

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

УДК 535.3

ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА В ПЛАСТИНКАХ ЛЕЙКОСАПФИРА С ПЕРЕМЕННЫМ УГЛОМ ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ КРИСТАЛЛА К ПОВЕРХНОСТИ

© 2013 г. В. Н. Ветров, Б. А. Игнатенков

*Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения
ВНЦ "ГОИ им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург
E-mail: vasvetrov@mail.ru*

Поступила в редакцию 29.03.2011 г.

Модификация лейкосапфира путем неоднородной пластической деформации позволяет получить пластины с переменным углом наклона оптической оси кристалла к поверхности. Рассмотрено преломление света в такой пластине при перпендикулярном и наклонном падении параллельного пучка лучей. Предложен алгоритм расчета показателя преломления необыкновенного луча и двойного лучепреломления.

DOI: 10.7868/S0023476113030272

Ранее [1, 2] в аналитической форме было получено решение задачи о взаимодействии излучения с произвольно ориентированной пластинкой из одноосного кристалла, позволяющее определить изменение амплитуд проходящего и отраженного света при изменении одного из параметров, например угла падения луча или направления оптической оси кристалла. В рамках волновой модели света определена зависимость показателя преломления необыкновенного луча и двойного лучепреломления по апертуре осесимметричных оптических деталей сложной формы (мениски и линзы) из лейкосапфира с учетом направления оптической оси кристалла [3].

Падение параллельного пучка лучей на поверхность пластинки, в которой оптические оси кристалла расположены под разными углами, до сих пор в литературе не рассматривалось. Пластинка из пластически деформированного лейкосапфира с переменным углом оптической оси к поверхности является новым оптическим элементом и объектом исследования для решения поставленной задачи.

Деформацией дисков методом центрально-кольцевого изгиба [4, 5] можно реализовать два типа полусферических деталей из лейкосапфира:

- оптическая ось кристалла перпендикулярна поверхности мениска;
- в каждой точке поверхности линзы оптическая ось кристалла направлена под углом, обеспечивающим распространение необыкновенных лучей вдоль оптических осей кристалла.

Эти детали являются исходными заготовками для получения пластинок с переменным углом оптической оси кристалла к поверхности, физи-

ческие свойства которых не исследованы. При неоднородной пластической деформации лейкосапфира сохраняется трансляционная симметрия в слоях заготовки вдоль направлений, перпендикулярных ее поверхности [6], т.е. вдоль оптической оси исходного кристалла. Эти направления следует рассматривать как новые оптические оси, образующие конус и угловую апертуру с фокусом на оси симметрии мениска. Вырезав пластинку перпендикулярно последней (рисунок), получим новую оптическую среду с переменным углом оптической оси кристалла к поверхности. Пластинки имеют уникальные свойства: при падении параллельного пучка лучей, направленного перпендикулярно поверхности пластины, преломленные на входной поверхности необыкновенные лучи распространяются под углом к оси симметрии детали и пересекают ее, что обусловлено наличием конуса оптических осей кристалла. Это свойство отличает пластинки из пластически деформированного лейкосапфира от пластинок из одноосного кристалла с оптической осью, направленной под углом к поверхности.

В [3] рассмотрены особенности определения угла между направлением необыкновенного луча и оптической осью кристалла в деталях сложной формы, однако нормальное падение луча на поверхность деталей из пластически деформированного лейкосапфира наблюдается только в вершине детали, где оптическая ось перпендикулярна поверхности, что обеспечивает распространение луча вдоль оптической оси кристалла. При наклонном падении параллельного пучка лучей на поверхность мениска или линзы не реализуется случай нормального падения луча в точку поверхности

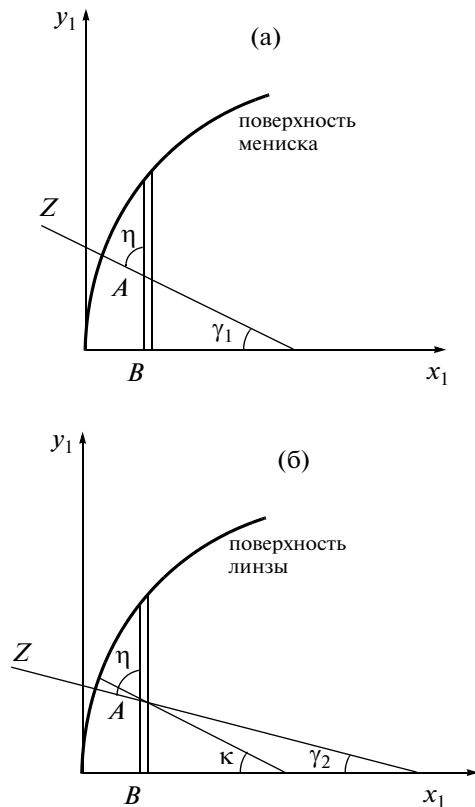


Схема получения пластинки лейкосапфира с переменным углом оптической оси к поверхности из заготовки мениска (а), из заготовки полусферической линзы (б); $\eta_1, \eta_2, \gamma_1, \gamma_2$ — углы между оптической осью кристалла и поверхностью, а также нормалью к поверхности пластинки, κ — угол нормали к поверхности полусферической линзы.

детали с оптической осью кристалла, направленной под углом к поверхности.

