

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

УДК 548.55

РАССЕЯНИЕ СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ ЛАНГАСИТА ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$)

© 2013 г. К. В. Закутайлов, Н. В. Ушаков*, Б. В. Набатов*

Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, Москва

**Институт кристаллографии РАН, Москва*

E-mail: Ushakov_Nikolay_89@mail.ru

Поступила в редакцию 30.10.2012 г.

Предложен способ построения индикатрисы рассеяния света для образцов кристаллов в форме прямоугольных параллелепипедов различных кристаллофизических ориентаций. Создана экспериментальная установка, позволяющая осуществлять регистрацию интенсивности света, рассеянного в образцах такой формы в плоскости, перпендикулярной входной грани. Построены индикатрисы рассеяния света для образцов кристаллов лангасита в плоскостях XU и YZ . Оценены отражательная и пропускательная способности образцов при падении света на грани по нормали. Найден максимальный угол, под которым рассеянный внутри кристалла свет выйдет из него, не испытывая полного внутреннего отражения. Установлен экспериментальный угол поворота кристаллов лангасита для регистрации фотоприемником интенсивности рассеянного света.

DOI: 10.7868/S0023476113030302

ВВЕДЕНИЕ

Кристаллы лангасита $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ (ЛГС) хорошо зарекомендовали себя в области акустики [1, 2]. В оптике они также являются перспективными материалами и начинают находить свое применение в качестве электрооптических затворов [3]. Одно из основных требований при создании таких элементов – использование кристаллов высокого оптического качества, поскольку неоднородности, находящиеся в объеме кристаллов, являются центрами рассеяния и вносят дополнительные оптические потери в световой поток, прошедший через кристалл. Такими неоднородностями могут служить полосы роста, включения, пузыри, трещины и др. Физические причины их возникновения многочисленны и разнообразны. Оптически неоднородной среда может стать вследствие различных дефектов, возникающих в кристаллах как во время роста, так и при термохимическом отжиге.

Использование дефектных кристаллов в оптике нежелательно, поэтому необходимо установить причины оптической неоднородности кристаллов и влияние дефектов на параметры оптических свойств. Это позволит усовершенствовать технологию выращивания с целью получения высококачественных образцов для применения их в оптике [4].

Удобным методом оценки однородности кристаллов является определение индикатрисы рассеяния света в среде. Обычно под рассеянием понимают только пространственное распределение светового потока, обусловленное неоднородностью по объему показателя преломления среды,

воспринимаемое как несобственное свечение вещества.

Существующие установки для измерения интенсивности девяностоградусного рассеяния света в кристаллах (т.е. рассеяния света в плоскости, ортогональной к входной грани образца) основаны на измерениях в образцах цилиндрической формы [5]. Использование такой геометрии образцов имеет свои недостатки. Во-первых, существуют трудности в подготовке и изготовлении образцов такой формы. Во-вторых, использование образца определенной ориентации в форме цилиндра даст полную диаграмму (индикатрису) рассеяния только в одной из трех кристаллофизических плоскостей.

Цель настоящей работы заключается в разработке способа определения индикатрисы рассеяния в образцах кристаллов в форме прямоугольных параллелепипедов различных кристаллофизических ориентаций.

НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ РЕГИСТРАЦИИ РАСSEЯННОГО СВЕТА

Для реализации предлагаемого способа регистрации интенсивности света, рассеянного в образцах в форме прямоугольных параллелепипедов, необходимо принять некоторые допущения. Во-первых, рассматривается упругое рассеяние света (т.е. рассеяние на частоте падающего света) в видимой области спектра [6]. Во-вторых, на исследуемой длине волны образцы должны представлять собой непоглощающие среды. В-третьих, рассеяние света происходит в объеме образцов независимыми частицами, размеры которых

порядка длины волны излучения. Такими частицами могут быть различные неоднородности среды, для которой характерно нарушение показателя преломления: пузыри, включения и др. Условие независимости предполагает, что число частиц достаточно мало, а расстояние между ними велико, так что в окрестности каждой частицы полное поле, рассеянное всеми частицами, мало по сравнению с внешним полем. При этом предположении полное рассеянное поле представляет собой сумму полей, рассеянных отдельными частицами, каждая из которых находится под воздействием внешнего поля в изоляции от других частиц [6, 7]. И наконец, расстояния между центрами рассеяния случайны. Это означает, что фазы волн, рассеянных отдельными частицами, не связаны между собой каким-либо определенным соотношением. Поэтому полная интенсивность рассеяния скоплением частиц равна сумме интенсивностей рассеяния отдельными частицами [7].

