

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА ШОЛЬЦА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИНОК

А. В. ПОПОВА¹, П. С. ГОНЧАРОВА¹, Н. В. СИДОРОВ², М. Н. ПАЛАТНИКОВ²,
А. В. СЮЙ^{1,3}, А. И. ЛИВАШВИЛИ¹, В. В. КРИШТОП¹

¹Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 680021, Хабаровск, Россия
E-mail: krishtop@list.ru

²Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева
Кольского научного центра РАН, 184209, Апатиты, Россия

³Тихоокеанский государственный университет, 680035, Хабаровск, Россия

Предложен метод повышения точности определения разницы толщин двух анизотропных пластин с использованием интерференционного фильтра Шольца. Через скрещенный фильтр Шольца пропускается монохроматическое излучение, которое после прохождения фильтра имеет периодическое распределение интенсивности излучения по длинам волн. Для ориентировочной оценки предложено использовать расстояние между соседними минимумами излучения, а для уточнения полученных значений — исследовать параметры поляризации излучения. Этот метод позволяет определять толщину кристаллической пластинки с точностью до 0,1 мкм.

Ключевые слова: интерференционно-поляризационный фильтр, эффективная толщина, поляризация, эллисометрия, разность фаз

Кристаллические пластинки, изготовленные из одноосных кристаллов, являются предметом исследования сами по себе, например при изучении оптической активности и формирования особенных состояний оптического поля [1—3]. Кроме того, кристаллические пластинки широко применяются во многих областях оптических исследований, например, для преобразования излучения по частоте, для изготовления электрооптических модуляторов света, а также для изготовления фазовых пластинок [4—7]. Строгий контроль качества кристаллических пластинок является необходимым условием при их изготовлении.

Фильтр Шольца представляет собой набор кристаллических пластинок, помещенных между скрещенными поляризаторами. По интенсивности монохроматического излучения, проходящего через скрещенный фильтр Шольца, можно определить отклонение от заданной толщины анизотропных кристаллов. Это обстоятельство можно использовать для сравнения полуволновых или четвертьволновых пластинок с эталоном с высокой точностью. При использовании монохроматического источника спектральный состав излучения на выходе определяется взаимной ориентацией оптических элементов и их размерами. Изменение разности фаз ортогональных компонентов светового поля изменяет состояние поляризации световой волны.

При прохождении широкополосного излучения через двухступенчатый фильтр Шольца результирующий спектр примет периодический характер (рис. 1). В этом случае при фиксированной толщине ортогональных анизотропных пластин максимумы и минимумы прошедшего излучения будут наблюдаться на различных длинах волн. Замеряя спектральный шаг между соседними экстремумами, можно определить разницу (Δd) геометрических размеров двух исследуемых пластин. Схема скрещенного фильтра Шольца позволяет исследовать эффективную толщину системы анизотропных пластин. При этом если исследуемые кристаллы расположены параллельно, то эффективная толщина определяется суммой толщин двух кристаллов, а если кристаллы ортогональны, то их разностью [8—10].

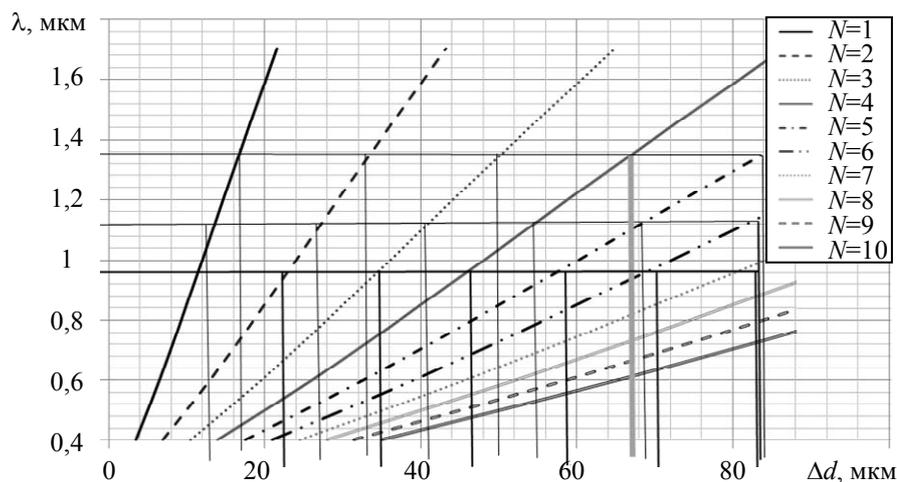


Рис. 1

Каждой длине волны излучения с минимальной интенсивностью соответствуют несколько возможных эффективных толщин кристаллов; одной эффективной толщине кристалла соответствует несколько длин волн излучения с минимальной интенсивностью. Таким образом, определив длины волн соседних минимумов, можно рассчитать порядок минимума, а соответственно эффективную толщину кристалла:

$$N = \frac{\frac{\lambda_i}{\Delta n(\lambda_i)}}{\frac{\lambda_{i-1}}{\Delta n(\lambda_{i-1})} - \frac{\lambda_i}{\Delta n(\lambda_i)}}$$

где N — порядок минимума; λ_i, λ_{i-1} — соседние длины волн минимальной интенсивностью; $\Delta n(\lambda_i)$ — величина двулучепреломления, т.е. разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей на i -й длине волны.

