматриваются вопросы разработки перестраиваемых мультиплекс-светофильтров, в которых используется комбинация двух интерференционных светофильтров с высоким и первым порядком интерференции.

За счет использования двух светофильтров — низкого и высокого порядка — можно выделять из спектра источника излучение с большей степенью монохроматичности при сохранении перестраиваемого диапазона. Упрощенная схема такого светофильтра показана на рис. 1.

Светофильтр первого порядка образован зеркалами 1 и 2 и воздушным зазором между ними. Светофильтр высокого порядка образован зеркалами 3 и 10 и прозрачной пластиной 5 между ними. Зеркальное покрытие 1 нанесено на прозрачную пластину 8; корпус 6 фиксирует между зеркалами 1 и 2 воздушный зазор 0,2—0,4 мкм. Пластина 8 имеет форму диска с тремя радиально расположенными держателями 7. Управление воздушным зазором — электростатическое: управляющее напряжение U_0 подается между зеркалом 1 и электродом 9. Держатели 7 обеспечивают упругую поддержку подвижного зеркала и регулируют величину зазора.

Определим возможные параметры рассматриваемого микромеханического мультиплекс-светофильтра. Сила электростатического притяжения зеркал 1 и 2 друг к другу равна

$$F = \frac{\varepsilon_0 S E^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 S U_0^2}{2d^2}, \quad (1)$$

где ε_0 — диэлектрическая постоянная, S — площадь зеркала, E — напряженность электрического поля в воздушном зазоре, U — напряжение на зазоре, d — величина зазора.

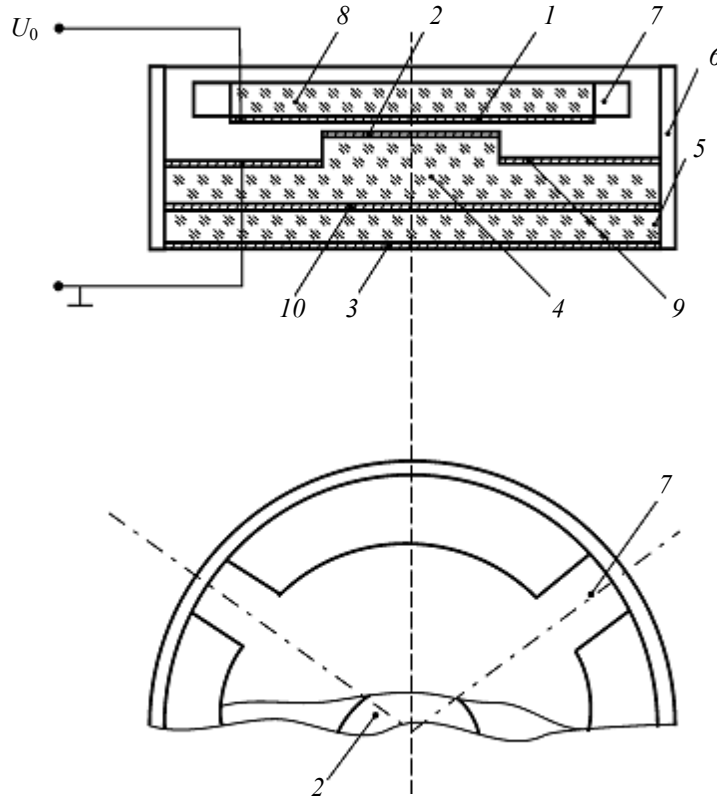


Рис. 1

Изгиб держателей 7 при возникновении силы F определим по формуле изгиба балки, нагруженной сосредоточенной силой на конце [5]:

$$f = \frac{Pl^3}{3E_{Ю}I}. \quad (2)$$

Здесь f — прогиб конца балки; $P = F/3$ — сосредоточенная сила, нагружающая конец балки; l — длина балки; $E_{Ю}$ — модуль Юнга ее материала; $I = hb^3/12$ — момент инерции сечения балки относительно оси симметрии сечения; b и h — толщина и ширина балки. Объединив (1) и (2), получим

$$f = 2 \frac{\varepsilon_0 S E^2 l^3}{E_{Ю} h b^3}. \quad (3)$$

Рассмотрим оптические характеристики светофильтра. В мультиплекс-интерферометре при отношении значений оптической толщины интерферометров, кратном целому числу, область дисперсии определяется областью дисперсии тонкого интерферометра, разрешение обусловлено параметрами толстого интерферометра.

Прозрачность T_m мультиплекс-светофильтра аналогично прозрачности четырехзеркального интерферометра на длине волны максимума пропускания определяется формулой [1]:

$$T_m = \frac{T^4}{\left[(1-R)^2 + 4R \sin^2 \frac{\delta_1}{2} \right] \left[(1-R)^2 + 4R \sin^2 \frac{\delta_2}{2} \right]}, \quad (4)$$

где $\frac{\delta_1}{2} = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 L_1$, $\frac{\delta_2}{2} = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 L_2$ (без учета скачков фаз на отражающих поверхностях), n_1 , L_1 и n_2 , L_2 — показатель преломления среды и расстояние между зеркалами тонкого и толстого светофильтра; T и R — энергетические прозрачность и коэффициент отражения каждого зеркала. Порядок спектра пропускания толстого светофильтра определяется выражением

$$q = \frac{2L_2 n_2}{\lambda_q}, \quad (5)$$

где λ_q — средняя длина волны области дисперсии интерферометра с порядком q .

Область дисперсии мультиплекс-светофильтра $\Delta\lambda_m$ примерно равна области дисперсии тонкого светофильтра [2]:

$$\Delta\lambda_m = \frac{\bar{\lambda}}{q_1}, \quad (6)$$

где q_1 — порядок спектра тонкого светофильтра, $\bar{\lambda} = (\lambda_{\max} + \lambda_{\min})/2$, λ_{\max} и λ_{\min} — максимальная и минимальная длина волны рабочего диапазона мультиплекс-светофильтра.

Разрешение мультиплекс-светофильтра определяется разрешением тонкого светофильтра [2]:

$$\delta\lambda_m = \delta\lambda_1 = \frac{\lambda_q}{q_2} \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}}. \quad (7)$$

Аппаратная функция мультиплекс-светофильтра представляет собой произведение аппаратных функций его составных частей, светофильтр пропускает излучение с длинами волн, общими для полос пропускания обоих составляющих его светофильтров.

При перестройке светофильтра (путем изменения зазора между зеркалами) с первым порядком интерференции его полоса пропускания смещается по спектру, происходит выделение одной полосы дисперсии, затем другой полосы второго светофильтра, т.е. „переключение“ пропускаемых светофильтром с большим порядком интерференции диапазонов $\Delta\lambda_q$ этого светофильтра. В спектре пропускания мультиплекс-светофильтра не будут наблюдаться одновременно две или более дисперсионные области, если ширина полосы пропускания светофильтра с меньшим зазором на наименьшей длине волны рабочего диапазона мультиплекс-светофильтра $\delta\lambda_1$ меньше полосы дисперсии $\Delta\lambda_q$ второго:

$$\delta\lambda_1 \leq \Delta\lambda_q.$$

Значение $\delta\lambda_1$ определяется из выражения (7) путем подстановки в него параметров тонкого светофильтра.

Найдем полосу дисперсии второго интерферометра:

$$\Delta\lambda_q = \frac{\lambda_q^2}{2L_2}.$$

Число „переключаемых“ полос дисперсии M равно:

$$M = q_{\min} - q_{\max} = 2L_2 n_2 \left(\frac{1}{\lambda_{\max}} - \frac{1}{\lambda_{\min}} \right).$$

Проведем количественную оценку достижимых параметров рассматриваемого устройства, в котором интерферометр с меньшим зазором имеет порядок $q_1 = 1$, регулируемый диапазон спектра $\Delta\lambda = \Delta\lambda_m = 0,4—0,8$ мкм и величину зазора L_1 в крайних точках диапазона перестройки в соответствии с (5) $L_1 = 0,2—0,4$ мкм. Результаты расчетов приведены в табл. 1—3.

Таблица 1

Расчетные геометрические и электрические параметры перестраиваемого мультиплекс-светофильтра ($E_{10} = 0,7 \cdot 10^{11}$ Па)

Параметры держателя, м				E , В/м	L_2 , мкм	$U = Ed$, В	S , м ²
$f = \Delta L_1$	h	b	l				
$0,2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^{-6}$	3,4	$1 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2

Расчетные оптические параметры микромеханического мультиплекс-светофильтра ($R = 0,9$, $T = 0,07$, $n_2 L_2 = 5,8$ мкм)

L_1 , мкм	λ , мкм	$\delta\lambda_1$, мкм	$\Delta\lambda_m$, мкм	$\delta\lambda_m$, мкм	q	$M = q_{\min} - q_{\max}$	T_m
0,2	0,4	0,013	0,013	0,00046	29	14,5	0,24
0,3	0,6	0,02	0,031	0,001	19,3	14,5	0,0009
0,4	0,8	0,027	0,055	0,0019	14,5	14,5	0,0007

Таблица 3

Расчетные оптические параметры микромеханического мультиплекс-светофильтра ($R = 0,85$, $T = 0,1$, $n_2 L_2 = 5,8$ мкм)

L_1 , мкм	λ , мкм	$\delta\lambda_1$, мкм	$\Delta\lambda_m$, мкм	$\delta\lambda_m$, мкм	q	$M = q_{\min} - q_{\max}$	T_m
0,2	0,4	0,02	0,013	0,00071	29	14,5	0,2
0,3	0,6	0,03	0,031	0,0016	19,3	14,5	0,0017
0,4	0,8	0,04	0,055	0,0028	14,5	14,5	0,0013

Результаты расчетов подтверждают, что мультиплекс-светофильтр может перестраиваться в диапазоне длин волн $0,4—0,8$ мкм, управляющее напряжение не превышает $3—4$ В; расчетное разрешение $\delta\lambda \approx 7,5—13$ Å.

Таким образом, показано, что микромеханический мультиплекс-светофильтр может работать, перекрывая весь видимый диапазон спектра с разрешением порядка 10 Å. Управляющее электрическое напряжение по своей величине совместимо с рабочими напряжениями полупроводниковых микросхем.

Подобный светофильтр, по нашему мнению, может найти применение в системах экспресс-анализа химических веществ и различных промышленных жидкостей и газов при исследованиях содержания вредных веществ в окружающей среде. Светофильтр может иметь модификации, работающие в различных участках инфракрасного диапазона спектра.

На рис. 2 приведен расчетный график зависимости (по формуле (4)) коэффициента пропускания мультиплекс-светофильтра в видимом диапазоне спектра от величины регулируемого зазора тонкого светофильтра. Толщина зазора толстого светофильтра $n_2 L_2 = 5,8$ мкм, энерге-

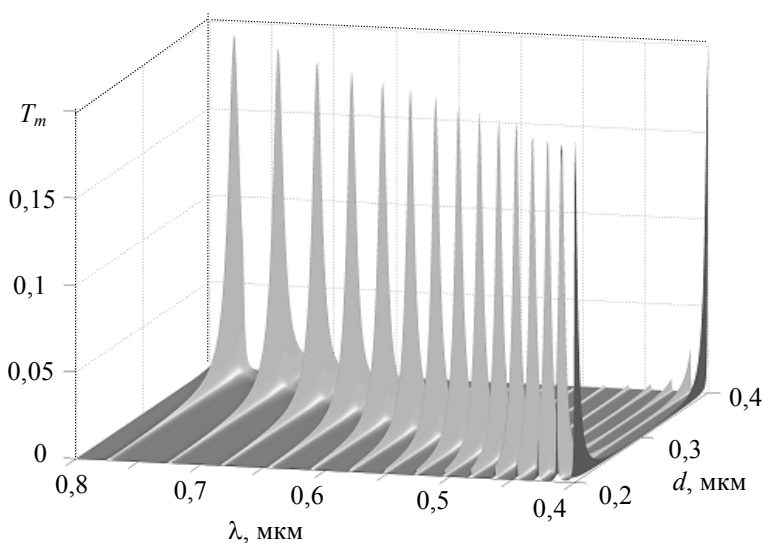


Рис. 2

гия мультиплекс-светофильтра в видимом диапазоне спектра от величины регулируемого зазора тонкого светофильтра. Толщина зазора толстого светофильтра $n_2 L_2 = 5,8$ мкм, энерге-

тические прозрачность и коэффициент отражения каждого зеркала соответственно равны: $T = 0,1$ и $R = 0,85$.

Проведены предварительные исследования экспериментальных образцов с субмикронными эквидистантными воздушными зазорами между зеркалами резонатора с первым порядком интерференции. Упрощенная схема такого перестраиваемого мультиплекс-светофильтра представлена на рис. 3.

Светофильтр первого порядка образован зеркалами 1, 2 и воздушным зазором между ними. Светофильтр высокого порядка (в экспериментальном образце отсутствовал) образован зеркалами 3, 4 и прозрачной пластиной 5 между ними. К пьезокерамической шайбе 8 прикреплена державка 9, в которой закреплена прозрачная пластина 7 с зеркалом 1. Важнейшей конструктивной особенностью устройства является использование между зеркалами 1 и 2 субмикронного эквидистантного воздушного зазора [6], регулируемого в пределах 0,2—0,4 мкм на всей площади оптической апертуры диаметром 10 мм.

