

УДК 681.7.036:661.847.955.2

СВОЙСТВА И ОПТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СЕЛЕНИДА ЦИНКА, ПОЛУЧЕННОГО ФИЗИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

А.А. Дунаев^а, И.Л. Егорова^а

^а ОАО «НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация

Адрес для переписки: dunaev@goi.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 29.01.15, принята к печати 10.04.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-3-449-456

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Дунаев А.А., Егорова И.Л. Свойства и оптическое применение поликристаллического селенида цинка, полученного физическим осаждением из газовой фазы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 3. С. 449–456.

Аннотация

Приведены результаты исследования технологии получения, механических и оптических свойств поликристаллического селенида цинка. Совокупность физико-химических свойств обеспечивает ему широкое применение в оптике инфракрасного диапазона. Технология получения основана на физическом осаждении пара на разогретую подложку (PVD). Исследованы на рентгеноспектральном микроанализаторе «САМЕВАХ» структурные особенности и неоднородности элементного состава поверхностей роста поликристаллических заготовок селенида цинка. Для всех поверхностей роста зафиксированы характерные кристаллиты пирамидальной формы, измерения соотношения концентраций основных элементов свидетельствуют об их соответствии стехиометрии соединения селенида цинка. Произведены измерения двулучепреломления, оптической однородности, теплопроводности, механических и оптических свойств. Установлено, что независимо от столбчатости и текстурированности поликристаллического конденсата оптический материал является фотомеханически изотропным и однородным. Показана реальная работоспособность деталей из поликристаллического оптического селенида цинка в тепловизорах спектральных диапазонов от 3 до 5 мкм и от 8 до 14 мкм и CO₂-лазерных технологических установках с плотностью мощности 500 Вт/см². Разработанная технология позволяет производить поликристаллический оптический материал в промышленном масштабе.

Ключевые слова

селенид цинка, поликристалл, технология, сырье, свойства, применение.

PROPERTIES AND OPTICAL APPLICATION OF POLYCRYSTALLINE ZINC SELENIDE OBTAINED BY PHYSICAL VAPOR DEPOSITION

A.A. Dunaev^a, I.L. Egorova^a

^aScientific and Technological Institute of Optical Material Science, All-Russian Scientific Center «Vavilov State Optical Institute», JSC, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation

Corresponding author: dunaev@goi.ru

Article info

Received 29.01.15, accepted 10.04.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-3-449-456

Article in Russian

For citation: Dunaev A.A., Egorova I.L. Properties and optical application of polycrystalline zinc selenide obtained by physical vapor deposition. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 3, pp. 449–456.

Abstract

Findings on production technology, mechanical and optical properties of polycrystalline zinc selenide are presented. The combination of its physicochemical properties provides wide application of ZnSe in IR optics. Production technology is based on the method of physical vapor deposition on a heated substrate (Physical Vapor Deposition - PVD). The structural features and heterogeneity of elemental composition for the growth surfaces of ZnSe polycrystalline blanks were investigated using CAMEBAX X-ray micro-analyzer. Characteristic pyramid-shaped crystallites were recorded for all growth surfaces. The measurements of the ratio for major elements concentrations show their compliance with the stoichiometry of the ZnSe compounds. Birefringence, optical homogeneity, thermal conductivity, mechanical and optical properties were measured. It is established that regardless of polycrystalline condensate columnar and texturing, the optical material is photomechanically isotropic and homogeneous. The actual performance of parts made of polycrystalline optical zinc selenide in the thermal spectral ranges from 3 to 5 μm and from 8 to 14 μm and in the CO₂ laser processing plants with a power density of 500 W/cm² is shown. The developed technology gives the possibility to produce polycrystalline optical material on an industrial scale.

Keywords

zinc selenide, polycrystal, technology, raw materials, properties, application.

Введение

«...Несмотря на насыщенность современных оптических приборов сложными электронными схемами, сердцем любого оптического прибора, определяющим его функциональные возможности, остается оптический элемент, изготовленный из какого-либо оптического материала». Тезис был сформулирован академиком Г.Т. Петровским в 1978 году [1] и не утратил актуальности в настоящее время. Свидетельством тому является активное освоение спектра пропускания атмосферы в видимой и инфракрасной (ИК) области, повышение требований к качеству оптических материалов, что, в совокупности с рядом специфических для каждого материала требований, способствует улучшению тактико-технических характеристик оптико-механических приборов и устройств, повышает их конкурентоспособность и продвижение на рынок наукоемких технологий.

