

07;12

Особенности полного внутреннего отражения в оптических кристаллах

© Л.В. Алексеева, И.В. Повх, В.И. Строганов

Дальневосточный государственный университет путей сообщения,
Хабаровск

Поступило в Редакцию 4 августа 1998 г.

Показано, что можно вырезать кристалл таким образом, что один падающий луч при отражении от наклонной грани внутри кристалла возбудит четыре луча, два обыкновенных и два необыкновенных, идущих в разных направлениях.

Хорошо известно явление двойного лучепреломления, которое заключается в том, что луч света в кристалле разбивается на два луча со взаимно перпендикулярными поляризациями [1–4]. Один из них поляризован в плоскости главного сечения (плоскость, которая содержит оптическую ось кристалла и падающий луч) и называется необыкновенным (e), другой имеет поляризацию (вектор \mathbf{E}), перпендикулярную этой плоскости, и называется обыкновенным (o).

В литературе рассмотрена разновидность двойного лучепреломления — явление двойного лучеотражения, заключающееся в разделении луча на два — обыкновенный и необыкновенный при полном внутреннем отражении в кристалле [3,5].

Покажем, что можно вырезать кристалл таким образом, что один падающий луч при отражении от наклонной грани внутри кристалла возбудит четыре луча, два обыкновенных и два необыкновенных, идущих в разных направлениях. Такое явление можно назвать четырехлучеотражением. Это происходит вследствие того, что плоскости главного сечения для падающего и отраженного лучей не совпадают.

Эксперимент выполнен на призме, вырезанной из одноосного кристалла иодата лития. Вид сверху на эту призму приведен на рис. 1, *a*. Луч 1 гелий-неонового лазера ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$) проходит через призму и попадает на наклонную грань 2, расположенную под углом 45° к одной из боковых граней 3. На этой грани 2 происходит полное внутреннее отражение, из призмы выходят четыре луча 4–7, распространяющихся

в нескольких разных направлениях. Плоскости падения и отражения лучей совпадают с плоскостью рис. 1, *a*. Угол падения луча I β равен 45° . Углы отражения γ для четырех лучей разные. Два луча 4, 6 — обыкновенные, два 5, 7 — необыкновенные. Нормаль к поверхности отражения обозначим — 8. Оптическая ось расположена в плоскости zz , перпендикулярной направлению луча I , и составляет угол 45° с плоскостью рис. 1, *a*. Все отраженные лучи лежат в одной плоскости.

Пространственное расположение отраженных лучей 4–7 фотографировалось и приведено на рис. 1, *b*.

Обозначим соответственно углы отражения для лучей 4–7 через γ_{eo} , γ_{ee} , γ_{oo} и γ_{oe} . Индексы у углов отражения γ соответствуют типам взаимодействия лучей в кристалле. Например, для γ_{eo} первый индекс (e) говорит о том, что луч I , падающий на наклонную грань призмы, является необыкновенным, второй индекс (o) — отраженный луч — обыкновенный. То есть для взаимодействий $e \rightarrow o$ (луч 4) и $o \rightarrow e$ (луч 7) происходит анизотропное отражение лучей от наклонной грани призмы (с поворотом плоскости поляризации при отражении).

Законы отражения для лучей 4–7 соответственно могут быть записаны в следующем виде:

$$n_e \cdot \sin \beta = n_o \cdot \sin \gamma_{eo}, \quad (1)$$

$$n_e \cdot \sin \beta = n_e(\gamma_{ee}) \sin \gamma_{ee}, \quad (2)$$

$$n_o \cdot \sin \beta = n_o \cdot \sin \gamma_{oo}, \quad (3)$$

$$n_o \cdot \sin \beta = n_e(\gamma_{oe}) \sin \gamma_{oe}. \quad (4)$$

Во всех случаях угол падения $\beta = 45^\circ$. Показатели преломления $n_o = 1.8830$; $n_e = 1.7367$ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$) [6].

Углы отражения, вычисленные по формулам (1)–(4), приведены на рис. 2, *a*. Видно, что для двух типов взаимодействий $e \rightarrow e$ и $o \rightarrow e$ величины углов отражения γ_{ee} (луч 5) и γ_{oe} (луч 7) зависят от положения оптической оси в плоскости zz (угла α).