Рассеянную волну в любой точке, достаточно удаленной от источника, можно рассматривать как волну, распространяющуюся внутри некоего телесного угла. Направлением распространения рассеянной волны является ось конической поверхности.

Пространственное распределение интенсивности рассеянного света зависит от частоты света, размера и формы рассеивающих частиц. Рассеяние на достаточно малых сферических частицах, радиус которых меньше 0.03λ , хорошо описывает теория Рэлея [7]. В этом случае пространственное распределение интенсивности рассеянного света симметрично. Увеличение размеров частиц приводит к отклонениям от теории Рэлея: угловое распределение интенсивности рассеянного света перестает быть симметричным, в индикатрисе рассеяния возможно появление пиков и провалов из-за возрастания вероятности взаимного усиления или подавления рассеянных волн. Рассмотрение рассеяния большими частицами, размеры которых сравнимы или больше длины волны излучения, требует совершенно иного подхода, чем в случае малых частиц. Тогда необходимо пользоваться теорией Ми [7, 8], учитывающей размеры частиц. Основное отличие теории Ми состоит в том, что падающий пучок света, образующий фронт плоской волны бесконечной протяженности, можно считать состоящим из отдельных составных лучей, каждый из которых распространяется вдоль совершенно определенного пути. Лучи, падающие на частицу и проходящие мимо нее, вызывают различные явления: отражение, преломление и дифракцию.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для измерения интенсивности рассеяния света в образцах кристаллов в форме прямоугольных

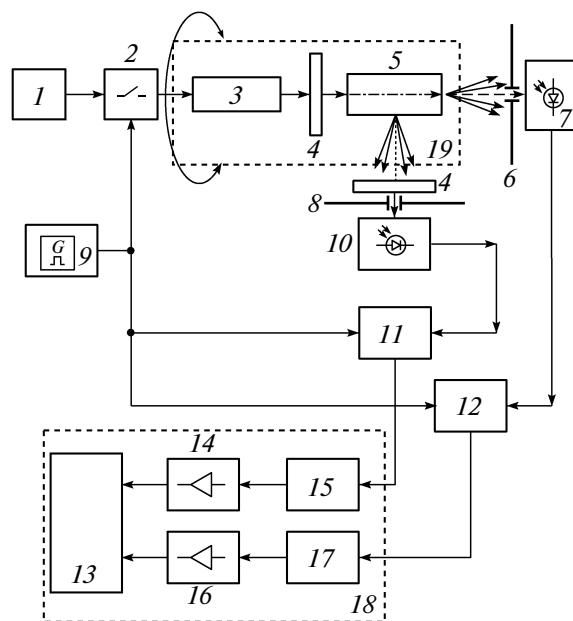


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения интенсивности рассеяния света в плоскости ортогональной входной грани: 1 – блок питания, 2 – управляемый транзисторный ключ, 3 – полупроводниковый лазерный модуль, 4 – поляризаторы, 5 – образец, 6, 8 – диафрагмы, 7, 10 – фотодиоды, 9 – генератор прямоугольных импульсов, 11, 12 – синхронные детекторы, 18 – регистрирующий модуль (13 – регистратор, 14, 16 – управляемые ослабители, 15, 17 – фильтры низкой частоты), 19 – платформа механического вращения системы лазерный модуль–образец–поляризатор.

параллелепипедов предложена и собрана установка, блок-схема которой приведена на рис. 1. Она позволяет регистрировать интенсивность света, рассеянного в образце в плоскости ортогональной входной грани.

