



СОВРЕМЕННЫЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ НА ОСНОВЕ СЕЛЕНИДА ЦИНКА

Н. Кульчицкий, д.т.н., МГУ им. М.В.Ломоносова;

А.Наумов, naumov_arkadii@mail.ru;

В.Семенов, ООО "МакроОптика", Москва

Интерес к селениду цинка появился в начале 80-х годов прошлого века, когда начался поиск материалов, прозрачных в ИК-диапазоне спектра и, в первую очередь, на длине волны 10,6 мкм. Излучение именно этой длины волны испускали появившиеся в 70-е годы прошлого века CO_2 -лазеры. Работа над разработкой лазерной аппаратуры активно велась в США и в СССР для задач создания оружия нового типа. Одна из проблем заключалась в необходимости использования прозрачных для ИК-излучения материалов. Они требовались для конструкции окон, через которые энергетический луч мог быть выведен из замкнутого контура лазера в заданном направлении с минимальными потерями мощности. Нужно было найти материал не только прозрачный, но и обладающий низким внутренним поглощением излучения, механически прочный, стойкий к воздействию атмосферы и высоких температур.

СЕЛЕНИД ЦИНКА СВОЙСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Селенид цинка – светло-желтое твердое вещество, прямозонный полупроводник, ширина запрещенной зоны которого составляет 2,7 эВ при 25 °С. В виде монокристаллов селенид цинка используют для изготовления оптических окон, линз, призм и зеркал, в частности для ИК-техники. Спектральный диапазон пропускания – 0,5–22 мкм. ZnSe также используют для изготовления фокусирующей и проходной оптики в системах CO_2 -лазеров высокой мощности ($\lambda=10,6$ мкм). Поликристалл можно применять для создания выходных устройств в лазерах. Преимущество селенида цинка (ZnSe) перед другими ИК-материалами заключается прежде всего в том, что этот материал прозрачен и в видимом диапазоне. Это облегчает юстировку всех приборов с оптикой из селенида цинка (ZnSe) в видимом диапазоне длин волн (например, 632 нм). Необходимо отметить, что вследствие высокого показателя преломления селенид цинка требует нанесения просветляющего покрытия.

Поликристаллический селенид цинка активно используется в приборах ночного видения, тепловизионных системах переднего обзора (FLIR-системы). Монокристалл селенида цинка используют в качестве подложек для детекторов, сцинтилляционный монокристалл применяют в приборах для досмотра багажа. Сегодня развитие данного направления находит активную поддержку (рис.1).

Селенид цинка применяется в устройствах ИК-оптики с диапазоном прозрачности 0,5–13 мкм. Наиболее часто используемыми материалами для ИК-применений являются поликристаллы ZnSe, которые в основном применяются для производства окон, зеркал и линз [1, 2]. Также селенид цинка в виде порошков и крошки широко применяется в качестве просветляющих оптических покрытий. 87% от общего количества материалов приходится на поликристаллы селенида цинка и 13% на селенид цинка в виде порошков и крошки.

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ СЕЛЕНИДА ЦИНКА

Объемные образцы селенида цинка получают разными методами: выращиванием из расплава, горячим прессованием порошка, кристаллизацией из паровой фазы (PVD), химическим осаждением из газовой фазы (CVD). В зависимости от метода получения свойства материала существенно различаются. Это связано с влиянием условий получения материала на его структуру, примесный состав, наличие объемных дефектов и их концентрацию.

Выращивание из расплава под давлением

Наибольшее применение для выращивания ZnSe из расплава получил метод Бриджмена-Стокбаргера. В соответствии с этим методом предварительно очищенный порошок селенида цинка помещают в автоклав и расплавляют при температуре, достигающей 1600°C, под давлением инертного газа 2–20 МПа. Затем контейнер

с расплавом перемешают через зону, в которой существует температурный градиент.

Впервые компактные образцы селенида цинка из расплава были получены в 1958 году Фишером. В нашей стране исследования в области получения объемных образцов селенида цинка из расплава проводились в Государственном оптическом институте (ГОИ) им. С.И.Вавилова (Ленинград), в ИФТГ АН СССР (Черноголовка), а также во ВНИИ "Монокристаллов" (Харьков). Наиболее значительные результаты были достигнуты в ГОИ, где в 60-е годы было организовано промышленное производство монокристаллов селенида цинка диаметром до 120 мм.

