

ОПТИЧЕСКАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГЕРМАНИЯ

© 2005 г. И. А. Каплунов, канд. физ.-мат. наук; Ю. М. Смирнов, доктор техн. наук;
А. И. Колесников, канд. физ.-мат. наук

Тверской государственный университет, Тверь
E-mail: Ivan.Kaplunov@tversu.ru

Исследована оптическая прозрачность моно- и поликристаллического германия. Показано влияние на ослабление инфракрасного излучения наличия примесей (их вида и концентрации), структуры материала. Получены зависимости коэффициента ослабления от температуры.

Коды OCIS: 160.0160, 160.4760.

Поступила в редакцию 30.08.2004.

Введение

Кристаллы германия (моно- и поликристаллы) широко используются для изготовления оптических элементов систем инфракрасной (ИК) техники. Германий, благодаря механической прочности, устойчивости к атмосферным воздействиям, относительно высокой прозрачности, возможности получения крупногабаритных заготовок, является одним из основных материалов для применения в спектральном диапазоне 2,5–14 мкм, на который приходится основная часть энергии излучения, испускаемого объектами. Для конструирования и эффективной работы приборов ИК техники необходимо учитывать характеристики материала – его светопотери (в основном за счет поглощения и рассеяния) и неоднородность показателя преломления.

Известные работы по исследованию оптической прозрачности германия [1–9] включают в себя изучение поглощения ИК излучения в области прозрачности чистых и легированных кристаллов в зависимости от вида и концентрации легирующих примесей, от дефектов, от температуры. Однако завершенной картины результаты исследований не дают: нет полных, совпадающих данных по поглощению излучения в диапазоне 2,5–14 мкм и температурной зависимости поглощения; окончательно не определена величина поглощения кристаллической решеткой; нигде не показан вклад рассеяния излучения; неполно представлен материал для исследований – рассматриваются только кристаллы, легированные сурьмой; практически не учитывается влияние структуры германия, его однородности, технологии получения и т. д.

Целью данного исследования были анализ имеющихся данных по пропусканию германия в ИК диапазоне (2,3–14 мкм), экспериментальное исследование чистых и легированных моно- и поликристаллов германия при обычных и повышенных температурах.

Оптическая прозрачность германия в ИК диапазоне

Первое наиболее полное систематизированное экспериментальное исследование, выполненное в работе [1], позволило получить зависимость коэффициента поглощения (для длины волны 10,6 мкм) от удельного сопротивления ρ легированного сурьмой германия, при этом максимальная прозрачность наблюдалась для диапазона $\rho = 5\text{--}10$ Ом см. Отмечается, что образцы были получены выращиванием в тигле в форме лодочки с градиентом концентрации примеси в расплаве, данные по чистоте исходного сырья отсутствовали.

Теоретическое обоснование наличия минимума поглощения [2] в диапазоне 5–10 Ом см было построено на анализе поглощения излучения на свободных носителях заряда, которое имеет место в рассматриваемом диапазоне прозрачности германия. Коэффициент поглощения α для заданной длины волны в этом случае определяется уравнением:

$$\alpha = L + A_h P + A_e N, \quad (1)$$

где L – коэффициент поглощения на колебаниях кристаллической решетки германия (решеточное поглощение), A_h – эффективное сечение дырочного поглощения, A_e – эффективное сечение электронного поглощения, P и N – концентрации дырок и электронов соответственно. Под эффективным сечением поглощения понимают отношение коэффициента поглощения к концентрации свободных носителей [10]. A_h и A_e – величины, характеризующие вклад механизмов поглощения, обусловленных переходами свободных носителей заряда в валентной зоне и зоне проводимости соответственно.

С учетом связи концентрации электронов и дырок с электропроводностью, постоянства произведения концентраций электронов и дырок при данной температуре и известной концентрации элект-

ронов (дырок) в полупроводнике с собственной проводимостью можно выразить значение коэффициента поглощения при 300 К – $\alpha(300)$ – через удельное сопротивление ρ :

$$\alpha(300) = L + \frac{A_h}{\rho e \mu} + (A_e - b A_h) \left\{ \frac{1}{2 \rho e b \mu} + \sqrt{\frac{1}{(2 \rho e b \mu)^2} - \frac{n_i^2(300)}{b}} \right\}, \quad (2)$$

где e – заряд электрона, μ – подвижность дырок, μb – подвижность электронов, b – коэффициент, $n_i(300)$ – концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике при 300 К.

Температурная зависимость коэффициента поглощения определяется уравнением:

$$\alpha(T) = L + A_e N(300) + A_h n_i^2(T)/N(300), \quad (3)$$

где $N(300)$ – концентрация электронов при температуре 300 К, n_i – концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике.

В рассматриваемой спектральной области дырочное поглощение для длины волны 10,6 мкм больше электронного (в 40 [2], 20 [3], 16 [4] раз) и поэтому коэффициент поглощения можно снизить, уменьшая концентрацию дырок, путем легирования примесью электронного типа. Учитывая, что определенные в работах [2–4] абсолютные значения эффективных сечений поглощения и их соотношений различаются, можно утверждать, что будет существовать разный характер зависимости коэффициента поглощения от удельного сопротивления германия.