Развитие тепловидения и лазерной техники ИК диапазона сделало селенид цинка (ZnSe) привлекательным материалом для защитных люков и линзовой оптики благодаря благоприятному сочетанию оптических и термомеханических свойств [2]. В частности, его спектр пропускания полностью перекрывает прозрачность атмосферы в видимой и ИК областях спектра (рис. 1), что позволяет применять его в перспективных гиперспектральных оптических системах [3].

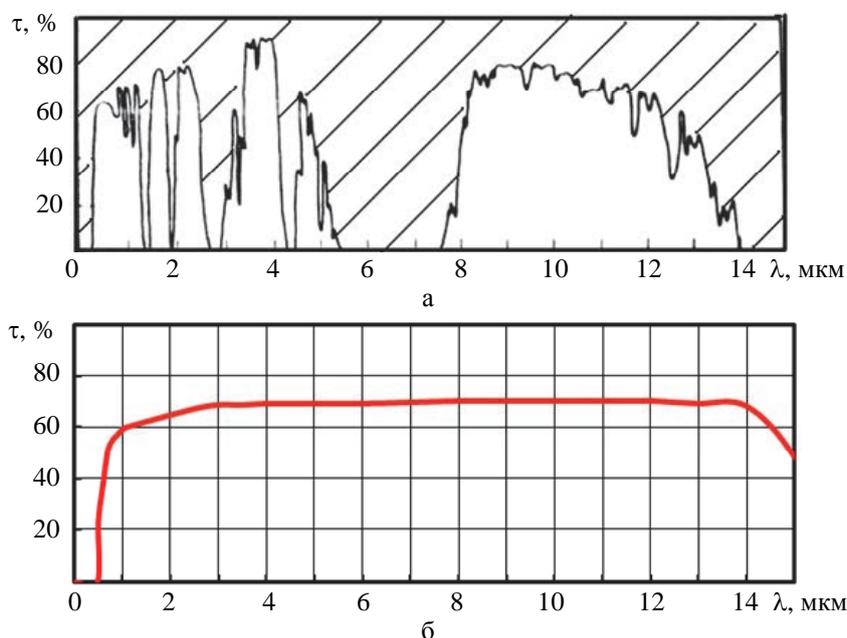


Рис. 1. Спектральные коэффициенты пропускания атмосферы (а) и поликристаллического селенида цинка (б)

ZnSe представляет интерес как перспективный люминесцентный материал, излучающий от синей до ИК области спектра. Сцинтилляторы на основе ZnSe(Te) имеют максимум спектра излучения в области 640 нм, сцинтилляционную эффективность около 15% и время высвечивания 10 мкс. Наличие этих свойств обеспечивает целесообразность их применения в томографии и дозиметрии, поскольку в этом случае решающим фактором оказывается сочетаемость с кремниевыми фотодиодами и малое послесвечение. Размер детекторов – $10 \times 7 \times 5 \text{ мм}^3$ [4, 5].

Легирование ZnSe ионами переходных металлов (Cr, Fe, Co) открывает перспективу создания перестраиваемых лазеров для спектрального диапазона 2–5 μm . Создание таких лазеров особенно важно для разработки высокочувствительных методов спектрального анализа, поскольку в данной области длин волн лежат сильные линии поглощения многих молекул [6, 7]. В основном используются легированные кристаллы, полученные либо из расплава, либо путем твердофазной диффузии атомов переходных металлов через поверхность. Эти методы не позволяют получить однородные крупные кристаллы высокого оптического качества, что необходимо для реализации предельных значений по мощности и эффективности непрерывной генерации. Крупные кристаллы были выращены из паровой фазы методом физического транспорта [8, 9]. Рост осуществлялся из отдельных источников паров ZnSe и CrSe. Такая методика позволила вырастить кристаллы $\text{Ø}50 \times 10 \text{ мм}$. Легирование селенида цинка в процессе свободного роста не приводит к инверсии типа проводимости. Имплантацией азота из плазменного источника удалось создать высокую концентрацию акцепторных уровней и получить ZnS *p*-типа, на основе которого был реализован

лазерный диод, излучающий свет в области спектра в интервале длин волн 430–590 нм [10, 11]. Успех с имплантацией азота в ZnSe стимулировал получение *N*-легированных полупроводников *p*-типа группы II–VI, в частности, ZnO.

Практическая инфракрасная техника использует крупногабаритные оптические элементы. Выращивание ZnSe из расплава позволяет достичь диаметра заготовок до 200 мм [12], однако сквозные поры и примесные неоднородности [13] ограничивают реальные возможности их применения. Применение и дальнейшее совершенствование технологии ZnSe-CVD (Chemical Vapor Deposition) [14] позволило устранить присущие другим методам недостатки и создать оптический материал для CO₂-лазеров.