Метод горячего прессования порошка

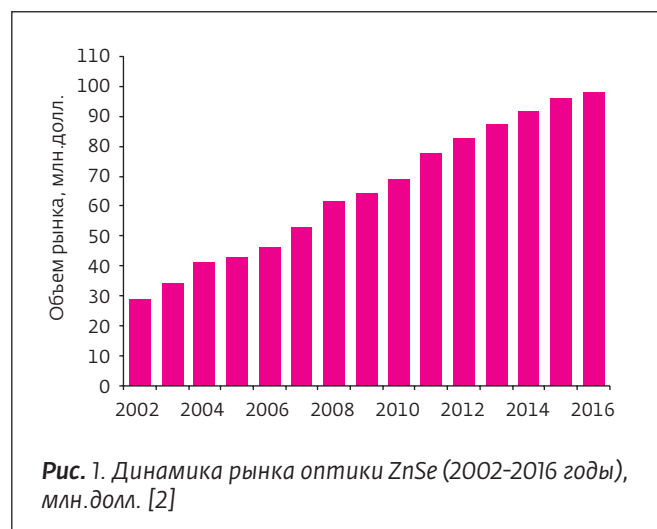
В конце 60-х годов основным методом получения поликристаллического селенида цинка за рубежом был метод горячего прессования порошков. Шихту в виде порошка селенида цинка с определенным размером зерна помещали в вакуумную печь между графитовыми прокладками и сдавливали с помощью пресса. Температура в печи составляла 800–1200°C, давление – 0,1–0,3 ГПа.

Образцы ZnSe, полученные этим методом, обладали малым коэффициентом теплового расширения и неплохими механическими свойствами. Однако, несмотря на сравнительно малое содержание примесей, получить таким способом материал с хорошими оптическими свойствами не удалось. В нашей стране метод горячего вакуумного прессования порошка селенида цинка в основном развивался в ГОИ. Но так же, как и за рубежом, получить образцы с удовлетворительными свойствами исследователи пока не смогли.

Кристаллизация из паровой фазы (PVD-метод)

Для получения крупногабаритных оптических элементов из селенида цинка в нашей стране в ГОИ основные усилия были направлены на развитие метода кристаллизации из паровой фазы (метод вакуумной сублимации и конденсации). Этот метод представляется достаточно простым в аппаратном исполнении и позволяет выращивать образцы селенида цинка больших размеров с хорошими оптическими свойствами.

Рост поликристаллических пластин проводится в контейнере из углеродсодержащих материалов, в котором создается пониженное давление (около 10^{-3} Па). Исходный селенид



цинка испаряется из нижней камеры печи, температура в которой более 1000°C. По высоте печи устанавливается температурный градиент (около 7 град/см). Образующиеся пары проходят через фильтр, представляющий собой графитизированную сетку, и конденсируются в более холодной части камеры на подложке в виде плотных кристаллических осадков. Температура в зоне конденсации – 850–950°C.

Полученный таким образом материал обладал практически всеми основными преимуществами поликристаллического селенида цинка и широко использовался в нашей стране под маркой ПО-4 (оптический поликристалл № 4). В ГОИ были созданы промышленные установки, позволяющие выращивать диски селенида цинка диаметром до 500 мм.

Метод химического осаждения из газовой фазы (CVD-метод)

Методом химического осаждения из газовой фазы поликристаллический селенид цинка можно получить с использованием различных химических реакций, где в качестве источника цинка используются летучие галогениды, металлоорганические соединения цинка или элементарный цинк, а в качестве источника селена – селеноводород, элементоорганические соединения селена или элементарный селен.

Каждый из процессов получения селенида цинка имеет свои достоинства и недостатки. При проведении химического осаждения с использованием галогенидов в селенид цинка может попасть галоген, что ухудшает оптические свойства материала. Использование элементоорганических соединений селена



вызывает загрязнение получаемого материала углеродом. Наиболее часто для получения ZnSe методом химического осаждения из газовой фазы используются элементарные цинк, диэтилцинк, селен, селеноводород. Возможность глубокой очистки исходных реагентов, которые являются легколетучими веществами, позволяет получать материал с малым содержанием примесей – не более 10^{-5} ат.%. Высокую чистоту селенида цинка, получаемого химическим осаждением из газовой фазы, могут обеспечить различные реагирующие вещества, однако однородность, оптические и механические свойства таких материалов существенно различаются.

Получение селенида цинка с использованием элементоорганических соединений

Возможность получения слоев селенида цинка по реакции взаимодействия диэтилцинка с селеноводородом (MOCVD-метод) впервые была показана в 1971 году. В дальнейшем этот метод развивался для получения тонких эпитаксиальных слоев. Структурное совершенство и низкое содержание примесей в монокристаллических пленках ZnSe позволяет предположить, что метод MOCVD имеет хорошие перспективы для получения массивных кристаллов селенида цинка. Кроме того, использование диэтилцинка, обладающего хорошей летучестью и высокой химической активностью, позволяет снизить температуру процесса до 200–500°C и отказаться от использования газаносителя, являющегося потенциальным источником загрязнений.

Химическое осаждение селенида цинка из паровой фазы по реакции цинка с селеном

Метод получения монокристаллов селенида цинка из паров элементарных цинка и селена прежде всего привлекал исследователей безопасностью и экологической чистотой. Также исследовался процесс образования ZnSe в системе Zn-Se-H-Ag в температурном интервале 480–800°C при изменении давления от 0,7 до 6 кПа. Было обнаружено, что в зависимости от условий роста образуется материал с различной структурой и морфологией.

Однако прямой синтез из паров цинка и селена в проточной системе не дал хороших результатов. Высококачественный мелкокристаллический селенид цинка удалось получить при замене селена селеноводородом. Для этого через источ-

ник селена пропускался водород, взаимодействующий с селеном с образованием H_2Se , который далее доставлялся потоком водорода в зону образования ZnSe.