Источником монохроматического излучения является лазерный модуль (3) типа НLDPМ12-655-25. Длина волны лазерного излучения $\lambda = 655$ нм, выходная мощность 25 мВт, напряжение питания 2.5–4 В. Экспериментальным путем установлена угловая расходимость лазерного излучения, которая для длинной полуоси эллипса составила 2.587×10^{-4} рад, а для короткой – 1.797×10^{-4} рад.

Источником питания лазерного модуля служит блок питания (1) с постоянным стабилизированным выходным напряжением 3.3 В. Для модуляции светового потока питание на лазерный модуль подается через управляемый транзисторный ключ (2), обеспечивающий телеграфный режим модуляции (типа “включен – выключен”) питания лазерного модуля, а следовательно, и интенсивности светового потока. Управление ключом осуществляется от генератора прямоугольных импульсов (9), выполненного на микросхеме таймера

типа КР1006ВИ1. Генератор на выходе обеспечивает сигнал прямоугольной формы стабильной частоты 1 кГц и скважностью 50%. Таким образом, световой поток на выходе лазерного модуля имеет период 1 мс с длительностью включения и паузы по 500 мкс.

Полупроводниковый лазерный модуль (3), поляризатор (4) и образец (5) размещаются на вращающейся платформе для регистрации света, рассеянного в различных направлениях в плоскости ортогональной входной грани поворотом образца (5) до критического угла, при котором рассеянный свет еще выйдет из кристалла и будет зафиксирован фотоприемником (10), не испытывая полного внутреннего отражения. Управление платформой (19) обеспечивается шаговым двигателем. Шаг поворота составляет 20 угл. мин. Измерение интенсивности в одном направлении происходит 10 раз в течение времени не более 2 с, после чего результат усредняется.

Поляризатор на входе всегда ориентируется так, что в кристалле распространяется обыкновенная волна, а на выходе — чтобы пропускать обыкновенную волну, рассеянную в кристалле. Далее расчеты представлены только для обыкновенной волны.

Прием светового излучения, вышедшего из кристалла, обеспечивается двумя каналами: опорным и измерительным. Применение фотоприемника (7), выполненного на основе фотодиода типа BPW20RF, обеспечивает измерение интенсивности светового потока, прошедшего через кристалл. Относительная спектральная чувствительность фотодиода в области длины волны 655 нм составляет 65%. Второй фотоприемник (10) также выполнен на основе фотодиода типа BPW20RF и предназначен для регистрации интенсивности света, рассеянного под углом 90° относительно входной грани. Для обеспечения линейности работы фотоприемников (7) и (10) на выходе лазерного модуля расположен ослабитель светового потока. Наилучшие результаты в качестве ослабителя показал светофильтр типа НС-3 (нейтрально серый светофильтр с коэффициентом ослабления 1000).

Диафрагма (8) круглой формы диаметром 2 мм находится на расстоянии 20 мм от кристалла. Она плотно прилегает к фотоприемнику (10). Для нахождения угла, под которым рассеянный свет в данном направлении попадает на фотодиод, необходимо определить телесный угол Ω , в котором он распространяется. Угол определяется размерами диафрагмы, расстоянием до нее и рассчитывается по формуле

$$\Omega = 2\pi \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (a/b)^2}} \right], \quad (1)$$

где a — радиус диафрагмы, b — расстояние от рассеивающего центра до диафрагмы.

При $a = 1$, $b = 20$ мм телесный угол равен 7.839×10^{-3} ср. Применение диафрагмы позволяет регистрировать интенсивность рассеянного света в направлении, перпендикулярном входной грани в растворе конуса, угол сечения которого составляет $\pm 2.86^\circ$.

Диафрагма (6) круглой формы диаметром 2 мм находится на расстоянии 100 мм от кристалла и плотно прилегает к фотоприемнику (7). Воспользовавшись формулой (1), можно определить телесный угол, в котором распространяется свет, прошедший через кристалл. При $a = 1$, $b = 100$ мм телесный угол равен 3.141×10^{-4} ср. На фотодиод (7) попадает свет, прошедший под углом $0.00 \pm 0.57^\circ$.

