

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 681.7.067 + 621.315.592

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ СОЗДАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

© 2010 г. Н. А. Кулакова, канд. физ.-мат. наук; А. Р. Насыров, канд. физ.-мат. наук;
И. М. Несмелова, доктор физ.-мат. наук
НПО “Государственный институт прикладной оптики”, Казань
E-mail: nazla52@mail.ru

В обзоре представлены современные способы создания оптических систем для инфракрасной области спектра. Рассмотрены системы на основе классических материалов (германий и кремний), гибридные системы с применением полупроводниковой керамики и халькогенидных стекол, системы с дифракционными и градиентными элементами. Особое внимание уделяется получению оптических структур на основе полимеров.

Ключевые слова: полупроводниковые среды, халькогенидные стекла, дифракционные оптические элементы, градиентные оптические элементы.

Коды OCIS: 160.1890

Поступила в редакцию 05.08.2009

В настоящее время при выборе и разработке оптической системы для инфракрасных (ИК) приборов разного назначения на первый план выдвигаются задачи ее упрощения при сохранении технических характеристик. Это сокращение числа компонентов, уменьшение массы и габаритов, снижение стоимости изготовления оптических деталей и системы в целом. При этом, в связи с прогрессом в создании новых матричных приемников излучения с малыми размерами чувствительных элементов требования к качеству изображения и светосиле – высокие. При формировании требований к качеству изображения для ИК области спектра необходимо учитывать, что дифракционный предел разрешения растет с увеличением длины волн. Перечисленные выше требования к ИК системам рассматриваются в работах [1–4].

Оптические системы в широкой области спектра подразделяются на три класса – зеркальные, зеркально-линзовые и линзовые. В зеркальных системах хроматизм практически отсутствует, атермализация в них осуществляется легко. Однако сложность конструкции и более высокая стоимость, а в ряде случаев, увеличенные габариты зеркальных и зеркально-линзовых систем

заставляют искать пути их совершенствования. Одной из проблем, с которыми сталкиваются разработчики при конструировании линзовых оптических систем для ИК области спектра, является проблема выбора оптического материала для изготовления линз, пластин, пропускающих излучение и обладающих малой дисперсией, малым изменением коэффициента термического расширения. В работах [1, 3, 5] представлены параметры основных оптических материалов, используемых в ИК системах. Наиболее полная сводка физико-химических свойств и характеристик ряда кристаллов, применяемых в ИК оптике, представлена в работе [6].

Оптические ИК системы с линзами можно условно разделить на четыре типа:

- классические с линзами из полупроводниковых сред (германий и кремний) как кристаллических, так и поликристаллических,
- с линзами из полупроводниковой керамики и халькогенидных ИК стекол,
- с дифракционными оптическими элементами (ДОЭ), в том числе с применением полимерных материалов,
- с градиентными оптическими элементами (ГрОЭ) и применением полимеров.

Классические системы с применением полупроводниковых сред из кристаллических и поликристаллических германия и кремния

До недавнего времени линзы, изготовленные из германия и кремния, являлись основными элементами объективов для ИК области спектра. Изготовление этих объективов является трудоемким процессом, линзы получаются дорогими, больших размеров и массы. Германий становится непрозрачным при температуре около 400 °C, а при температуре около 120 °C коэффициент пропускания германия снижается в 2 раза [3]. Возникают сложности с аттестацией заготовок германия и кремния [7] и с юстировкой оптической системы. Для повышения качества изображения и уменьшения количества элементов объектива создают асферические поверхности, методы, средства изготовления и контроля которых рассмотрены в работах [8, 9].

В качестве примера оптической системы из германия и кремния на рис. 1 представлена оптическая схема панкратического ИК объектива, разработанного в НПО ГИПО [10]. Разработки ИК техники в НПО ГИПО представлены в обзоре [2].

Оптические системы с применением элементов из полупроводниковой керамики и халькогенидных ИК стекол

В начале 80-х годов прошлого столетия активно началось изучение таких полупроводников, как сульфид и селенид цинка, с целью применения их в качестве оптических сред для ИК оптики взамен германия и кремния. Поликристаллы были получены (оптические керамики ПО-4, КО-4, КО-6) горячим прессованием по-

рошка, выращиванием из расплава, кристаллизацией из паровой фазы (CVD), химическим осаждением из газовой фазы [11].

Сульфид цинка ZnS имеет превосходные оптические, тепловые, механические свойства, высокую температуру плавления, высокую твердость. Селенид цинка ZnSe обладает схожими физико-химическими свойствами, но имеет меньшую твердость, чем ZnS. Исправить этот недостаток можно, применив для изготовления линзы сплав $ZnS_{1-x}Se_x$ [12], который имеет более высокую твердость, чем ZnSe. У этих материалов есть ряд преимуществ по сравнению с германием и кремнием: они прозрачны как в видимой, так и в ИК областях спектра, коэффициент пропускания в длинноволновой области спектра больше, чем у германия, показатель поглощения меньше, что позволяет применять более простое антиотражающее покрытие; пропускание образцов меняется незначительно с изменением температуры. Применение ZnSe и ZnS для изготовления линз позволяет создавать оптические системы на несколько атмосферных окон: 1–2,6, 3–5, 8–12 мкм.