Получение селенида цинка по реакции паров цинка и селеноводорода (цинк-гидридный метод)

Многие проблемы, связанные с получением крупногабаритных, однородных и высокопрозрачных образцов селенида цинка, удалось решить с помощью метода химического осаждения из газовой фазы с использованием паров цинка и селеноводорода. Несмотря на высокую стоимость, именно этот метод нашел за рубежом промышленное применение. В цилиндрической трубе, изготовленной из кварцевого стекла или металлических материалов, создается необходимый профиль температуры и пониженное давление. Внутри трубы размещаются реактор в виде прямоугольного параллелепипеда и ванна с цинком. Скорость испарения цинка регулируется изменением температуры. Пары цинка смешиваются с потоком аргона и поступают в реактор, куда подается селеноводород, предварительно также разбавленный аргоном. Температура в зоне реакции 600–800°C, давление менее 10^4 Па.

Процесс химического осаждения ZnSe протекает внутри реактора, стенки которого химически инертны, термически стойки и не обладают адгезией к селениду цинка. Обычно в качестве подложки используют пластины из углеродсодержащих материалов (графита, стеклоуглерода).

Большинство разработанных в настоящее время методов позволяют получать поликристаллический селенид цинка с высокой прозрачностью в инфракрасной области спектра. Однако одним из общих недостатков получаемых материалов является наличие примесных и структурных дефектов. Основная проблема, возникающая при использовании ZnSe в силовой оптике, связана с наличием в нем различных типов объемных неоднородностей, вызывающих разрушение образцов при воздействии сфокусированного лазерного излучения.

Методом вытягивания из расплава можно получать кристаллы селенида цинка размером до 120 мм, однако размер образцов высокого оптического качества не превышает 40–60 мм. Основная трудность выращивания высокооднородного селенида цинка из расплава состоит в значительном количестве примесей, поступаю-



щих из материала аппаратуры, и в образовании на границе кристаллизации большого количества пор. Кроме этого, в кристаллических слитках ZnSe большого диаметра при охлаждении возникают значительные термические напряжения, а образцы, вырезанные из этих слитков, обладают низкими механической прочностью и лазерной стойкостью. Так, при практически одинаковой величине поглощения на длине волны 10,6 мкм ($\beta_{10,6} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$) образцы, полученные из расплава, имели примерно в 3 раза более низкую лазерную прочность при испытании в импульсном режиме генерации CO_2 -лазера по сравнению с образцами, полученными CVD-методом. В настоящее время основное применение метод находит при выращивании монокристаллов ZnSe, $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Se}$, $\text{ZnSe}_x\text{Te}_{1-x}$, используемых в опто- и микроэлектронике, например в качестве высокоэффективных полупроводниковых сканляторов.

Образцы ZnSe, выращенные методом горячего прессования порошка, содержат значительное количество как структурных, так и примесных дефектов. Поэтому они существенно уступают по величине оптических потерь образцам, полученным другими методами. Имеющийся уровень потерь таких образцов на длине волны 10,6 мкм составляет 10^{-1} см^{-1} , что практически на три порядка хуже, чем для CVD-образцов. По этой причине, несмотря на низкое содержание примесей и хорошие механические свойства, прессованный селенид цинка в настоящее время не применяется в ИК-оптике.

Существует целый ряд применений, где использование поликристаллического селенида цинка, полученного кристаллизацией из пара, возможно. Несмотря на высокую дефектность и более низкие оптические и механические характеристики по сравнению с CVD-материалом, он может применяться (и широко применялся до недавнего времени) в ИК-спектроскопии, для изготовления защитных окон устройств, регистрирующих температуру объектов окружающей среды и эксплуатирующихся в обычных (не экстремальных) условиях. Следует отметить, что метод вакуумной конденсации используется также для получения высококачественных монокристаллов ZnSe небольшого диаметра.

Мелкокристаллический MOCVD-ZnSe, обладающая высокими механическими свойствами (прочность на разрыв примерно в 2 раза выше, чем в CVD-материале), уступает монокристаллическому и CVD-ZnSe по своим оптическим характеристикам. Лучшая опубликованная вели-

чина коэффициента поглощения такого материала на рабочей длине волны CO_2 -лазера составляет 10^{-2} см^{-1} . Образцы MOCVD-ZnSe обладают не только более высоким по сравнению с монокристаллами поглощением, но и значительным рассеянием в видимом диапазоне длин волн. Таким образом, несмотря на широкое использование пленок MOCVD-ZnSe в микроэлектронике, этот материал в виде массивных образцов пока не нашел применения в проходной ИК-оптике, что связано с его более низкими оптическими характеристиками.

Методом химического осаждения из газовой фазы с использованием паров цинка и селеноводорода удается получить поликристаллический селенид цинка с малым содержанием примесей. Несмотря на наличие различного рода неоднородностей и дефектов структуры, этот материал по совокупности своих оптико-механических характеристик превосходит ZnSe, получаемый другими методами, что делает CVD-метод наиболее перспективным для синтеза образцов.