Приведем формулы для интенсивности отраженных лучей. Перед входной гранью призмы 9 ставим поляризатор, направление пропускания которого совпадает с направлением $I2$ (рис. 1, *c*). В этом случае

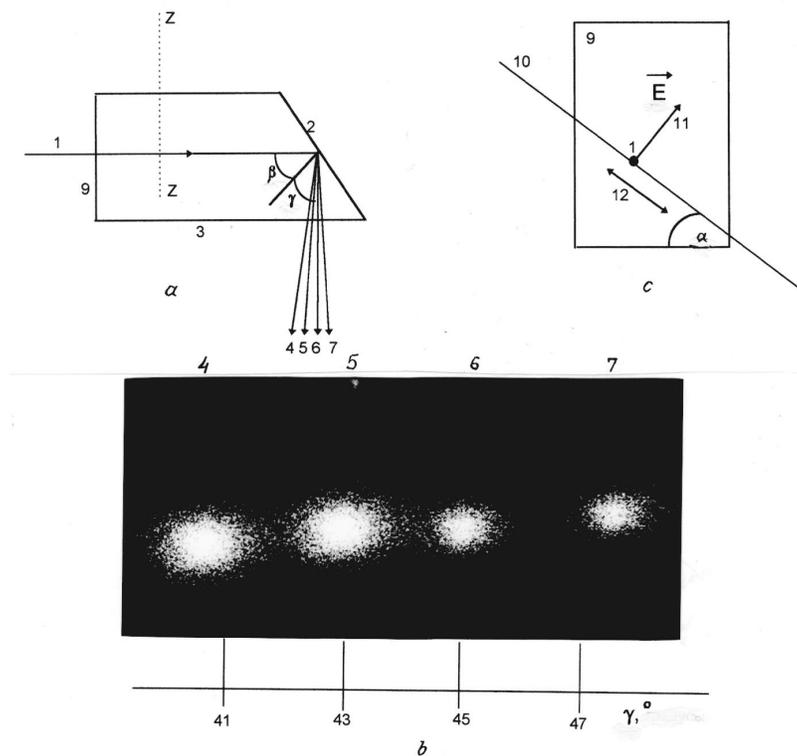


Рис. 1. Ход лучей в кристалле LiIO_3 при полном отражении (а, с) и экспериментальное наблюдение отраженных лучей (b). zz — плоскость, перпендикулярная плоскости рисунка. Оптическая ось находится в плоскости zz и в то же время расположена под углом 45° к плоскости рисунка. 1 — лазерный луч, 2, 3 — грани кристалла, 4–7 — отраженные лучи, 8 — нормаль к поверхности отражения, 9 — входная грань кристалла, 10 — оптическая ось кристалла, 11 — направление вектора \mathbf{E} для падающего лазерного луча 1; 12 — направление пропускания поляриоида. β — угол падения, γ — угол отражения, α — угол между оптической осью 10 и верхней или нижней гранью призмы. Индексы "о" и "е" соответствуют обыкновенным и необыкновенным лучам. Стрелками указано направление вектора напряженности \mathbf{E} электрического поля для отраженных световых лучей (b). Типы взаимодействий: 4 — $e \rightarrow o$, 5 — $e \rightarrow e$, 6 — $o \rightarrow o$, 7 — $o \rightarrow e$. Углы отражения, град: 4 — 40.9, 5 — 42.8, 6 — 45, 7 — 47.52.

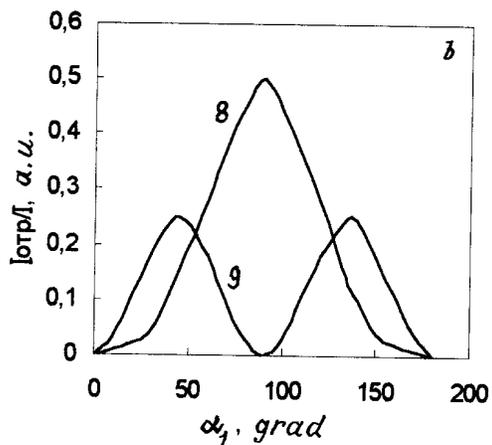
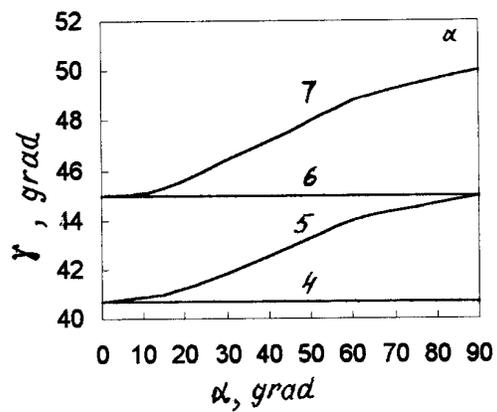