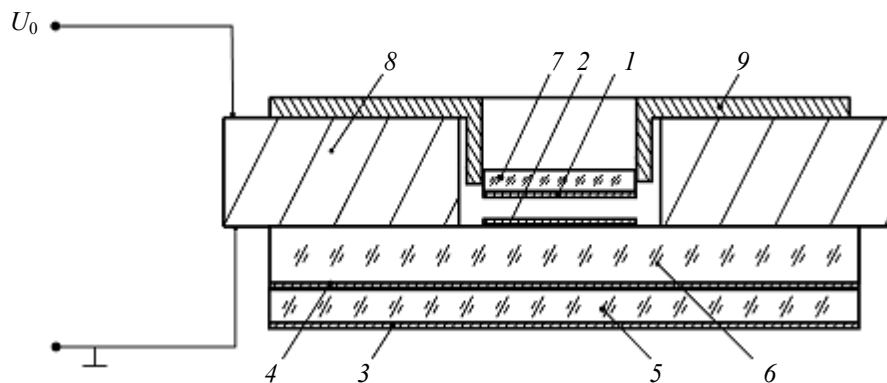


Рис. 3

Управление величиной воздушного зазора осуществляется изменением управляющего напряжения, приложенного между обкладками пьезокерамической шайбы 8.

Исследованные экспериментальные образцы с субмикронными эквидистантными воздушными зазорами между зеркалами резонатора с первым порядком интерференции имели отклонения от эквидистантности порядка 0,09 мкм (определялись по интерференционным цветам) на световом диаметре 8 мм. При изменении зазора на 0,125 мкм происходила перестройка резонатора с пропускания в области синего цвета на пропускание в области красного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скоков И. В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике. М.: Машиностроение, 1989. 256 с.
2. Лебедева В. В. Экспериментальная оптика. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. 352 с.
3. Чесноков В. В., Чесноков Д. В. (отв. исполнитель). Исследование физических проблем нано- и микроразмерных функциональных механических устройств информационных оптоэлектронных систем. Отчет о НИР, № Госрегистрации 0199.0010326, инв. № 022001.0314. Новосибирск, 2003.
4. Чесноков А. Е. Исследование оптических характеристик многослойных структур управляемого резонатора Фабри—Перо // Сб. матер. III Междунар. науч. конгресса „ГЕО-Сибирь-2007“. Новосибирск: СГГА, 2007. Т. 4. Ч. 1. С. 167—170.
5. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1988. 736 с.
6. Заявка на патент РФ № 2008130196. Способ изготовления перестраиваемого светофильтра с интерферометром Фабри—Перо / В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков, Д. М. Никулин, А. Е. Чесноков. Приоритет от 21.07.2008.

Сведения об авторах

- Владимир Владимирович Чесноков*** — д-р техн. наук, профессор; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра физики, Новосибирск; E-mail: garlic@ngs.ru
- Дмитрий Владимирович Чесноков*** — канд. техн. наук, доцент; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра физики, Новосибирск; E-mail: garlic@yandex.ru
- Дмитрий Михайлович Никулин*** — Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра физики, Новосибирск; инженер; E-mail: dimflint@mail.ru

Поступила в редакцию
12.01.09 г.

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР И ЭЛЕМЕНТОВ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 535.211:66.088

Д. В. ЧЕСНОКОВ, В. В. ЧЕСНОКОВ

ЛАЗЕРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР

Рассмотрены перспективные методы получения упорядоченных массивов наноструктур при использовании относительно недорогой лазерной техники с наносекундной длительностью импульса.

Ключевые слова: лазерный пиролиз, плазмохимическое травление, лазерный перенос, массив наноструктур.

Использование теплового воздействия импульсного лазерного излучения для формирования наноразмерных структур на поверхности подложек имеет хорошие перспективы. В ведущих по этому вопросу исследованиях можно выделить два направления:

- 1) применение сфокусированного излучения в качестве обрабатывающего инструмента, при этом минимальные размеры полученных структур прямо или косвенно определяются размером фокального пятна;
- 2) инициация и использование процессов самоорганизации образующихся внутри области фокального пятна структур.

Среди работ первого направления отметим те, в которых изучаются условия получения структур, меньших фокального пятна. Так, в монографии [1] показано, что силы поверхностного натяжения расплава могут как увеличивать, так и уменьшать размер отверстия, „прокальываемого“ в тонкой металлической пленке сфокусированным лазерным лучом, т. е. намечен путь преодоления размерных ограничений, накладываемых использованием видимого света для технологических целей; в работе [2] обосновывается возможность получения лазерно-пиролитическим осаждением (LCVD) пленок металла (при наносекундной длительности импульса облучения) с минимальным размером структурного элемента до половины длины волны света за счет нелинейной (экспоненциальной) зависимости скорости пиролитической реакции от температуры; фирма Nanolab [3] предлагает технологию получения кремниевых острий с радиусом закругления вершин 25—500 нм лазерным импульсным локальным облучением поверхности, использующую известный эффект выдавливания материала при остывании поверхностной расплавленной микрозоны, при плотности жидкой фазы, большей плотности твердой.

Ко второму направлению относятся исследования нелинейно-оптических процессов на облучаемой поверхности и образования поверхностных периодических структур [4, 5]; в работе [2] также обсуждаются теплофизические и газодинамические процессы, сопровождающие импульсное облучение поверхностей пленок на подложках в атмосферных условиях, и роль поверхностного натяжения при формообразующих манипуляциях с наноразмерными

структурами; в [6] представлены результаты исследований по формированию неупорядоченного массива металлических наностолбиков наносекундным (20 нс) лазерным облучением хромовой пленки, расположенной вблизи поверхности кремниевой окисленной пластины.

Авторами настоящей статьи ведутся работы в обоих направлениях, но вначале обсудим возможности технологии, использующей для формобразования фокальное пятно как целое.

На рис. 1 схематически показано формирование массивов наностолбиков („наноточек“) на подложке. Сначала (а) на поверхность кремниевой пластины, покрытой слоем диэлектрика, методом LCVD [2] осаждается топологический рисунок из пленки золота в виде матрицы круглых элементов. Метод позволяет получать на подложке при наносекундной длительности импульса облучения металлические островки и линии с минимальным размером, примерно равным $1/2$ длины волны света (для азотного лазера — $\lambda = 0,334$ мкм). Затем (б) посредством лазерного разогрева в инертной среде островки золота расплавляются и под действием сил поверхностного натяжения собираются в сферические капли, диаметр которых зависит от толщины h и диаметра D островков золота. При $h \approx 5$ нм диаметр каплей составит примерно 80 нм. Далее (в) на структуру напыляют в вакууме защитный слой; после удаления шариков травлением (г) защитный слой на подложке образует маску с отверстиями, через которую на подложку напыляют в вакууме материал островков (д) и травливают защитный слой (е). На подложке возникает массив островков, которые затем в результате оплавления преобразуются в наностолбики (ж). Повторение этапов, представленных на рис. 1, в—е, и затем новое оплавление (вторая итерация) позволяют получить наностолбики — капли диаметром порядка 40 нм, после третьей итерации получаются капли диаметром порядка 20 нм и т. д. Полученные столбики могут служить маской при плазмохимическом или ионном вытравливании столбиков в кремниевой подложке (з).

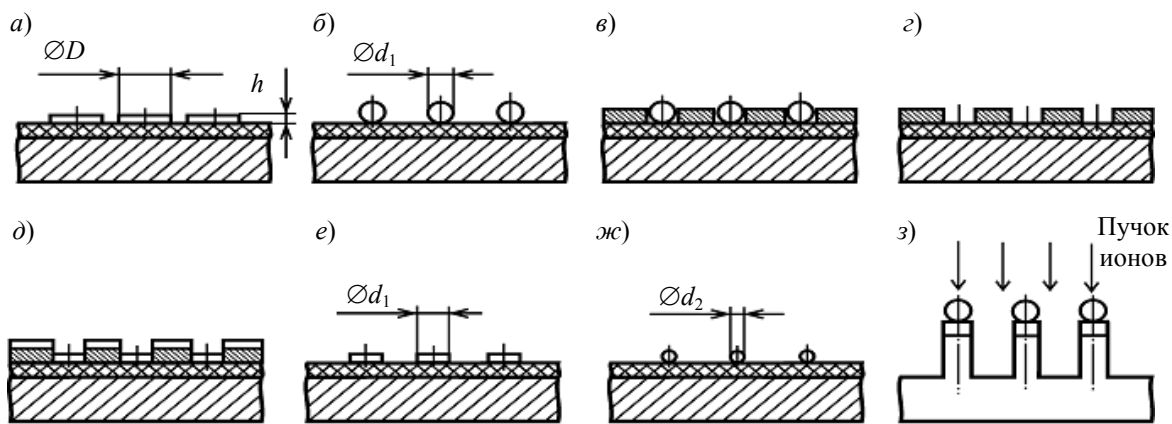


Рис. 1

Экспериментальная проверка проведена с использованием шариков диаметром менее 1 мкм, которые получены диспергированием сплошной пленки золота, нанесенной на кремниевую пластину с пленкой нитрида кремния. При нагревании в инертной среде до температуры 700 °С в течение 10 мин пленка золота под действием сил поверхностного натяжения собиралась в капли диаметром 0,1—1 мкм; далее структура подвергалась плазмохимическому травлению в плазме фреона, под каплями золота оставались невытравленными столбики кремния высотой до 3 мкм.

На рис. 2 представлены микрофотографии структур, соответствующие разным стадиям их изготовления: а — наностолбики золота диаметром менее 1 мкм, полученные расплавлением сплошной тонкой пленки золота; б — столбики кремния высотой 3 мкм, образованные плазмохимическим травлением в атмосфере фреона.

Лазерное облучение позволяет реализовывать также транспортировку нано- и микрообъектов с поверхности одной подложки на другую.

Рассмотрим гидродинамические эффекты, возникающие при наносекундном лазерном облучении многослойных тонкопленочных структур на подложках, приводящие к возможности переноса микрообъекта через зазор, разделяющий подложки. Схема переноса показана на рис. 3.

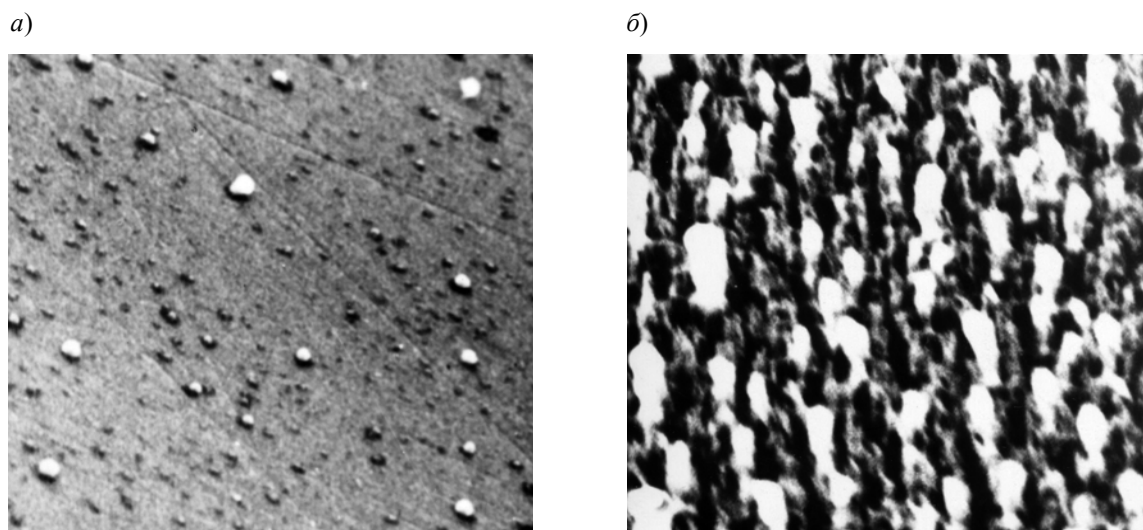


Рис. 2

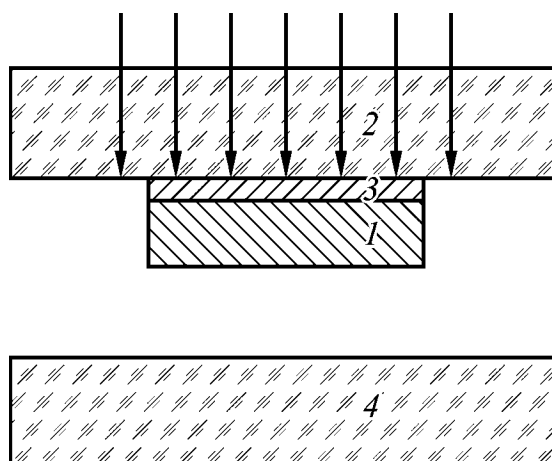


Рис. 3

Переносимый микрообъект *1* закреплен на подложке *2* с помощью защитного слоя *3*. Сквозь прозрачную подложку *2* на защитный слой направляется излучение, которое поглощается поверхностью слоя и за время импульса испаряет слой. Давление образующегося пара приводит в движение переносимый объект. Процессы нагрева и испарения после окончания лазерного импульса происходят без теплообмена с окружающей средой, адиабатически; при температуре T выше температуры кипения при нормальных условиях и ниже критической для определения давления пара p_T можно использовать уравнение адиабаты [6]:

$$p_T = p_0 \frac{T}{T_0} \exp \left[\frac{LM}{RT_0} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \right];$$

здесь p_0 — давление насыщенного пара при температуре T_0 , L — удельная теплота испарения защитного слоя, M — молярная масса вещества слоя, R — универсальная газовая постоянная.