Авторы [4], исследуя поверхностное и объемное оптическое поглощение (на длине волны 10,6 мкм) в монокристаллах, полученных способом Чохральского в атмосфере аргона, определили, что минимальное поглощение приходится на диапазон удельного сопротивления $\rho = 10$ –20 Ом см, при этом коэффициент решеточного поглощения составил $0,0073 \text{ см}^{-1}$. Коэффициент решеточного поглощения по данным [2] составлял $0,013 \text{ см}^{-1}$. В работе [3] на основе теоретического и экспериментального изучения определен диапазон минимального поглощения при значениях $\rho = 15$ –20 Ом см; рекомендуемый для применения кристаллов диапазон ρ составляет 10–40 Ом см. По экспериментальным данным [5] минимальный коэффициент поглощения наблюдается в кристаллах при $\rho = 5$ –10 Ом см; исследования были выполнены на монокристаллах, полученных способом Степанова.

Исследования прозрачности чистых и высокочистых монокристаллов германия [6, 7] позволяют считать, что с повышением чистоты коэффициент поглощения снижается. Однако в любом случае слабое легирование кристаллов донорной примесью

приводило к дополнительному снижению коэффициента поглощения.

Зависимость поглощения от концентрации свободных носителей заряда приводит к существенному изменению прозрачности германия с температурой. Этот эффект теоретически и экспериментально рассматривался в работах [2, 5, 8, 9]. В [8] приведены экспериментальные зависимости поглощения высокоомного германия ($\rho = 50$ Ом см) и теплофизические характеристики элементов на его основе, в [5] изучалась температурная зависимость поглощения образцов германия в диапазоне удельного сопротивления 0,03–2,50 Ом см. Наиболее детально проведено исследование германия (применительно к акустооптическим модуляторам) в работе [9], где изучались легированные образцы с сопротивлением менее 1 Ом см и более 4 Ом см и сделан вывод о предпочтительном использовании материала с удельным сопротивлением 4–5 Ом см.

Анализ опубликованных экспериментальных и теоретических исследований оптического поглощения в германии позволяет сделать следующие выводы. Рекомендуемый для применения диапазон удельного сопротивления германия электронного типа проводимости составляет от 5–10 до 40 Ом см, минимум поглощения при этом относят к диапазону $\rho = 5$ –15 Ом см. Для работы при повышенных температурах предпочтительно использование материала с более низким $\rho = 4$ –5 Ом см (повышенным уровнем легирования). Технические условия на оптический германий марки КГО [11] определяют диапазон удельного сопротивления 5–40 Ом см. Почти не представлены экспериментальные исследования германия в диапазоне удельного сопротивления 1–4 Ом см. Можно отметить, что в большинстве случаев рассчитывался коэффициент ослабления (включающий рассеяние), а не поглощения. Для оценки минимальных значений поглощения необходимо учитывать вклад рассеяния, который, несомненно, будет определяться структурой материала, примесным составом и будет зависеть от метода получения германия [11].

Кристаллы германия и методики определения коэффициента ослабления

Поликристаллы и монокристаллы для изучения оптической прозрачности германия выращивали из расплава методом Чохральского. Монокристаллы получали с кристаллографической ориентацией $\langle 111 \rangle$, отклонение от ориентации не превышало $1,5^\circ$. Поликристаллы имели размер зерен 1–3 мм. Легирование осуществлялось путем введения лигатуры в исходную загрузку. Выращивание монокристаллов производилось в вакууме в графитовом теп-

дном узле, в случае легирования с использованием висмута выращивание осуществляли в атмосфере азота. Выращенные кристаллы имели форму цилиндрических слитков диаметром 40–45 мм, длиной 200–300 мм.

Изучали монокристаллы, легированные галлием, сурьмой, висмутом, совместно сурьмой и висмутом, нелегированные и особоистые. При изучении оптической прозрачности компенсированного (с разной степенью компенсации) германия в качестве примесей вводили сурьму и галлий. Поликристаллы исследовали с добавкой сурьмы и нелегированные. При выращивании поддерживали слабоогнутую в кристалл поверхность раздела – фронт кристаллизации – для устранения возможного “эффекта грани” при выращивании в кристаллографическом направлении $\langle 111 \rangle$.

В качестве исходного сырья использовали зонно-очищенный поликристаллический германий (марки ГПЗ). Химическая чистота ГПЗ определяет удельное сопротивление материала – более 47 Ом см при температуре 23 °С.

Концентрация электроактивных примесей в выращенных монокристаллах определялась косвенным методом – на основе измерений удельного сопротивления четырехзондовым методом на шлифованных торцевых поверхностях образцов. Однородность распределения примеси по сечению и высоте образцов находилась в пределах 10% для значений удельного сопротивления 15–50 Ом см и 5–8% для диапазона 0,1–15 Ом см.

