

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

УДК 681.78.01

РАЗВИТИЕ НОВЫХ НАПРАВЛЕНИЙ В ОТЕЧЕСТВЕННОМ ОПТИЧЕСКОМ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ

© 2010 г. В. А. Балоев¹, канд. техн. наук; С. Н. Бездилько², доктор техн. наук;
А. Б. Бельский³, канд. техн. наук; Г. Н. Герасимов⁴, доктор физ.-мат. наук;
А. И. Дирочка^{5,6}, доктор физ.-мат. наук; С. В. Максин²;
В. П. Пономаренко^{5,6}, доктор физ.-мат. наук; В. В. Тарасов⁷, доктор техн. наук;
В. А. Тупиков⁴, доктор техн. наук; А. М. Филадельф⁵, чл.-корр. РАН, доктор техн. наук;
Ю. Г. Якушников⁸, доктор техн. наук

¹ НПО “Государственный институт прикладной оптики”, Казань

² Московский Дом оптики НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Москва

³ ФНПЦ “Красногорский завод им. С.А. Зверева”, г. Красногорск, Московская обл.

⁴ НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

⁵ НПО “Орион”, Москва

⁶ Московский физико-технический институт (государственный университет), Москва

⁷ ЦНИИ “Циклон”, Москва

⁸ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва

E-mail: yakush@miigaik.ru

Представлен обзор основных тенденций развития отечественных оптических и оптико-электронных систем за последние годы. Рассмотрены и проанализированы некоторые практические пути реализации этих направлений, приводятся примеры современных разработок, выполняемых на ведущих предприятиях страны.

Ключевые слова: оптические системы, оптико-электронные системы, фотоприемные устройства, гиперспектральные системы.

Коды OCIS: 000.3860

Поступила в редакцию 09.03.2010

В рамках ставшего уже традиционным и, начиная с 2005 г., ежегодного, Международного форума “Оптика” в октябре 2009 г. была проведена научно-практическая конференция “Оптика, фотоника и оптоинформатика в науке и технике” (Всероссийский выставочный центр, Москва). На пленарном заседании 20 октября 2009 г. было заслушано несколько докладов, представленных ведущими отечественными организациями и предприятиями, в которых большое внимание уделялось как современному состоянию отечественной оптической науки и техники, так и перспективным направлениям развития оптического и оптико-электронного

приборостроения. Настоящая статья является кратким обобщением этих докладов.

Развитие оптических и оптико-электронных комплексов, включая лазерные, идет в настоящее время по нескольким направлениям, к числу которых можно отнести следующие:

– исследования процессов создания, распространения, приема и обработки оптических сигналов,

– использование последних достижений оптической науки и развивающейся теории оптико-электронных систем для создания новых типов приборов, совершенствования методов проектирования, включающего компьютерное

моделирование, расчет, конструирование и испытания как приборов в целом, так и их отдельных узлов,

- совершенствование компонентной и элементной базы оптических и оптико-электронных приборов, а также технологии их изготовления,

- комплексирование оптико-электронных систем с системами обработки цифровых изображений,

- создание оптико-электронных систем нового поколения, обладающих существенно лучшими параметрами и характеристиками, нежели существующие,

- расширение областей применения оптических и оптико-электронных методов и аппаратуры, в частности, систем “двойного” назначения (гражданских и военных) в самых разных областях науки и техники.

Известно, что мировой рынок оптических и оптико-электронных технологий последние 10–15 лет развивается очень высокими темпами (ежегодные темпы роста более 15% в год), а оптическая и оптико-электронная техника занимает одно из ведущих мест в ряду высоких новейших технологий, которые в конечном итоге определяют уровень и эффективность всей промышленности и потенциал любой страны.

Оптическое и оптико-электронное приборостроение аккумулирует самые передовые достижения естественных наук и стимулирует развитие фундаментальных, поисковых и прикладных исследований, обеспечивая создание сложных информационных и интеллектуальных систем и комплексов. Поэтому важно обеспечить быстрое развитие всех направлений оптики, создание эффективной в эксплуатации инфракрасной (ИК), ультрафиолетовой (УФ) и многоспектральной оптико-электронной техники, лазеров и лазерных приборов, что в конечном итоге определит технический прогресс во многих отраслях науки, промышленности, медицины, экологии, безопасности и др. Нужно отметить наукоемкость большинства разработок новой оптической и оптико-электронной техники, что, в частности, требует для ее производства высокого уровня технологической и метрологической базы.