РЫНОК CVD ZnSe

ИК-устройства с оптикой из селенида цинка покрывают широкий круг применений как в гражданской сфере, так и в военной. Спрос на приборы ИК-спектрального диапазона со стороны оборонного сектора составляет около 70% от общего спроса на данные устройства. Среди применений оборонного назначения можно назвать тепловизионные системы слежения ближнего и среднего ИК-диапазона авиационного, морского и наземного базирования. Системы используются и как независимые приборы, и как устройства, встроенные в технику военного назначения. Тепловизионные и ИК-приборы приобретают активное бытовое использование в разных странах. Перспективными считаются разработки в области автомобильной, энергетической и нефтегазовой промышленности. В последние годы неоднократно появлялись разработки систем ночного видения для автомобилей. Эти системы могут дать в ближайшие годы мощный толчок развитию рынка.

Как отмечалось выше, интерес к селениду цинка появился в начале 80-х годов прошлого века. В СССР к решению этой проблемы были подключены ГОИ (Ленинград), Институт химии высокочистых веществ (г.Горький), институт ГИРЕДМЕТ (Москва) и ВНИИ монокристаллов (Харьков).

Помимо оборонных, коммерческих и бытовых применений материала в приборах реги-



Таблица 1. Потенциальные области использования селенида цинка

Состояние	Изготавливаемые элементы	Применение
Монокристалл	Материал лазерного качества	Лазерный микрочип среднего ИК-диапазона
Монокристалл	ИК-оптика, выходные и входные окна	Полупроводниковые лазеры
Монокристалл	Кристалл	Акустооптический модулятор
Монокристалл	Кристалл ZnS: Mn (5%) на подложке	Электролюминофор, LED
Монокристалл	Подложка	Электронный прибор на ПАВ
Поликристалл	Материал для инфракрасной оптики	Тепловизионные системы переднего обзора (FLIR-системы)
Порошок, крошка	Сцинтилляционные детекторы	Детекторы альфа- и рентгеновского излучения
Порошок, крошка	Пленка	Детекторы гамма- и рентгеновского излучения
Порошок, крошка	Пленка на прозрачной подложке CaF ₂ (PbF ₂)	Двух- и трехслойное просветляющее покрытие
Порошок, крошка	Порошок	Компонент белого пигмента литопон
Порошок, крошка	Пленка на прозрачной подложке (например, графит)	Электролюминофор для рентгеновских трубок, сцинтилляторов
Порошок, крошка	Пленка на стеклянной подложке	Ультралегкие солнечные батареи

страции сигнала, немалую долю рынка составляют приложения для генерации излучения ИК-спектра. В последние годы рынок технологических CO₂-лазеров составил более 1 млрд. долларов США. Использование поликристаллического ZnSe в CO₂-лазерах обусловлено рядом уникальных характеристик материала (низким поглощением на длине волны генерации и высокой лучевой стойкостью). Достижимые значения рабочих характеристик допускают использование материала в мощных технологических лазерных системах.

Рынок всех оптических элементов для инфракрасных устройств оценивается в 450–500 млн. долларов. Из множества оптических материалов, используемых для производства ИК-оптики, значительная доля рынка в денежном выражении приходится на цинкселенидовую оптику.

Ожидается, что ежегодный рост рынка ИК-устройств для гражданских применений в 2016–2017 годы составит 17%. На данный момент наблюдается увеличение спроса на приборы среднего и теплового ИК-диапазона. Отмечено значительное увеличение объемов рынка ИК-устройств за счет расширения круга областей применения и выход на рынок приборов ИК-диапазона гражданского назначения. На протяжении последних 10 лет тенденция роста спроса на ZnSe на рынке сохраняется. Объем рынка оптических материалов из селенида цинка на сегодня составляет

более 80 тонн в натуральном выражении и более 80 млн. долл. – в денежном. Объем внутреннего российского рынка значительно меньше – в натуральном выражении не превышает, по нашим оценкам, 2–2,5 тонн.

СТРУКТУРА РЫНКА И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ

Рынок оптических элементов можно условно разделить на три сегмента, соотносящихся друг с другом в трех отношениях: товарном по "назначению" продукции (Laser Grade и FLIR Grade), товарном по размерам элементов и географическом аспекте. Требования, предъявляемые к материалам ИК-оптики, зависят от целевого назначения оптических элементов, которые изготавливаются из этих материалов. Так, для дистанционного проведения бесконтактного контроля температуры различных объектов в системах обнаружения и оповещения, следящих системах, ИК-окнах летательных аппаратов необходимо использовать материалы с хорошей прозрачностью в областях 1–6 и 8–14 мкм. Эти области соответствуют окнам прозрачности атмосферы Земли для ИК-излучения. Кроме того, материал должен обладать хорошими механическими свойствами. Для силовой ИК-оптики требуются материалы с низким коэффициентом поглощения (менее 10⁻³ см⁻¹).