Образцы для исследований имели форму плоскопараллельных пластин диаметром 40–45 мм и толщину 12–15 мм. Рабочие поверхности пластин были отполированы, непараллельность поверхностей не превышала 0,5% от толщины пластин.

Экспериментальные исследования оптической прозрачности кристаллов германия проводились на инфракрасном спектрофотометре ИКС-29 с рабочим диапазоном измерений 2,3–25 мкм. Первый метод заключается в измерении коэффициента пропускания образца τ и последующем расчете коэффициента ослабления α по формуле [12]:

$$\alpha = \frac{1}{h} \ln \frac{(1-R)^2 + \sqrt{(1-R)^4 + 4\tau^2 R^2}}{2\tau}, \quad (4)$$

где h – толщина образца, R – коэффициент отражения германия.

Более точное определение коэффициентов пропускания и последующий расчет коэффициента ослабления осуществлялись при исследованиях вторым методом – с использованием образца сравнения (тонкая отполированная германиевая пластина оптического качества). Коэффициент ослабления

рассчитывали на основе измеренного коэффициента пропускания контролируемого образца τ' по формуле [13]:

$$\alpha = -\frac{1}{\Delta h} \ln \tau', \quad (5)$$

где Δh – разность толщин образца и эталона.

Определение коэффициентов ослабления выполнялось с использованием обеих методик; температурные исследования проводили с помощью приставки к ИКС-29, позволяющей осуществлять оптические измерения при температурах от комнатной до 120 °С.

Экспериментальные исследования оптической прозрачности германия

Легированные электроактивными примесями монокристаллы

Оптическое пропускание германия в ИК диапазоне и однородность пропускания по сечению заготовок определяются в основном наличием и равномерностью распределения легирующей примеси. Экспериментально полученные в настоящей работе зависимости коэффициента ослабления (с учетом наших предварительных исследований [14]) для длины волны 10,6 мкм от удельного сопротивления германия представлены на рис. 1. Максимальной прозрачностью (коэффициент ослабления ниже $0,02 \text{ см}^{-1}$) обладают монокристаллы германия электронного типа проводимости (примеси – сурьма и висмут) в диапазоне удельного сопротивления германия от 1,5 до 40–45 Ом см (кривые 1, 2, 3). Моно-

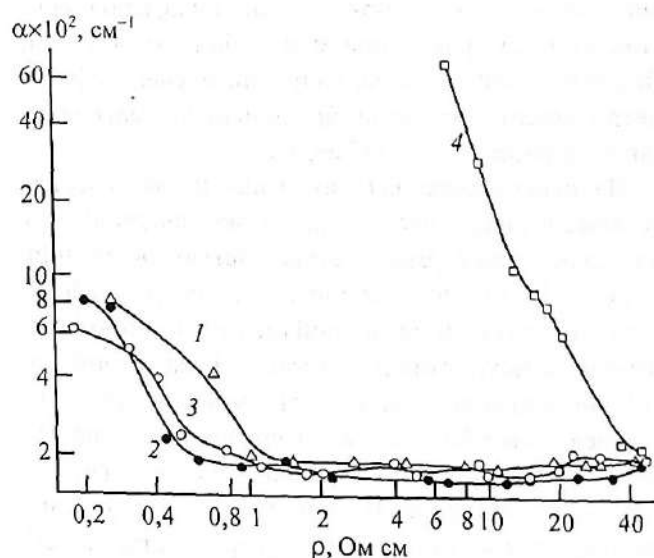


Рис. 1. Зависимости коэффициента ослабления α на длине волны 10,6 мкм от удельного сопротивления ρ легированных монокристаллов германия. Примеси: 1 – сурьма, 2 – висмут, 3 – сурьма + висмут, 4 – галлий.

кристаллы германия, легированные галлием, имеют высокий коэффициент ослабления (кривая 4), обусловленный дырочным поглощением; α резко увеличивается с увеличением концентрации примеси. Результаты исследований подтверждают механизм поглощения излучения в области прозрачности на свободных носителях. Наблюдается минимум поглощения для германия электронного типа проводимости, расположенный в диапазоне 2–20 Ом см (что соответствует концентрации легирующей примеси $8 \times 10^{14} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$). Кроме того, отмечается, что монокристаллы, легированные висмутом, имеют самые низкие значения коэффициента ослабления (кривая 2). Промежуточные результаты отвечают совместному легированию сурьмой и висмутом (кривая 3).

Следует отметить, что существует специфика в измерении коэффициентов пропускания с дальнейшим расчетом коэффициентов поглощения. Спектрофотометрическими методами практически невозможно правильно определить истинное значение коэффициента поглощения в слабо поглощающем материале. Фактически рассчитывается коэффициент ослабления, включающий в себя поглощение и рассеяние проходящего излучения. Величина ослабления за счет рассеяния может быть разной и зависит от ряда факторов, связанных в германии в основном с условиями выращивания [11, 15]. Несмотря на относительно невысокие величины рассеяния в целом, при поглощении, близком к решеточному (коэффициент ослабления ниже $0,02 \text{ см}^{-1}$), вклад рассеяния может быть существенен. В слаболегированном монокристаллическом германии с совершенной структурой доля рассеяния мала; в кристаллах с высокой плотностью дислокаций, наличием дислокационных дефектов разного вида, в поликристаллах вклад рассеяния может быть значителен. Поэтому коэффициенты, полученные спектрофотометрическими методами, правильно рассматривать как коэффициенты ослабления.