Длительность температурного импульса примерно в три раза превышает длительность лазерного импульса, и за этот короткий промежуток времени переносимый испаренный материал (объект) не успеет переместиться на заметное расстояние; следовательно, давление пара при оценочных расчетах можно считать постоянным. Для замкнутой системы „пар—объект“ и при проведении процесса переноса в вакууме можно записать:

$$p_T t = \rho_m h v,$$

где t — длительность температурного импульса, ρ_m — плотность объекта, h — его толщина, v — скорость объекта.

На состояние объекта при его отделении от подложки и при движении влияют следующие факторы:

— температура соприкасающейся с паром поверхности объекта в течение температурного импульса близка к температуре пара, теплоотвод затруднен, поэтому объект при отделении нагревается;

— пар защитного слоя выходит из зазора между подложкой и объектом, поэтому по поверхности объекта существует градиент давления. Если объект имеет форму плоского диска, то касательные тангенциальные и радиальные силы стремятся растянуть его в радиальном направлении.

Будем считать, что диаметр диска меньше длины упругой волны, возникшей в диске в момент лазерного воздействия, а его толщина — меньше длины тепловой волны, что позволит не учитывать инерционные эффекты. Давление пара максимально в средней области диска и близко к нулю на периметре зазора; для упрощения оценок заменим при расчетах диск шайбой с центральным отверстием, заполненным паром защитного слоя, что позволит использовать в упругой стадии деформаций модель в виде толстостенного цилиндра с внутренним давлением [7]. В такой модели максимальные напряжения возникают на внутренней поверхности цилиндра, они равны

$$\sigma_r = -p_T; \quad \sigma_\theta = \frac{1-k^2}{1+k^2} p_T,$$

где σ_r и σ_θ — радиальное и тангенциальное механическое напряжение, $k = r_1/r_2$, r_1 и r_2 — радиус внутренней и внешней поверхностей цилиндра. Приняв значение $k = 0,5$, получим $\sigma_\theta \approx 1,67p_T$. Таким образом, напряжение в диске близко к значению давления пара.

Энергия падающего излучения $Q = P_0 \tau$ (P_0 — плотность мощности падающего излучения, τ — длительность лазерного импульса) расходуется на нагревание переносимого объекта и прилегающей к поверхности области подложки, а также на испарение защитного слоя. Для плотности мощности падающего излучения, нагревающего защитный слой на значение ΔT , справедливо выражение

$$P_0 \tau (1 - R_{\text{отр}}) \approx c_1 \rho_1 d_1 \Delta T + c_3 \rho_3 l_3 \Delta T + \rho_2 d_2 L_{\text{исп}}.$$

Здесь c_1 , c_3 , ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 , d_1 , d_2 — удельные теплоемкость, плотность, а также толщина слоев переносимого материала (индекс 1), защитного слоя (индекс 2) и подложки (индекс 3); l_3 — толщина нагревающейся за время импульса области подложки; $L_{\text{исп}}$ — удельная теплота испарения защитного слоя; $R_{\text{отр}}$ — коэффициент отражения защитного слоя.

Для иллюстрации значений физических эффектов в таблице приведены расчетные величины температуры и давления в адиабатических условиях пара йода и магния (материалов защитного слоя толщиной 0,2 мкм) при длительности лазерного импульса $\tau = 10$ нс, различных значений энергии и плотности лазерной мощности, температуры переносимого диска из золота ΔT_d при его толщине 0,1 мкм, скорости движения при переносе. При вычислениях уч-

тены потери тепла на нагревание поверхностного слоя подложки и потери на отражение излучения.

Защитный слой	T , К	$\Delta T_{\text{д}}$, К	Q , 10^3 Дж/м^2	P , 10^8 Вт/см^2	p_T , Па	v , м/с
I ₂	515	242	1,53	0,15	10^6	4,60
Mg	1700	1427	5,74	0,57	10^6	0,46

Из данных таблицы следует, что механические напряжения $\sigma \approx p_T$ при переносе не превышают предела текучести материала переносимого объекта, однако температура объекта может превышать его температуру плавления при принятой в расчетах длительности лазерного импульса.

Учитывая изложенное, можно рассматривать две возможности формирования структур методом лазерного переноса: перенос без изменения формы и перенос с оплавлением и уменьшением поперечника переносимого диска.

На рис. 4 приведена схема получения на подложке упорядоченного массива наночастиц методом переноса с оплавлением. Материал, из которого формируются наночастицы, предварительно нанесен в виде тонкой сплошной пленки 1 на прозрачную подложку поверх защитного слоя 2 и облучается наносекундными импульсами сфокусированного лазерного излучения. Фокальное пятно сканирует по пленке, за каждый импульс от подложки отрывается участок 3 пленки и движется к подложке-акцептору; время движения при величине зазора 1 мкм составляет примерно 0,2 мкс для условий первой строки таблицы. Если отделившийся участок расплавлен, силами поверхностного натяжения за время „полета“ он собирается в шарик и в таком виде оседает на поверхность. Время преобразования отделенных от подложки расплавленных участков пленки в шарики можно оценить по частоте „капиллярных колебаний“ микрокапель под действием поверхностного натяжения [8]. Период таких колебаний равен

$$\tau_k = 2\pi \sqrt{\frac{\rho_m r^3}{8\sigma}},$$

где r — радиус микрокапли. Для золотых микрокапель диаметром 100 нм период составляет около 10^{-8} с, т. е. много меньше времени движения в зазоре.

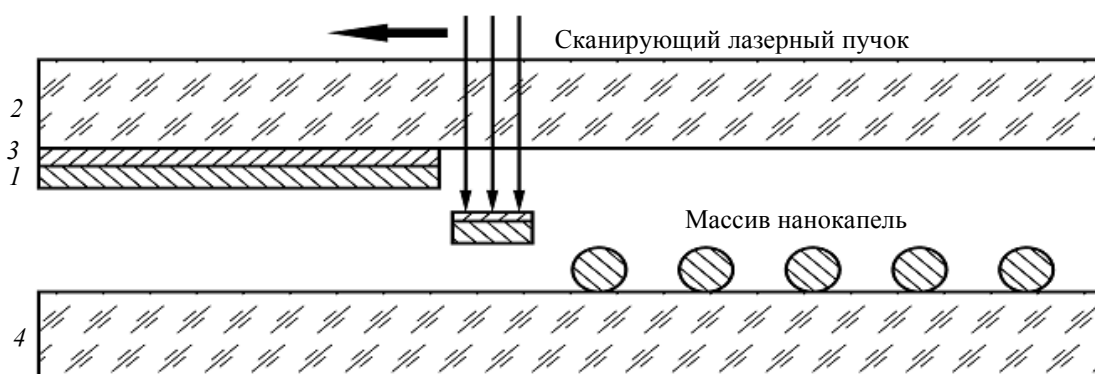


Рис. 4

На подложке формируется упорядоченный массив наночастиц, размер которых определяется толщиной пленки и диаметром испаренной зоны защитного слоя, аналогично рассмотренному на рис. 1.

Таким образом, показано, что существуют перспективные методы получения упорядоченных массивов наноструктур при использовании относительно недорогой техники, применяющей лазерное излучение с наносекундной длительностью импульса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейко В. П. Лазерная обработка пленочных элементов. Л.: Машиностроение, 1986. 248 с.
2. Чесноков В. В., Резникова Е. Ф., Чесноков Д. В. Лазерные наносекундные микротехнологии / Под общ. ред. Д. В. Чеснокова. Новосибирск: СГГА, 2003. 300 с.
3. [Электронный ресурс]: <www.nanolab.com>.
4. Емельянов В. И., Семиногов В. Н. Лазерно-индуцированные неустойчивости рельефа поверхности и изменение отражательной и поглощательной способности конденсированных сред // Итоги науки и техники. Сер. Физ. основы лазер. и пучковой технологии. М.: ВИНТИ, 1989. Т. 3. С. 57—91.
5. Панченко В. Я., Семиногов В. Н., Соколов В. И. Роль дифракции света на модуляциях поверхностного рельефа в процессах лазерной микротехнологии // Итоги науки и техники. Сер. Физ. основы лазер. и пучковой технологии. М.: ВИНТИ, 1989. Т. 3. С. 92—161.
6. Анисимов С. И., Имас Я. А., Романов Г. С., Ходыко Ю. В. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970. 272 с.
7. Справочник по сопротивлению материалов / Отв. ред. Г. С. Писаренко. Киев: Наукова думка, 1988. 736 с.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.

Сведения об авторах

- Дмитрий Владимирович Чесноков** — канд. техн. наук, доцент; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра физики, Новосибирск; E-mail: garlic@yandex.ru
- Владимир Владимирович Чесноков** — д-р техн. наук, профессор; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра физики, Новосибирск; E-mail: garlic@ngs.ru

Поступила в редакцию
12.01.09 г.

УДК 681.7.069.225:537.53

В. И. Донин

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ИСТОЧНИК НЕПРЕРЫВНОГО ДАЛЬНОГО ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Представлен новый дуговой источник мощного непрерывного дальнего вакуумного ультрафиолетового излучения, созданный на основе сильноточной плазмы пониженного давления, которая ранее использовалась в качестве активной среды ионных аргоновых лазеров со сроком службы порядка 1000 ч.

Ключевые слова: ВУФ-излучение, дуговой разряд, возбуждение ионных уровней.

В настоящее время коротковолновые источники излучения являются объектом интенсивных исследований для специалистов многих стран. Более того, для разработки технологии изготовления изделий микро- и нанoeлектроники (проекционной литографии), а также светозероэрозийных, радиационных технологий обработки материалов (в том числе с созданием регулярной нанометровой структуры) и др. требуются коротковолновые источники, способные работать в близких к промышленным условиям.

Традиционно для генерации непрерывного дальнего вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения используется синхротронное излучение и газоразрядные источники с камерами дифференциальной откачки для вывода излучения [1, 2], которые не получили широкого

распространения из-за их громоздкости, низкой эффективности, высокой стоимости и малой площади выходного излучения. В последнее время дальнее ВУФ-излучение получают, используя лазеры на свободных электронах [3], высшие гармоники излучения мощных короткоимпульсных лазеров [4], плазменные лазеры на линиях многозарядных ионов [5], спонтанное излучение многозарядных ионов из короткоимпульсной плазмы [6, 7]. Однако из-за указанных выше недостатков они также не используются в промышленности, например, малоиндуктивный разряд в капилляре с ксеноном обеспечивает эффективность на уровне ~ 0,03 % и среднюю мощность спонтанного излучения ~ 10 мВт при сроке службы капилляра около 30 мин [6].

В настоящей статье представлен новый дуговой источник мощного непрерывного дальнего ВУФ-излучения [8], созданный на основе сильноточной плазмы пониженного давления, которая ранее использовалась в качестве активной среды ионных аргоновых лазеров со сроком службы порядка 1000 ч [9, 10]. Плазма создавалась продольным дуговым разрядом постоянного тока в секционированных трубках длиной $l \approx 0,4\text{—}4$ м, диаметром $d \approx 1\text{—}40$ мм при плотности тока от 40 до 4000 А/см².

Схема отдельной секции трубки и расположение облучаемых образцов в разряде иллюстрируются рис. 1, где O_1O_2 — продольная ось разряда (область разряда показана точками), l — устройство вывода излучения, 2 — облучаемый образец, 3 — держатель образца. Облучаемые образцы располагаются в боковых (по отношению к оси O_1O_2) отверстиях, по площади сечения сравнимых с сечением разряда. Используется наиболее мощное излучение резонансных линий ионов, которое не поглощается наполняющим газом пониженного давления. В модельном эксперименте при $d = 40$ мм общая площадь облучаемой поверхности образцов составляла до 65 % от всей боковой поверхности столба разряда: $0,65\pi dl$.

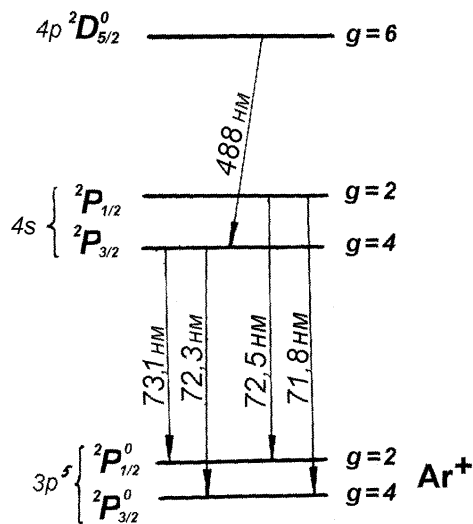
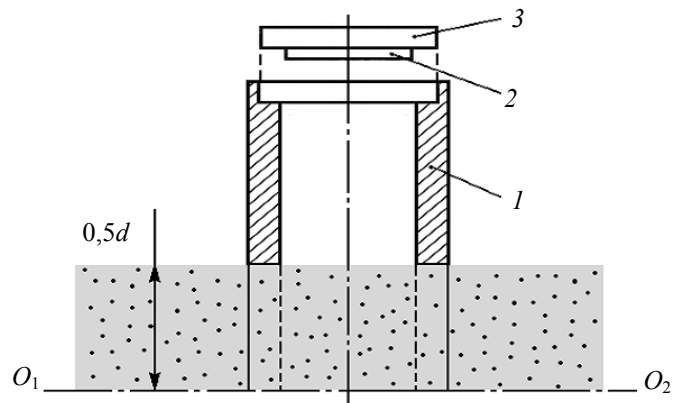


Рис. 2

Используется наиболее мощное излучение резонансных линий ионов, которое не поглощается наполняющим газом пониженного давления. В модельном эксперименте при $d = 40$ мм общая площадь облучаемой поверхности образцов составляла до 65 % от всей боковой поверхности столба разряда: $0,65\pi dl$.