Использование диафрагмы диаметром 2 мм диктуется необходимостью контролировать возможную нестабильность лазерного пучка и тем самым получать более корректные данные о диаграмме рассеяния.

Выходные электрические сигналы с фотоприемников (7) и (10) поступают на измерительные входы простых синхронных детекторов (11) и (12). Синхронные детекторы выполнены на микросхемах выборки-хранения и работают по принципу запоминания сигнала на измерительном входе в момент выключения светового потока и вычитания этого значения из величины сигнала в момент включения светового потока. На опорные входы синхронных детекторов (11) и (12) подаются сигналы с генератора (9). Выходные напряжения, снимаемые с выходов синхронных детекторов, подаются на регистрирующий модуль (13). В состав модуля входят фильтры низкой частоты с частотой среза 25 Гц, предназначенные для предотвращения проникновения сетевой помехи (частота 50 Гц), программно-управляемые ослабители, обеспечивающие регулировку входных сигналов, подаваемых на вход регистратора, амплитуда которых не должна превышать 1 В.

Использование такой схемы установки и образцов, выполненных в форме прямоугольных параллелепипедов, позволяет получить в каждой из трех кристаллофизических плоскостей секторальную диаграмму (индикатрису) рассеяния света с предельными углами раскрытия, при которых рассеянный свет выйдет из кристалла, не испытывая полного внутреннего отражения. Измерение интенсивности рассеянного света можно проводить и на образцах в форме цилиндра, при этом будет получена полная диаграмма рассеяния только в одной из трех кристаллофизических плоскостей для образца определенной ориентации.

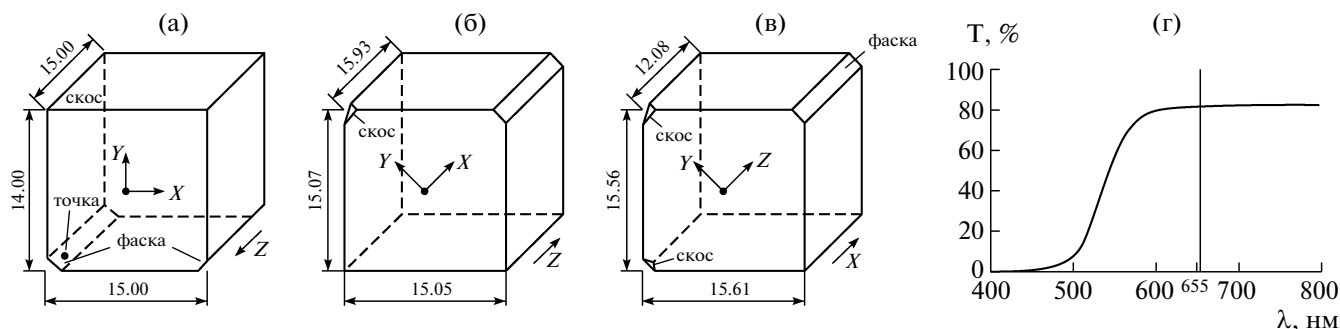


Рис. 2. Образцы: а – z-срез, б – 45° z-срез, в – 45° x-срез, г – спектр пропускания образца z-среза в неполяризованном свете вдоль оси Z.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В качестве образцов для измерения интенсивности рассеяния света использовались кристаллы ЛГС (точечная группа симметрии 32) в форме прямоугольных параллелепипедов. Ориентации и геометрические размеры образцов представлены на рис. 2а–2в. Спектр пропускания образца 2а в неполяризованном свете в диапазоне длин волн от 400 до 800 нм, полученный на спектрофотометре Cary 5000 Varian, представлен на рис. 2г. Для остальных образцов спектры пропускания имеют похожий вид. Из рис. 2г видно, что кристаллы ЛГС можно считать оптически прозрачными в области рабочей длины волны $\lambda = 655$ нм.

