

15

Поляризационный метод определения ориентации оптической оси Z-срезов одноосных кристаллов

© В.Д. Паранин

Самарский государственный аэрокосмический университет
им. академика С.П. Королева (национальный исследовательский
университет)
E-mail: vparanin@mail.ru

Поступило в Редакцию 8 января 2016 г.

Предложен поляризационный метод для определения ориентации оптической оси одноосного кристалла Z-среза. На примере ниобата лития толщиной $514\ \mu\text{m}$ показана применимость метода для контроля углов отклонения оптической оси от нормали к поверхности кристалла $\sim 0.01^\circ$. Рассмотрены особенности практической реализации заявленного метода и пути повышения его точности и быстродействия.

Одноосные кристаллы применяются для изготовления фазовых пластин [1], электрооптических устройств [2], преобразователей лазерных пучков высоких порядков [3,4]. Для исследования кристаллов наиболее часто применяются поляризационные оптические методы [5,6]. Они просты в реализации и позволяют контролировать двулучепреломление и оптическую разность хода [5,6], однородность [7,8], толщину кристаллов [9]. В недавней публикации [9] рассмотрено поляризационное измерение толщины Z-среза ниобата лития методом поворота кристалла. Было указано на высокую точность метода, достаточную для определения угловой ориентации оптической оси кристалла. Применяемый в настоящее время метод рентгеновской дифрактометрии определяет ориентацию оптических осей с погрешностью $0.08\text{--}0.17^\circ$. Однако разрешающая способность и точность современных моторизованных оптических установок позволяет контролировать углы с погрешностью $\sim 0.01^\circ$ и менее. При этом стоимость моторизованной оптомеханики и сопутствующих оптических элементов существенно ниже стоимости дифрактометра. Это позволяет применять и развивать

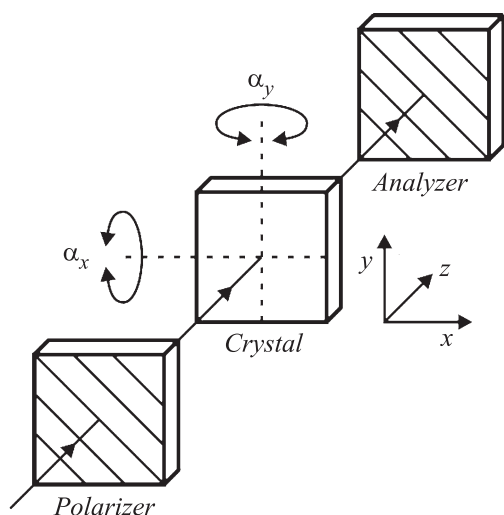


Рис. 1. Оптическая схема для определения ориентации оптической оси Z-среза одноосного кристалла.

поляризационные оптические методы для определения ориентации одноосных кристаллов.

Целью данной работы являлось исследование применимости метода поворота [9] для определения углового положения оптической оси Z-срезов одноосных кристаллов, выполненных в виде полированных пластин.

Известно, что при падении параллельного пучка света на одноосный кристалл в общем случае происходит его разделение на обыкновенную и необыкновенную волны [1]. Каждая из этих волн распространяется со своей фазовой скоростью, определяемой обыкновенным и необыкновенным показателями преломления n_o , n_e , углом падения α и длиной волны λ . С помощью анализатора осуществляется интерференционное сложение этих волн на выходе кристалла. Для возбуждения и интерференционного сложения обыкновенной и необыкновенной волны в кристалле подходит оптическая схема, изображенная на рис. 1. Поляризатор и анализатор установлены с кристаллом в диагональное положение для достижения наибольшей глубины модуляции выходной