Оптическая керамика на основе ZnS и ZnSe в НПО ГИПО широко применяется при разработке и изготовлении тепловизионной и тепlopеленгационной аппаратуры, что позволяет уменьшать количество элементов и увеличивает пропускание оптических систем изделий.

Авторы работы [12] создали объективы для ИК области спектра с линзами на основе поликристаллических ZnS и ZnSe и их сплавов, а также на основе халькогенидных стекол. Инновационные исследования позволили создать системы с хорошим качеством изображения, а также вдвое понизить их стоимость и массу по сравнению с системами из линз, изготовленных из поликристаллического германия. Поликристаллы ZnS и ZnSe были получены методом горячего прессования порошка. В работе представлены объективы для области 8–12,5 мкм со следующими параметрами: фокусное расстояние 150 и 100 мм, диафрагменные числа 1,0 и 1,2 соответственно, атермализация в диапазоне температур от –20 °C до +55 °C. Объективы используются в приборах военного и коммерческого назначения. Они обеспечивают хорошее качество изображения при работе с болометрическими неохлаждаемыми матрицами форматов 320×240 и 120×120 элементов с размером пикселя 50 мкм.

Компания “Umicor IR Glass” (Франция) освоила промышленный выпуск оптических деталей

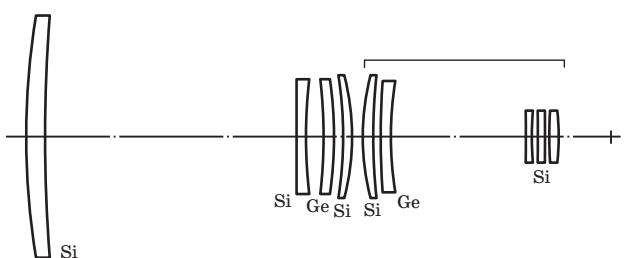


Рис. 1. Оптическая схема панкратического объектива на область спектра 3–5 мкм с непрерывно изменяющимся фокусным расстоянием 75–700 мм.

из халькогенидных стекол GASIR1 ($\text{Ge}_{22}\text{As}_{20}\text{Se}_{58}$) и GASIR2 ($\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$) [13]. Стоимость этих стекол невелика, детали изготавливаются более дешевым способом – моллированием. В табл. 1 показаны некоторые физические параметры халькогенидных стекол, представленных в работе [13]. Получен материал с воспроизводимостью показателя преломления стекол разных партий менее $1,5 \times 10^{-4}$ для длины волны 10 мкм. При просветлении линзы из халькогенидных стекол имеют пропускание до 98%. Получены слитки диаметром 200 мм и толщиной 60–70 мм. Изготовлены двухлинзовые объективы с асферическими и асферико-дифракционными поверхностями на области спектра 3–5 и 8–12 мкм с фокусным расстоянием 60 мм, диафрагменным числом 1,1 и полем зрения $15^\circ \times 11,5^\circ$. Объективы дают изображение по качеству, не уступающему создаваемому объективами с асферическими линзами из германия и селенида цинка. Высокое качество предлагаемых объективов подтверждается частотно-контрастными характеристиками, значения которых близки к расчетным значениям.

Технология изготовления качественной ИК оптики для коммерческих и военных целей на основе халькогенидных стекол описана в работе [14]. Моллированием халькогенидных стекол получены асферические и дифракционные поверхности и созданы ИК линзы для оптических систем (фокусное расстояние 19 мм, диафрагменное число 1,1) для работы с неохлаждаемыми приемниками излучения на область спектра 8–14 мкм. Матрица имела размер 320×240 элементов с пикселями 25 мкм. Зависимость показателя преломления от температуры у халькогенидных стекол меньше, чем у германия, что позволило изготовить атермализованные линзы для диапазона температур от -40°C до $+80^\circ\text{C}$ и поля зрения до 24° . Пропускание такого объекти-

ва – 91%. Это очень высокое значение, принимая во внимание, что теоретическая средняя дифракционная эффективность для области спектра 8–12 мкм составляет около 95%.

В работе [15] предложена оптическая система для средней (3,6–4,9 мкм) и ближней ИК (1,06 мкм) областей, состоящая из дуплета линз из CaF_2 и As_2S_3 , получены ахроматические и атермализованные системы. Также предлагается композиция из линз Ge и ZnSe. Для устранения хроматизма используются две дифракционные поверхности, которые получаются травлением и алмазным точением на поверхностях линз из ZnSe. Первый порядок дифракции образуется для длины волны 4,24 мкм, а четвертый порядок дифракции приходится на 1,06 мкм.