Тенденции развития тепловидения [15, 16] однозначно свидетельствуют, что спектральные диапазоны от 3 до 5 мкм и от 8 до 14 мкм по-прежнему остаются актуальными, следовательно, ZnSe является востребованным материалом, требующим дальнейшего совершенствования оптического качества и технологии его изготовления.

Цель работы состояла в разработке эффективного способа управления процессом выращивания поликристалла ZnSe методом физического транспорта [17], создании сырьевой, технологической и аппаратной базы и их практической реализации для выращивания поликристаллического ZnSe с высокими оптическими и эксплуатационными характеристиками.

Технология

Опытные заготовки оптического материала первоначально были применены в разработках ГОИ им. С.И. Вавилова, в частности, в приборе «Прогресс-2М», фото которого воспроизведено на рис. 2, а [18, С. 70]. Входное окно было изготовлено в виде эллипса 180×160 мм и толщиной 11 мм (рис. 2, б), в состав объектива также входила линза в паре со стеклом ИКС25.

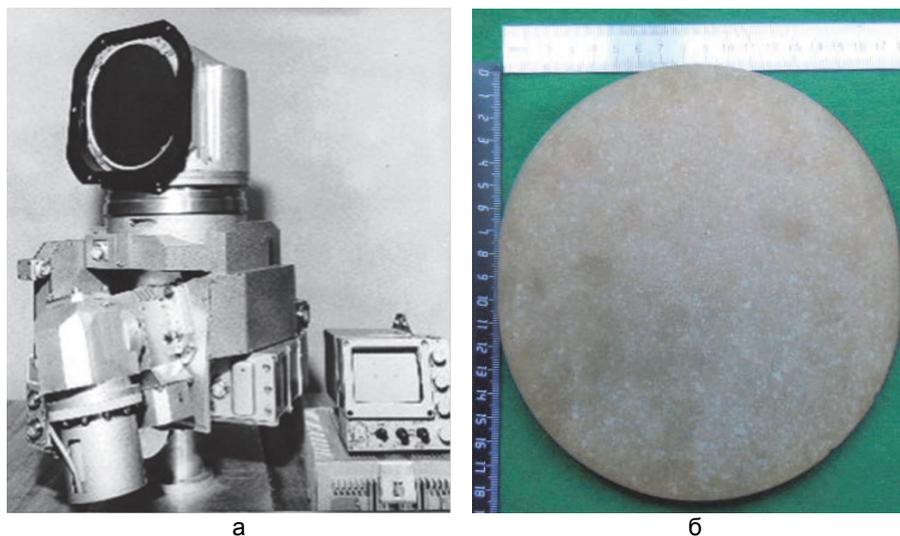


Рис. 2. Тепловизор «Прогресс-2М» (а) и входное окно из поликристаллического ZnSe (б)

Выращивание поликристаллического селенида цинка (ПО4) осуществляется методом физического осаждения пара (Physical Vapor Deposition – PVD), при этом ростовые установки используют больше физические процессы, такие как высокотемпературное вакуумное испарение, чем химические реакции на поверхности подложек, которые относятся к химическому осаждению (CVD). Компонировка одной из установок, схема размещения контейнера в нагревателе и температурный профиль по высоте представлены на рис. 3. Компактность оборудования позволяет разместить его на площади 6 м², сборка и обслуживание корпуса печи требуют высоты технологического помещения не менее 4,5 м. Естественным разумеется наличие в помещении приточно-вытяжной вентиляции.

Варьирование температурного режима (температуры испарения и конденсации, температуры фильтра, температурного профиля по высоте контейнера) осуществляется изменением температуры нагревателя, вертикальным перемещением контейнера относительно верхнего среза нагревателя, теплоизоляцией с помощью углеграфитовой ткани, которая послойно укладывается на крышку контейнера.

Для выращивания ПО4 предпочтительно используется порошкообразный продукт производства ЗАО «Унихим», Санкт-Петербург. С учетом того, что при выращивании происходит дополнительная очистка, минимизировано количество контролируемых примесей. Экспериментально показано, что в результате испарения фильтрации пара через углеграфитовую мембрану и конденсации пара на разогретую подложку происходит удаление примесей оксидов металлов и избыточных компонентов, снижается содержание тяжелых металлов [19]. При подборе режимов выращивания принципиально возможно применение других видов сырья, боя, остатков заготовок после механической обработки.

