

УДК 548.57; 535.243

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ ГЕРМАНИЯ РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

**И.А. Каплунов**

Тверской государственной университет,  
кафедра прикладной физики

Спектрофотометрическим методом и методом направленного пропускания получены значения коэффициентов пропускания света монокристаллами и поликристаллами германия при разрезании их на части. Расчеты показателей экстинкции показали, что экспоненциальный характер ослабления света не выполняется, что обуславливается наличием рассеяния света в кристаллах, интенсивность которого была предварительно измерена методом фотометрического шара.

**Введение.** При проведении исследований, в ходе которых по измеренным коэффициентам пропускания света кристаллами  $T$  вычисляются коэффициенты поглощения  $\alpha_n$ , рассеяние либо совсем не учитывается, либо считается, что коэффициенты рассеяния  $\alpha_p$  намного меньше  $\alpha_n$  [1–4]. Тот факт, что закон Бугера–Ламберта, основанный на экспоненциальности затухания света в веществе, сам по себе не выполняется, как правило, даже не обсуждается применительно к оптике кристаллов. Однако все формулы, связывающие, в зависимости от схемы измерений, коэффициенты пропускания с поглощением и рассеянием света, основаны на справедливости соотношения

$$I = I_0 \exp(-\alpha h) = I_0 \exp[-(\alpha_n + \alpha_p)h], \quad (1)$$

где  $\alpha$  – суммарный коэффициент (показатель) ослабления (экстинкции),  $h$  – толщина образца,  $I_0$  – интенсивность плоскопараллельного пучка света, уже вошедшего в образец,  $I$  – интенсивность пучка, прошедшего расстояние  $h$  в образце.

Формулами, основанными на соотношении (1), учитывающими отражения, в том числе многократные, от границ раздела, являются, например, соотношения, применяющиеся при измерениях оптического пропускания с помощью спектрофотометров (2) или по схеме направленного пропускания (3) [5]

$$\alpha = \frac{1}{h} \ln \left[ \frac{(1-R)^2 + \sqrt{(1-R)^4 + 4T^2 R^2}}{2T} \right], \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1}{h} [2\ln(1-R) - 0,5\ln T], \quad (3)$$

где  $R$  – коэффициент отражения.

Таким образом, существенные отклонения действительного характера ослабления световых потоков от закона Бугера–Ламберта могут в значительной степени обесценивать результаты многих экспериментальных, а тем более теоретических работ, посвященных связи оптических свойств кристаллов с их структурой, примесным составом и условиями выращивания.

**Измерения коэффициентов пропускания.** В методе направленного пропускания на образец падает хорошо коллимированный пучок лучей, что соответствует расчетной модели, приведенной в [5]. Именно эта особенность позволила сразу же экспериментально подтвердить предсказываемую теоретически зависимость коэффициентов ослабления от толщины исследуемого кристалла. В таблице 1 представлены результаты измерений коэффициентов направленного пропускания, доли рассеянного излучения и расчет коэффициентов ослабления для образцов различной толщины, вырезанных из двух кристаллических слитков – моно- и поликристалла германия. Кристаллы выращивались при одинаковых температурных и кинематических условиях, имели концентрацию легирующей примеси (сурьмы) в диапазоне  $(6-8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-1}$  (что соответствует удельному сопротивлению 2,5–3,5 Ом·см). Слитки имели форму цилиндров диаметром 38–40 мм, из которых для исследований были вырезаны четыре пары (одинаковой толщины) образцов. Образцы были достаточно однородными по концентрациям примеси и по удельному сопротивлению и соответствовали требованиям, предъявляемым к оптическому германию [6]. Согласно этому можно было предположить постоянство коэффициента ослабления  $\alpha$  по образцам. Однако эта величина для одного и того же материала падает с ростом толщины исследуемых образцов в 2–2,5 раза. Таким образом, эффект уменьшения коэффициента ослабления, вычисленного по известной формуле (2), связан только с тем, что эта формула выведена без учета рассеяния. Доля рассеянного излучения (которая измерялась методом с использованием фотометрического шара) для поликристаллических образцов очень велика. Но и сравнительно небольшое рассеяние в монокристалле приводит к существенному изменению коэффициента ослабления и к неправильному выводу о наличии неоднородности оптических свойств.