На удовлетворение требований к оптическим системам, сочетающим предельные оптические и эксплуатационные характеристики, направлено расширение элементной базы оптики. К современной элементной базе оптических изделий относят асферические преломляющие линзы, ДОЭ и ГрОЭ. В асферических преломляющих линзах одна или обе поверхности представляют собой гладкую вращательно-симметричную поверхность раздела двух сред, которые по сравнению со сферической поверхностью имеют дополнительные коррекционные параметры. Широкое использование асферических поверхностей стало возможным и экономически целесообразным благодаря появлению современных методов формообразования на основе прецизионной штамповки.

Оптические системы с дифракционными оптическими элементами, в том числе, с применением полимерных материалов

ДОЭ позволяют осуществить фокусировку и коррекцию формы волновых фронтов, аналогичных функциям линзовых и зеркальных эле-

Таблица 1. Физические параметры халькогенидных ИК стекол [13]

Название	GASIR1	GASIR2
Состав	$\text{Ge}_{22}\text{As}_{20}\text{Se}_{58}$	$\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$
Рабочая область, мкм	$0,8\text{--}14$	$1\text{--}14$
Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	4,40	4,70
Модуль Юнга, ГПа	18	19
Температура размягчения или плавления, $^\circ\text{C}$	292	264
Температурный коэффициент линейного расширения, K^{-1}	17×10^{-6}	16×10^{-6}
Температурный коэффициент показателя преломления для 20°C и 10,6 мкм, K^{-1}	$5,5 \times 10^{-5}$	$5,8 \times 10^{-5}$
Показатель преломления для длины волны 10 мкм	2,4944	2,5842
Максимальная температура использования, $^\circ\text{C}$	240	200

ментов, за счет дифракции света на их структуре [16, 17]. Г.Г. Слюсарев впервые рассмотрел новый тип оптических систем, состоящих из обычных линз и фазовых пластинок. Предложенная им фазовая пластина впоследствии получила название “киноформ”. Киноформ – это синтезированная голограмма со 100% дифракционной эффективностью. В 70-х годах прошлого века в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова проводилась большая работа по методам расчета киноформных элементов, обобщению основных моделей вычислительной оптики с целью включения в них киноформа [16]. Появляются объективы с киноформами для видимой области спектра, которые позволяют уменьшить количество оптических элементов по сравнению с обычными линзовыми системами на 30%. При этом считалось, что применение киноформа для ИК области нецелесообразно ввиду простоты схем при использовании материалов с большим показателем преломления. Однако с развитием тепловизионной техники появились новые требования к оптическим системам, например, необходимость создания систем с дискретным изменением увеличения для дальней ИК области спектра. В связи с этим возникла необходимость уменьшения числа рефракционных элементов за счет киноформных.

В работе [18] рассмотрена разработка для армии США тепловизионного оружейного прицела (ТОП) AN/PAS-13 *Hughes Aircraft Corporation*, где отмечается, что это “первая крупномасштабная программа военного производства, которая включила дифракционную оптику...”. ТОП функционирует в среднем ИК диапазоне и состоит из четырех оптических модулей: базовый модуль формирования изображений и три афокальных телескопических узла (ТОП для легкого, среднего и тяжелого оружия). Телескопическая система прицела для легкого оружия имеет 2^{\times} -увеличение, в то время как ТОП для среднего и тяжелого – увеличения $2^{\times}/3,3^{\times}$ и $3,3^{\times}/10^{\times}$ соответственно. Каждый из этих четырех модулей содержит один киноформный элемент для ахроматизации и, по крайней мере, один асферический элемент, полученные алмазным точением. Линзы изготовлены преимущественно из Si и Ge, для изготовления киноформа в ТОП для тяжелого оружия использован ZnS. На рис. 2 для сравнения представлены оптические схемы базового модуля ТОП с обычными линзами (рис. 2а) и с киноформом (рис. 2б). В базовом модуле с киноформом на 40% меньше элементов, дисторсия уменьшена в 2 раза,

ослаблены требования к допускам; в ТОП для легкого оружия – меньше элементов на 33%, более компактный вид, в ТОП для среднего оружия достигнуто значительное улучшение оптической передаточной функции, в ТОП для тяжелого оружия проще сборка, лучше качество изображения.

Традиционно асферическая и дифракционная поверхности на кремнии изготавливались с помощью алмазного точения. В работе [19] предложена новая технология получения дифракционных линз для ИК оптики. Плоская пластина кремния покрывается тонкой пленкой прозрачного в ИК области полимера, а далее проводится профилирование под нужную форму моллированием. В качестве полимерного покрытия использовались пленки флюорополимеров и полиэтилена толщиной 0,32–0,74 мм. Несмотря на ряд технологических трудностей авторам удалось изготовить объектив с хорошим качеством изображения для области спектра 4,19–4,45 мкм с фокусным расстоянием 50 мм и диафрагменным числом 2,6.