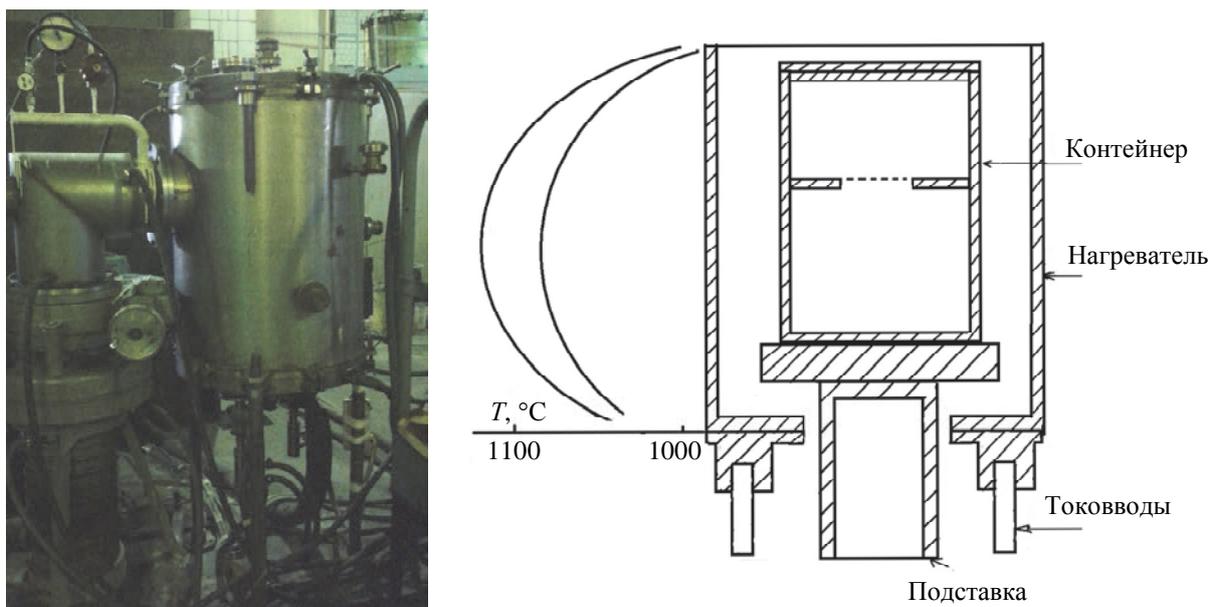


Рис. 3. Ростовое технологическое оборудование (а) и эскиз контейнера для выращивания поликристаллического ZnSe из паровой фазы (б). График на эскизе демонстрирует распределение температуры по высоте нагревателя; температура на крышке контейнера измеряется отдельной термопарой

Исследование свойств

Рентгенографически установлено, что поликристаллический конденсат является текстурированным материалом, причем степень текстурированности возрастает от подложки к ростовой поверхности. В зернах материала присутствуют двойники вращения по [111].

Структурные особенности и неоднородности элементного состава поверхностей роста заготовок ПО4 исследованы на рентгеноспектральном микроанализаторе «САМЕВАХ» фирмы САМЕСА. Для всей поверхности осаждения пара на выращиваемую заготовку зафиксированы характерные кристаллиты пирамидальной формы. Измерения соотношения концентраций основных элементов, выполненные на ряде плоских участков поверхностей, свидетельствуют об их соответствии стехиометрии соединения ZnSe. Выявлено наличие примесных элементов на границе раздела отдельных кристаллитов. Можно предположить, что примесные элементы, присутствующие в исходном сырье, могут переноситься на растущую заготовку поликристаллического конденсата, причем распределение таких элементов на поверхностях роста может быть реализовано тремя возможными путями – сегрегацией к границе зерен, в структурные неоднородности и в отдельные включения.

№ детали	Измеренные области	Двулучепреломление, нм/см	Напряжение σ , МПа
001	1	42	0,34
	2	22	
	3	25	
	4	25	
002	1	167	1,2
	2	75–83	
	3	167	
	4	83–92	
	5	67	
003	1	225	1,7
	2	92	
	3	92	
	4	92–100	

Таблица 1. Двулучепреломление и напряжения в деталях ПО4 диаметром 330 мм

Измерения двулучепреломления произведены на заготовках для штатных деталей защитного люка, устанавливаемого на борт самолета (три детали $\varnothing 330 \times 18$ мм на один люк). Величины максимальных значений напряжений, измеренные в зонах просветлений на интерференционных картинах двулучепреломления, представлены в табл. 1.