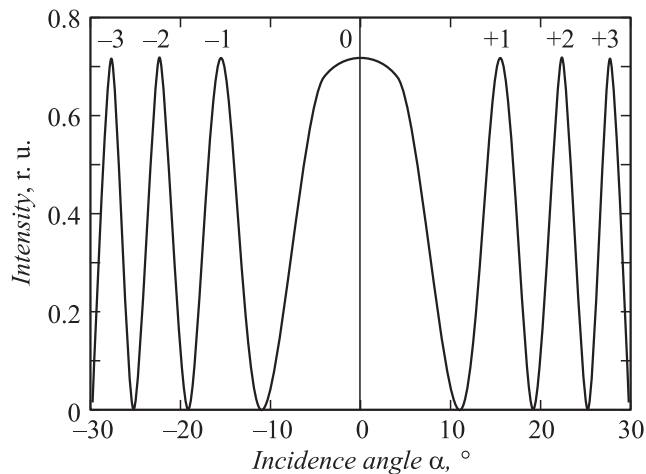


Рис. 2. Расчетная зависимость пропускания $I_{out}(\alpha)$ системы „поляризатор — кристалл Z-среза — анализатор“ с азимутальными углами $\gamma_1 = 45^\circ$, $\gamma_2 = 0^\circ$, $\gamma_3 = 45^\circ$.

оптической мощности $I_{out}(\alpha)$. Направление оптической оси кристалла совпадает с координатной осью z на рис. 1.

При повороте кристалла Z-среза, помещенного между поляризатором и анализатором, будет наблюдаться осциллирующая зависимость мощности выходного излучения от угла падения $I_{out}(\alpha)$. Для расчета типовой зависимости $I_{out}(\alpha)$ используем теоретический аппарат работы [9], основанный на матрицах Джонса [1]. В качестве исходных данных зададим азимутальные углы поляризатора, кристалла и анализатора $\gamma_1 = 45^\circ$, $\gamma_2 = 0^\circ$, $\gamma_3 = 45^\circ$. Примем толщину Z-среза кристалла LiNbO_3 равной $h = 500 \mu\text{m}$, показатели преломления $n_o = 2.28634$, $n_e = 2.20267$ при $\lambda = 632.8 \text{ nm}$.

На рис. 2 приведена расчетная зависимость $I_{out}(\alpha)$. Она содержит максимумы и минимумы интенсивности, обусловленные синфазным и противофазным сложением обыкновенной и необыкновенной волны за анализатором. Цифрами на рис. 2 обозначены номера максимумов.

Экстремумы $I_{out}(\alpha)$ определяются свойствами кристалла и расположены симметрично относительно реальной ориентации оптической оси

по шкале углов падения α (или углов преломления β). Следовательно, по угловому положению максимумов этой зависимости можно вычислить угловую ориентацию α_c оптической оси относительно нормали к поверхности кристалла. При точной установке нулевого положения гониометра — держателя кристалла угол α_c будет определяться суммой характерных углов $\alpha_{-1} + \alpha_{+1}$, взятых с различным знаком. Однако на практике достичь идеальной установки кристалла перпендикулярно падающему излучению не удается. Этому препятствуют недостаточная жесткость и точность микрометрических винтов гониометра. Поэтому нулевое положение гониометра — держателя кристалла α_n необходимо измерять по локальному максимуму характеристики $I_{out}(\alpha)$ вблизи нулевого положения $\alpha = 0^\circ$. Этот максимум появляется вследствие сложения на фотоприемнике переотраженного в кристалле оптического излучения по интенсивности. Величина локального максимума для стекол и кристаллов составляет $\sim 0.1\%$, что достаточно для его надежной регистрации современными фотоприемниками.

Вид зависимости $I_{out}(\alpha)$ определяется условиями распространения излучения в кристалле. Поэтому для определения ориентации оптической оси необходимо перейти от характерных углов падения α_{-1} , α_{+1} , α_n к соответствующим углам преломления β_{-1} , β_{+1} , β_n . Угол отклонения оптической оси от нормали в исследуемой плоскости падения примет простой вид

$$\beta_c = \beta_{+1} + \beta_{-1} - \beta_n, \quad (1)$$

где углы β берутся со знаком, зависящим от углового квадранта.