Поскольку плазма аргоновых лазеров достаточно хорошо изучена, произведем оценку энергетических характеристик резонансного ВУФ-излучения на ионах Ar^+ . На рис. 2 приведена схема рабочих уровней. Резонансное излучение реабсорбировано, и для непосредственных абсолютных измерений интенсивности требуется специальная вакуумная аппаратура. Однако для лазерных переходов (например, с длиной волны $\lambda = 488$ нм) заселенность нижнего рабочего (резонансного) уровня более просто оценить по измеренным значениям заселенности верхнего уровня и коэффициенту поглощения

k_0 , см⁻¹ (или усиления G_0) в центре доплеровски уширенной рабочей линии:

$$k_0 = -G_0 = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{\lambda^2 A_{mn}}{\Delta\nu_D} \frac{g_m}{4\pi} \left(\frac{N_n}{g_n} - \frac{N_m}{g_m} \right), \quad (1)$$

где A_{mn} — вероятность радиационного перехода с верхнего уровня m на нижний n (с⁻¹), $\Delta\nu_D$ — ширина линии (с⁻¹), N_m и N_n — заселенность рабочих уровней (см⁻³), g_m и g_n — их статистический вес.

Зависимость измеренной интегральной по сечению разряда заселенности верхнего уровня N_m линии $\lambda = 488$ нм в трубке диаметром $d = 11$ мм от тока J разряда при различных значениях давления наполнения p представлена на рис. 3 (кривая 1 — $p = 0,3$, 2 — $p = 0,65$, 3 — $p = 1$ мм рт. ст.) [9, 11]. При зажигании разряда давление, близкое к давлению наполнения, устанавливается только в приэлектродных частях (колбах), а вблизи стенок разрядного канала трубки давление в 3—5 раз ниже. Последнее обстоятельство позволяет пренебречь поглощением бокового ВУФ-излучения за счет фотоионизации при использовании аргона (сечения ионизации которого велики — порядка $3,5 \cdot 10^{-17}$ см²), поскольку расстояние от столба разряда до подложки ≈ 2 см. При этом расстоянии резонансное излучение атомных линий Ar (85—100 нм) будет полностью резонансно поглощаться). Используя измеренные значения G_0 и формулу (1), можно определить, что заселенность нижнего уровня также достигает насыщения, но при увеличении J резко спадает. Соответственно максимум мощности генерации на рабочем переходе несколько смещен к большим значениям тока (для кривой 3 он отмечен жирной

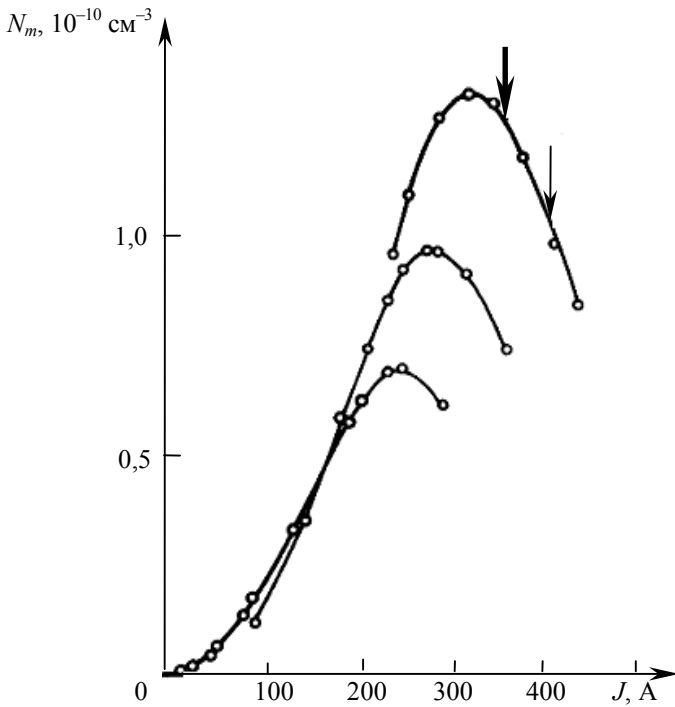


Рис. 3

стрелкой, а светлой стрелкой показано начало развития неустойчивостей в разряде). Полученная в максимуме мощности генерации заселенность N_n в 2 раза ниже N_m , а при токе до 200 А значения заселенности N_n и N_m близки. Таким образом, в рассматриваемых здесь условиях генерации значения N_n и N_m совпадают с точностью до множителя 2.

Оценим интенсивность I излучения (излучаемая мощность с 1 см³) на линии $\lambda = 72,3$ нм, пользуясь известным соотношением

$$I = F(k_0 r) A_{mn} N_m h \nu, \quad (2)$$

где N_m — заселенность верхнего (для перехода 72,3 нм) уровня, A_{mn} — вероятность спонтанного распада уровня в основное состояние, множитель $F(k_0 r)$ характеризует выход излучения ($r = d/2$), $h \nu$ — энергия кванта.

Значение $F(k_0 r)$ можно оценить по измеренной концентрации электронов $n_e = 1,5 \cdot 10^{14}$ см⁻³, которая близка к заселенности основного состояния иона. Проведенная для рассматриваемых здесь условий оценка по формуле Хольштейна [12] $F(k_0 r) = 1,6/k_0 r (\pi \ln k_0 r)^{1/2}$ с учетом радиального движения ионов [13] дает значение $F(k_0 r) \approx 0,4$. Подставив в выражение (2) численные значения ($A_{mn} = 2,5 \cdot 10^9$ с⁻¹, $N_m = 1 \cdot 10^{10}$ см⁻³), получим $I \approx 24$ Вт/см³. Учитывая, что ВУФ-излучение иона Ag^+ соответствует, по крайней мере, пяти сильным линиям в области 55—75 нм (см. например, рис. 1.37 в [1]), получим суммарную интенсивность $I_\Sigma \approx 120$ Вт/см³.

В условиях генерации расходуемая на единицу длины разряда мощность W не зависит от диаметра d и составляет $W \approx 840$ Вт/см [9, 10], поэтому легко можно оценить эффективность ВУФ-излучения ≈ 14 %. Хотя с увеличением диаметра разряда заселенность возбужденных уровней Ag^+ падает как $1/d$, значение $F(k_0 r)$ при этом не меняется. Следовательно, эффективность испускания ВУФ-излучения (за счет возрастания сечения разряда как d^2) должна увеличиваться пропорционально d .

Помимо обычного цилиндрического разряда для рассматриваемых здесь целей полезным может оказаться использование разряда „щелевого“ типа (сечение в виде прямоугольника со значительной разницей длины сторон) [14], поскольку в таком разряде значение $F(k_0r)$ будет определяться меньшей стороной.

Следует отметить, что дуговой источник [8] может применяться и в других случаях. Например, в работах [9, 15] указывалось, что в используемом здесь сильноточном разряде пониженного давления с рабочим газом Cl_2 (наполняющим) хлор находится в атомарном состоянии. Следовательно, предлагаемая конструкция может применяться для быстрого травления полупроводниковых материалов. При наполнении ее смесью водорода (при $p \approx 10\text{--}100$ мм рт. ст.) с небольшой добавкой углеродсодержащего газа она может быть использована для выращивания алмазных пленок [2, 16] на подложках с большой общей площадью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайдель А. Н., Шрейдер Е. Я. Вакуумная спектроскопия и ее применение. М.: Наука, 1976.
2. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. 4. / Под ред. В. Е. Фортова. М.: Наука, 2000.
3. Ackermann W., Asova G., Ayvazyan V., Azima A., Baboi N. et al. Operation of a free-electron laser from the extreme ultraviolet to the water window // Nat. Photon. 2007. Vol. 1, N 6. P. 336—342.
4. Hve J., Haarlammert T., Steinbrck T., Kutzner J., Tsilimis G., Zacharias H. High-flux high harmonic soft X-ray generation up to 10 kHz repetition rate // Opt. Commun. 2006. Vol. 266, N 1. P. 261—265.
5. Виноградов А. В., Рокка Дж. Импульсно-периодический рентгеновский лазер на переходе $3p\text{--}3s$ Ne-подобного аргона в капиллярном разряде // Квант. электрон. 2003. Т. 33, вып. 1. С. 7—17.
6. Собельман И. И., Шевелько А. П., Якушев О. Ф., Найт Л. В., Турли Р. С. Интенсивный источник ВУФ излучения на основе плазмы капиллярного разряда // Квант. электрон. 2003. Т. 33, вып. 1. С. 3—6.
7. Сейсян Р. Нанолитография СБИС в экстремально дальнем вакуумном ультрафиолете // ЖТФ. 2005. Т. 75, вып. 5. С. 1—13.
8. Патент РФ № 2324255. Универсальный дуговой источник ВУФ-фотонов и химически активных частиц / В. И. Донин. Оpubл. 10.05.2008. Б.И. № 13.
9. Донин В. И. Мощные ионные газовые лазеры. Новосибирск: Наука, 1991.
10. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Сер. Б. Т. XI-4 / Под ред. С. И. Яковленко. М.: Физматлит, 2005.
11. Донин В. И. Насыщение выходной мощности с током разряда в мощных аргоновых ОКГ непрерывного действия // ЖЭТФ. 1972. Т. 62, вып. 5. С. 1648—1660.
12. Holstein T. Imprisonment of resonanse radiation in gases // Phys. Rev. 1951. Vol. 83, N 6. P. 1159—1168.
13. Елецкий А. В., Фрейнкман Б. Г. Функция распределения и контур линии излучения ионов в разряде низкого давления // Докл. АН СССР. 1973. Т. 210. С. 62—65.
14. Алферов Г. Н., Донин В. И., Юршин Б. Я. К вопросу об оптимальном сечении разряда постоянного тока для лазера на ионах ArII // Журн. прикл. спектроскопии. 1976. Т. 25, вып. 1. С. 40—42.
15. Донин В. И. Сильноточные дуговые катоды для непрерывных разрядов пониженного давления // II Междунар. науч.-практич. конф. „Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности“. Сб. тр. СПб, 2006. Т. 4. С. 153.
16. Спицын Б. В., Алексенко А. Е. // Современные проблемы физической химии. М.: ИФХ РАН, 2005. С. 350—368.

Сведения об авторе

Валерий Ильич Донин — д-р физ.-мат. наук; Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск; E-mail: donin@iae.nsk.su

Поступила в редакцию
12.01.09 г.

В. А. ШВЕЦ, С. В. РЫХЛИЦКИЙ, Е. В. СПЕСИВЦЕВ, Н. Н. МИХАЙЛОВ

ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ВЫРАЩИВАЕМЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Приведены результаты по исследованию и разработке аппаратурных средств и методик эллипсометрического контроля *in situ* параметров гетероструктур, выращиваемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии, на основе тройного соединения $Cd_xHg_{1-x}Te$. Представлены экспериментальные результаты и модельные расчеты, которые демонстрируют возможность контролируемо выращивать наноструктуры, сформированные из однородных по составу слоев, а также с заранее заданным распределением состава по толщине растущего слоя.

Ключевые слова: эллипсометрия, контроль *in situ*, молекулярно-лучевая эпитаксия, наноструктуры, кадмий—ртуть—теллур.

Введение. Тройное соединение кадмий—ртуть—теллур (КРТ) $Cd_xHg_{1-x}Te$ — по видимому, наиболее перспективный материал для создания фоточувствительных структур дальнего ИК-диапазона спектра [1]. Ширина запрещенной зоны КРТ изменяется от 0 до 1,5 эВ в зависимости от процентного содержания кадмия. Эта особенность позволяет выращивать в едином технологическом процессе варизонные структуры с уникальными физическими свойствами. Технологической основой создания таких структур служит метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Он позволяет формировать как тонкие однородные слои нанометровой толщины заданного состава, так и градиентные по составу структуры. Для выращивания этих структур требуется надежный метод контроля, а эллипсометрия позволяет следить за изменениями состава и управлять процессом роста в режиме реального времени.

Задачу эллипсометрического контроля можно сформулировать следующим образом: необходимо определить распределение состава растущей структуры по глубине $x(z)$ на основе измеренных в процессе роста эллипсометрических параметров $\Psi(t)$ и $\Delta(t)$ (здесь z — координата по нормали к поверхности структуры).

Использован одноволновой метод эллипсометрии, он имеет максимальную чувствительность к составу в области длины волны He—Ne-лазера. Учитывая при этом более высокие точностные характеристики лазерного эллипсометра, можно полагать, что он может успешно конкурировать со спектральным методом.

Однако главное преимущество лазерной эллипсометрии заключается в ее быстродействии. Действительно, при скорости роста ~ 1 мкм/ч формирование активной области наноструктуры происходит за время 10—30 с, характерное время измерения эллипсометрического спектра имеет тот же порядок, и этого быстродействия явно недостаточно для эффективного контроля. Следует отметить, что применение спектроэллипсометра предполагает измерение больших массивов экспериментальных данных, обработка которых в режиме реального времени затруднена.

Ниже приведены результаты по исследованию и разработке аппаратурных средств и методов эллипсометрического контроля состава КРТ в процессе формирования гетероструктур с помощью МЛЭ.

Оптическая схема и функциональные особенности статического лазерного эллипсометра. Для контроля роста гетероструктур КРТ был разработан встраиваемый быстродействующий лазерный эллипсометр ЛЭФ-755. В основу прибора положена оригинальная оптическая схема статических измерений [2]. Ее особенность состоит в том, что в процессе изме-

рений *in situ* поляризационные элементы не вращаются, и модуляция сигналов отсутствует. Измеряются четыре сигнала, по которым рассчитываются эллипсометрические параметры структуры. Достоинство такой схемы заключается в том, что время измерения ограничивается только временем считывания и оцифровки сигналов, что дает возможность накапливать данные с целью усреднения для повышения точности измерений.