Известно, что полимеры в изготовлении линз для ИК области не применялись, в основном, по двум причинам. Во-первых, полимеры имеют небольшой показатель преломления (1,6, 1,7), и линзы на их основе для ИК области спектра будут иметь солидные объемы, что затрудняет коррекцию aberrаций. И, во-вторых, трудно найти полимеры, хорошо пропускающие оптическое излучение в ИК области спектра. Однако в настоящее время созданы простые и сравнительно дешевые ИК системы массового применения с неохлаждаемыми приемниками излучения для областей спектра 3–5 мкм и 8–14 мкм. В работе [20] сообщается о создании недорогих объективов с применением полимеров для воен-

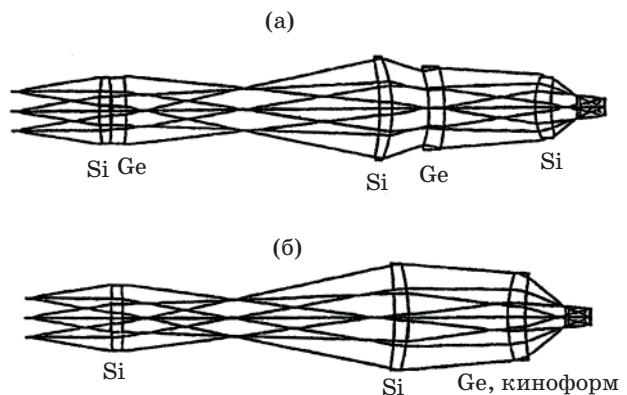


Рис. 2. Обычная (а) и гибридная (б) оптические схемы тепловой системы изображения.

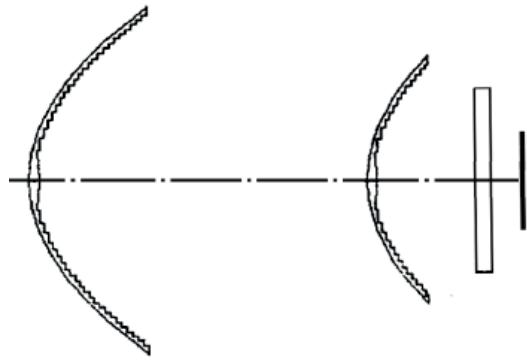


Рис. 3. Расположение оптических элементов в объективе с линзами из полимеров.

ного и гражданского использования на область спектра 8–14 мкм с диафрагменным числом 0,8 и с фокусным расстоянием 50 мм. Объектив состоит из двух пластмассовых линз с асферическими и дифракционными поверхностями (поверхностями Френеля). Толщина центральной части линзы равна 0,5 мм (см. рис. 3). Для изготовления линз использовались пластмассы марки POLY IR 2. Компанией “Fresnel Technologies, Inc”, США, разработаны пластмассы POLY IR 1–7, которые могут применяться для ИК об-

ласти спектра. На рис. 4 представлены области прозрачности полимеров POLY IR [21].

ДОЭ обычно рассматривается как идеальный чистый дифракционный элемент без учета дисперсии показателя преломления материала элементов. Авторы работы [22] представили модель дифракционного элемента с учетом дисперсии показателя преломления материала. Показано, что с учетом дисперсии возможно более точное определение параметров гибридной системы.

В работе [23] приведены данные о линзах Френеля, которые разработаны на основе качественного акрила (рис. 5) для области спектра от 0,5 до 2,0 мкм. Линзы выпускаются промышленно.

Оптические системы с градиентными оптическими элементами (ГрОЭ). Применение полимеров

Возможность фокусировки излучения при его распространении в неоднородной (градиентной) оптической среде положено в основу действия градиентной линзы. Линзу, выполненную из материала, имеющего радиальное распределение показателя преломления и плоские преломляющие поверхности, называют линзой