Наши исследования пропускания и рассеяния излучения в инфракрасном диапазоне показали, что монокристаллы германия с плотностью дислокаций до $(3-7) \times 10^4 \text{ см}^{-2}$ вполне пригодны для применения в качестве деталей проходной оптики. Крупногабаритные монокристаллы германия (диаметром до 150–200 мм) производства Запорожского титаномагниевого комбината имеют среднюю плотность дислокаций на уровне 10^5 см^{-2} при высоком спектральном пропускании. Изолированные дислокации слабо влияют на оптическую прозрачность, но остаточные напряжения при большой плотности дислокаций (более $(7-9) \times 10^4 \text{ см}^{-3}$) и неоднородном их распределении по сечению оптических заготовок обычно приводят к существенной неоднородности показателя преломления.

Работа основных видов тепловизионных систем, связанных с передачей и обработкой изображений, основана на получении контрастной картины с высоким разрешением элементов. В этом случае обязательно стремиться свести к минимуму коэффициент ослабления (поглощение кристаллической решеткой). Обязательными условиями являются однородность показателя ослабления и минимальное рассеяние, роль которого может быть определяющей. В ряде случаев технические задания на оптический германий, технические параметры на выпускаемые производством оптические заготовки включают не коэффициент ослабления, а минимально допустимое спектральное пропускание. Допускается использование германия с пропусканием, отличным от максимального: для диапазона длин волн 3–7 мкм не менее 46%, для 8–10,6 мкм не менее 45%, на 12 мкм не менее 35% (для непросветленного германия). Реально это соответствует изменению коэффициента ослабления от $0,035 \text{ см}^{-1}$ и ниже (для толщины 1 см, $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$). Компания "Игл Пичер" (США) приводит значение показателя ослабления для типичных оптических заготовок – $0,027 \text{ см}^{-1}$, что соответствует пропусканию 45,5%. Однако использование германия в силовой оптике, связанной с повышенной мощностью проходящего излучения (применение CO_2 -лазеров), требует минимальных значений коэффициента ослабления и, соответственно, пропускания на длине волны 10,6 мкм на уровне 47%.

Поглощение, обусловленное свободными носителями в германии, имеет место во всей области прозрачности, и соответствующий коэффициент поглощения пропорционален степенной зависимости длины волны [10]:

$$\alpha \sim \lambda^\gamma, \quad (6)$$

где γ – степенной коэффициент, учитывающий механизмы поглощения на свободных носителях. Для германия известные значения γ лежат в диапазоне от 1,2 до 2 [4, 5]. На рис. 2 приведены зависимости коэффициента ослабления от длины волны (в логарифмических координатах) для легированного сурьмой германия, которые для данного диапазона можно аппроксимировать линейными функциями с коэффициентом $\gamma \approx 1,05-1,10$.

В целом, наши исследования показывают, что максимальной прозрачностью в диапазоне 2,3–14 мкм обладают монокристаллы германия электронного типа проводимости в диапазоне удельного сопротивления 2–20 Ом см (концентрация легирующей примеси $(1-8) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$), а диапазон использования для основных видов систем ИК техники может находиться в пределах 1,5–45 Ом см (концентрация легирующей примеси $4 \times 10^{13}-10^{15} \text{ см}^{-3}$).

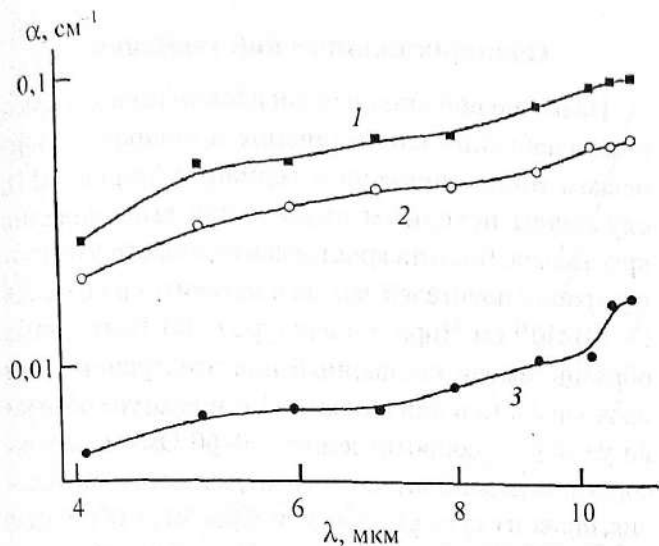


Рис. 2. Зависимости коэффициента ослабления α от длины волны для легированного сурьмой германия. Удельное сопротивление, Ом см: 1 – 0,25, 2 – 0,7, 3 – 4,4.