Величина показателя преломления на длине волны излучения 655 нм, необходимая для настоящей работы, была найдена с использованием формулы Зелмейера (2) из [9] и значений обыкновенного n_o показателя преломления ЛГС, приведенных в [9, 10] для ряда спектральных линий. Формула Зелмейера позволяет описать дисперсию показателя преломления в функциональном виде

$$n(\lambda) = \sqrt{A + B/(\lambda^2 - C) - D\lambda^2}, \quad (2)$$

где n – показатель преломления; λ – длина волны излучения; A, B, C, D – коэффициенты дисперсионной формулы для n_o и n_e , представленные в таблице.

Отметим, что из-за оптической неоднородности кристаллов значения показателей преломления, полученные разными авторами, различаются. Изменения могут наблюдаться в четвертом знаке после запятой. Поэтому целесообразно использовать значение n_o с учетом только третьего знака после запятой. Так для ЛГС $n_o = 1.898(1)$ при $\lambda = 655$ нм.

Пропускание образцов лангасита. Интенсивность светового потока, прошедшего через кристалл, ослабевает. Ослабление связано со многи-

ми параметрами, одним из которых является отражение на границах раздела двух сред, которыми являются грани образца. Отражательная способность R образца без учета поглощения при падении света по нормали для волны с обыкновенным n_o показателем преломления определяется выражением [11]:

$$R = \frac{r_{12}^2 + r_{21}^2 + 2r_{12}r_{21} \cos 2\beta}{1 + r_{12}^2 r_{21}^2 + 2r_{12}r_{21} \cos 2\beta}, \quad (3)$$

где $r_{12} = -r_{21} = \frac{n_1 - n_o}{n_1 + n_o}$, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_o h$, n_1 – показатель преломления воздуха, h – толщина образца.

Пропускательную способность T непоглощающего кристалла при падении света по нормали можно определить выражением

$$T = \frac{t_{12}^2 t_{21}^2}{1 + r_{12}^2 r_{21}^2 + 2r_{12}r_{21} \cos 2\beta}, \quad (4)$$

где $t_{12} = \frac{2n_1}{n_1 + n_o}$, $t_{21} = \frac{2n_2}{n_1 + n_o}$.

В непоглощающих кристаллах $R + T = 1$. Для образцов ЛГС при $\lambda = 655$ нм отражательная и пропускательная способности, рассчитанные по (3) и (4), равны $R = 0.1752$ и $T = 0.8248$ соответственно. Рассчитанная по (4) пропускательная способность ЛГС совпадает с экспериментальным зна-

Значения коэффициентов дисперсионной формулы Зелмейера для кристаллов ЛГС

Коэффициенты	n_o	n_e
A	3.5129	3.5558
B	0.0383	0.0387
C	0.0236	0.0225
D	0.0096	0.0098

чением пропускания при $\lambda = 655$ нм с точностью 99.1% и составляет $T_{\text{экср}} = 0.8174$.

Регистрация интенсивности света, рассеянного в плоскости ортогональной входной грани. Для определения угла поворота образца необходимо знать максимальный угол, при котором рассеянный свет выйдет из кристалла, не испытывая полного внутреннего отражения, и будет зафиксирован фотоприемником. Критический угол, при котором произойдет полное отражение, может быть определен по формуле [12]:

$$\varphi_{\text{кр}} = \arcsin \frac{n_o}{n_1}. \quad (5)$$

Предельным внутренним углом $\alpha/2$ рассеяния света в кристалле является угол, значение которого максимально приближено, но не достигает угла полного внутреннего отражения $\varphi_{\text{кр}}$. Он связан законом Снеллиуса с углом $\beta/2$, под которым рассеянный свет выйдет из кристалла и будет зарегистрирован фотоприемником.

Угол полного внутреннего отражения света $\varphi_{\text{кр}}$ для волны с n_o равен 31.79° . Предельным внутренним углом рассеяния $\alpha/2$ для волны с n_o можно считать угол, равный 31.00° .