Рис. 2. Зависимость углов отражения γ от положения оптической оси в призме (а) и интенсивности отраженных лучей от направления вектора \mathbf{E} в падающем лазерном луче (b). Типы взаимодействий: 4 — $e \rightarrow o$, 5 — $e \rightarrow e$, 6 — $o \rightarrow o$; 7 — $o \rightarrow e$; 8 — $e \rightarrow o$, $e \rightarrow e$, 9 — $o \rightarrow e$, $o \rightarrow o$ — экспериментальные точки. Кривые 4–7 соответственно для отраженных лучей 4–7; 8 — для лучей 4 и 5; 9 — для лучей 6 и 7.

отсчет угла поворота поляроида α_1 равен нулю. Тогда для лучей 4–7 соответственно интенсивности отраженных лучей равны:

$$I_{eo} = 0.5 \cdot I \cdot \sin^4 \alpha_1, \quad (5)$$

$$I_{ee} = 0.5 \cdot I \cdot \sin^4 \alpha_1, \quad (6)$$

$$I_{00} = 0.25 \cdot I \cdot \sin^2 2\alpha_1, \quad (7)$$

$$I_{oe} = 0.25 \cdot I \cdot \sin^2 2\alpha_1. \quad (8)$$

При попадании лазерного луча I в призму он преобразуется в два луча — обыкновенный и необыкновенный, идущие в одном направлении, перпендикулярном оптической оси призмы (рис. 1, *a*). В этом случае для лучей, падающих на наклонную грань 2 призмы, плоскость главного сечения расположена под углом 45° к плоскости рис. 1, *a* и проходит через падающий луч.

Для отраженных лучей плоскость главного сечения составляет угол 90° с плоскостью рис. 1, *a*, а кроме того, располагается перпендикулярно плоскости главного сечения для падающих лучей. При таком расположении плоскостей главного сечения любой из лучей, падающий на наклонную грань 2 (обыкновенный или необыкновенный), имеет компоненту вектора \mathbf{E} , расположенную под углом, не равным нулю или 90° , по отношению к плоскости главного сечения для отраженных лучей. Эта компонента \mathbf{E} и возбуждает два отраженных луча — обыкновенный и необыкновенный. Таким образом, падающий обыкновенный луч I возбуждает два отраженных луча — обыкновенный и необыкновенный. А также падающий необыкновенный луч I тоже возбуждает при отражении от грани 2 два луча — необыкновенный и обыкновенный. Из призмы выходит четыре луча, идущих в разных направлениях.

Интенсивность отраженных лучей приведена на рис. 2, *b*.

Отметим, что данный эффект четырехлучеотражения связан с определенной, обычно не используемой в эксперименте, конфигурацией образца, вырезанного из кристалла, с особым расположением оптической оси кристалла по отношению к грани образца, и должен наблюдаться в любых анизотропных кристаллах — одноосных и двухосных.

Список литературы

- [1] *Константинова А.Ф., Гречушников Б.Н., Бокуть Б.В.* и др. Оптические свойства кристаллов. Минск. Наука и техника, 1995. 302 с.
- [2] *Федоров Ф.И., Филиппов В.В.* Отражение и преломление света прозрачными кристаллами. Минск: Наука и техника, 1976. 224 с.
- [3] *Кизель В.А.* Отражение света. М.: Наука, 1973. 352 с.
- [4] *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970. 856 с.
- [5] *Строганов В.И., Самарин В.И.* Полное внутреннее отражение необыкновенных лучей // Кристаллография. 1995. Т. 20. № 3. С. 652–653.
- [6] *Никогосян Д.Н., Гурздян Г.Г.* Кристаллы для нелинейной оптики // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 8. С. 1529–1541.