Нелегированный и особо чистый монокристаллический германий

Монокристаллический нелегированный германий выращивался из германия ГПЗ без легирования, образцы имели концентрацию электроактивных примесей $(2,2-5,5) \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и подвижность носителей заряда в пределах $(3,7-3,8) \times 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (при температуре 77 К), удельное сопротивление 50–60 Ом см, электронный тип проводимости. В монокристаллах особо чистого германия электронного типа проводимости (производитель – ФГУП “Германий”) концентрация носителей заряда составляла $(1-2) \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ при значениях удельного сопротивления 55–56 Ом см.

Зависимости коэффициента ослабления от длины волны для легированного сурьмой, особо чистого и нелегированного монокристаллов германия приведены на рис. 3. Особо чистые и, особенно, неле-

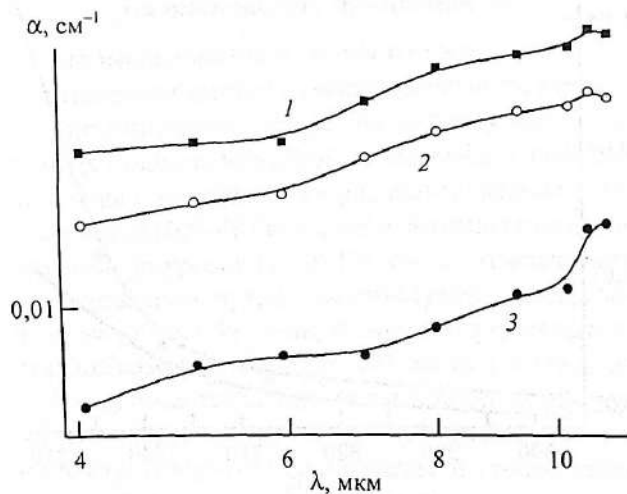


Рис. 3. Зависимости коэффициента ослабления α от длины волны для монокристаллов германия: 1 – нелегированного, 2 – особо чистого, 3 – легированного сурьмой.

гированные кристаллы уступают по прозрачности германию с добавкой сурьмы.

Температурная зависимость пропускания

На использование германия в оптических целях существенное ограничение накладывает температурная зависимость пропускания [8, 9]. Уже при температурах около 60 °С в рабочем диапазоне длин волн наблюдается снижение пропускания на 2–3% (рис. 4); наиболее выражено снижение начиная с длин волн 5–7 мкм. Для нелегированного, слаболегированного германия эта зависимость выражена более заметно (рис. 5), коэффициент ослабления резко возрастает с 55–60 °С.

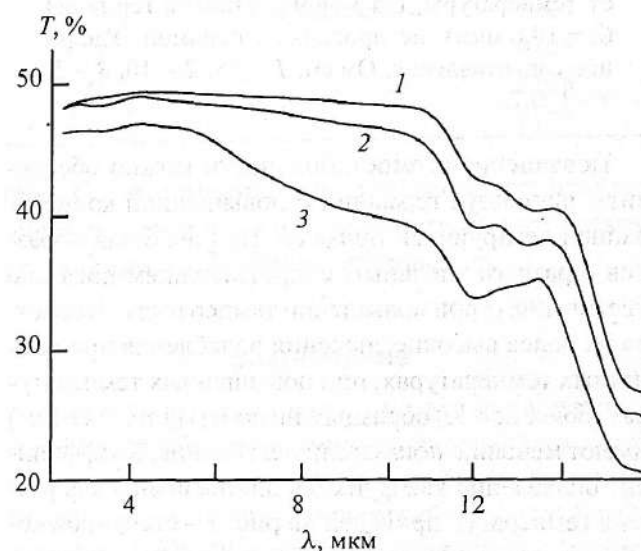


Рис. 4. Спектры пропускания оптических монокристаллов германия. Температура: 1 – 294, 2 – 335, 3 – 358 К.

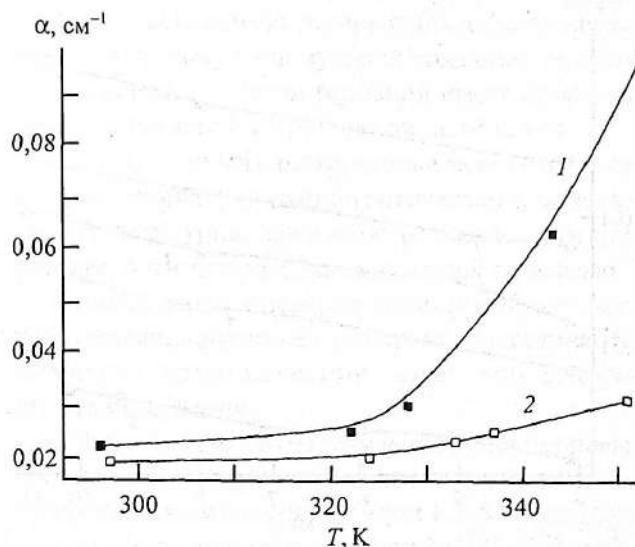


Рис. 5. Зависимости коэффициента ослабления α от температуры для монокристаллов германия ($\lambda = 10,6 \text{ мкм}$): 1 – нелегированный, 2 – легированный сурьмой.