Эллипсометр состоит из двух оптико-механических модулей: излучающего плеча поляризатора и приемного плеча анализатора, которые крепятся непосредственно на камеру МЛЭ таким образом, чтобы излучение лазера проходило через оптический вход камеры. Излучающее плечо поляризатора включает в себя источник света и поляризатор. В качестве источника света используется высокостабильный He—Ne-лазер с рабочей длиной волны 632,8 нм и мощностью излучения 2 мВт.

Поляризатор формирует линейно поляризованный пучок света, изменение состояния поляризации которого после отражения от поверхности пленки гетероэпитаксиальной структуры КРТ подлежит измерению в приемном плече анализатора. В качестве поляризатора используется призма Глана с воздушным промежутком.

Оптическая схема прибора показана на рис. 1. Излучаемый лазером 1 световой пучок линейно поляризуется призмой 2 и отражается от поверхности измеряемой структуры 3. Две диафрагмы 4 вырезают два узких пучка света, отраженных от поверхности образца под равными углами. Далее на пути световых пучков располагается компенсатор 5, представляющий собой термостабилизированное устройство, состоящее из двух фазосдвигающих пластинок, разность фазового сдвига между которыми равна $\pi/2$. Пластинки ориентированы между собой таким образом, что „быстрая“ ось одной совпадает с „медленной“ осью другой. Такое устройство обеспечивает стабильность измерений при изменении температуры воздуха вокруг прибора. Обе пластинки имеют форму диска с отверстием в центральной части, для того чтобы один из пучков проходил через эти отверстия без изменений поляризации, в то время как другой претерпевал бы относительный фазовый сдвиг, равный приблизительно 90° . Далее оба световых пучка расщепляются призмой Волластона 6 на две ортогонально поляризованные компоненты, которые засвечивают фоточувствительные площадки четырехэлементного фотоприемника 7, с выходов фотоприемника снимаются сигналы I_1, I_2, I_3 и I_4 . В процессе измерения поляризационные элементы могут фиксироваться в положениях: поляризатор $P = +45^\circ$ или -45° , компенсатор $C = 45^\circ$ или 0° , анализатор $A = 0^\circ$ или 45° .

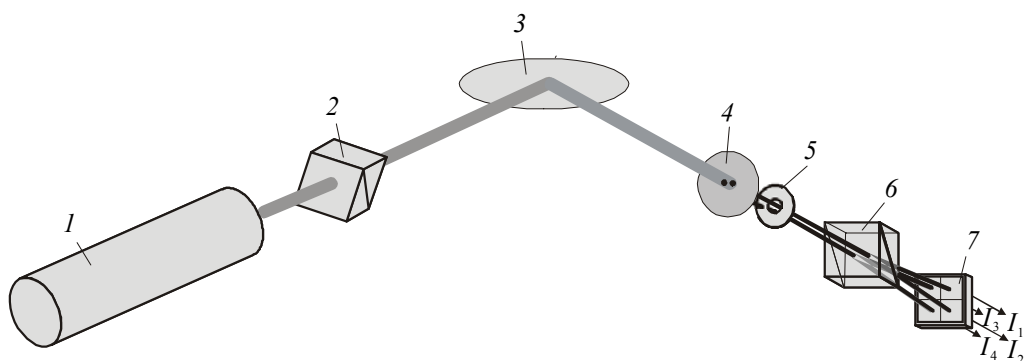


Рис. 1

По измеренным сигналам I_1, I_2, I_3 и I_4 вычисляются эллипсометрические параметры образца Ψ и Δ . Альтернативные положения поляризационных элементов предусмотрены для исключения систематических ошибок и снятия неоднозначности в измерениях. Так, комбинация элементов $P = 45^\circ, C = 45^\circ, A = 0^\circ$ дает следующие соотношения между измеренными сигналами и эллипсометрическими параметрами:

$$\cos 2\Psi = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}; \quad (1)$$

$$\sin 2\Psi \sin \Delta = \frac{I_3 - I_4}{I_3 + I_4}. \quad (2)$$

В этом случае области однозначного определения эллипсометрических параметров лежат в границах: $\Psi \{0; 90^\circ\}$, $\Delta \{90; 270^\circ\}$. Области максимальной чувствительности: для значений Δ — в окрестностях 180° или 0° , для значений Ψ — в окрестности 45° .

Комбинация элементов $P = 45^\circ$; $C = 0^\circ$; $A = 45^\circ$ связывает сигналы с эллипсометрическими параметрами выражениями

$$\operatorname{tg} \Delta = \frac{(I_3 - I_4)(I_1 + I_2)}{(I_3 + I_4)(I_1 - I_2)}; \quad (3)$$

$$\sin^2 2\Psi = \left(\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \right)^2 + \left(\frac{I_3 - I_4}{I_3 + I_4} \right)^2. \quad (4)$$

В этом случае области однозначного определения эллипсометрических параметров лежат в границах: $\Psi \{0; 45^\circ\}$, $\Delta \{0; 360^\circ\}$. Области максимальной чувствительности: для значений Ψ — в окрестности 0 и 90° , для значений Δ чувствительность одинакова во всем диапазоне значений от 0 до 360° . Таким образом, выбирая ту или иную комбинацию элементов, можно подобрать условия измерений, обеспечивающие максимальную чувствительность и диапазон однозначного определения эллипсометрических параметров из выражений (1)—(4).

С целью повышения точности измерений за счет увеличения отношения сигнал/шум в электронной схеме обработки сигналов применена схема дифференциального включения, в которой измеряются и усиливаются не сами сигналы I_1 и I_2 (I_3 и I_4), а непосредственно их разность и сумма. В электронном тракте обработки сигналов применяются малозумящие операционные усилители с автоматической сменой коэффициента усиления от 1 до 1000 с шагом 10 по логарифмической шкале. Смена коэффициента усиления задается автоматически исходя из условия насыщения сигнала. Усиленные сигналы направляются в 14-разрядный АЦП, представляющий собой многофункциональное устройство L761, размещаемое на материнской плате компьютера. Дополнительно АЦП выдает цифровые коды на управление операционными усилителями.

Контроль при выращивании слоев постоянного состава. При измерении состава использована сильная зависимость оптических постоянных КРТ от состава на длине волны He—Ne-лазера $\lambda = 632,8$ нм. По результатам проведенных ранее измерений [3, 4] были получены следующие эмпирические зависимости для оценки показателей преломления n и поглощения k от состава КРТ при комнатной температуре:

$$n(x) = 3,907 - 1,052x + 0,16x^2; \quad (5)$$

$$k(x) = 1,186 - 1,481x + 0,53x^2. \quad (6)$$

Для температуры роста 190 — 200 °С эти данные были скорректированы с учетом температурных коэффициентов, измеренных в работе [5]. Для эллипсометрических параметров можно рассчитать аналогичные зависимости $\Psi(x)$ и $\Delta(x)$ на основании соотношений (5) и (6) с использованием модели полубесконечной среды. Было установлено, что от состава в большей степени зависит параметр Ψ , в то время как зависимость $\Delta(x)$ слабее, кроме того, значение Δ также зависит от рельефа поверхности. Используя в качестве калибровочной кривой зависимость $\Psi(x)$, можно выращивать слои заданного состава с точностью не менее $\pm 0,002$ мольных долей. Такой контроль позволил получать однородные по составу структуры, пригодные для создания фотоприемных устройств дальнего ИК-диапазона.

При выращивании тонких нанослоев состав КРТ изменяется скачком на величину δx . При этом за счет френелевского отражения на границе раздела возникают интерференционные осцилляции эллипсометрических параметров, которые в плоскости Ψ – Δ из-за поглощения света представляют собой сворачивающуюся спираль.

На рис. 2 показаны такие кривые, рассчитанные для различных значений δx . Точка S соответствует результатам измерения Ψ , Δ на поверхности пленки КРТ достаточно большой толщины (больше глубины проникновения света — ≈ 100 нм) и постоянного состава $x_0 = 0,3$. Амплитуда размаха спиральных кривых пропорциональна величине δx , и их центральные точки представляют собой калибровочную кривую (пунктир), соответствующую отмеченной выше зависимости эллипсометрических параметров от состава.

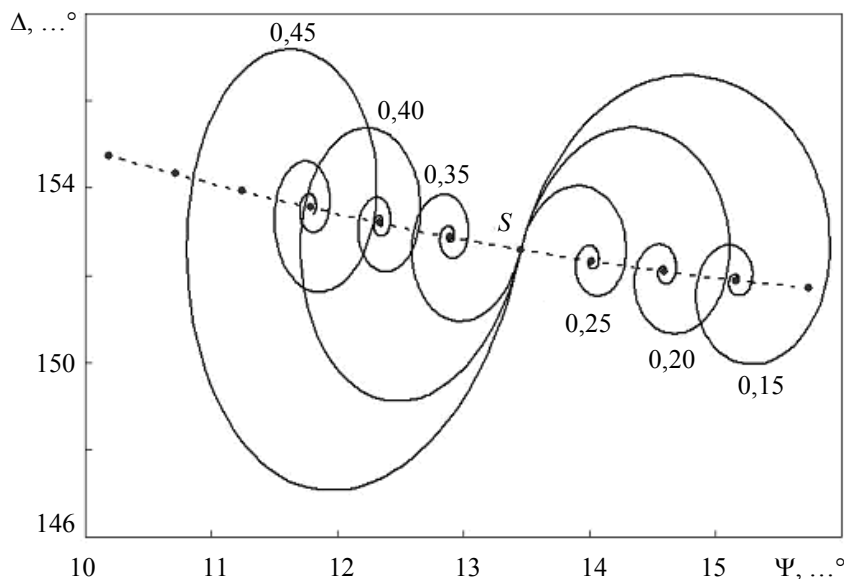


Рис. 2

С помощью приведенных кривых легко представить поведение эллипсометрических параметров при росте потенциального барьера или ямы. В этом случае имеется две ступеньки в профиле состава, и соответствующая траектория эллипсометрических параметров Ψ и Δ будет составлена из участков двух спиральных кривых; форма кривых будет определяться составом, а их протяженность — толщиной выращиваемых слоев.

На рис. 3 показана траектория эллипсометрических параметров, измеренная при незначительном уменьшении на короткое время (~ 14 с) потока теллура за счет частичного перекрытия его молекулярного источника. Экспериментальные результаты показаны символами, интервалы между измерениями составляют 1 с. Начало изменений (точка S) соответствует стационарному росту КРТ с составом $x_0 = 0,422$. После перекрытия потока Te наблюдается быстрое изменение параметров Ψ , Δ вдоль линии SA . В соответствии с проведенным выше моделированием участок SA представляет собой фрагмент спиральной кривой, соответствующей росту барьерного слоя. Из сравнения с расчетными кривыми (пунктирные линии на рисунке, числа возле кривых показывают состав слоя) получаем, что состав барьерного слоя $x = 0,449$, а погрешность его определения $\delta x = \pm 0,002$. Толщина слоя определяется длиной кривой SA и составляет $16,2 \pm 0,1$ нм. После восстановления потока Te наблюдается излом в траектории эллипсометрических параметров в точке A (окончание роста слоя), которые продолжают изменяться вдоль другой спиральной кривой, сворачивающейся к исходной точке S .

Хорошее совпадение расчетной кривой с экспериментом, которое наблюдается после восстановления потока Te (участок спирали AS), доказывает, что растет однородный слой постоянного состава. Незначительное расхождение соответствует изменению состава всего в

несколько тысячных молевых долей. Излом экспериментальной траектории в точке A свидетельствует о ступенчатом изменении состава: верхняя оценка толщины переходного слоя не превышает 0,5 нм. Восстановленный по эллипсометрическим измерениям профиль состава $x(z)$ схематично показан на вставке к рис. 3.

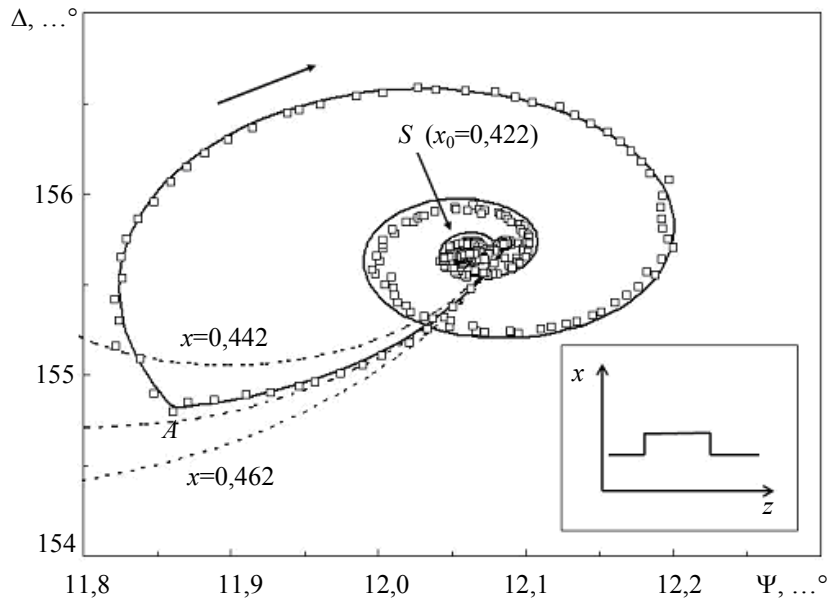


Рис. 3

Аналогичным образом удастся контролируемо выращивать различные структуры, состоящие из одного или нескольких однородных по составу слоев, обладающие уникальными характеристиками [6, 7], в том числе и периодические структуры [8].