Для практической реализации перечисленных выше направлений необходимо решить ряд задач научно-теоретического (методологического) характера. Необходимо

- разработать методики выбора оптимальных спектральных рабочих диапазонов,

- определить корреляционные связи сигналов, получаемых в различных спектральных диапазонах,

- установить признаки классификации различных целей и фонов (материалов, покрытий, образований),

- научиться использовать различия в поляризационных характеристиках излучения различных объектов.

В русле решения этих задач можно отметить исследования физических свойств и перспектив практического применения терагерцового и вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) диапазонов оптического спектра, ведущиеся в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова (НПК “ГОИ им. С.И. Вавилова”).

Интерес к терагерцовому диапазону электромагнитного излучения, длины волн которого простираются от 1 мм до 10 мкм (частоты от 0,3 ТГц до 30 ТГц), связан с физическими особенностями этого излучения, например, способностью проходить без значительного поглощения через объекты, не прозрачные для видимого и ИК диапазонов. Метод генерации терагерцового излучения с использованием матричного диполя, возбуждаемого излучением CO₂-лазера, позволит получать излучение субмиллиметрового диапазона с высокой средней мощностью (десятки Вт).

Основной особенностью диапазона длин волн от 200 нм вплоть до области мягкого рентгеновского диапазона – ВУФ диапазона, является высокая энергия фотонов, способная разрушить любое молекулярное соединение и вызывать деструктивные явления в различных материалах даже при минимальной спектральной плотности ВУФ излучения. Эти свойства определяют эффективность применения этого излучения в технологических и специальных целях. Однако следует отметить крайне ограниченный выбор прозрачных материалов, пригодных для использования в качестве окон источников ВУФ излучения, высокий коэффициент поглощения излучения атмосферными газами, небольшое количество лабораторных источников излучения, крайне недостаточный арсенал приемников излучения, слабую метрологическую базу. Приведенные факторы затрудняют освоение этого диапазона оптического спектра, обладающего большими потенциальными возможностями практического применения.

В НПК “ГОИ им. С.И. Вавилова” разработаны не имеющие аналогов в мировой практике принципы создания источников стимулирован-

ного, непрерывного во времени источника ВУФ излучения. Создан действующий лабораторный макет такого источника (работа ведется в кооперации с университетом г. Упсала, Швеция), а также лабораторный макет измерителя мощности лазерного ВУФ излучения. Проведены первые эксперименты по изучению воздействия этого излучения на поверхность алюминиевых зеркал. Созданы газоразрядные источники спонтанного излучения ВУФ диапазона, налажено их мелкосерийное производство (до 1000 шт. в год). Выпускаемые источники не имеют аналогов в России, а некоторые из них не имеют аналогов и за рубежом. Сотрудникам НПК “ГОИ им. С.И. Вавилова” принадлежит мировой приоритет в разработке ламп барьерного разряда, излучающих в ВУФ диапазоне и являющихся в настоящее время самыми эффективными лабораторными источниками ВУФ излучения.

Существенно расширилась номенклатура разрабатываемых отечественными организациями и предприятиями оптико-электронных систем различного назначения.

На первый план при создании оптико-электронных и, в частности, лазерных систем вышли технологические и технико-экономические ограничения. Выбор технического облика вновь создаваемой системы (прибора) зачастую проводится исходя из анализа доступных технологий. Все чаще предметом исследований становятся собственно технологии и, в первую очередь, направленные на создание серийно-пригодной продукции, в том числе, продукции массового потребления.

Помимо технологий изготовления компонентной базы оптических и оптико-электронных систем большое внимание уделяется и технологии их проектирования с отработкой на компьютерных моделях и опытных образцах, а также обеспечению пригодности разрабатываемых изделий для серийного производства. Решение этих задач определяет основное направление развития проектирования новой техники в современных условиях. Набор типовых, подлежащих тиражированию, схемотехнических решений, отработанных на образцах вплоть до их серийного освоения, в определенном смысле, формализует субъективный опыт разработчиков и составляет важнейший элемент технологии проектирования современных оптико-электронных систем.

Системный инновационно-направленный подход для развития оптических систем современных приборов должен предусматривать как

внедрение новых методов расчетов оптических и лазерных систем, создание новых оптических материалов, обладающих хорошим пропусканием в широком спектральном диапазоне, и технологий их обработки, развитие асферической и дифракционной оптики, обеспечивающей высокое пространственное и спектральное разрешение, так и создание панорамных объектов для “смотрящих” систем с широким спектральным рабочим диапазоном и адаптивных оптических систем, например, с перестраиваемым в реальном масштабе времени угловым полем или обладающих свойством адаптироваться к изменению рабочего спектрального диапазона, создание новых методик анализа, контроля и аттестации оптических компонентов и систем.