Таким образом, диапазон выбора максимального угла поворота кристалла ограничен значением угла полного внутреннего отражения и коэффициентом отражения, с одной стороны, а с другой — минимальным углом, при котором выполняется условие перекрытия областей, где происходит полное внутреннее отражение. Минимальное значение такого угла 23.00° . Для кристаллов ЛГС выбран внутренний угол $\alpha/2_{\text{экср}}$, в пределах которого будет происходить регистрация интенсивности рассеянного света, равный 25.00° . Значит, кристалл необходимо поворачивать на максимальный угол $\beta/2_{\text{экср}} = 53.30^\circ$.

ИЗМЕРЕНИЕ РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Для получения полной диаграммы рассеяния света в плоскости, перпендикулярной входной грани, необходимо использовать два образца в форме прямоугольных параллелепипедов, изготовленных из одной були так, чтобы кристаллофизические оси, расположенные в плоскости рассеяния, были ориентированы по нормальям к граням для первого образца и по ребрам — для второго.

I. Чтобы получить полную диаграмму рассеяния в плоскости XU , необходимо использовать образцы с ориентацией “ z -среза” (рис. 2а) и “ $45^\circ z$ -среза” (рис. 2б). Падающий свет направлен вдоль оси Z . Модели секторальных диаграмм, которые можно получить для кристаллов таких ори-

ентаций, представлены на рис. 3а.1.1 для образца с ориентацией “ z -среза” и рис. 3а.1.2 для образца с ориентацией “ $45^\circ z$ -среза”.

Для получения полной диаграммы рассеяния в плоскости XU необходимо секторальные диаграммы выбранных в этом случае образцов расположить так, чтобы их кристаллофизические оси совпали. Таким образом будут исключены из рассмотрения области, в которых происходит полное внутреннее отражение. Модель полученной диаграммы рассеяния представлена на рис. 3.1.б.

Для монокристалла ЛГС получена индикатриса рассеяния в плоскости XU в полярных координатах, которая показана на рис. 3в.1. Соотношение интенсивностей прошедшего и рассеянного излучения составляет 80 дБ. Индикатриса рассеяния демонстрирует ярко выраженную анизотропию рассеяния появлением максимумов рассеяния, высота которых характеризует интенсивность рассеяния. Симметрия расположения максимумов характеризуется осью третьего порядка, которая совпадает с кристаллографической осью третьего порядка, направленной вдоль оси Z . В плоскости рассеяния XU , представленной на рис. 3в.1, находятся четыре системы эквивалентных максимумов, симметрию расположения которых можно также описать осью симметрии третьего порядка. Следовательно, в образце существуют четыре системы рассеивающих центров, которые занимают по три эквивалентных позиции. Максимумы на индикатрисе рассеяния возникают в направлениях, соответствующих отражениям от кристаллографических плоскостей, в которых сконцентрирована наибольшая плотность рассеивающих центров.

В кристалле ЛГС для максимумов в направлении $60^\circ, 180^\circ, 300^\circ$ такими плоскостями являются $(\bar{4}221), (2\bar{4}21), (22\bar{4}1)$ в направлении $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ — $(\bar{2}4\bar{2}1), (\bar{2}241), (4\bar{2}\bar{2}1)$; в направлении $30^\circ, 150^\circ, 270^\circ$ — $(\bar{2}201), (0\bar{2}21), (20\bar{2}1)$, и в направлении $90^\circ, 210^\circ, 330^\circ$ — $(\bar{2}021), (2\bar{2}01), (02\bar{2}1)$.