Для экспериментального исследования использовались полированные кристаллы конгруэнтного ниобата лития Z-среза толщиной $514 \pm 2 \mu\text{m}$. Заявленная производителем погрешность ориентации Z-оси составляет не более 0.17° , непараллельность сторон — не более 0.02° . Определение ориентации оптической оси проводилось на автоматизированном спектральном эллипсометре J.A. Woollam V-VASE. Эллипсометр содержит два моторизованных поворотных столика, один из которых осуществляет поворот образца вокруг координатной оси y (рис. 1), а второй перемещает фотоприемник. Разрешение поворотных столиков составляет 0.005° , точность задания угла падения — 0.01° . В процессе измерения угол α изменялся в пределах $\pm 20^\circ$ с шагом 0.01° . Диаметр открытой диафрагмы фотоприемника составлял 2 mm, ширина спектра

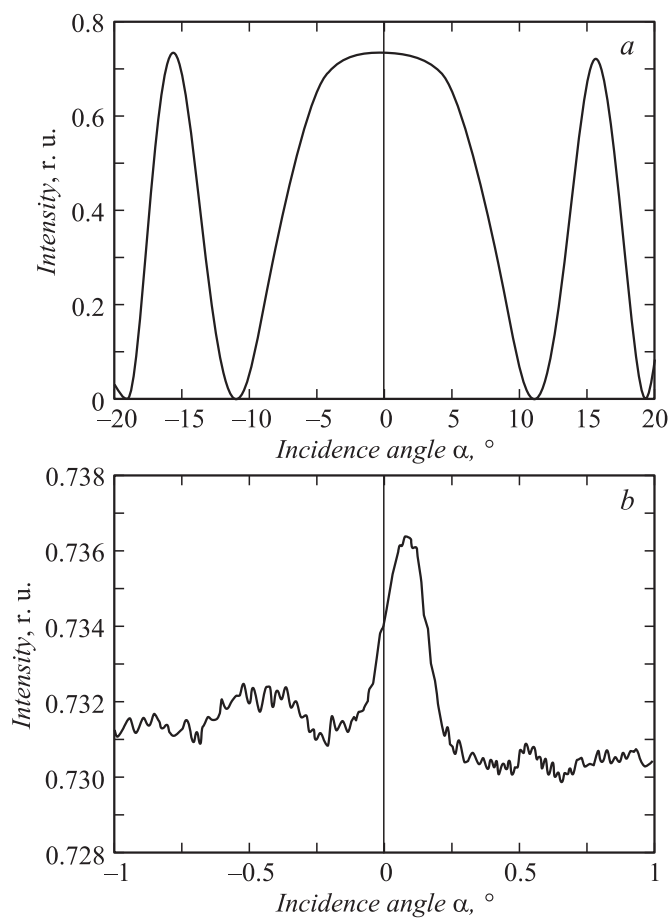


Рис. 3. Экспериментальная зависимость пропускания $I_{out}(\alpha)$ от угла падения α : *a* — вся характеристика, *b* — область нулевых углов, *c* — область -1 максимума, *d* — область $+1$ максимума.

монохроматора — 4.5 nm. На рис. 3 приведена экспериментально измеренная зависимость $I_{out}(\alpha)$, включая характерные участки в окрестности углов падения $\alpha_{-1}, \alpha_{+1}, \alpha_n$.