Свое основное применение ZnSe находит при изготовлении оптических элементов мощ-

Таблица 2. Свойства селенида цинка, применяемого в лазерной (LASER-grade) и инфракрасной (FLIR-Grade) оптике [1]

Марка селенида цинка	Laser-Grade	FLIR-Grade
Коэффициент поглощения на $\lambda = 10,6$ мкм, см^{-1}	$< 5 \cdot 10^{-4}$	$< 7 \cdot 10^{-3}$
Собственное оптическое пропускание на $\lambda = 10,6$ мкм для образцов толщиной 6 мм	$> 99,97$	$> 99,9$
Границы 10%-ного оптического пропускания, мкм	0,5–22	0,5–22
Лучевая прочность для импульсного режима работы CO_2 -лазера, Дж/см ²	> 20	Не нормируется
Неоднородность показателя преломления на $\lambda = 0,6328$ мкм	$< 5 \cdot 10^{-6}$	Не нормируется
Наличие включений	Отсутствие видимых включений	Допускаются включения размером менее 100 мкм
Температура плавления, °С	1520 ± 15	1520 ± 15
Коэффициент термического расширения, K^{-1}	$7,6 \cdot 10^{-6}$	$7,6 \cdot 10^{-6}$
Средний размер зерна, мкм	50–70	50–70
Предел прочности на изгиб, МПа	50	50
Твердость по Кнупу, МПа	1500	1500

ных CO_2 -лазеров. Если в лазерах мощностью 3,5 кВт время наработки оптических элементов составляет около 1500 час, то в лазерах мощностью 20 кВт и более оно сокращается более чем на порядок. Лазерная оптика и особенно линзы на выходе лазерного луча требуют частой замены, то есть лазерная оптика является расходным материалом.

Для этих целей за рубежом используется селенид цинка марки Laser-Grade. Селенид цинка применяется также при конструировании оптических элементов различных спектральных приборов и ИК-объективов, защитных окон специальных устройств, принимающих тепловые сигналы в широком спектральном диапазоне, и т.д. Свойства изготавливаемого за рубежом для этих целей селенида цинка марки FLIR-Grade (или ИК-качества, в дальнейшем используются все эти термины) также приведены в табл.2. Как видно из таблицы, требования к оптическим свойствам селенида цинка марки Laser-Grade существенно ниже. Это связано с тем, что мощность проходящего через оптический элемент излучения в этом случае небольшая и допускается наличие более высоких потерь, связанных с поглощением и рассеянием электромагнитного излучения.

Что касается механических свойств, то требования к ним довольно высокие для обеих марок ZnSe. Известно, что прочностные характеристики поликристаллических материалов (критическое напряжение сдвига, предел текучести, прочность

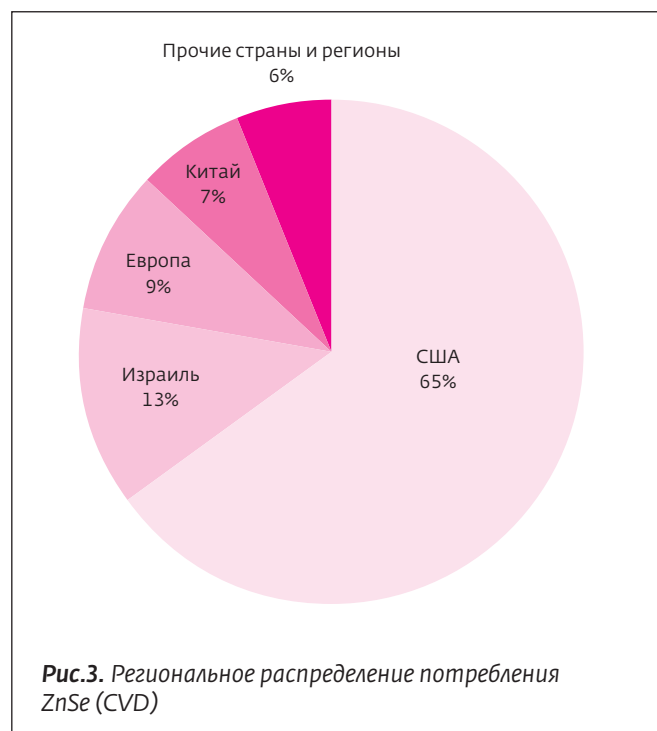
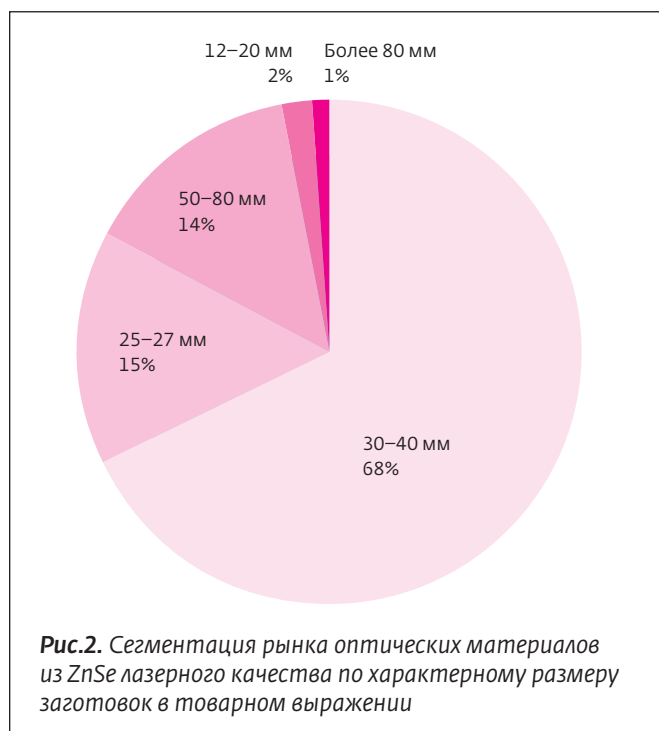
на разрыв и т.д.) существенно выше, чем монокристаллических, и возрастают с уменьшением размера зерна поликристалла. Необходимые механические свойства селенида цинка достигаются получением поликристаллического материала с мелкозернистой структурой.