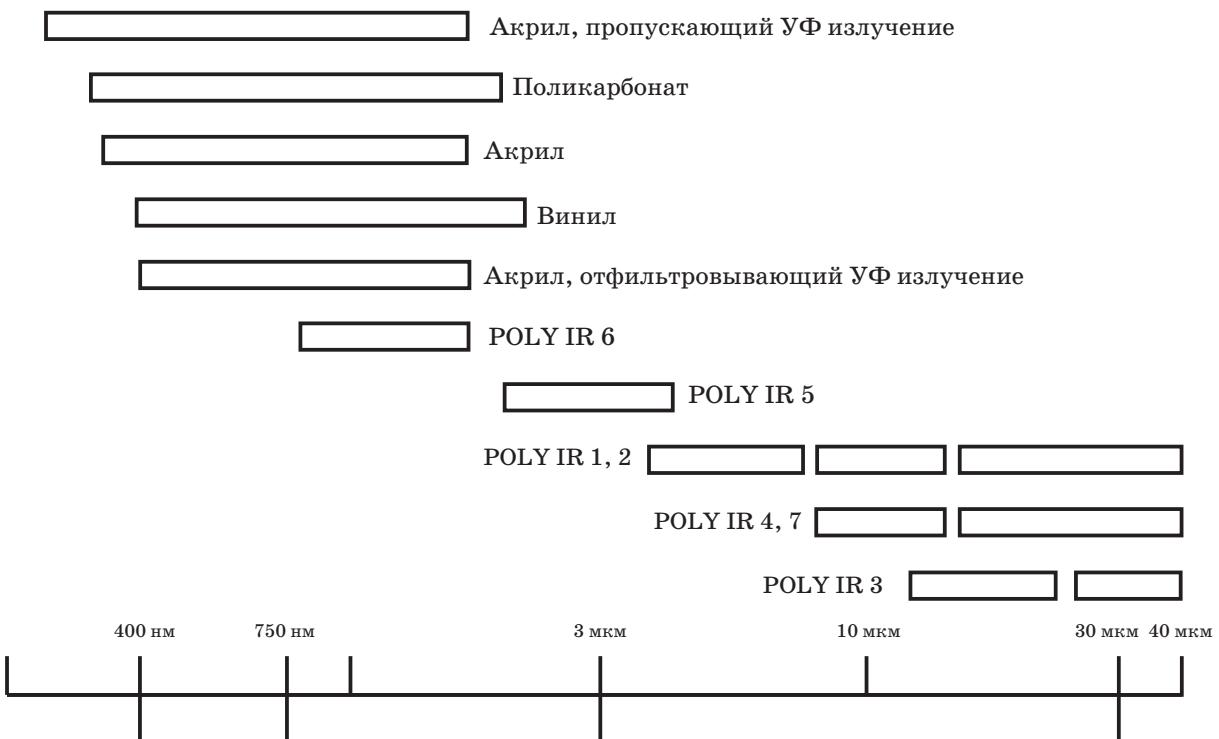


Рис. 4. Области пропускания полимерных материалов.

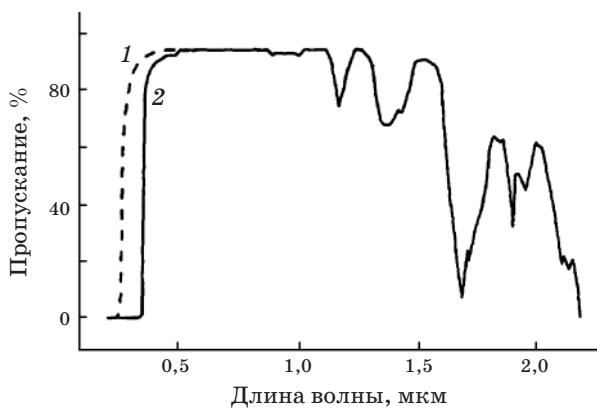


Рис. 5. Спектр пропускания высококачественного акрила. Акрил для ультрафиолета (1), наиболее часто используемый акрил (2).

Вуда. В работе [24] рассмотрены aberrации и коррекционные возможности склеенной линзы Вуда и показано, что такая линза является простейшей радиально-градиентной оптической системой, для которой существует вероятность полного устранения всех aberrаций третьего порядка.

Одной из самых важных особенностей градиентных линз, по сравнению с классическими линзами, является то, что оптические поверхности таких линз плоские. При выпуклых поверхностях сферической формы наличие градиента показателя преломления в линзе эквивалентно асферизации поверхности, что существенно повышает относительное отверстие линзы, увеличивая светопропускание системы. Использование градиентных линз позволяет сократить количество элементов оптических систем и уменьшить их массу.

При создании градиентных линз используют как неорганические стекла, так и полимеры. Обмен ионами – самый популярный способ получения оптических элементов из стекла с градиентом показателя преломления. Например, образец стекла с ионами Na может быть помещен в раствор, содержащий ионы Li. В результате диффузии натрий частично замещается литием, и образец получает структуру градиентного материала.

В работе [25] рассмотрены объективы для ИК области спектра с ГрОЭ, полученные на основе твердых растворов $ZnS_{1-x}Se_x$ и $Ge_{1-x}Si_x$. Градиент показателя преломления в полупроводниках задавался изменением состава (изменением значения “ x ”) при выращивании кристаллов по методу Чохральского или химическим осаждением из паровой фазы. Получены ИК линзы с лучшим качеством изображения, чем у германьевого синглета с асферическими поверхностями.