Таблица 1. Результаты измерения направленного пропускания ( $\tau_n$ ) и доли рассеянного излучения (S) (длина волны 2,5 мкм)

Толщина, см	Монокристалл			Поликристалл		
	$\tau_n$ , %	$\alpha$ , см <sup>-1</sup>	S, %	$\tau_n$ , %	$\alpha$ , см <sup>-1</sup>	S, %
0,32	40	0,070	0,8	37	0,26	6,5
1,20	37	0,060	1,5	31	0,20	16,0
3,69	36	0,030	3,5	19	0,19	39,0
7,26	33	0,027	5,0	14	0,14	67,0

Измерение коэффициентов пропускания тех же самых образцов на спектрофотометре дало иные результаты. На рис. 1 представлены спектрограммы монокристаллических (рис. 1, а) и поликристаллических (рис. 1, б) образцов для диапазона длин волн 2,5–14,5 мкм. В таблице 2 указаны значения коэффициентов ослабления, вычисленные по формуле (2) без учета рассеяния для длины волны 6,0 мкм. При сравнении данных табл. 1 и 2 видно, что величины  $\alpha$ , полученные с помощью спектрофотометра, сравнительно меньше, чем величины, полученные при использовании метода направленного пропускания. Разброс значений  $\alpha$  по образцам для монокристалла меньше, чем для поликристалла при использовании спектрофотометра. Для этих фактов имеются достаточно внятные объяснения. Во-первых, как показано в работе [5], при нахождении коэффициентов ослабления погрешности, характерные для измерений на спектрофотометрах, выше, чем для измерений методом направленного пропускания. Во-вторых, коэффициенты ослабления, получаемые с помощью спектрофотометров, всегда должны быть несколько выше их истинных значений из-за особенностей оптической схемы этих приборов. Экспериментаторам известны случаи, когда спектрофотометр дает значения коэффициентов пропускания выше теоретически возможных. У германия для нормального падения света максимальное пропускание составляет примерно  $T_{\max} \approx 47\%$  (при полном отсутствии поглощения и рассеяния). Однако возможно получение на отградуированных приборах значений пропускания на уровне 48–51% – такое наблюдается обычно для тонких (толщиной 1–2 см) образцов. Данный эффект не обсуждался в литературе, поэтому следует привести его физическое обоснование.

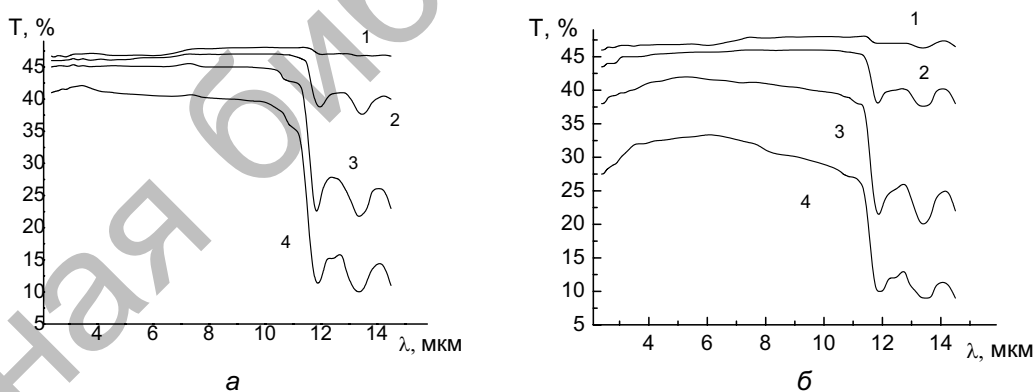


Рис. 1. Спектральная зависимость пропускания монокристаллов (а) и поликристаллов (б) германия. Толщина  $h = 0,32$  (кривая 1), 1,2 (кривая 2), 3,69 (кривая 3) и 7,26 см (кривая 4)

В отличие от метода направленного пропускания, в спектрофотометрах на образец падает не пучок параллельных лучей, а широкий пучок сходящихся лучей, дающих изображение источника теплового излучения (глобара).

Выходная для излучения щелевая диафрагма представляет собой, по сути, протяженный, почти ламбертов источник света. В этом легко убедиться, закрыв, например, наполовину, верхнюю часть выходной диафрагмы и нижнюю часть входной диафрагмы прибора. Настроенный при открытых диафрагмах на 100%, он покажет не менее 5–10% прошедшего света. Именно данной конструктивной особенностью объясняется завышение коэффициентов пропускания, измеряемых спектрофотометрами. Пояснения даны на рис. 2, где изображены источник света в виде щелевой диафрагмы, некоторая излучающая точечная область источника и ход лучей из этой области во входную диафрагму спектрофотометра без кристалла (пунктирная линия) и с кристаллом (сплошная линия).