Как отмечалось выше, по величине неоднородностей и примесей принята сегментация оптических материалов из селенидов цинка на материалы лазерного качества (при коэффициенте поглощения $\beta_{\text{предельное}} \leq 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$) и FLIR-качества (при коэффициенте поглощения $\beta_{\text{предельное}} \leq 7 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ и размере примесей $\leq 0,1$ мм).

На рынке ZnSe лазерного качества выделяются группы товаров по характерному размеру заготовок (диаметру). Соотношение спроса в товарном выражении (в кг) представлено на рис.2.

Сегмент крупных заготовок (> 50 мм) в денежном выражении занимает большую долю рынка вследствие большей массы отдельных заготовок. В свою очередь, удельная весовая стоимость (1 г) оптического материала из ZnSe в меньших заготовках выше из-за сложностей обработки.

Наиболее востребованными на сегодняшний момент являются заготовки диаметром 30–40 мм, также прослеживается долгосрочная тенденция смещения спроса в сторону заготовок с диаметром 50 мм. Заготовки размером свыше 80 мм изготавливаются на заказ, что сопровождается договорным ценообразованием – как правило,



цена возрастает в геометрической прогрессии в зависимости от диаметра заготовки.

CVD-ZnSe потребляется всеми развитыми странами и многими странами третьего мира, прежде всего из Юго-Восточной Азии. К крупнейшим потребителям относятся компании, производящие комплектующие для технологических лазерных установок на основе готовых оптических элементов из CVD-ZnSe (рис.3). В свою очередь, такие оптические элементы производит корпорация II-VI и многие оптические фирмы в Европе, США, Китае, России. Другую, меньшую, группу потребителей материала образуют компании, производящие различные FLIR-системы, устройства ИК-диапазона. В списке основных потребителей CVD-ZnSe более 400 компаний.

Приведенные оценки относятся к зарубежному рынку. Что касается российских потребителей, то в настоящее время отмечается рост интереса к материалу качества Laser Grade для технологических лазеров. В то же время существует тенденция роста внутреннего российского рынка крупноформатного FLIR-материала, прежде всего за счет военных заказов.

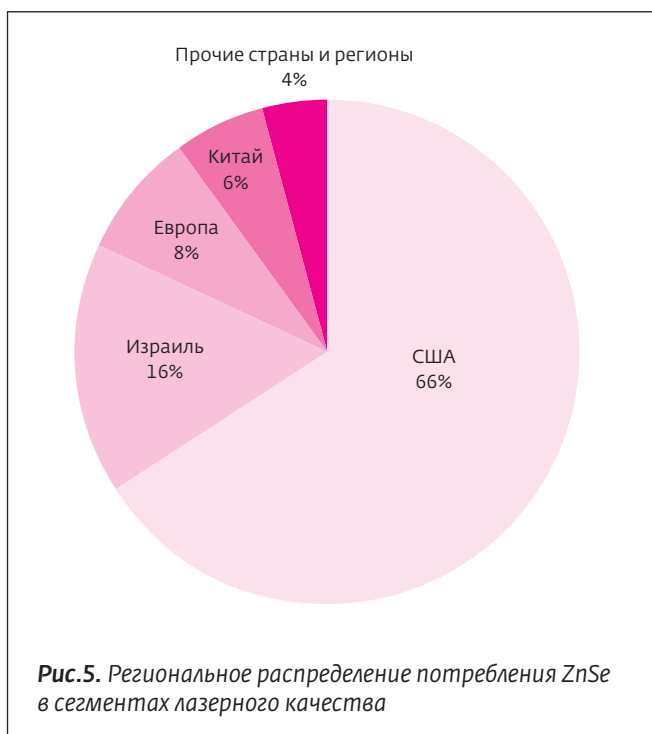
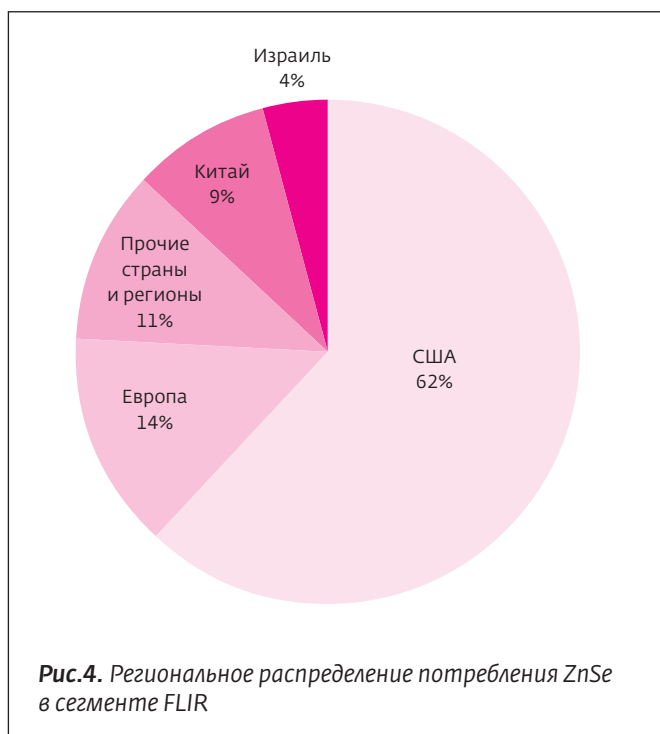
Рынок элементов FLIR-качества является менее привлекательным, если оценивать его с позиций объема – он составляет около 17–19 млн. долларов. В случае FLIR-применений у селенида цинка существуют конкуренты: менее каче-