В последние годы пристальное внимание уделяется фотоприемным устройствам (ФПУ) “смотрящего” типа, в которых используются матричные приемники излучения формата $M \times N$ ($M \approx N$) или субматричные приемники форматов $4 \times N$, $6 \times N$ (многорядные линейки фоточувствительных элементов), а также ФПУ 3-го поколения на матричных приемниках излучения, которые работают одновременно в двух или более спектральных диапазонах.

При создании таких ФПУ разработчики добиваются увеличения формата ФПУ с одновременным уменьшением размеров отдельных элементов и повышением однородности параметров и характеристик этих элементов, работы устройств в двух и более спектральных диапазонах, а также увеличения рабочих температур и частоты кадров, повышения чувствительности, снижения масс-габаритных параметров и энергопотребления ФПУ и систем их охлаждения или термостабилизации.

В качестве примера можно привести ряд работ НПО “Орион”. В последние годы здесь был выпущен ряд охлаждаемых матричных ФПУ на основе соединений “кадмий-ртуть-теллур” (КРТ) и антимонида индия для “смотрящих” систем с шагом элементов от 28 до 35 мкм форматов 128×128 , 256×256 , 320×256 , 384×288 , а также субматричные ФПУ форматов 2×96 , 2×256 , 4×288 для сканирующих систем. Эти ФПУ призваны обеспечить решение большинства задач, стоящих перед тепловизионными оптико-электронными системами, в сфере разработки алгоритмов обработки электронных изображений, создания специальных микропроцессорных устройств, обеспечивающих выравнивание сигналов, снимаемых с чувствительных

элементов ФПУ, привязки к нулевому уровню, вычитанию фоновой составляющей, “замену” (деселекцию) дефектных элементов и др. В настоящее время для всех разработанных матричных ФПУ созданы специальные блоки обработки сигналов, выполняющие цифровую обработку массива сигнальной информации и позволяющие сформировать видеоизображение в стандартном телевизионном формате. В последнее время ведутся работы по созданию трехцветных матричных ФПУ на основе КРТ.

Известные достоинства неохлаждаемых тепловых многоэлементных приемников излучения (МПИ) – микроболометров, сопровождаются рядом недостатков, ограничивающих круг их применений. К их числу относятся наличие теплового шума Джонсона, избыточного токового $1/f$ -шума, а также возникновение джоулева нагрева чувствительных элементов, проявляющегося в появлении тока смещения измерительной схемы. Для устранения этих недостатков с целью повышения пороговой чувствительности микроболометров и приближения ее к значениям, характеризующим чувствительность охлаждаемых фотонных МПИ, в последние годы предлагается ряд путей. Одним из них является использование оптического считывания сигналов, образующихся в отдельных элементах чувствительного слоя микроболометрических МПИ.

“Развязка” фоточувствительного слоя от оптической схемы считывания позволит сочетать высокое геометрическое разрешение с высокой частотой кадров, обеспечиваемой хорошим быстродействием современных ФПУ на сравнительно дешевых КМОП-структурах, освоенных и массово выпускаемых промышленностью, а в конечном итоге, заметно снизит себестоимость изготовления подобных систем. В микроболометрических устройствах с перестраиваемым эталоном Фабри–Перо при использовании оптического считывания сигналов с отдельных элементов ФПУ возможно сочетать кремниевые чувствительные элементы с кремниевой схемой считывания, увеличить коэффициент заполнения пиксела микроболометра за счет устранения столбиков-контактов, соединяющих чувствительные элементы со схемой считывания, а в микроболометрах с перестраиваемым эталоном Фабри–Перо отказаться от температурной стабилизации.

Выделим некоторые перспективные направления развития отечественных оптико-электронных систем нового поколения, в частности,

систем “двойного” назначения (гражданских и военных). К ним, в первую очередь, можно отнести космический и авиационный мониторинг земной поверхности, атмосферы, околоземного космического пространства, Солнца, планет солнечной системы, обнаружение и распознавание различных целей и образов и выделение полезных сигналов на сложной фоноцелевой картине. Это особенно важно для систем обеспечения обороны и безопасности, а также для робототехнических систем военного и мирного назначения, ИК, УФ и многоспектральные системы самого различного назначения – от военной техники до медицинских или противопожарных систем, медицинскую и научно-аналитическую аппаратуру.