В последнее время все более широкое применение находят элементы для оптических систем из полимеров. В работе [26] показано, что для конкретной полимерной системы полидиаллилизофталат-полиметилметакрилат сферические aberrации могут быть снижены на порядок по сравнению с aberrациями однородной линзы такой же геометрической формы, изготовленной из полиметилметакрилата.

Авторы работ [27, 28] сообщают о создании градиентных материалов на основе множества чередующихся слоев толщиной 10 нм из двух полимеров с разными значениями показателя преломления. Если толщины пленок намного меньше, чем длина волны света, а показатели преломления соседних слоев отличаются незначительно, получается материал с уникальными свойствами, отличными от свойств составных частей. Создавались “стопы” толщиной 50 мкм, в которых расчетным путем определялся необходимый градиент показателя преломления. Затем “стопы” объединялись и моллированием формировались градиентные линзы.

В работе [27] описывается технология создания полимерной многослойной градиентной линзы, подобной хрусталику глаза человека, который может быть представлен как система нанопленок биологических полимеров. Изготавливались системы из чередующихся полимерных нанослоев с показателями преломления 1,53 и 1,57. (Используемые полимеры представлены в работе [29]). Образована плоско-выпуклая линза с осевым и радиальным распределением показателя преломления, обе поверхности которой обрабатывались алмазным точением. Получены линзы диаметром 20 мм, толщиной в центре 2,87 мм, с радиусом кривизны 23,5 мм. Проведено сравнение такой линзы с классической линзой из гомогенного стекла BK7, которое является аналогом стекла K8. (Стекло BK7 является боросиликатным высококачественным оптическим стеклом с низкой пузырчатостью и нулевым сопротивлением). В результате применения градиентной линзы качество изображения системы лучше, масса меньше (более чем на порядок величины) по сравнению с линзой из стекла.

В работе [28] материал для изготовления линз представлял “стопу” из 4096 слоев нанополимеров: (толщина каждого слоя 10 нм) метакри-

лата (PMMA) с показателем преломления 1,40 и акрилонитрила стирол (SAN17) с показателем преломления 1,573. На рис. 6 представлено распределение показателя преломления в линзах, изготовленных из таких "стоп". Используя полученные градиентные линзы, можно преобразовать гауссов закон распределения интенсивности излучения входного луча в форму, представленную на рис. 7, при этом коэффициент пропускания излучения линз около 100% и отклонения на краях менее 3%.

Необходимо обратить внимание на разработки, представленные в докторской диссертации Б.Н. Сеника [30], в которой рассматриваются методика получения градиентно-асферических слоев на оптических элементах вакуумным методом, а также некоторые аспекты изготовления оптических элементов на основе полимеров. Решается задача получения асферической поверхности методом вакуумного напыления с одновременным управлением изменения показателя преломления в напыляемом слое. При этом получается минимальная толщина градиентного слоя. В работе разработана методика нанесения неоднородных ахроматических покрытий для спектрального диапазона 2,0–12,5 мкм. Созданы тепловизионные объективы и модули оптико-электронных приборов для гражданского применения и специального назначения с улучшенными оптическими, светотехническими характеристиками, с небольшими массой и габаритами.

Разработки оптических систем с дифракционными и градиентными элементами далеко не исчерпаны. При этом на первый план выдвигается задача выбора оптимальной исходной схемы. Задача, названная М.М. Русиновым композицией оптических систем, не решается ни одной из существующих компьютерных программ, предназначенных для расчета и проектирования оптики. Традиционно разработчики оптических систем компонуют исходную схему, опираясь на собственный опыт и, используя разработанный Г.Г. Слюсаревым и основанный на теории aberrаций третьего порядка аппарат основных параметров. Однако наиболее результативным считается подход, при котором исходная схема выбирается из архива известных схемных решений [31]. В созданных в последние годы коммерческих программных продуктах, предназначенных для расчета, исследования, оптимизации и аттестации оптических систем, реализован именно этот подход. К наиболее мощным из этих программных продуктов относятся DEMOS (раз-

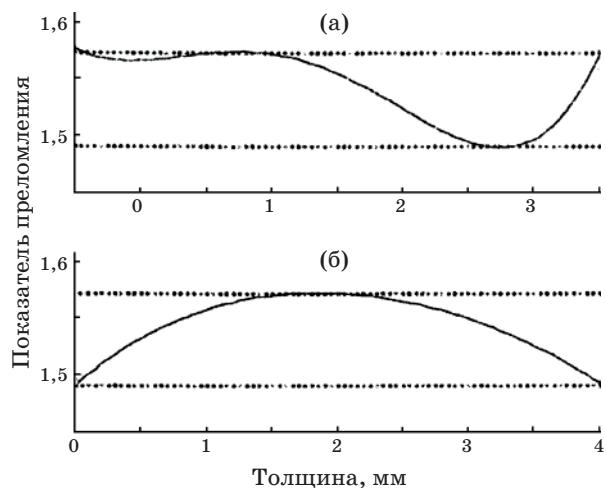


Рис. 6. Распределение показателя преломления по толщине градиентных линз. а – радиус кривизны линзы $R = 10,9963$ мм, б – $R = 21,8393$ мм.