ственные, но имеющие меньшую стоимость, – NaCl, KCl, AgCl, KRS-5, KRS-6, ZnS.

Селенид цинка лазерного качества в виде пластин, линз и заготовок оптических материалов потребляется высокотехнологичными компаниями всех передовых стран (Европы, Северной Америки, Австралии) и некоторыми странами Азии, Южной и Латинской Америки. Оптические элементы производятся компаниями II-VI, Rohm&Haas, а также многочисленными оптическими предприятиями в Европе, США, России, Китае, Австралии из поставляемого посредниками и указанными производителями материала.

Основными игроками на рынке являются компании II-VI Infrared и Rohm & Haas, вместе они занимают 50% рынка производства кристаллов селенида и сульфида цинка. Большая часть компаний, представленных на данном рынке, представляет собой вертикально-интегрированные структуры, объединяющие в себе предприятия нескольких уровней передела.

Основными игроками на мировом рынке мощных CO₂-лазеров являются следующие компании: Photon Sources – в настоящее время часть Lumonics (Ontario, Canada), Coherent (Santa Clara, CA), II-VI (Saxonburg, PA), Laser Power Corp. (San Diego, CA), Coherent, Sumitomo (Osaka, Japan), Rocky Mountain Instruments (Longmont, CO), and V&S Scientific (Potters Bar, UK). Две компании США – II-VI



(Saxonburg, PA) и Laser Power Corp. (San Diego, CA) контролируют около 50% рынка.

Основным мировым производителем селенида цинка и оптики на его основе является компания II-VI (Saxonburg, PA). Другие производители – Phoenix Infrared (Lowell, MA – в настоящее время принадлежит китайской Vital Chemacal), Corning (NY), Exotic Electro-Optics (Murrieta CA), Cradley Crystals (USA), Laser Optex (Beijing, China), Ultiquest Technologies (Shanghai, China), Ningbo Yinzhou Huajing Photoelectric Plastic Co. (Ningbo, China).

Емкость рынка селенида цинка (лазерного и оптического) в виде оптических заготовок в натуральном исчислении, как отмечалось выше, можно оценить более чем в 80 т в год. Стоимость на рынке заготовки из ZnSe CVD в зависимости от качества составляет от 1,4 до 2,0 долл. за грамм. Стоимость оптических компонентов (линз, окон, зеркал) – в 5-10 раз выше. Следует отметить, что исходные материалы, используемые при производстве селенида цинка, селен и цинк (чистотой 99,5–99,9%), составляют не более 2% от стоимости готовой продукции и присутствуют в достаточном количестве, как на российском, так и на мировом рынке [3, 4].

Основной потребитель продукции на внутреннем рынке – Министерство обороны РФ. Потребность военных приложений в материале демонстрирует рост. Ряд процессов, проис-

ходящих на российском гражданском рынке селенида цинка, свидетельствуют о том, что ситуация на нем также меняется. Во-первых, в Россию поступает большое количество оборудования по материалуобработке (резка, сварка, разделка отверстий в труднодоступных местах, раскройка листовых материалов), а также для медицины и научных исследований. А в состав такого технологического оборудования входят энергетически мощные лазеры. Оптика лазерных систем, как отмечалось, имеет ограниченный срок эксплуатации. Объем деталей, требующих замены, стремительно растет. Этим он создает объективные предпосылки роста российского рынка. Во-вторых, об оживлении спроса на изделия из селенида цинка свидетельствует появление новых игроков на рынке – производителей собственно материала и оптики из этого материала, о которых шла речь выше. В-третьих, ряд оптико-механических производств, входящих в госкорпорацию "Ростехнологии", занимаются разработкой FLIR – систем, в частности тепловизоров. Специалисты оценивают ожидаемые в ближайшие 2-3 года объемы потребления в этом секторе рынка на уровне 5-10 т в год, а также прогнозируют его дальнейший рост.