Для практической реализации этих направлений прилагаются усилия многих отечественных предприятий. В частности, работы ФНПЦ “Красногорский завод им. С.А. Зверева” направлены на создание новых поколений оптико-электронных систем космической оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) дистанционного зондирования Земли с космических аппаратов, средств контроля космического пространства, систем воздушной и космической разведки, обзорно-прицельных систем, оптико-электронных средств траекторных измерений.

Эти задачи являются, в определенной мере, общими для систем различного применения. При их решении важно обеспечить минимизацию масс-габаритных параметров аппаратуры, достижение максимально высокого спектрального и пространственного разрешения, интеллектуализацию систем (т. е. создание адаптивного программно-аппаратного обеспечения для решения целевых задач оптико-электронной аппаратуры космических аппаратов), многоспектральность (гиперспектральность) ОЭА, а также применение адаптивной и асферической оптики.

Новые поколения оптико-электронных систем должны обеспечивать круглосуточность работы ОЭА, информативность (информационную емкость) каналов ОЭА, адаптивность спектральных зон, мобильность и модульность ОЭС, оперативность и повышение дальности обнаружения и распознавания целей с сокращением времени на их поиск, комплексированность каналов технического зрения.

Решение указанных задач невозможно без разработки соответствующих технологий, элементной базы и особенно новой метрологической стендовой базы с требуемой оптической и

радиометрической калибровкой такого класса аппаратуры. Для решения этих задач потребовалась организация новых современных производств тепловизионных и низкоуровневых телевизионных модулей и каналов нового поколения, прецизионных малогабаритных лазерно-гироскопических устройств (на базе высокочувствительных приемников ПЗС) и систем высокоточной стабилизации изображений, спектроделительных интерференционных покрытий высокого пространственного разрешения, адаптивных оптических устройств компенсации искажений оптического изображения (за счет эффекта турбулентности в атмосфере), изготовления и контроля прецизионной асферической оптики (в том числе внеосевой) диаметром до 1–2 м, совершенствование технологии изготовления и контроля просветляющих, отрезающих, полосовых, интерференционных покрытий (для оптического диапазона).

Создание на Красногорском заводе им. С.А. Зверева фотолитографического оборудования предусматривает разработку проекционно-оптических систем для степперов и степсканеров, работающих в глубоком (DUV) и экстремальном (EUV) УФ.

Для реализации этих задач в DUV ($\lambda = 193$ нм) диапазоне необходимо создание кварцевой и флюоритовой линзовой и зеркальной оптики (в том числе на стеклокерамике), высокоточных позиционеров с двухступенным сканированием и создание систем активного виброгашения с прецизионными датчиками УФ интерферометрии.

Для решения поставленных задач в EUV ($\lambda = 13,5$ нм) диапазоне требуется создание зеркальной асферической оптики (стеклокерамика, монокристаллические элементы + стекло), обеспечение высочайшего качества поверхностей оптических покрытий, создание нового класса прецизионной метрологии и мощных источников лазерного излучения (до 200 Вт).

В качестве примера разработки Красногорским заводом им. С.А. Зверева оптико-электронных изделий медицинского назначения можно упомянуть медицинский комплекс общепатологического геномного мониторинга человека для полной диагностики заболеваний человека. Медицинский комплекс должен включать аппаратуру для выделения лейкоцитов из крови, аппаратуру для электрофореза белков лейкоцитов, цифровой спектрофотометр-денситометр, другую аналитическую аппаратуру, а также специальное программно-

алгоритмическое обеспечение и автоматизированное рабочее место для проведения анализа и обработки данных.

На этом же предприятии ведется разработка и организация производства офтальмологических комплексов – щелевой лампы с YAG-лазером для микрохирургических операций на глазе, т. е. разрушения патологических образований сфокусированным лазерным импульсным излучением очень короткой длительности (на длине волны 1,06 мкм с энергией импульса 0,2–15 мДж), а также проектирование производства медицинских комплексов, основанных на методах оптической когерентной томографии, и создание оптико-электронных средств для телемедицины.

Для нового поколения метрологических комплексов контроля и аттестации оптических и оптико-электронных приборов и систем на Красногорском заводе им. С.А. Зверева создаются автоматизированные системы интерферометрического контроля различных (плоских, вогнутых, выпуклых) поверхностей крупногабаритных оптических деталей (сферических и асферических), контроля качества объективов (измерения оптических передаточных функций) и контроля спектроделительных покрытий в УФ и видимой областях, для контроля качества объективов в области глубокого ($\lambda = 150–200$ нм) и экстремального ($\lambda = 10–30$ нм) УФ диапазона для установок фото- и нанолитографии.