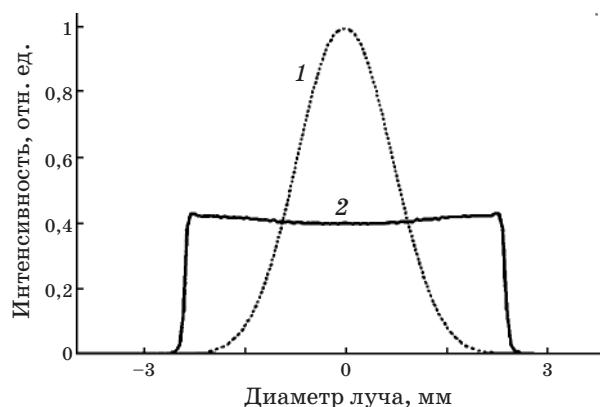


Рис. 7. Закон распределения интенсивности входного луча (1) и интенсивности луча на выходе излучения (2) с применением двух градиентных линз.

работчик – ВНИЦ “ГОИ им. С.И. Вавилова”) [32], ZEMAX Optical design program (*Focus Software, Inc.*) [33].

В заключение приводим табл. 2 из работы [34], в которой для сравнения приведены различного рода ошибки оптических систем, устранимые в случае применения однородной, дифракционной и градиентной оптики.

Непрерывное повышение требований к оптическим системам задает тенденции их развития в сторону сокращения габаритов, массы, повышения разрешающей способности и коэффициента светопропускания, сокращения числа оптических компонентов. Все это может быть

Таблица 2. Коррекционные возможности синглетов различных типов [34]

№	Одновременно устранимые аберрации	Однородный	Дифракционный	Градиентный
1	Сферическая, кома, астигматизм	—	—	+
2	Сферическая, кома, кривизна Петцвала	—	—	+
3	Сферическая, кома, дисторсия	—	—	+
4	Сферическая, астигматизм, кривизна Петцвала	—	+	+
5	Сферическая, астигматизм, дисторсия	—	—	+
6	Сферическая, кривизна Петцвала, дисторсия	—	+	+
7	Кома, астигматизм, кривизна Петцвала	+	+	+
8	Кома, астигматизм, дисторсия	+	—	+
9	Кома, астигматизм, дисторсия	+	+	+
10	Астигматизм, кривизна Петцвала, дисторсия	—	+	+
11	Сферическая, кома, астигматизм, дисторсия	—	—	+
12	Сферическая, кома, кривизна Петцвала, дисторсия	—	—	+
13	Сферическая, астигматизм, кривизна Петцвала, дисторсия	—	—	+
14	Кома, астигматизм, кривизна Петцвала, дисторсия	—	—	+

достигнуто за счет широкого применения асферических, дифракционных и градиентных элементов в оптических системах. В свою очередь, положительный эффект от их применения будет достигнут только в том случае, если они изготовлены с высокой точностью, иначе технологические погрешности не позволят получить в изготовленной системе заложенные в проект расчетные значения базовых параметров. Удешевление оптических систем возможно за счет использования новых материалов, а также отработанных технологий копирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Lloyd J.M.* Thermal Imaging Systems. N.-Y.: Plenum Press, 1975. Перевод: Васильченко Н.В. Системы тепловидения. М.: "Мир", 1978. 414 с.
2. *Иванов В.П., Белозеров А.Ф.* Инфракрасная техника в НПО "Государственный институт прикладной оптики" // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 1. С. 5–11.
3. *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.* Инфракрасные системы "смотрящего типа". М.: Логос, 2004. 443 с.
4. *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.* Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. М.: Логос, 2007. 191 с.
5. *William L. Wolfe, George J. Zissis.* The Infrared Handbook. Revised Edition. Prepared by IRIA Center, Michigan. Перевод: Киселева Н.Л., Кин С.Г. Проектирование оптических систем М.: Мир, 1998. Т. 2. 347 с.
6. *Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Переломова Н.В., Стрижевская Ф.Н., Чкалова В.В.* Акустические кристаллы. Справочник / Под ред. Шаскольской М.П. М.: Наука, 1982. 632 с.
7. *Несмелова И.М., Астафьев Н.И., Несмелов Е.А.* Зависимость коэффициента поглощения кристаллического германия в ИК области спектра от удельного сопротивления // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 1. С. 88–92.
8. *Поспелов В.В., Сеник Б.Н.* Асферизация высокоточных оптических элементов методом вакуумного напыления // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 1. С. 14–19.
9. *Кукс В.Г., Хуснутдинов А.Г.* Получение асферических оптических поверхностей вращения в широком диапазоне технологических параметров // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 12. С. 14–19.
10. *Иванов В.П., Козлов С.Д., Морозов А.Е., Нигматуллина Н.Г.* Объективы с непрерывно изменяющимся фокусным расстоянием для работы в инфракрасной области спектра // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 1. С. 70–73.
11. *Гаврищук Е.М., Яшина Э.В.* Оптические элементы из сульфида цинка и селенида цинка для инфракрасной техники // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 12. С. 24–31.
12. *Zhang E., Song V.W., Zhang J.S., Zybron C.Y.* Non-Ge Optics and Low-Cost Electronics Desings for LIR Imagers // Proc. SPIE. 2003. V. 4820. P. 550–571.
13. *Guimond Y., Bellec Y., de Boulaiz Z.A.* IR moulded optics for thermal imaging // Proc. SPIE. 2003. V. 5074. P. 807–813.
14. *Curatu G.* Design and fabrication of low-cost thermal imaging optics using precision chalcogenide