Все это и создает объективные предпосылки развития производства в России. В настоящее время несколько компаний здесь зани-



маются производством CVD-ZnSe и изделий из него: ООО "МакроОптика" (Москва), ООО "НН ОПТИКА" и RAIN Optics (Нижний Новгород), ОАО "Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения ВНИЦ "ГОИ им. С.И.Вавилова" (входит в концерн "Швабе"), ЗАО "ИНПРОМ", "Алкор Текнолоджиз" (Alkor Technologies), ООО "Германий и приложения" (Москва) [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Гавришук Е.М. Поликристаллический селенид цинка для инфракрасной оптики. – Неорганические материалы, 2003, т. 39, № 9, с.1031-1049.
2. Кульчицкий Н.А., Наумов А.В. О современном состоянии рынка селена и соединений на его основе. – Цветная металлургия. № 4, 2010, с.37-44.
3. US Geological Survey Publications / <http://minerals.usgs.gov>.
4. Butterman W.C., Brown R.D. "Selenium"// U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Open File Report OF-03-018, 2004.
5. Витков В.С., Кульчицкий Н.А., Сокольский В.А. Поликристаллический CVD ZnSe для ИК-оптики. – Тезисы докладов XXI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – Москва, 25-28 мая 2010, с.166.

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА

Идея использовать полупроводниковые квантовые точки в качестве элементной базы квантового компьютера уже давно реализуется в Институте физики полупроводников им. А.В.Ржанова Сибирского отделения РАН (ИФП СО РАН). В институте создан большой научный задел мирового уровня, ведь изучением процессов формирования ансамблей самоорганизующихся квантовых точек Ge в Si методом молекулярно-лучевой эпитаксии в ИФП занимаются с 1992 года, проводя исследования электронных, спиновых, магнитных и оптических явлений в таких ансамблях.

Цель нового проекта – создание логических элементов для квантовых вычислений на основе полупроводниковых наноструктур с квантовыми точками, формируемыми на основе эпитаксиальных технологий. Основное преимущество кремния для построения кубитов заключается в слабом спин-орбитальном взаимодействии, а также в наличии изотопов с нулевым спином ядра. Оба эти фактора обеспечивают достаточно большие времена декогеренции электронных спинов в структурах на кремнии по сравнению с другими материалами. В сочетании с развитой кремниевой технологией этот материал является наиболее перспективным для решения проблемы создания элементной базы квантового компьютера.

Специалистами ИФП СО РАН было показано, что квантовые точки Ge в Si представляют собой реальную систему с энергетической структурой гетероструктур II типа, в которой локализованные состояния для электронов и дырок формируются по разные стороны от гетерограницы: дырки локализуются в Ge, электроны – в Si. Разработаны методы эпитаксиального роста совершенных многослойных гетероструктур Ge/Si с плотностью нанокристаллов Ge до 10^{12} см⁻² при размерах 10–25 нм. Экспериментально с помощью метода электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) была доказана локализация электронов на Ge/Si квантовых точках. Были проведены исследования локализации электронов в вертикальных стеках квантовых точек, которые в дальнейшем можно использовать при разработке базовых элементов квантового компьютера. Установлено, что переход от неупорядоченного ансамбля туннельно-связанных квантовых точек к ансамблю линейных цепочек квантовых точек Ge в гетероструктурах Ge/Si приводит к увеличению времени декогеренции электронных спинов на квантовых точках.

Разработана оригинальная методика изготовления подвешенных наноструктур для создания кубитов на основе квантовых точек. Ключевыми особенностями подвешенных систем, актуальными с точки зрения кубитов и спин-считывающих

устройств, являются электрон-электронное взаимодействие, усиленное по сравнению с их неподвешенными аналогами. В данном направлении у коллектива ИФП СО РАН нет конкурентов по виду используемых объектов и по научному заделу.

Мировому научному сообществу известны и другие предложения экспериментальных подходов к реализации квантовых вычислений на основе квантовых точек. Одно из них заключается в использовании твердотельных структур с двумерным электронным газом, в котором с помощью электрических затворов локализуются единичные электроны и их спины (квантовые точки, сформированные с помощью внешнего электрического поля в наногетероструктурах с двумерным электронным газом). В качестве материалов для кубитов на квантовых точках, сформированных из квантовых ям, исследуются наногетероструктуры GaAs/AlGaAs, Si/SiGe, а также кремниевые структуры металл-окисел-полупроводник.

Дальнейшие исследования должны показать перспективность выбранных структур для построения кубитов для проведения одно- и двухкубитовых операций с возможностью контроля результата операции.

*А. Двуреченский, член-корр. РАН,
ИФП СО РАН, лаборатория неравновесных
полупроводниковых систем, www.isp.nsc.ru*