II. Для регистрации рассеянного света в плоскости YZ необходимо использовать образцы, ориентации которых представлены на рис. 2а (z -срез) и 2в ($45^\circ x$ -срез). Свет, падающий на образец, направлен по оси X . Для получения картины полного углового распределения интенсивности рассеянного света в плоскости YZ необходимо, как и в случае I, секторальные диаграммы рассеяния для выбранных образцов совместить так, чтобы направления кристаллофизических осей Y и Z совпали, тем самым будут исключены области, в которых происходит полное внутреннее отражение. Полученная модель углового распределения рас-

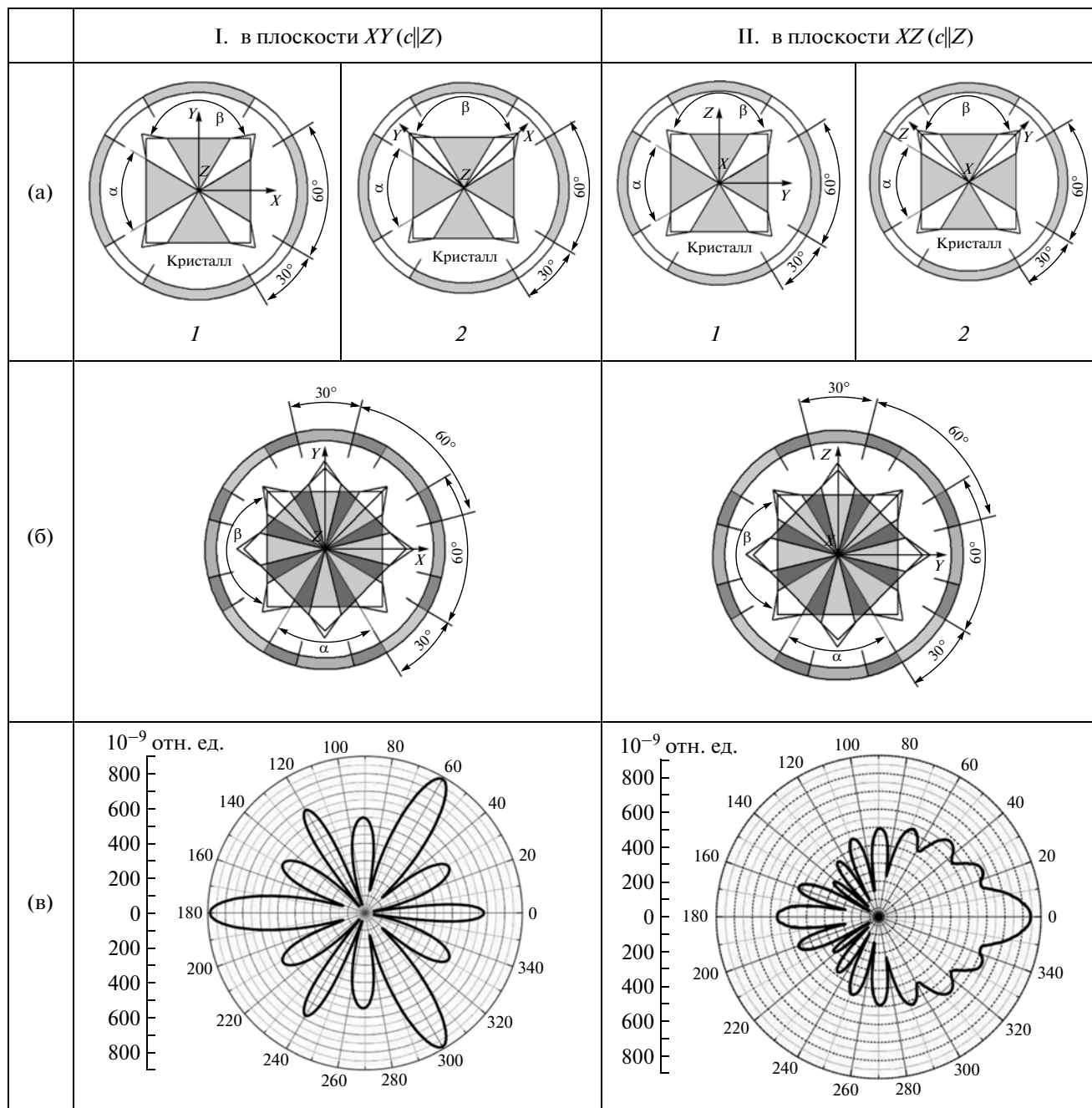


Рис. 3. Угловое распределение интенсивности рассеянного света в кристаллах ЛГС в плоскости XY (I) и YZ (II). α – максимальный сектор рассеяния, в котором распространяется рассеянный свет в кристалле, не испытывая полного внутреннего отражения, β – сектор, в котором рассеянный свет выйдет из кристалла и будет зарегистрирован фотоприемником; а – модель секторальной индикатрисы рассеяния для кристалла, изображенного на рис. 2а (I.1), модель индикатрисы рассеяния для кристалла 2б (I.2); для кристалла 2а (II.1), для кристалла 2в (II.2); б – модель полной индикатрисы рассеяния для кристаллов в плоскости I (рис. 2а, 2б), для кристаллов в плоскости II (рис. 2а, 2в); в – внутренняя интенсивность рассеяния света в ЛГС в полярных координатах.

сеянного света в плоскости YZ представлена на рис. 3б. II.

Для кристаллов ЛГС, представленных на рис. 2а и 2в, получена полная внутренняя диаграмма распределения рассеянного света в плоскости YZ в полярных координатах, которая пред-

ставлена на рис. 3в. II. Соотношение интенсивностей прошедшего и рассеянного излучения составляет 80 дБ. На диаграмме (рис. 3в. II) максимумы возникают в направлениях, соответствующих отражениям от кристаллографических плоскостей, в которых сконцентрирована наи-

большая плотность рассеивающих центров. Так, для направлений 0° и 180° такими плоскостями будут $(\bar{2}4\bar{2}1)$ и $(24\bar{2}1)$.

ВЫВОДЫ

Для регистрации света, рассеянного в образцах в плоскости ортогональной входной грани, собрана установка, особенность которой заключается в том, что поворот системы лазерный модуль—кристалл—поляризатор осуществляется одновременно.