- glass molding // Proc. SPIE. 2008. V. 7060. P. 706008-1-7.
15. *Nevo Y., Nir D., Wachtel S.* Use of diffractive elements to improve IR optical systems // Proc. SPIE. 2003. V. 4820. P. 744–750.
16. *Ган М.А.* 50 лет киноформной оптики. Итоги и перспективы развития // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 7. С. 9–16.
17. *Фишман А.И.* Фазовые оптические элементы-киноформы // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 12. С. 76–83.
18. *Cox A.* Application of diffractive optics to infrared imagers // Proc. SPIE. 1995. V. 2552. P. 304–312.
19. *Vicker D., LeBlanc R.* Midwave Infrared Imager with plastic Laminated Diffractive/Aspheric Surfaces // Proc. SPIE. 2001. V. 4369. P. 642–648.
20. *Claytor N.E., Claytor R.N.* Polymer imaging optics for the thermal infrared // Proc. SPIE. 2004. V. 5406. P. 107–113.
21. <http://www.fresneltech.com/materials.html>
22. *Hu Zhang, Hua Liu, Zhenwu Lu, Hongxin Zhang, Zhengguo Ni.* Modeling diffractive optical elements in hybrid systems with the effect of the material dispersion // Proc. SPIE. 2008. V. 7060. P. 706015-1-8.
23. <http://www.fresneltech.com/pdf/Fresnel Lenses.pdf>
24. *Степанов С.А., Грейсух Г.И.* Аберрационные свойства и коррекционные возможности склеенной линзы Вуда // Опт. и спектр. 1999. Т. 86. № 3. С. 522–527.
25. *Howard J.W., Ryan-Howard D.P.* Optical design of thermal imaging systems utilizing gradient-index optical materials // Opt. Eng. 1985. V. 24. № 2. P. 263–266.
26. *Фадеев Е.А., Косяков В.И., Тухватулин А.Ш.* Математическое моделирование технологии и свойств градиентных сферических линз // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 10. С. 70–73.
27. *Beadie G., Fleet E., Rosenberg A., Lane P.A., Shirk J.S., Kamdar A.R., Ponting M., Hiltner A., Baer E.* Gradient Index Polymer Optics // Proc. SPIE. 2008. V. 7061. P. 706113-1-5.
28. *Zahreddine R.N., Lepkowicz R.S., Bunch R.M., Baer E., Hiltneac A.* Beam Shaping System based on Polymer Spherical Gradient Refractive Index Lenses // Proc. SPIE. 2008. V. 7062. P. 706214-1-8.
29. *Mueller C.D., Nazarenko S., Ebeling T., Schuman T.L., Hiltner A., Baer E.* Novel structures by microlayer coextrusion – Talc-filled PP, PC/San, and HDPE/LLDPE // Polym. Eng. 1997. V. 37. P. 335–362.
30. *Сеник Б.Н.* Асферические градиентные элементы для оптического и опто-электронного приборостроения // Автореф. докт. дис. Москва: ФНПЦ ОАО “Красногорский завод им. С.А. Зверева”, 2007. 40 с.
31. *Ежов Е.Г.* Разработка схем и методик расчета центрированных оптических систем, включающих однородные линзы с асферическими поверхностями, дифракционные и градиентные элементы // Автореф. докт. дис. Самара: СГАУ, Пенза: ПГУАС, 2007. 34 с.
32. *Zhdanov D.* Design of optical systems with HPE by DEMOS program // Proc. SPIE. 1991. V. 1574. P. 254–260.
33. ZEMAX: software for optical system design. <http://www.focus-software.com>
34. *Грейсух Г.И., Ефименко И.М., Степанов С.А.* Оптика градиентных и дифракционных элементов. М.: Радио и связь, 1990. 223 с.