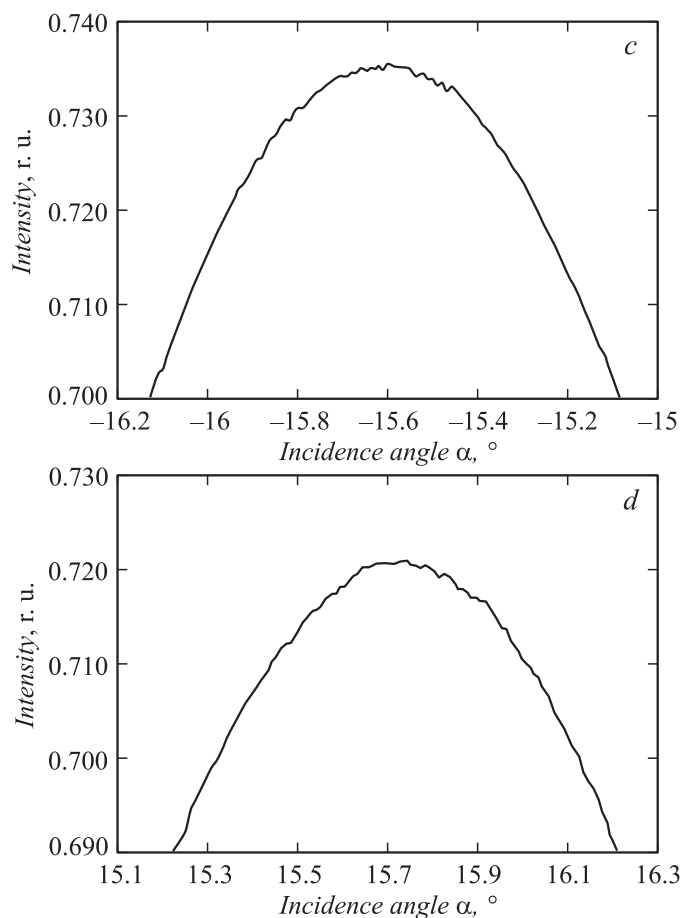


Рис. 3 (продолжение).

Измеренная характеристика имеет характерные максимумы и минимумы, обусловленные интерференцией обыкновенной и необыкновенной волны после анализатора. Асимметрия зависимости на рис. 3, *a* в окрестности $\pm 20^{\circ}$ обусловлена конструкцией гониометра, который частично перекрывает падающее излучение при углах около -20° . Несовпадение интенсивностей -1 и $+1$ максимумов на рис. 3, *c* и *d*

вызвано прогревом источника излучения и фотоприемника, обусловливающим медленный дрейф регистрируемой мощности, около 1%/h. На рис. 3, *b* присутствует локальный максимум, обусловленный сложением переотраженного в кристалле излучения. Как показали исследования, угловое положение локального максимума надежно определяется при диаметре открытой ирисовой диафрагмы фотоприемника 1–3 mm. Максимумы интерференции, показанные на рис. 3, *c* и *d* имеют достаточно выраженную форму для определения углов α_{-1} и α_{+1} . По результатам исследования 4 кристаллов ниобата лития Z-среза были определены углы отклонения оптической оси от нормали к поверхности β_c : $+0.0249^\circ$, -0.0693° , $+0.0337^\circ$, -0.1042° . Полученные экспериментальные данные соответствуют характеристикам кристаллов, заявленным предприятием-производителем. Это позволяет применять и развивать поляризационные оптические методы для контроля ориентации плоскопараллельных кристаллических пластин.

Рассмотрим пути улучшения точности и быстродействия предложенного метода.

Метод измерения является амплитудным, поскольку основан на поиске экстремумов характеристики $I_{out}(\alpha)$. Поэтому предпочтительнее использовать максимумы этой зависимости, так как в них достигается максимальное отношение сигнал/шум. Причем ближайšie к нулевому положению углы α_{-1} , α_{+1} имеют минимальные значения из всех пригодных для измерения углов, что обеспечивает наименьшее время сканирования углового диапазона. Однако и при этом условии время измерения в диапазоне углов $\pm 20^\circ$ с шагом 0.01° составляло около 1.5 h. Это обусловлено достаточно длительной экспозицией, необходимой для обеспечения отношения сигнал/шум. Для большего сокращения времени измерения необходимо исследовать только узкие угловые диапазоны в окрестности характерных углов α_{-1} , α_{+1} , α_n .