Измерение рассеяния света в кристаллических образцах, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда, позволяет получить в каждой из трех кристаллофизических плоскостей секторальную диаграмму рассеяния с предельными углами раскрытия, при которых рассеянный свет выйдет из кристалла, не испытывая полного внутреннего отражения.

Предложен способ построения углового распределения интенсивности рассеянного света в плоскости, перпендикулярной направлению падения светового потока, для кристаллов в форме прямоугольных параллелепипеда с использованием секторальных диаграмм двух кристаллов.

Для образцов кристалла ЛГС индикатриса рассеяния была построена в плоскостях XU и YZ . Построение индикатрисы осуществлялось по способу наблюдения девяностоградусного рассеяния в образцах.

Авторы выражают благодарность А.Ф. Константиновой за полезные обсуждения, способствовавшие написанию данной статьи.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ИК РАН при поддержке Минобрнауки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рошупкин Д.В.* // Машиностроитель. 2006. № 5. С. 56.
2. *Андреев И.А.* // Журн. техн. физики. 2006. Т. 76. Вып. 6. С. 80.
3. *Qi H., Wei A., Yuan D.* // Mater. Sci. Eng. B. 2005. V. 122. P. 246.
4. *Бузанов О.А.* Способ выращивания монокристаллов лантан-галлиевого силиката методом Чохральского. Патент РФ 2108418. С30В29/34, С30В15/00. М., 1998.
5. *Блистанов А.А., Портнов О.Г., Гераськин В.В.* Дефекты в оптических монокристаллах. Научные труды № 88. М.: Металлургия, 1976.
6. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
7. *Ван де Хюлст Г.* Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во Иностран. лит., 1961.
8. *Хвостиков И.А.* // Успехи физических наук. 1940. Т. 24. № 2. С. 165.
9. *Stade J., Bohaty H., Hengst M.* // Cryst. Res. Technol. 2002. V. 37. P. 1113.
10. *Батурина О.А., Гречушников Б.Н., Каминский А.А. и др.* // Кристаллография. 1987. Т. 32. № 2. С. 406.
11. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970. 856 с.
12. *Константинова А.Ф., Гречушников Б.Н., Бокуть Б.В. и др.* Оптические свойства кристаллов. Минск: Наука и техника, 1995. 302 с.