Контроль градиентных слоев переменного состава. Другой пример неоднородных структур — градиентные слои переменного состава. Задача эллипсометрического контроля остается той же, что и при выращивании слоев с резкой границей — определение в реальном времени состава растущего слоя. В отличие от слоистых структур интерпретация измерений для неоднородных слоев оказывается более сложной.

В случае малого градиента состава ($dx/dz \ll 1/\lambda$) отражение света происходит, главным образом, от верхней границы раздела, поэтому отраженный пучок несет информацию о составе приповерхностной области. При этом измеряемые эллипсометрические параметры пересчитываются в состав по модели полубесконечной среды, как это описано в предыдущем разделе для толстых непрозрачных слоев. Однако наиболее интересным и важным является случай, когда градиент $dx/dz \approx 1/\lambda$ и больше. При таких значениях градиента в состояние поляризации отраженного света существенный вклад вносят парциальные волны, отраженные от внутренних областей неоднородного слоя.

На рис. 4 показаны результаты численных расчетов, имитирующих поведение эллипсометрических параметров при росте градиентных слоев. В качестве исходных были выбраны три профиля (а) с линейной зависимостью состава $x(z)$ и с тремя различными градиентами: $dx/dz = 2$ (кривые 1), 1,5 (2) и 1 (3). Для этих профилей рассчитывались соответствующие зависимости $\Psi(z)$ и $\Delta(z)$, которые показаны на рис. 4, б и в символами (для этого градиентный слой разбивался на большое количество однородных подслоев); сплошными линиями показаны также зависимости $\bar{\Psi}(z)$ и $\bar{\Delta}(z)$, рассчитанные для френелевской границы раздела „внешняя среда—среда с комплексным показателем преломления $N(z)$ “, т. е. в пренебрежении парциальными волнами: $\text{tg} \bar{\Psi} e^{i\bar{\Delta}} = r_p(z)/r_s(z)$. Стрелками отмечены особенности в поведении эллипсометрических параметров в точках излома профилей $x(z)$.

Из представленных результатов можно сделать следующие выводы:

- излом в профиле состава приводит к появлению затухающих интерференционных осцилляций, главным образом, параметра Δ ;
- амплитуды осцилляций пропорциональны величине изменения градиента в точке излома;
- после затухания осцилляций эллипсометрический параметр $\Psi(z)$ становится равным $\bar{\Psi}(z)$, в то время как $\Delta(z) = \bar{\Delta}(z) - \delta\Delta$, где сдвиг $\delta\Delta$ пропорционален градиенту состава;
- для слоев с градиентом $dx/dz < 0,5$ интерференцией можно пренебречь, и эллипсометрические параметры равны $\bar{\Psi}$ и $\bar{\Delta}$, т. е. полностью определяются составом верхнего слоя.

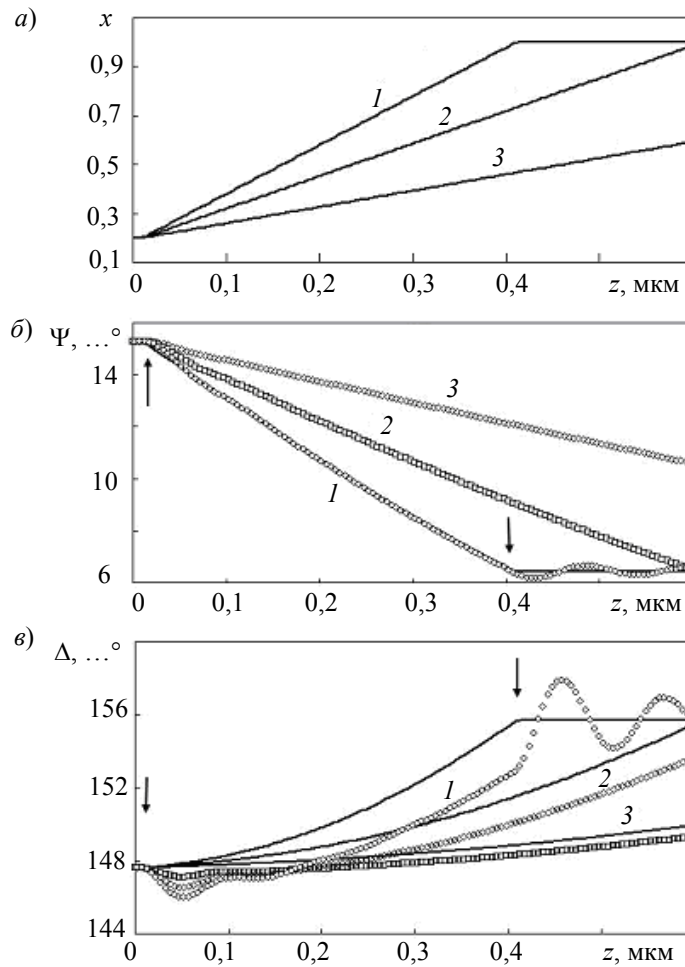


Рис. 4

Для объяснения отмеченных выше закономерностей рассмотрим достаточно толстый (по сравнению с глубиной проникновения света) слой, для которого комплексный показатель преломления изменяется с толщиной по линейному закону: $N(z) = N_0 + \beta z$, где $\beta = dN/dz$ — постоянная величина. По мере роста слоя комплексные коэффициенты отражения $R_{p,s}$ будут изменяться, и их зависимость от координаты z можно записать в следующем виде:

$$R_{p,s}(z) = (1 + \alpha_{p,s})r_{p,s}(z),$$

где $\alpha_{p,s} \ll 1$ — слабо меняющаяся функция координаты z , $r_{p,s}(z)$ — коэффициенты Френеля для границы раздела „внешняя среда—среда с показателем преломления $N(z)$ “. Тогда в рассматриваемом приближении для производной коэффициентов отражения будет

$$\frac{dR_{p,s}}{dz} = (1 + \alpha_{p,s}) \frac{dr_{p,s}}{dz}. \quad (7)$$

С другой стороны, производную от коэффициентов отражения можно найти в явном виде, если выразить приращение dR при нанесении слоя толщины dz с показателем преломления $N(z)$ на подложку с коэффициентом отражения $R(z)$. Используя итерационные формулы для однослойной системы [9] и опуская для простоты здесь и ниже индексы „ p “ и „ s “, запишем:

$$R(z + \delta z) = \frac{r[1 - rR(z)] + [R(z) - r]X}{1 - rR(z) + r[R(z) - r]X}, \quad (8)$$

где

$$X = \exp\left(-i \frac{4\pi\delta z}{\lambda} \sqrt{N^2(z) - \sin^2\varphi}\right),$$

φ — угол падения света, а коэффициенты Френеля берутся для координаты z . После некоторых преобразований из (7), (8) получаем для $\alpha_{p,s}$ следующие выражения:

$$\alpha_p = i \frac{\beta\lambda N \cos\varphi}{2\pi(N^2 - \sin^2\varphi)} \cdot \frac{N^2 - 2\sin^2\varphi}{N^4 \cos^2\varphi - N^2 + \sin^2\varphi}; \quad \alpha_s = i \frac{\beta\lambda N \cos\varphi}{2\pi(N^2 - \sin^2\varphi)(N^2 - 1)}.$$

Наконец, для эллипсометрических параметров получим

$$\operatorname{tg}\Psi e^{i\Delta} = \operatorname{tg}\bar{\Psi} e^{i\bar{\Delta}} (1 + \alpha_p - \alpha_s) = \operatorname{tg}\bar{\Psi} e^{i\bar{\Delta}} \left[1 + i \frac{\beta\lambda N \cos\varphi}{2\pi(N^2 - \sin^2\varphi)} \frac{(N^2 - 1)\sin^2\varphi}{N^4 \cos^2\varphi - N^2 + \sin^2\varphi} \right].$$

Для КРТ абсолютное значение показателя преломления $|N| \approx 3-4$, поэтому обе величины α_p и α_s остаются малыми даже в случае относительно большого градиента, когда $\beta\lambda \approx 1$. Обращает внимание, что второе слагаемое в скобках последнего выражения для заданного диапазона значений N и угла падения φ — мнимая величина. Это объясняет сдвиг параметра Δ по отношению к $\bar{\Delta}$ для градиентного слоя КРТ и одновременно неизменность параметра Ψ .

Проведенное выше рассмотрение позволяет сформулировать простое правило, пригодное для контроля состава в процессе роста градиентных слоев. Если градиент состава dx/dz порядка $1/\lambda$ или меньше, то после затухания интерференционных осцилляций, вызванных скачком градиента, параметр Ψ соответствует текущему значению состава растущего слоя. Иначе говоря, для таких градиентных слоев состав можно по-прежнему рассчитывать по модели полубесконечной среды, как это делалось для однородных слоев. В то же время параметр Δ оказывается заниженным по сравнению со значением $\bar{\Delta}$ для текущего состава, и этот сдвиг пропорционален величине градиента. В работах [3, 4] было показано, что параметр Δ может служить критерием качества растущей поверхности КРТ: появление поверхностного рельефа приводит к уменьшению Δ . При росте градиентного слоя в качестве индикатора шероховатости по-прежнему можно использовать измеренное значение Δ после его коррекции.

Представленная методика контроля использовалась при выращивании поверхностного барьерного слоя КРТ на финишной стадии создания фоточувствительной структуры. Барьерный слой позволяет уменьшить поверхностную рекомбинацию и увеличить время жизни неосновных носителей. При этом изменение состава должно быть плавным, чтобы избежать образования ростовых дефектов.

На рис. 5, а показано поведение эллипсометрических параметров Ψ (кривая 1) и Δ (кривая 2) при росте градиентного барьерного слоя. Вертикальной стрелкой отмечен момент перекрытия потока теллура (начало роста слоя). После этого значение параметра Ψ начинает уменьшаться, в то время как для параметра Δ на начальной стадии наблюдаются немонотонные изменения вследствие интерференционных колебаний. Последующее уменьшение Δ вызвано ростом градиентного слоя и согласуется с теми результатами, которые обсуждались выше.

Профиль изменения состава, полученный после обработки эллипсометрических данных, представлен на рис. 5, б. Сначала наблюдается медленное изменение состава, а к моменту окончания роста градиент состава достигает максимального значения — $dx/dz = 1,3 \text{ мкм}^{-1}$. При этом безразмерный параметр, характеризующий величину градиента, $\lambda(dx/dz) = 0,82$, что подтверждает применимость рассмотренной выше методики к данному примеру.

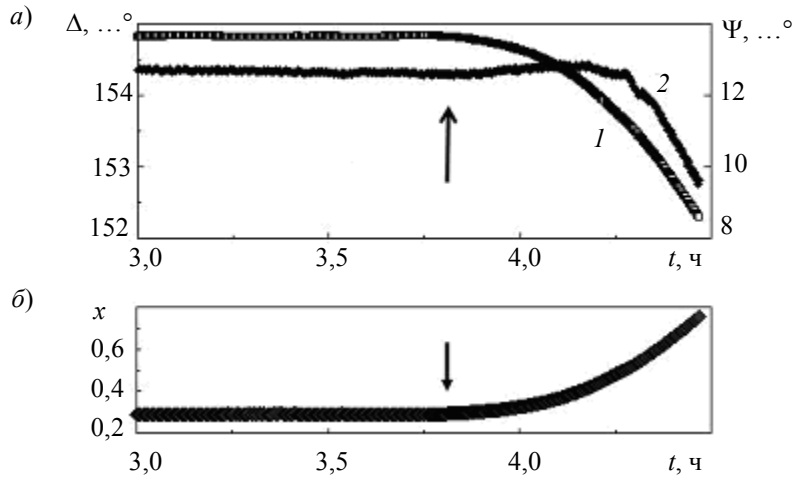


Рис. 5

Наноструктуры с большим градиентом состава. Уникальные возможности технологии МЛЭ КРТ позволяют выращивать квантовые наноструктуры с произвольно заданным профилем состава. Значительный интерес представляют квантовые ямы с асимметричным градиентным распределением состава. При толщине таких структур в несколько десятков нанометров и диапазоне изменения состава порядка единицы безразмерный параметр $\lambda(dx/dz)$, характеризующий градиент, оказывается порядка десяти и выше. В этом случае полученные в предыдущем разделе результаты оказываются неприменимы, и необходимо искать другие подходы для интерпретации эллипсометрических измерений.