Расчетные значения напряжений, представленные в таблице, весьма малы по сравнению с пределом прочности на изгиб (19,6–33,3 МПа), поэтому присутствие таких напряжений в пластинах не является опасным. Остаточные напряжения в материале не исчезают и не перераспределяются при механической резке материала (рис. 4).

Оптический коэффициент напряжений (B) был определен двумя методами – по измеренной разности хода и по картине полос. Сравнительный анализ результатов на большом числе образцов показывает, что оптический коэффициент напряжений материала ПО4 не зависит от размеров образцов и при $\lambda = 550$ нм равен $(10,85 \pm 1,37) \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$. Из полученного значения B и показателя преломления $n = 2,61$ можно вычислить разность пьезооптических постоянных $\pi_{11} - \pi_{12} = \pi_{44} = -2 B/n^3$, которая равна $1,14 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$.

Оптическая однородность (Δn) измерена двумя независимыми методами – интерференционным и дифрактометрическим: максимальные значения Δn составляют $(4-8) \cdot 10^{-6}$, относительное снижение углового разрешения составляет 1,05–1,2.

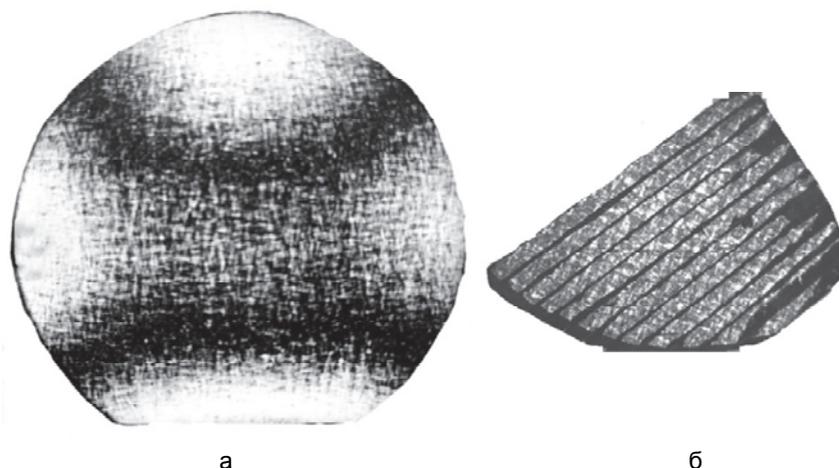


Рис. 4. Поляризационно-оптическое изображение двулучепреломления в заготовке диаметром 350 мм (а); сохраняемость двулучепреломления (остаточных напряжений) после многократной распиловки сегмента заготовки (б)

Поскольку ZnSe имеет достаточно высокую оптическую чувствительность, мы применили это свойство при просвечивании образцов параллельно и перпендикулярно оси роста. В поликристаллическом ZnSe наведенная оптическая анизотропия имеет две составляющие – термическую и ростовую. Термическая составляющая двулучепреломления и напряжений наблюдается при просвечивании дисков или темплетов параллельно оси температурного градиента, обеспечивающего процесс роста. Эта составляющая имеет распределение, близкое к равновесному. Ростовая составляющая двулучепреломления и напряжений наиболее отчетливо выражена в темплетах, просвечиваемых перпендикулярно оси роста. Она очень часто имеет ассиметричное распределение, далекое от равновесия. Для изучения влияния зеренной неоднородности по толщине и остаточных напряжений на механическое поведение материала в области его упругости при комнатной температуре использовался четырехточечный изгиб темплетов. Изгиб производился так, чтобы напряжения, возникающие при этом, растягивали:

1. поверхность, обращенную к фронту роста;
2. поверхность, обращенную к подложке;
3. поверхность, параллельную оси роста при просвечивании образца в этом же направлении.

Нагружение проводилось в поле зрения полярископа рычажным прессом со ступенчатой нагрузкой.

Анализ картин полос для всех случаев нагружения показал их полную тождественность за исключением локальных краевых отклонений, обусловленных индивидуальными особенностями зеренной структуры. Чем выше механический момент, тем более похожими становятся картины полос. Это свидетельствует о том, что материал по своему фотомеханическому поведению в целом является однородным и изотропным и что его зеренная неоднородность, текстура, особенности роста и остаточные напряжения не создают в материале каких-либо макроскопических механических особенностей.

Измерения пропускания образцов в видимой и ИК областях спектра в различных направлениях также установили, что геометрическая ориентированность зерен не влияет на пропускание (ослабление) материала. Показано, что поликристаллический селенид цинка ПО4 реально может эксплуатироваться при температурах до 350°C , не вызывая при этом значительного увеличения поглощения в ИК области.