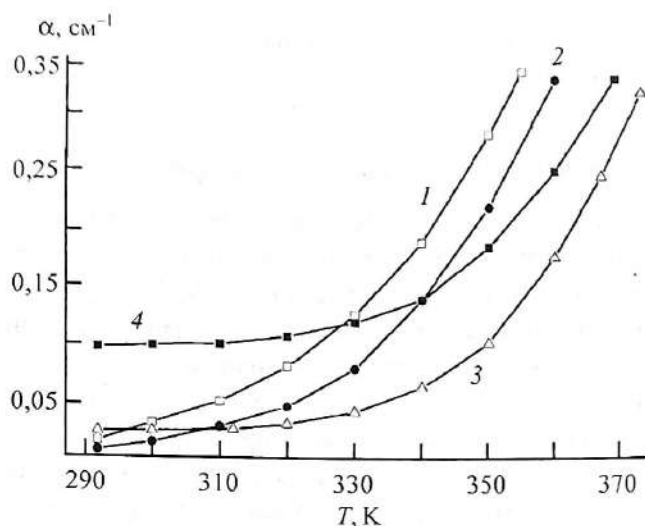


Рис. 6. Зависимости коэффициента ослабления α от температуры для монокристаллов германия ($\lambda = 10,6$ мкм), легированных сурьмой. Удельное сопротивление, Ом см: 1 – 25, 2 – 10, 3 – 5, 4 – 1, 0,7.

Повышение термостабильности можно обеспечить, используя германий с повышенной концентрацией легирующей примеси. На рис. 6 для образцов с разным удельным сопротивлением показано увеличение α при повышении температуры. Несмотря на более высокие значения ослабления при комнатных температурах, при повышенных температурах (более 350 К) образцы с низким ρ (1 и 0,7 Ом см) имеют меньшие показатели ослабления. Коэффициент ослабления как функция длины волны для разных температур приведен на рис. 7 – степенной коэффициент γ (в случае линейной аппроксимации зависимостей) находится в пределах 1,10–1,15 и несколько возрастает с увеличением температуры.

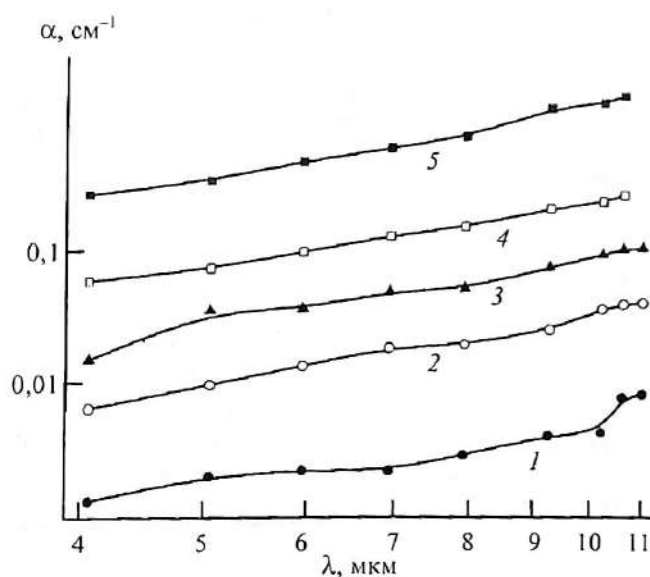


Рис. 7. Зависимости коэффициента ослабления α от длины волны для монокристалла германия (Sb, 4,4 Ом см). Температура: 1 – 293, 2 – 327, 3 – 342, 4 – 364, 5 – 408 К.

Поликристаллический германий

На начальной стадии были проведены исследования ослабления ИК излучения в поликристаллическом зонно-очищенном германии (марки ГПЗ), служащем исходным сырьем для выращивания кристаллов. Чистота кристаллов оценивается по концентрации носителей заряда и находится в пределах $(3-10) \times 10^{11}$ см⁻³ (при температуре 77 К). Вырезанные образцы имели смешанный или электронный тип проводимости и при комнатной температуре обладали удельным сопротивлением 50–60 Ом см. Зафиксированы низкие значения спектрального пропускания, причем с существенным разбросом по образцам: от 20 до 48%. Низкая прозрачность поликристаллического сырьевого германия объясняется, по-видимому, наличием значительного количества электронейтральных примесей (водород, азот, углерод, кислород), которые концентрируются на границах зерен в слитках и поглощают излучение, а кроме того, имеет место эффект рассеяния.