При нормальном падении светового пучка на пластинку из пластически деформированного лейкосапфира в центральной точке поверхности луч распространяется так же, как и в вершине мениска и линзы. Для других точек поверхности пластинки реализуются новые условия преломления падающего луча, так как оптическая ось кристалла направлена под углом к поверхности. Угол отклонения γ_1 оптической оси кристалла от нормали в каждой точке поверхности мениска (рисунок) определяется в случае образования прямого конуса оптических осей выражением

$$\gamma_1 = \arctg\left(\frac{y_1}{1-x_0}\right), \quad (1)$$

где безразмерный параметр $y_1 = y/R$, R — радиус внутренней поверхности мениска, а x_0 характери-

зует расстояние до точки B , т.е. положение пластинки относительно вершины заготовки.

Для конуса оптических осей кристалла, образованных в пластинке из заготовки полусферической линзы лейкосапфира (рисунок), обеспечивающего прохождение преломленного луча соосно с направлением оптических осей [5], отклонение оптической оси от нормали равно

$$\gamma_2 = \arctg\left(\frac{y_1}{1-x_0}\right) - \arcsin\left(\sqrt{\frac{n_e^2 y_1}{((1-x_0)^2 + y_1^2)n_o^2 n_e^2 - (n_o^2 - n_e^2)x_0^2}}\right), \quad (2)$$

где n_o, n_e — показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей.

При нормальном падении на поверхность пластинки параллельного светового пучка для случая, когда фронт волны параллелен поверхности, а оптическая ось кристалла находится в плоскости, перпендикулярной последней, для определения угла p между оптической осью кристалла и направлением необыкновенного луча в каждой точке поверхности применима зависимость (3), приведенная в [7] для случая, когда фронт волны параллелен поверхности, а оптическая ось кристалла находится в плоскости, перпендикулярной последней

$$p = \arctg(n_e^2 \tg \gamma / n_o^2), \quad (3)$$

где p обуславливается, как и угол γ , расстоянием от центральной точки пластины y_1 .

Подставляя (3) в выражение

$$n_o - n = (n_o - n_o n_e) / \sqrt{n_o^2 \sin^2 p + n_e^2 \cos^2 p}, \quad (4)$$

можно определить двойное лучепреломление и показатель преломления необыкновенного луча в каждой точке поверхности пластинки.

При наклонном падении лучей на пластинку угол рассогласования p для точки поверхности определяется из общего решения уравнения [3]. Для выбранной системы координат с учетом изменения угла падения луча и направления оптической оси кристалла решения уравнения для разных точек поверхности пластинок сведены в таблицу. Для центральной точки пластинки имеем наклонное падение луча и оптическую ось кристалла, направленную перпендикулярно поверхности, как и для вершины мениска и линзы. Для других точек поверхности пластинок при падении параллельного пучка лучей угол p обусловлен углом падения пучка и направлением оптической оси кристалла, т.е. углами γ_1 или γ_2 соответственно для пластинок, полученных из разных заготовок. При совпадении направления необыкновенного луча и оптической оси кристалла в

Формулы расчета угла между оптической осью кристалла и направлением необыкновенного луча в пластинках ($\beta \neq 0$)

Для центральной точки поверхности пластинок ($y_1 = 0$)

$$p = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{(Ln_e^2(Ln_o^2 - 1))}}{Ln_o^2 - 1} \text{ где } L = \sin^2 \beta / n_o n_e$$

Для точек поверхности пластинок ($y_1 > 0$)

Пластинка из заготовки мениска

$$p = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha \pm \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha - (Ln_o^2 - 1)(Ln_e^2 - \operatorname{tg}^2 \alpha)}}{Ln_o^2 - 1},$$

где $L = \sin^2 \beta / n_o n_e \cos^2 \alpha$
 $\alpha = \gamma_1 = \operatorname{arctg}(y_1 / (1 - x_1))$

Пластинка из заготовки полусферической линзы

$$p = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha \pm \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha - (Ln_o^2 - 1)(Ln_e^2 - \operatorname{tg}^2 \alpha)}}{Ln_o^2 - 1},$$

где $L = \sin^2 \beta / n_o n_e \cos^2 \alpha$, $\alpha = \gamma_2$

$$\gamma_2 = \operatorname{arctg} \left(\frac{y_1}{1 - x_1} \right) - \arcsin \left(\sqrt{\frac{n_e^2 y_1^2}{((1 - x_1)^2 + y_1^2) n_o^2 n_e^2 - (n_o^2 - n_e^2) y_1^2}} \right)$$

данной точке поверхности пластинок двулучепреломление отсутствует.

Разработанный алгоритм позволяет определить изменение показателя преломления необыкновенного луча и двулучепреломления по поверхности пластинок в широком интервале изменения углов β и γ , однако необходимо учитывать угол полного отражения и его зависимость от направления оптической оси кристалла. В дополнение к результатам [1, 2] в части амплитуд волн, прошедших через пластинку с произвольно ориентированной оптической осью кристалла, разработанный алгоритм применим для определения исследованных характеристик пластинок из одноосных кристаллов, произвольно ориентированных относительно оптической оси кристалла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Константинова А.Ф., Лонский Э.С. // Кристаллография. 1977. Т. 22. № 1. С. 14.
2. Константинова А.Ф., Гречушников Б.Н., Бокунь Б.В., Валяшко Е.Г. Оптические свойства кристаллов. Минск: Наука и техника, 1995. 302 с.
3. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А. // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 106. № 1. С. 154.
4. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Письменный В.А. и др. Способ получения оптических линз. Патент РФ на изобретение № 2285757 от 2006.
5. Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Письменный В.А. и др. Способ получения оптических линз из лейкосапфира. Патент РФ на изобретение № 2377614 от 2009.
6. Афанасьев И.И., Андрианова Л.К., Ветров В.Н., Игнатенков Б.А. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 4. С. 1173.
7. Шустер А. Введение в теоретическую оптику. Л.; М.: ОНТИ, 1935. 376 с.