На углах $\alpha_{\pm 1}$ (около $\pm 15.6^\circ$) вследствие угловой зависимости показателя преломления n_x кристалл представляет собой фазовую пластину низкого порядка. Такая фазовая пластина, помещенная между поляризатором и анализатором, характеризуется низкой спектральной избирательностью (измеренная полуширина спектра FWHM = 230 nm) на длине волны составляет 632.8 nm. Это позволяет увеличить ширину спектра зондирующего излучения до максимального значения, определяемого монохроматором спектрального эллипсометра, чтобы улучшить отношение сигнал/шум.

Отметим, что углы преломления $\beta_{\pm 1}$, на которых выполняется условие синфазности обыкновенного и необыкновенного лучей, равны

$$\frac{h(n_o - n_x(\beta_{\pm 1}))}{\cos(\beta_{\pm 1})} = \pm\lambda, \quad (2)$$

где h — толщина кристалла, m ; n_o — обыкновенный показатель преломления; $n_x(\beta)$ — показатель преломления кристалла Z -среза для x -поляризованного излучения. Из формулы (2) следует, что уменьшение длины волны зондирующего излучения снижает углы $\beta_{\pm 1}$ и $\alpha_{\pm 1}$, уменьшая время измерения. Этому также способствует увеличение двулучепреломления, наблюдаемое у кристалла ниобата лития в коротковолновом диапазоне. Так, при длинах волн 441.6 и 532 nm углы падения $\alpha_{\pm 1}$ составили около $\pm 12.6^\circ$ и $\pm 14.2^\circ$ соответственно.

Недостатком рассмотренного метода является определение ориентации оптической оси только в одной плоскости. Для решения этой проблемы необходимо использовать поворотную платформу с малым качанием (не более 0.01°). Привлекательным является применение ПЗС-линейки или матрицы высокого разрешения, имеющей не менее 3072 элементов по каждой стороне и чувствительность не менее 14 bit. В последнем случае возможно существенное сокращение времени измерения за счет одновременной регистрации всего углового диапазона и программной обработки коноскопического изображения.

Таким образом, рассмотрен поляризационный метод определения ориентации оптической оси Z -срезов одноосных кристаллов. Метод прост в реализации, основан на использовании типовых оптических элементов и моторизованных оптомеханических устройств. Погрешность установки нуля исключается использованием максимума интенсивности, возникающего при сложении переотраженного в кристалле излучения.

Экспериментальная апробация метода с использованием Z -срезов кристаллов ниобата лития толщиной $514 \pm 2 \mu m$ показала соответствие разориентации оптической оси пределам, заявленным изготовителем. Анализ метода выявил необходимость сокращения времени измерения для реализации экспресс-диагностики кристаллов. С этой целью предложено использование коротковолнового диапазона, сканирование только трех характерных участков характеристики, использование ПЗС-линейки вместо подвижного фотоприемника.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

- [1] *Ярив А., Юх П.* Оптические волны в кристаллах / Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 616 с.
- [2] *Кузьминов Ю.С.* Электрооптический и нелинейно-оптический кристалл ниобата лития. М.: Наука, 1987. 264 с.
- [3] *Khonina S.N., Kharitonov S.I.* // J. Mod. Opt. 2015. V. 62. N 2. P. 125–134.
- [4] *Khonina S.N., Karpeev S.V., Alferov S.V., Soifer V.A.* // J. Opt. Soc. Am. 2015. V. 17. P. 065001-11.
- [5] *Шубников А.В.* Основы оптической кристаллографии. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 206 с.
- [6] *Четвериков С.Д.* Методика кристаллооптического исследования шлифов. М.: Госгеолгиздат, 1949. 154 с.
- [7] *Паранин В.Д.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 11. С. 146–150.
- [8] *Паранин В.Д.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 12. С. 132–136
- [9] *Паранин В.Д.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. В. 12. С. 120–123.