Таблица 2. Коэффициенты ослабления ( $\alpha$ ) германия (длина волны 6,0 мкм), полученные спектрофотометрическим методом

Толщина, см	Монокристалл	Поликристалл
	$\alpha$ , см <sup>-1</sup>	$\alpha$ , см <sup>-1</sup>
0,32	0,013	0,023
1,20	0,007	0,017
3,69	0,008	0,018
7,26	0,010	0,038

Вследствие преломления часть лучей в диапазоне углов  $\Delta\alpha$  не попадает в прибор, что уменьшает световой поток, участвующий в измерениях. Зато из диапазона углов  $\Delta\beta$  в прибор попадает свет, который не проходил бы в диафрагму при отсутствии кристалла, что увеличивает световой поток, участвующий в измерениях, поскольку при любом положении излучающей области на источнике  $\Delta\alpha < \Delta\beta$  и общим итогом является увеличение светового потока, участвующего в измерениях.

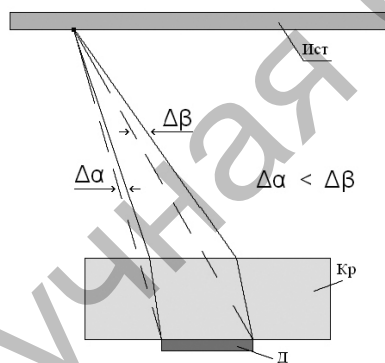


Рис. 2. К иллюстрации эффекта фокусировки излучения кристаллом при измерениях пропускания с помощью спектрофотометров: Кр – кристалл; Ист – источник света; Д – диафрагма;  $\Delta\alpha$  – угол, лучи из которого не попадают в диафрагму при наличии кристалла;  $\Delta\beta$  – угол, лучи из которого попадают в диафрагму только при наличии кристалла

Эффект фокусировки излучения кристаллом несколько снижается ростом коэффициентов отражения с увеличением углов падения света. Расчеты показывают, что максимальные углы падения реально не превышают 15°, и

даже для них увеличение френелевского отражения не превышает и одного процента. Это существенно меньше эффекта, связанного с фокусировкой. Численные расчеты, произведенные с помощью интегрирования по поверхностям выходной диафрагмы и кристалла, дают следующие величины рассматриваемого эффекта, примерно пропорционального показателю преломления и толщине кристалла. Для кристаллов германия толщиной менее 2 см он дает до 5% "лишнего" света, а для кристаллов толщиной 5–7 см эффект может достигать и 20%. Однако в случае толстых образцов рост поглощения и рассеяния света в материале в конечном итоге всегда снижает коэффициенты пропускания до значений, меньших, чем  $T_{\max}$ .

Поскольку завышение коэффициентов пропускания спектрофотометрами может давать занижение коэффициентов ослабления, то очевидно, что приборы этого типа не могут применяться для обнаружения и изучения более тонких зависимостей коэффициентов пропускания от толщины кристаллов с учетом рассеяния. Для этого необходимы только хорошо коллимированные, параллельные пучки света, использование которых характерно для метода направленного пропускания.

**Заключение.** Даже в сравнительно прозрачных кристаллах германия, применяемых в оптике, доля рассеянного излучения в общих световых потерях может быть настолько существенной, что экспоненциальный закон Бугера – Ламберта для ослабления светового пучка не выполняется. Для однородных кристаллов показатель ослабления, вычисленный по классическим формулам, в которые входят толщина образца и измеренный коэффициент пропускания, увеличивается в 2–3 раза при уменьшении толщины в 20 раз. Правильное определение соотношений между сечениями рассеяния и поглощения света в кристаллах германия невозможно без использования строго параллельных, хорошо коллимированных пучков излучения.

#### Список литературы

1. Hutchinson C.J., Lewis C., Savage J.A., Pitt A. Surface and bulk absorption in germanium at 10,6  $\mu\text{m}$  //Applied Optics. 1982. V. 21, № 8. P. 1490–1495.
2. Ровинский Р.Е., Роголин В.Е., Шершель В.А. Оптические свойства и области применения полупроводниковых монокристаллов германия. //Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1983. Т. 47, № 2. С. 406–409.
3. Карлов Н.В., Сисакян Е.В. Оптические материалы для  $\text{CO}_2$ -лазеров //Изв. АН СССР. Сер. физ. 1980. Т. 44, № 8. С. 1631–1638.
4. Маколкина Е.Н., Пржевуский А.К. Влияние структурных дефектов на оптические параметры кристаллов германия //Оптический журнал. 2003. Т. 70, № 11. С. 64–67.
5. Каплунов И.А., Колесников А.И., Талызин И.В., Седова Л.В., Шайович С.Л. Измерения коэффициентов ослабления света монокристаллами германия и парателлурита //Оптический журнал. 2005. Т. 72, № 7. С. 76–84.
6. Каплунов И.А., Смирнов Ю.М., Колесников А.И. Оптическая прозрачность кристаллического германия //Оптический журнал. 2005. Т. 72, № 2. С. 61–68.