Путем выращивания получены слитки нелегированного поликристаллического германия и германия, легированного сурьмой (с разной ее концентрацией). Пропускание полученного поликристаллического германия в среднем на 1–2% ниже для тех же значений длин волн, чем монокристаллического. Коэффициент ослабления для поликристаллов выше, чем для монокристаллических образцов, и, кроме того, выявилась более резкая температурная зависимость ослабления при одинаковом уровне легирования (рис. 8).

Основными причинами снижения пропускания в поликристаллах являются: ослабление излучения за

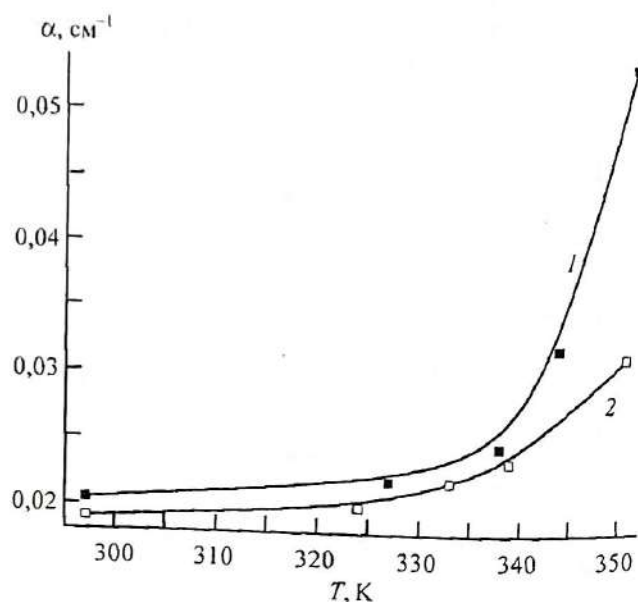


Рис. 8. Зависимости коэффициента ослабления α от температуры для легированного германия ($\lambda = 10,6$ мкм): 1 – поли-, 2 – монокристаллы.

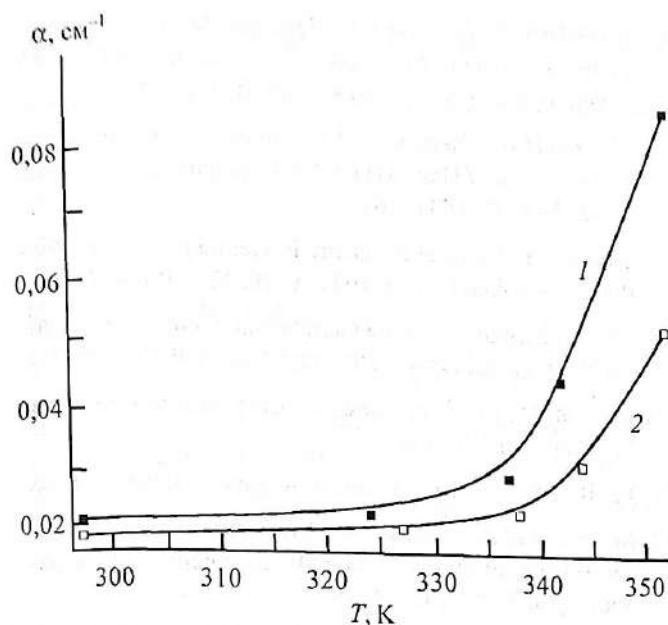


Рис. 9. Зависимости коэффициента ослабления α от температуры для поликристаллов германия ($\lambda = 10,6$ мкм): 1 — нелегированный, 2 — легированный сурьмой.

счет рассеяния на границах зерен; поглощение излучения примесями (электроактивными и нейтральными), сосредоточенными в основном на тех же границах; возможное увеличение доли решеточного поглощения. Прозрачность нелегированного германия ниже, чем при введении сурьмы, — наблюдается такая же зависимость коэффициента ослабления от удельного сопротивления, как и для монокристаллических образцов (рис. 9). В целом использование поликристаллического оптического германия ограничено наличием рассеянного ИК излучения в таком материале, которое в основном и определяет более высокий уровень коэффициента ослабления.

Влияние компенсации на оптическую прозрачность

Для исследования влияния компенсации электроактивных примесей на оптическую прозрачность германия определялось ослабление излучения компенсированными монокристаллами *n*-, *p*- и смешанного типа проводимости в диапазоне удельного сопротивления 0,6–46 Ом см. Концентрация галлия задавалась на уровне $(2-6) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а компенсация осуществлялась путем введения сурьмы до определенного уровня. Рассчитанные для таких монокристаллов коэффициенты ослабления на длине волны 10,6 мкм представлены в таблице. Компенсация существенно снижает пропускание германия, независимо от конечного значения удельного сопротивления и типа проводимости. Компенсированные кристаллы *n*-типа проводимости имеют более высокие значения коэффициента ослабления по сравнению с легированными только донорными примесями

Коэффициенты ослабления в компенсированных монокристаллах германия

Удельное сопротивление, Ом см	Тип электропроводимости	Коэффициент ослабления, см ⁻¹
0,6	<i>p</i>	2,35
0,7	<i>p</i>	1,73
0,9	<i>n</i>	0,031
1,0	<i>p</i>	1,03
1,5	<i>p</i>	0,70
1,8	<i>n</i>	0,03
2,0	<i>p</i>	0,55
2,3	<i>n</i>	0,025
3,4	Смешанный	0,35
3,8	<i>n</i>	0,021
11	Смешанный	0,090
20	Смешанный	0,037
32	<i>p</i>	0,035
44	<i>p</i>	0,038
45	<i>n</i>	0,024

(рис. 1) в том же интервале удельного сопротивления. Изменение типа проводимости на *p*-тип резко увеличивает коэффициент поглощения.