Другим примером реализации одного из отмеченных выше направлений являются разработки тепловизионных систем НПО “Государственный институт прикладной оптики” (ГИПО) и ЦНИИ “Циклон”. Тепловизоры, созданные в ГИПО, работают на охлаждаемых многоэлементных приемниках. К ним относятся: тепловизионные прицелы 1-го поколения на охлаждаемых линейках фоточувствительных элементов для оснащения отечественных возимо-переносных противотанковых комплексов, тепловизионные каналы 2-го поколения на субматричных охлаждаемых ФПУ и тепловизионные каналы 3-го поколения на матричных охлаждаемых ФПУ.

В ГИПО отработаны опытные образцы ИК каналов сканирующе-смотрящего типа, решающих задачу обзора заданного широкого сектора пространства и построения тепловизионного кадра в узком поле зрения со стабилизацией оси визирования.

Традиционно ГИПО сопровождает свои разработки необходимым объемом фоно-целевых

исследований и разработкой соответствующей стендовой и метрологической аппаратуры.

Ряд тепловизоров на базе микроболометрических матриц разработан ЦНИИ “Циклон”. Приборы успешно используются в различных областях науки и техники.

Подводя итог и анализируя требования к создаваемым или планируемым в обозримой перспективе новым оптико-электронным изделиям специального и гражданского назначения, можно выделить некоторые наиболее актуальные направления дальнейшего совершенствования оптико-электронных систем:

- ♦ Создание многоспектральных (многодиапазонных, многоканальных) оптико-электронных систем с обеспечением возможности работы в УФ, видимом, ближнем ИК, среднем ИК и дальнем ИК диапазонах спектра (в том числе с комплексированием изображений, получаемых в этих диапазонах).

- ♦ Создание информационно-емких высоко разрешающих гиперспектральных систем и соответствующей метрологической базы к ним.

- ♦ Создание оптико-электронных систем с элементами адаптивной и асферической оптики практически для всех спектральных диапазонов.

- ♦ Внедрение высокоразрешающих спектроразделительных оптических модулей.

- ♦ Внедрение оптических (голографических) корреляторов и лазерно-локационных средств для повышения достоверности и оперативности работы обзорно-прицельных систем.

- ♦ Применение во многих оптико-электронных системах широкоугольной внеосевой зеркальной оптики с глубокой асферикой и облегченных конструкций из углепластика.

- ♦ Создание нового класса программно-аппаратного обеспечения для анализа и обработки гиперспектральной информации, выделения объектов на фоне мощных помех, в том числе за счет программно-алгоритмического обеспечения для реализации метода последетекторной обработки сигналов на ФПУ оптико-электронных систем; высокопроизводительной обработки сигнальной информации в цифровых комплексированных каналах технического зрения.

- ♦ Создание нового поколения высокоточных безинерционных и активных систем высокоточной стабилизации изображения.

Развитие многих из этих направлений и решение ряда важных научных и практических задач, к сожалению, затруднено из-за возникшего в последние десятилетия отставания отечественного оптического и оптико-электронного приборостроения от уровня достижений мировой науки и техники.

В связи с этим важное место занимают организационно-технические решения и мероприятия, призванные координировать усилия отдельных отечественных предприятий, направленные на повышение качества отечественных разработок серийно выпускаемых и вновь создаваемых приборов и отдельных их компонентов.

Во многом преодолению сложившегося отставания будет содействовать создание холдинга “Оптические системы и технологии”, объединяющего усилия многих предприятий оптического и оптико-электронного приборостроения в России. Необходимо установить и развивать научно-производственное сотрудничество предприятий оптического холдинга с институтами и организациями РАН и высшей школы, специализирующимися в области материаловедения, разработки оптических, оптико-электронных и лазерных компонентов и систем, подготовки кадров.

Только комплексный подход и решение указанных проблемных вопросов сможет обеспечить разработку и организацию производства качественно новой наукоемкой и высокотехнологичной оптической и оптико-электронной продукции специального, научного, промышленного и общегражданского назначения.

Итак, резюмируя вышеизложенное, необходимо еще раз остановиться на главном: развитие в целом отечественного оптического и оптико-электронного приборостроения должно базироваться не только на совершенствовании отдельных его направлений, а на комплексном программно-целевом подходе к данной проблеме в оптической отрасли промышленности, академических и вузовских институтах. Такой подход обеспечит правильный выбор приоритетных направлений развития оптики и оптико-электронного приборостроения и их увязку с задачами инновационного общегосударственного развития не только оптической, но и других отраслей промышленности.