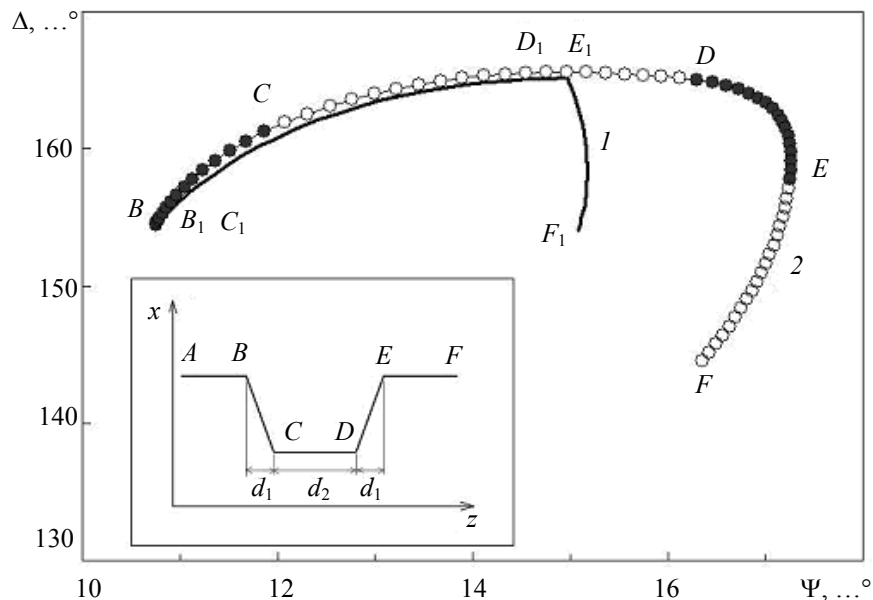


Рис. 6

Проблемы, которые возникают при контроле состава таких структур, легко пояснить на примере численного моделирования. На рис. 6 представлены траектории эллипсометрических параметров при выращивании гетероструктуры, изображенной на вставке. Кривая 1 ($B_1C_1D_1E_1F_1$) показывает траекторию изменения эллипсометрических параметров при росте

структуры с резкими границами ($d_1 = 0$). Кривая 2 ($BCDEF$) рассчитана для структуры с градиентным изменением состава ($d_1 = 8$ нм). Задача эллипсометрического контроля в данном случае состоит в измерении градиента состава на участке BC . Однако из рисунка хорошо видно, что кривая BC для градиентного участка почти совпадает с кривой C_1D_1 для дна ямы с резкими границами. При изменении градиента смещается только конечная точка C , но форма кривой BC изменяется слабо. Кроме того, точка C , соответствующая переходу от градиентного участка к дну ямы, на экспериментальной кривой никак не выделена, в отличие от кривой $BCDEF$, где в точке D_1 (E_1) наблюдается излом, служащий своего рода маркером границы раздела.

Такое изменение эллипсометрических параметров можно пояснить. Направление кривой для эллипсометрических параметров в плоскости Ψ – Δ характеризуется производной $d\Delta/d\Psi$. В работе [10] показано, что производная $d\Delta/d\Psi$ при росте оптически неоднородных структур является функцией текущего значения комплексного показателя преломления $N = n - ik$ (в нашем случае — функцией текущего значения состава, так как и показатель преломления n , и показатель поглощения k зависят от состава КРТ). Аналогично вторая производная $d^2\Delta/d\Psi^2$ зависит от показателя преломления и его градиента в точке измерения. Принимая во внимание, что оптические постоянные связаны с составом эмпирическими формулами (5), (6), получим для производных: $d\Delta/d\Psi = G_1(x)$ и $d^2\Delta/d\Psi^2 = G_2(x, x')$, где x' — градиент состава, а G_1 и G_2 — явные функции состава и его градиента. Из этих соотношений следует, что кривая в плоскости координат Ψ – Δ претерпевает излом (т. е. производная $d\Delta/d\Psi$ претерпевает скачок) в том случае, если наблюдается скачок состава. Если имеет место скачок в первых производных состава, как для структуры, изображенной на вставке (точки C , D , E), то в соответствующих точках кривой эллипсометрических параметров должны наблюдаться скачки вторых производных. Из этих рассуждений ясно, что для анализа результатов эллипсометрических измерений структур с большим градиентом состава целесообразно привлекать информацию о производных эллипсометрических параметров $d\Delta/d\Psi$, т. е. вычислять наклон эллипсометрической траектории.

На рис. 7 приведена номограмма для градиентного участка BC структуры, изображенной на вставке рис. 6, которая построена в координатах „производная $d\Delta/d\Psi$ —параметр Δ “.

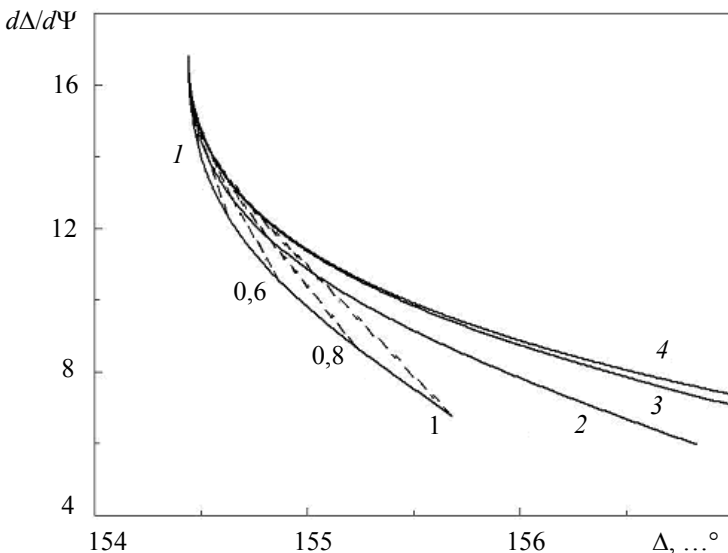


Рис. 7

Сплошные кривые соответствуют постоянным значениям градиента dx/dz : 1 — 0,6, 2 — 0,3, 3 — 0,15, 4 — 0,075 нм⁻¹; пунктиром показаны линии постоянной толщины 0,6, 0,8 и 1 нм (числа возле кривых). Как видно, в данном случае удается разделить линии для разных d_1 , в отличие от представления в координатах Ψ – Δ , где соответствующие кривые просто накладываются друг на друга. Кроме того, в новых координатах траектория эллипсометрических параметров

построенная для структуры, будет иметь изломы в точках, соответствующих изломам состава, что существенно облегчает контроль.

Рассмотрим предельные возможности обсуждаемых измерений. Точность вычисления производной зависит от ряда параметров, а именно:

— относительной точности измерения эллипсометрических параметров $\delta\Psi$ и $\delta\Delta$;

- интервалов изменения эллипсометрических параметров, на которых вычисляется производная ($\Psi_n - \Psi_1$ и $\Delta_n - \Delta_1$);
- количества измерений n на этом интервале.

Погрешность вычисления производной $d\Delta/d\Psi$ по двум измерениям в начале и в конце интервала с точностью до множителя равна

$$\frac{\delta\Delta}{\Psi_n - \Psi_1} + \frac{\delta\Psi}{\Delta_n - \Delta_1}.$$

Если на интервале проведено n измерений, то погрешность уменьшается в \sqrt{n} раз. Здесь следовало бы учесть, что измерения проведены не на границах интервала, а равномерно распределены по нему, поэтому при расчете погрешности должен появиться множитель K порядка 2. В итоге получим для оценки погрешности вычисления производной следующую формулу:

$$\delta\left(\frac{d\Delta}{d\Psi}\right) \approx \frac{K}{\sqrt{n}} \left(\frac{\delta\Delta}{\Psi_n - \Psi_1} + \frac{\delta\Psi}{\Delta_n - \Delta_1} \right). \quad (9)$$

Численная проверка была проведена путем имитации эллипсометрических измерений, наложением случайного разброса и последующим вычислением производной по методу наименьших квадратов. Моделирование подтвердило приведенную выше функциональную зависимость от n и интервалов измерения $\Psi_n - \Psi_1$ и $\Delta_n - \Delta_1$, при этом было найдено значение множителя $K = 4$.

На основе формулы (9) была сделана оценка предельной точности вычисления производной применительно к рассматриваемым задачам. В качестве погрешностей эллипсометрических параметров были взяты их среднеквадратичные разбросы, измеренные в процессе роста пленки КРТ постоянного состава: $\delta\Psi = \pm 0,009$ и $\delta\Delta = \pm 0,04^\circ$. Интервал изменения эллипсометрических параметров, на котором производится вычисление производных, определяется рядом простых соображений. Во-первых, он должен соответствовать достаточно малому изменению толщины растущего слоя, чтобы можно было вычислять производную в режиме реального времени; во-вторых, сама производная на этом интервале не должна существенно изменяться. Исходя из этих критериев оптимальная толщина — 0,1—0,2 нм, что соответствует интервалу изменения эллипсометрических параметров 0,05 и 0,35° для Ψ и Δ соответственно при росте оптически контрастного слоя с резкой границей раздела. При росте градиентного слоя эти значения могут оказаться в несколько раз меньше.

Наконец, число измерений на интервале определяется быстродействием эллипсометра. Быстродействие описанного выше эллипсометра позволяет реализовать $\sim 10^3$ измерений в секунду, и при скорости роста $\sim 0,1$ нм/с обеспечивает порядка 1000 измерений на заданном интервале.

Исходя из этих оценок погрешность измерения производной составляет 0,1—0,2, а погрешность относительного измерения параметра Δ на том же интервале окажется порядка $\delta\Delta/\sqrt{n} \approx 0,001^\circ$. Согласно номограмме рис. 7, такая точность приемлема для разделения кривых с градиентом $\delta x/d_1 = 0,3$ и $0,6$ нм⁻¹ при достижении толщины растущего слоя всего несколько десятых нанометра. Что касается кривых с малым градиентом ($\delta x/d_1 < 0,15$ нм⁻¹), то экспериментально разделить кривые можно только после достижения толщины в несколько нанометров. В данном случае наблюдается типичная корреляция между толщиной слоя и градиентом его состава: для эллипсометрических измерений увеличение толщины в два раза равносильно такому же увеличению градиента.

Заключение. Рассмотрена проблема эллипсометрического контроля гетероструктур на основе КРТ в процессе их выращивания методом МЛЭ. Для реализации этой задачи был разработан лазерный эллипсометр, интегрированный в камеру эпитаксии. Работа эллипсометра базируется на статической схеме измерений, за счет чего удается достичь высокого быстродействия и в режиме реального времени следить за процессами роста.

Разработаны эллипсометрические методики, позволяющие выращивать тонкие слои КРТ с прецизионным контролем их состава и толщины, а также градиентные структуры с заранее заданным распределением состава. Численным моделированием и аналитическими расчетами определены области применения этих методик, их эффективность подтверждена экспериментальными результатами. Предложены методики контроля при выращивании градиентных структур толщиной в несколько нанометров. Требуемая для этого точность достигается за счет привлечения информации о поведении производной эллипсометрических параметров $d\Delta/d\Psi$ в процессе роста структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоконев В. М., Крайлюк А. Д., Дегтярев Е. В. и др. Статус молекулярно-лучевой эпитаксии кадмий—ртуть—теллур в тепловизионной технике // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. № 9. С. 7—19.
2. Патент РФ № 2007120401/28 (022214). Эллипсомер / Е. В. Спесивцев, С. В. Рыхлицкий, А. Г. Борисов, В. А. Швец. Заявл. 31.05.2007, опубл. 10.09.2008.
3. Svtashev K. K., Dvoretzky S. A., Sidorov Yu. G. et al. The Growth of high-quality MCT films by MBE using in-situ ellipsometry // Cryst. Rec. Technol. 1994. Vol. 29, N 7. P. 931—937.
4. Svtashev K. K., Shvets V. A., Mardezhov A. S. et al. Ellipsometry as a powerful tool for the control of epitaxial semiconductor structures in-situ and ex-situ // Mat. Sci. and Engineer. B. 1997. Vol. B44, N 1—3. P. 164—167.
5. Shvets V. A., Mikhailov N. N., Yakushev M. V., Spesivtsev E. V. Ellipsometric measurements of the optical constants of solids under impulse heating // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4900. P. 46—52.
6. Михайлов Н. Н., Швец В. А., Дворецкий С. А. и др. Эллипсометрический контроль роста наноструктур на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ // Автометрия. 2003. Т. 39, № 2. С. 71—80.
7. Дворецкий С. А., Икусов Д. Г., Квон Д. Х. и др. Выращивание квантовых ям $HgTe/Cd_{0.735}Hg_{0.265}Te$ методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Автометрия. 2007. Т. 43, № 4. С. 104—111.
8. Mikhailov N. N., Smirnov N. N., Dvoretzky S. A. et al. Growth of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ nanostructures by molecular beam epitaxy with ellipsometric control // Int. J. Nanotechnology. 2006. Vol. 3, N 1. P. 120—130.
9. Антонов В. А., Дронь О. С., Пшеницын В. И. Эллипсометрия неоднородных поверхностных слоев и пленок // Эллипсометрия — метод исследования поверхности / Под ред. А. В. Ржанова. Новосибирск: Наука, 1983. С. 9—16.
10. Швец В. А. Определение профилей оптических постоянных неоднородных слоев из эллипсометрических измерений in situ // Автометрия. 1993. № 6. С. 25—33.

Сведения об авторах

- Василий Александрович Швец** — канд. физ.-мат. наук; Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск; Специализированный учебно-научный центр Новосибирского государственного университета, кафедра физики; E-mail: shvets@isp.nsc.ru
- Сергей Владимирович Рыхлицкий** — канд. техн. наук; Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, лаборатория эллипсометрии, Новосибирск; E-mail: rhl@isp.nsc.ru
- Евгений Васильевич Спесивцев** — канд. техн. наук, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, лаборатория эллипсометрии, Новосибирск; E-mail: evs@isp.nsc.ru
- Николай Николаевич Михайлов** — канд. физ.-мат. наук, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, лаборатория эпитаксии из молекулярных пучков соединений A_2B_6 , Новосибирск; E-mail: mikhailov@isp.nsc.ru

Поступила в редакцию
12.01.09 г.

SUMMARY

P. 11—17.

CORRECTION OF INFRARED IMAGES ON THE BASE OF REAL-TIME STATISTICAL DATA PROCESSING

Infrared image correction for non-uniform sensitivity of separate elements in linear photodetector array using statistical real-time analysis of the images is considered. Comparison is performed of adaptive methods (based on analysis of a neighborhood of corrected element) and non-adaptive approaches (employing statistics of intensity distribution throughout the entire frame). A multi-point correction method is suggested which involves an approximation of characteristic curves of photo detector elements.