Исследования температурной зависимости спектрального коэффициента поглощения проводились по методике измерения пропускания излучения постороннего источника исследуемым образцом: в интервале длин волн 200–800 нм – на спектрофотометре Spekord UV-VIS, в интервале 5000–1200 нм – на UR-20 при температурах в диапазоне от комнатной до 600 °С. Экспериментально подтвержден факт, что вплоть до третьего окна прозрачности атмосферы включительно (8–14 мкм) поглощение в оптическом материале не увеличивается (рис. 5).

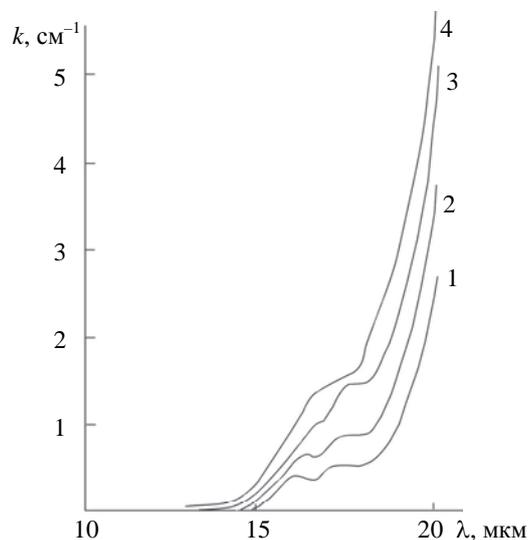


Рис. 5. Температурная зависимость спектрального коэффициента поглощения ПО4 (толщина образца 5 мм) (1 – 20 °С, 2 – 100 °С, 3 – 200 °С, 4 – 300 °С)

На перенос энергии в области высокой прозрачности поликристаллических материалов заметное влияние оказывает рассеяние, связанное с порами, дефектами структуры, включениями и другими неоднородностями. Непосредственные измерения показателя направленного рассеяния в области малых углов рассеяния проведены на приборе НФК-2, измеряемая величина определена как отношение светового потока, рассеянного «вперед» в образце толщиной 1 см в телесный угол 7 град вокруг падающего луча, к световому потоку, падающему на образец. Измерения проведены на длинах волн 1,0; 1,5; 2,0 и 2,5 мкм. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Длина волны, мкм	Показатель направленного светорассеяния, $\text{см}^{-1} \cdot 10^4$		
	образец 1	образец 2	образец 3
1	2	4,4	0,95
1,5	1,9	3,8	0,93
2	2	3,3	0,98
2,5	2	3,25	0,9

Таблица 2. Направленное рассеяние ИК излучения в ПО4

Полученный результат можно оценить как достаточно низкий и сравнимый с рассеянием в видимой области промышленных марок стекла, например, ТФ. Слабая зависимость показателя рассеяния от длины волны свидетельствует, что оно вызвано, в основном, крупными по сравнению с длиной волны неоднородностями, в том числе и на поверхности. Последнее обстоятельство накладывает высокие требования на оптическую полировку рабочих поверхностей деталей.

Поскольку оптический материал используется в различных изделиях, где могут быть реализованы различные виды нагружения и соответственно напряженного состояния, то требуется знать величины этих предельных напряжений, которые необходимы для проведения расчетов на устойчивость систем. В связи с тем, что такие данные в литературе отсутствуют, был собран обширный экспериментальный материал по прочности ПО4 при испытаниях на разрыв, сжатие и изгиб. Прочностные исследования проводились на универсальной машине «Инстрон». Статистически обработанные результаты представлены в табл. 3.

Оптический материал испытан в качестве элементов лазерных технологических установок различных типов: УЛГ-2.01, ЛН-1, НМ-И1, ЛН-2, 5НМ-И1. Так, на установке УЛГ-2.01 при плотности мощности 300 Вт/см² выходная мощность лазера составила 2,5 кВт. Термодеформация, измеренная на интерферометре сдвига ИТ-183, не превышала 1 мкм (0,1 λ). При нагрузке 500 Вт/см² и диаметре пучка 45 мм выходная мощность лазера достигает 7,5 кВт, при этом расходимость пучка не превышает 2·10⁻³ рад, а

температура окна, установленного на оптический контакт с водоохлаждаемой оправой, не поднимается выше 40–50 °С. Качество излучения, близкое к одномодовому, обеспечивает резку стали толщиной 4 мм со скоростью 1 м/мин при ширине реза 0,3 мм. Материал ПО4 был установлен в качестве выходных окон и фокусирующих линз на лазерной технологической установке ХЕБР-1А. При плотности мощности 400 Вт/см² элементы эксплуатировались в течение 7 месяцев с нагрузкой 12 ч в неделю; стабильность характеристик процесса резки во времени сохранялась.