Заключение

Максимальной прозрачностью в диапазоне 2,3–14 мкм обладают монокристаллы германия *n*-типа проводимости в диапазоне удельного сопротивления 2–20 Ом см (концентрация легирующей примеси $(1-8) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$). Диапазон использования монокристаллического германия для основных видов систем ИК техники может находиться в пределах 1,5–45 Ом см (концентрация легирующей примеси $4 \times 10^{13} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$).

В качестве основных легирующих добавок можно применять сурьму и висмут; при этом отмечено, что легированный висмутом германий имеет несколько меньшие значения коэффициента ослабления.

Нелегированный и особо чистый монокристаллический германий уступает по оптической прозрачности и температурной зависимости прозрачности кристаллам, оптимизированным донорной примесью.

Использование поликристаллического оптического германия ограничено наличием рассеяния ИК излучения, более высокими значениями коэффициента ослабления.

Для работы оптики из германия в условиях повышенных температур необходимо применять материал с удельным сопротивлением 1,5–5 Ом см (концентрация легирующей примеси $3 \times 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$).

На оптическое пропускание германия влияют условия выращивания кристаллов, структура материала, наличие примесей. Разработанные методы

выращивания кристаллов германия [16] позволяют стабильно выращивать монокристаллы с высокой прозрачностью и однородностью в ИК диапазоне длин волн; получены монокристаллы германия в форме диска диаметром до 520 мм, крупноблочные кристаллы до 620 мм.

Авторы выражают благодарность Блохиной Г.С. и Шайовичу С.Л. за помощь в проведении экспериментов и обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Capron E.D., Brill O.L. Absorption Coefficient as a Function of Resistance for Optical Germanium at 10,6 μm // *Applied Optics*. 1973. V. 12. № 3. P. 566–572.
2. Bishop P.J., Gibson A.F. Absorption Coefficient of Germanium at 10,6 μm // *Applied Optics*. 1973. V. 12. № 11. P. 2549–2550.
3. Deutsch T.F. Laser Window Materials – an Overview // *J. of Electronic Material*. 1975. V. 4. № 4. P. 663–719.
4. Hutchinson C.J., Lewis C., Savage J.A., Pitt A. Surface and Bulk Absorption in Germanium at 10,6 μm // *Applied Optics*. 1982. V. 21. № 8. P. 1490–1495.
5. Левинзон Д.И., Ровинский Р.Е., Роголин В.Е. и др. Поглощение ИК излучения в германии // *Материалы IX Совещания по получению профилированных кристаллов и изделий способом Степанова и их применению в народном хозяйстве*. Л.: ЛИЯФ, 1982. С. 123–126.
6. Валявко В.В., Осипов В.П., Гришин В.П. и др. Оптические свойства чистого германия в области 2,5–15 мкм // *Журн. прикл. спектр.* 1979. Т. 30. В. 4. С. 729–731.
7. Карлов Н.В., Сусакин Е.В. Оптические материалы для CO_2 -лазеров // *Изв. АН СССР. Сер. физическая*. 1980. Т. 44. № 8. С. 1631–1638.
8. Young P.A. Thermal Runaway in Germanium Laser Windows // *Applied Optics*. 1971. V. 10. № 3. P. 638–643.
9. Fox A. Thermal Design for Germanium Acoustooptic Modulators // *Applied Optics*. 1987. V. 26. № 5. P. 872–884.
10. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1977. 368 с.
11. ТУ 48-4-522-89. Кристаллы германия оптические. 1990.
12. Каплунов И.А., Колесников А.И. Влияние характеристик германия на рассеяние ИК излучения // *Поверхность*. 2002. № 2. С. 14–19.
13. Klein Ph.H. Techniques for Measuring Absorption Coefficient in Crystalline Materials // *Opt. Eng.* 1981. V. 20. № 5. P. 790–794.
14. Смирнов Ю.М., Каплунов И.А., Блохина Г.С., Долгих И.К. Оптические свойства монокристаллов германия в ИК области спектра // *Физика кристаллизации*. Калинин: КГУ, 1990. С. 78–86.
15. Калинушкин В.П. Исследование примесных дефектов в полупроводниках методом рассеяния лазерного излучения ИК-диапазона // *Тр. ИОФ АН СССР*. 1986. Т. 4. С. 3–59.
16. Смирнов Ю.М., Каплунов И.А. Монокристаллы германия для инфракрасной техники // *Материаловедение*. 2004. № 5. С. 48–52.