Keywords: infrared photodetector, correction for non-uniform sensitivity, statistical analysis.

Data on authors

- Sergey M. Borzov* — Cand. Techn. Sci.; Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk; E-mail: borzov@iae.nsk.su
- Victor I. Kozik* — Cand. Techn. Sci.; Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk; E-mail: kozik@iae.nsk.su
- Oleg I. Potaturkin* — Dr. Techn. Sci., Professor; Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk; E-mail: potaturkin@iae.nsk.su

P. 18—21.

A GAIN IN EFFICIENCY OF LASER LOCATOR OF OPTICAL SYSTEMS

A method is described, which makes it possible to increase efficiency of laser locator of optical devices. The approach employs temporally constant illumination to provide a high search rate at low detection range, and pulse-gated illumination to ensure high detection range at low search rate. Thus, the proposed method combines high search rate of constant illumination with relatively high detection range. Automatic range scanning in adjustable limits is introduced to improve the classical principle of pulse-gated illumination. Additional advantage is provided by redistribution of average power of laser emitter from short-range zone (where it is excessive) to long-range zone (where it is insufficient).

Keywords: laser locator, laser illuminator, pulse gated, optoelectronic, image intensifier, detection range, detection probability.

Data on author

- Andrey V. Golitsyn* — Institute of Applied Microelectronics, Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk subsidiary, Russian Academy of Science; the Head of Department of Modelling of Opto-Electronic Devices; E-mail: golitsyn@oesd.ru

P. 21—26.

CALIBRATION OF TELEVISION MEASURING DEVICES AT INACCESSIBLE OBJECTS

A method is proposed for calibration of television measuring instrument based on employment of graphic reference object positioned in hard-to-get-at spots. The developed method makes it possible to carry out calibration of the instrument without precise positioning and orientation of reference object.

Keywords: calibration, graphic reference object, computer vision gauges.

Data on authors

- Victor I. Kozik** — Cand. Techn. Sci.; Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Laboratory of Physicotechnical Problems of Remote Diagnostics, Novosibirsk; E-mail: kozik@iae.nsk.su
- Evgeny S. Nezhevenko** — Dr. Techn. Sci.; Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Laboratory of Physicotechnical Problems of Remote Diagnostics, Novosibirsk; E-mail: nejevenko@iae.nsk.su

P. 27—34.

TWO-CHANNEL PSEDOBINOCLAR OPTOELECTRONIC DEVICE FOR POTENTIAL HAZARD DETECTION

A two-channel optoelectronic device for border-guard and law-enforcement units is developed. The device is intended for potential threat detection in patrolled area outside effective rifle fire range at day and night illumination conditions. The thermal imaging channel makes it possible to detect a human activity and moving vehicles, while laser locator channel is applied for detection of optical devices.

Keywords: thermal imaging, microbolometer, multichannel, image intensifier, pulse gated, superapochromat, high performance reconfigurable computing, image fusion, image processing.

Data on authors

- Andrey V. Golitsyn** — Institute of Applied Microelectronics, Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk subsidiary, Russian Academy of Science, Siberian Branch, Novosibirsk; the Head of Department of Modelling of Opto-Electronic Devices; E-mail: golitsyn@oesd.ru
- Peter V. Zhuravlev** — Institute of Applied Microelectronics, Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk subsidiary, Russian Academy of Science, Siberian Branch, Novosibirsk
- Harry E. Zhurov** — Institute of Applied Microelectronics, Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk subsidiary, Russian Academy of Science, Siberian Branch, Novosibirsk; the Head of Department of Electronic Systems and Testing
- Alexander V. Koryakin** — Dr. Techn. Sci.; State Scientific Research Institute of Applied Problem, St. Petersburg; E-mail: koral_spb@email.ru
- Alexander P. Tchikhonadskih** — Cand. Techn. Sci.; State Scientific Research Institute of Applied Problem, St. Petersburg; E-mail: spchih@mail.ru
- Victor B. Shlishevsky** — Dr. Techn. Sci., Professor; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Photogrammetry and Remote Sounding, Novosibirsk; E-mail: svb_dom@ngs.ru
- Tatyana V. Yashina** — Institute of Applied Microelectronics, Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk subsidiary, Russian Academy of Science, Siberian Branch, Novosibirsk, Leading Engineer-Designer

P. 34—39.

CONCEPTUAL DESIGN OF UNIVERSAL OPTICAL-ELECTRONIC OBSERVATION DEVICES

Concept is considered of general design of multi-purpose optical-electronic observation devices. For a perspective multichannel optical-electronic system (OES), the structure of applied channels is justified. The system applicability at day-time and night conditions, as well as at hard weather conditions is discussed. Several problems of OES efficiency enhancement, improvement of obtained images, and detection of disguised objects.

Keywords: multichannel optical-electronic device, hardt weather conditions, increase information density, detection of disguised objects.

Data on authors

- Nikolay N. Mordvin* — the Central Design Office of Precision Instrument-Making, Novosibirsk; the Chief of Research Branch;
E-mail: post@tochpribor.com
- Gennady N. Popov* — the Central Design Office of Precision Instrument-Making, Novosibirsk; Director;
E-mail: post@tochpribor.com

P. 39—42.

PSEUDO-COLOR EYEPIECE FOR NIGHT VISION DEVICES

A pseudo-color eyepiece for night vision instruments of various purposes is developed. The eyepiece incorporates a special illumination facility directing to observer's eye a polychromatic light beam with irradiance uniformly distributed across the field of view.

Keywords: night vision device, eyepiece, sight, mixture of colors.

Data on authors

- Mikhail F. Noskov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Radio Electronics, Novosibirsk
- Victor B. Shlishevsky* — Dr. Techn. Sci., Professor; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Photogrammetry and Remote Sounding, Novosibirsk;
E-mail: svb_dom@ngs.ru

P. 43—47.

OFF-AXIS VOLUME HOLOGRAPHIC OPTICAL ELEMENTS FOR INFRARED

Peculiarities of recording of off-axis volume holographic optical element (HOE) used as a one-component lens for near infrared are considered. It is shown experimentally that aberrations of reference and object waves, appearing at the stage of the HOE recording, are more than an order of magnitude smaller than the laser wavelength. Measured values of transverse aberration HOE are close to calculated data. It is noted that increase in signal-to-noise ratio of an off-axis volume HOE extends detection range of infrared radiation sources.

Keywords: holographic optical element, infrared.

Data on authors

- Yuri T. Batomunkuev* — Cand. Techn. Sci.; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Physics, Novosibirsk; E-mail: opttechnic@mail.ru
- Nikolay A. Mescheryakov* — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Metrology, Standardizations and Certifications, Novosibirsk;
E-mail: opttechnic@mail.ru

P. 48—53.**STUDY OF BASIC TWO-LENS COMPONENTS OF HIGH-APERTURE OBJECTIVES FOR MODERN IMAGE INTENSIFIERS**

High resolution of modern image intensifiers is afforded by high-quality correction of residual aberrations in the lenses. For basic two-element components of the lenses made of Russian optical glass, calculations of relative values of partial and secondary dispersions in the range from 0,6 to 0,9 μm are performed. The set of basic two-element components with relative aperture of 1: 3—1 : 2,5, achromatized for the spectral interval, may serve as a basis for calculation of high-aperture lenses designed for modern image intensifier tube of II and III generations.

Keywords: two-lens components, high-aperture lenses, night vision devices.

Data on authors

- Sergey V. Oleynik* — Post-Graduate Student; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Optical Devices, Novosibirsk; E-mail: sol2000@ngs.ru
- Tatyana N. Hatsevich* — Cand. Techn. Sci.; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Optical Devices, Novosibirsk; E-mail: shafrai@risp.ru

P. 53—57.**CHROMATIC PROPERTIES OF MANGIN MIRROR OBJECTIVE IN SEVERAL RANGES OF A SPECTRUM**

Zinc selenide catadioptric lenses for 0,5—12 μm range are considered. Analysis of chromatic properties of Mangin mirror simultaneously in both visible and thermovision (3—5 and 8—12 μm) spectral ranges are carried out for various combinations of construction parameters. Plots of chromatic sums vs width and curvature radius of optical surfaces are presented. Areas of minimal variation of chromatic sums with construction parameters are determined for the best compensation of chromatic aberrations in the system of "collecting lens with Mangin mirror + meniscus".

Keywords: multispectral, catadioptric, Mangin mirror, chromatic aberrations.

Data on authors

- Marina P. Egorenko* — Siberian State Academy of Geodesy, Department of Optical-Electronic Devices, Novosibirsk; Assistant; E-mail: kaf.oep@ssga.ru
- Victor S. Efremov* — Cand. Techn. Sci.; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Optical-Electronic Devices, Novosibirsk; E-mail: ews49@mail.ru

P. 58—63.**DEVELOPMENT OF AN OPTICAL SYSTEM WITH DISCRET CHANGE OF FOCAL LENGTH**

Development of high-aperture lens with the possibility to change discretely its focal length is a challenge for designer of IR apparatus. A parametric model is proposed for thin-component lens with discrete variation of focal length, minimal number of moving elements, and fixed system length and rear aperture angle. With the use of the model, fast lenses with discretely variable focal length in the range of 8—12 mm was developed. Evaluation of image quality is based on comparison of real lens MTF with diffraction-limited MTF of an ideal lens.

Keywords: discrete change of focal length, fast thermo-vision camera lens, spectral range from 8 to 12 μm .

Data on authors

- Sergey V. Oleynik* — Post-Graduate Student; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Optical Devices, Novosibirsk; E-mail: sol2000@ngs.ru
- Tatyana N. Hatsevich* — Cand. Techn. Sci.; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Optical Devices, Novosibirsk; E-mail: shafrai@risp.ru

P. 63—68.

TUNABLE MULTIPLEX OPTICAL FILTERS

The problem of development of optical filters with a transmission band tunable throughout the entire visible range is considered. Calculations are performed for micromechanically controlled tunable multiplex optical filters with the design bandwidth of 10 Å.

Keywords: multiplex optical filters, submicron equidistant air clearance, micro- and nanotechnologies.

Data on authors

- Vladimir V. Chesnokov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Physics, Novosibirsk; E-mail: garlic@ngs.ru
- Dmitry V. Chesnokov* — Cand. Techn. Sci.; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Physics, Novosibirsk; E-mail: garlic@yandex.ru
- Dmitry M. Nikulin* — Siberian State Academy of Geodesy, Department of Physics, Novosibirsk; Engineer; E-mail: dimflint@mail.ru

P. 69—74.

LASER APPLICATION FOR NANOSTRUCTURE FORMATION

Perspective laser-based methods of formation of ordered nanostructure arrays are analysed. The methods under consideration make use of relatively inexpensive technique based on application of nanosecond pulsed laser.

Keywords: laser-induced pyrolysis, plasmachemical treatment, nanostructure array.

Data on authors

- Dmitry V. Chesnokov* — Cand. Techn. Sci.; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Physics, Novosibirsk; E-mail: garlic@yandex.ru
- Vladimir V. Chesnokov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Physics, Novosibirsk; E-mail: garlic@ngs.ru

P. 74—77.

HIGH-POWER CW SOURCE OF EXTREME VUV RADIATION FOR PROCESSING OF SEMICONDUCTOR MATERIALS

Application of existing sources of CW extreme VUV radiation is restricted by their large size, low efficiency, high cost, and small irradiated area. A novel type of arc-discharge source of extreme VUV radiation (75—10 nm) with the power of ~ 10 kW and efficiency of ~ 10 % (at least for the range of 70—30 nm) is described. The new sources are easy to manufacture; they have a lifetime of about 1000 h and are capable of irradiating samples with total surface area of ~ 0,1—1 m².

Keywords: extreme VUV radiation, arc-discharge plasma, exciting of ion levels.

Data on author

- Valery I. Donin* — Dr. Phys.-Math. Sci.; Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk; E-mail: donin@iae.nsk.su

P. 78—88.

IN SITU ELLIPSOMETRY OF GROWING MCT-BASED NANOSCALE HETEROSTRUCTURES

Development of ellipsometric instrumentation is reviewed, and analysis of data of *in situ* ellipsometry of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ structures during molecular beam epitaxy is presented. An automatic ellipsometer adapted for the measurements is developed on the base of static optical scheme. A high operation speed allows application of the ellipsometer to technological control during structure growth. Experimental results and numerical calculations are presented demonstrate applicability to growth of layered nanostructures of homogeneous layers as well as of layers with assigned distribution of composition across the layer thickness.

Keywords: ellipsometry, *in situ* control, molecular beam epitaxy, nanostructure, MCT.

Data on authors

- Vasily A. Shvets** — Cand. Phys.-Math. Sci.; Institute of Semiconductor physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Department of Physics, Novosibirsk; E-mail: shvets@isp.nsc.ru
- Sergey V. Rykhliitskii** — Cand. Techn. Sci.; Institute of Semiconductor physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Laboratory of Ellipsometry, Novosibirsk;
E-mail: rhl@isp.nsc.ru
- Evgeny V. Spesivtsev** — Cand. Techn. Sci.; Institute of Semiconductor physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Laboratory of Ellipsometry, Novosibirsk;
E-mail: evs@isp.nsc.ru
- Nikolay N. Mikhailov** — Cand. Phys.-Math. Sci.; Institute of Semiconductor physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Laboratory of Epitaxy from Molecular Beams of Connections A_2B_6 , Novosibirsk; E-mail: mikhailov@isp.nsc.ru