Фактические результаты технологии выращивания крупногабаритного ПО4 представлены на рис. 6. На рис. 7 – пример использования защитного люка в составе оптико-электронного блока мобильного базирования.

Вид нагружения	Прочность, $\sigma \pm E$, МПа	Коэффициент вариации, V , %
Растяжение	$4,41 \pm 1,47$	44
Чистый изгиб	$30,40 \pm 1,27$	8,4
Осевое сжатие	$120 \pm 4,51$	10,3

Таблица 3. Влияние вида нагружения на прочность материала ПО4 ($\pm E$ – доверительный интервал с надежностью 0,95)

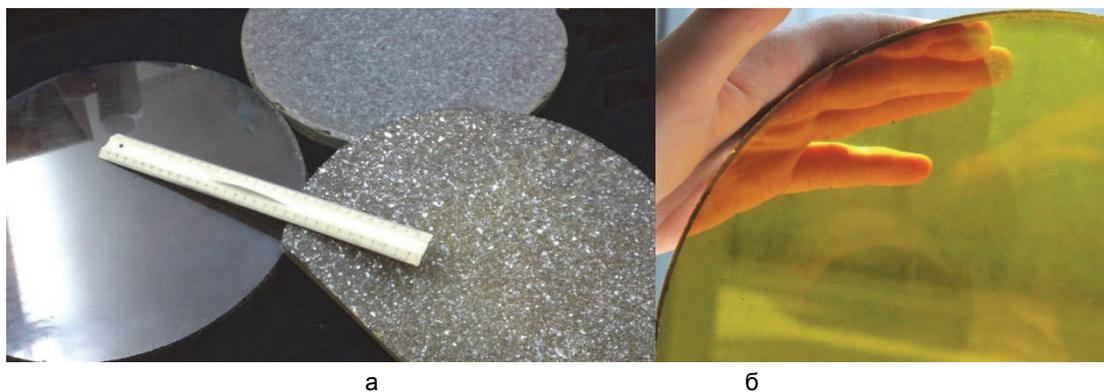


Рис. 6. Фактические результаты выращивания и обработки ПО4 диаметром 350 мм: шлифовка, полировка, резка (а); деталь из ПО4 на просвет (б)

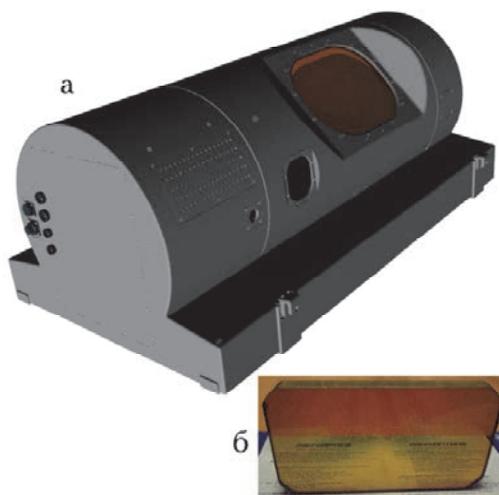


Рис. 7. Оптико-электронный блок мобильного базирования (а) и защитный люк из ПО4 (б) для него

Заключение

1. Показано, что селенид цинка является полифункциональным оптическим материалом, работающим как активная генерирующая среда в средней инфракрасной области. Материал ПО4 позволяет решать задачи, связанные с применением оптических систем, работающих одновременно в широких спектральных диапазонах: видимом (от 400 до 650 нм), ближнем инфракрасном (от 700 до 1600 нм), в том числе на рабочих длинах волн лазерных излучателей (1064 нм и 1540 нм), а также дальнем инфракрасном диапазоне (от 3000 до 14000 нм).
2. Выявлено, что фотомеханическая изотропность и однородность материала сохраняется в условиях чистого изгиба и диаметрального сжатия образцов различной ориентации, геометрическая ориентированность зерен не влияет на спектральный коэффициент пропускания в различных направлениях.

3. Проведенное комплексное исследование процесса, в основе которого лежит физический метод осаждения пара (PVD), позволило создать технологию крупногабаритного поликристаллического селенида цинка, вошедшего в научно-техническую документацию под маркой ПО4.

Литература

1. Петровский Г.Т. Новые оптические стекла и кристаллы // Оптико-механическая промышленность. 1978. № 12. С. 13–17.
2. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с франц. М.: Мир, 1988. 420 с.
3. Сенник Б.Н. Применение кристаллов в перспективных разработках гиперспектральных оптических систем // Прикладная физика. 2007. № 3. С. 136–142.
4. Цирлин Ю.А., Глобус М.Е., Сысоева Е.П. Оптимизация детектирования гамма-излучения сцинтилляционными кристаллами. М.: Энергоатомиздат, 1991. 152 с.
5. Schotanus P., Dorenbos P., Ryzhikov V.D. Detection of CdS(Te) and ZnSe(Te) scintillation light with silicon photodiodes // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1992. V. 39. N 4. P. 546–550. doi: 10.1109/23.159663
6. Carrig T.J., Wagner G.J., Sennaroglu A., Jeong J.Y., Pollock C.R. Mode-locked Cr²⁺ ZnSe laser // Optics Letters. 2000. V. 25. N 3. P. 168–170.
7. Adams J.J., Bibeau C., Page R.H., Krol D.M., Furu L.H., Payne S.A. 4.0–4.5- μ m lasing of Fe:ZnSe below 180 K, a new mid-infrared laser material // Optics Letters. 1999. V. 24. N 23. P. 1720–1722.
8. Kozlovsky V.I., Akimov V.A., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Landman A.I., Martovitsky V.P., Mislavskii V.V., Podmar'kov Yu.P., Skasyrsky Ya.K., Voronov A.A. Room-temperature tunable mid-infrared lasers on transition-metal doped II–VI compound crystals grown from vapor phase // Physica Status Solidi (B) Basic Research. 2010. V. 247. N 6. P. 1553–1556. doi: 10.1002/pssb.200983165
9. Akimov V.A., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Landman A.I., Podmar'kov Yu.P., Voronov A.A. Vapour growth of II-VI single crystals doped by transition metals for mid-infrared lasers // Physica Status Solidi C: Conferences. 2006. V. 3. N 4. P. 1213–1216. doi: 10.1002/pssc.200564723
10. Ozgur U., Alivov Ya.I., Liu C., Teke A., Reshchikov M.A., Dogan S., Avrutin V., Cho S.-J., Morko H. A comprehensive review of ZnO materials and devices // Journal of Applied Physics. 2005. V. 98. N 4. Art. 041301. P. 1–103. doi: 10.1063/1.1992666
11. Хаас М.А., Ченг Х., Дельюдт Д.М., Ки Ю. Синие-зеленый лазерный диод. Патент RU 2127478, 1999.
12. Petrovsky G.T. Optical materials for infrared range of spectrum // Proc. SPIE. 1991. V. 1540. P. 401–411.
13. Yoshida H., Fujii T., Kamata A., Nakata Y. Undoped ZnSe single crystal growth by the vertical Bridgman method // Journal of Crystal Growth. 1992. V. 117. N 1–4. P. 75–79. doi: 10.1016/0022-0248(92)90719-Y
14. Goela J.S., Taylor R.L. Monolithic material fabrication by chemical vapour deposition // Journal of Materials Science. 1988. V. 23. N 12. P. 4331–4339. doi: 10.1007/BF00551927
15. Якушенков Ю.Г. Тенденции развития малогабаритных инфракрасных систем 3-го поколения, работающих активно-пассивным методом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 3 (79). С. 11–14.
16. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Современное состояние и перспективы развития зарубежных тепловизионных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 3 (85). С. 1–13.
17. Mattox D.M. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. 2nd ed. Elsevier Inc., 2010. 771 p.
18. Коротаев В.В., Мельников Г.С., Михеев С.В., Самков В.М., Солдатов Ю.И. Основы тепловидения. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 122 с.
19. Петровский Г.Т., Бороздин С.Н., Демиденко В.А. и др. Оптические кристаллы и поликристаллы // Оптический журнал. 1993. № 11. С. 77–93.

Дунаев Анатолий Алексеевич

– доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории, ОАО «НИТИОМ ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, dunaev@goi.ru

Егорова Ирина Львовна

– ведущий инженер, ОАО «НИТИОМ ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация, dunaev@goi.ru

Anatoly A. Dunaev

– D.Sc., senior scientific researcher, Laboratory head, Scientific and Technological Institute of Optical Material Science, All-Russian Scientific Center «Vavilov State Optical Institute», JSC, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, dunaev@goi.ru

Irina L. Egorova

– leading engineer, Scientific and Technological Institute of Optical Material Science, All-Russian Scientific Center «Vavilov State Optical Institute», JSC, Saint Petersburg, 192171, Russian Federation, dunaev@goi.ru