При расчетах значение N округляется до ближайшего меньшего целого.

Для определения эффективной толщины кристалла необходимо полученное значение N умножить на минимальную эффективную толщину кристалла, соответствующую первому максимуму для i -й длины волны с учетом дисперсии показателей преломления материала. Графически первый минимум соответствует линии $N=1$ (см. рис. 1):

$$\Delta d = Nd_{\min}$$

Согласно рис. 1, разные длины волн минимальной интенсивностью соответствуют нескольким эффективным толщинам кристаллов, которые, в свою очередь, соответствуют условиям минимума разных порядков.

Измерения с использованием спектрографа позволяют определить разницу толщин исследуемых кристаллов с ограниченной точностью. Графическим методом можно определить порядок интерференционного минимума. Тогда для более точного расчета эффективной толщины кристалла необходимо учитывать поправку δd :

$$\Delta d = Nd_{\min} + \delta d,$$

для определения которой требуется дополнительный анализ прошедшего излучения или проведение измерений с высокой точностью.

Одним из способов диагностики состояния поляризации и решения аддитивной задачи является использование вращающегося поляризатора. Если свет полностью поляризован, то с

помощью поворота анализатора достаточно просто измерить азимут поляризационного эллипса и угол эллиптичности без учета знака.

Соотношение и положение осей поляризационного эллипса принято характеризовать двумя эллипсометрическими параметрами: первый параметр — угол ψ между большой полуосью эллипса и положительным направлением оси абсцисс (азимут поляризации), второй параметр — угол χ между хордой АВ и большой полуосью эллипса (угол эллиптичности).

Для определения уточняющей поправки δd были проведены исследования с фиксированной длиной волны проходящего излучения гелий-неонового лазера, $\lambda=0,6328$ мкм, приемником излучения служил измеритель фототока СФ2-1.

В эксперименте (рис. 2, а) два ортогонально расположенных кристалла K_1 и K_2 помещены между скрещенными поляроидами Π_1 и Π_2 фильтра Шольца под углом 45° к осям пропускания. В первом кристалле исходный луч распадается на o - и e - лучи. Во втором кристалле обыкновенный луч становится необыкновенным, а необыкновенный, из-за взаимной ортогональной ориентации кристаллов, наоборот, — обыкновенным. В результате разность фаз между лучами будет определяться эффективной толщиной кристаллов и величиной двулучепреломления, а поляризация вышедшего излучения приобретет эллиптический характер:

$$\Delta\varphi + 2\pi k = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \Delta d .$$

Ориентация элементов в ходе эксперимента показана на рис. 2, б).

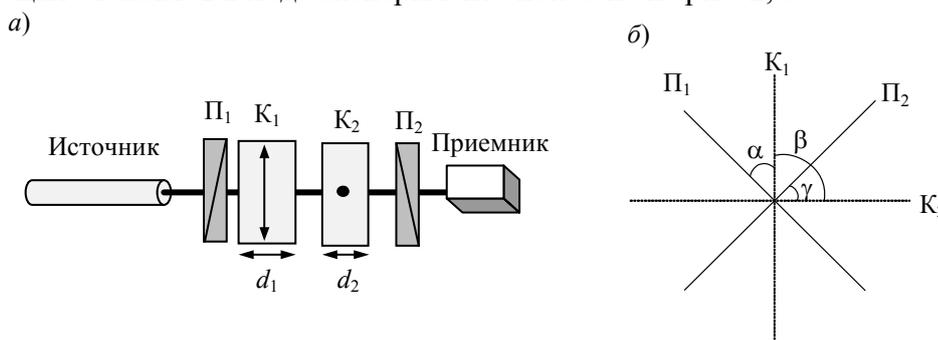


Рис. 2

Эксперимент состоял в измерении интенсивности прошедшего излучения в зависимости от положения анализатора. Исследования проводились для пары анизотропных кристаллов ниобата лития, изготовленных в Институте химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева.

Исследуемые кристаллы представляют собой плоскопараллельные пластины толщиной $d_1=930$ мкм и $d_2=845$ мкм, измеренной микрометром с точностью до 5 мкм. В процессе эксперимента кристаллические пластины располагались в разном порядке, а их ориентация изменялась на $\pm 45^\circ$ относительно оси пропускания поляризатора. В результате кристаллы располагались таким образом, чтобы эффективная толщина анизотропной среды равнялась разности толщин $\Delta d=85$ мкм. Такая эффективная толщина соответствует минимальной интенсивности на длинах волн 1,38, 1,15, 1 мкм и др.

Эллипсометрические исследования в видимой области позволяют анализировать параметры проходящего излучения. На входе приемника состояние поляризации характеризуется поляризационной индикатрисой — угловой зависимостью интенсивности излучения. На рис. 3 приведена поляризационная индикатриса в полярных координатах для различного расположения кристаллов, т.е. зависимость интенсивности J от угла ψ ; символами „-“ и „/“ обозначается ориентация главного сечения каждого кристалла, т.е. 1-2/ означает, что у первого кристалла главное сечение расположено горизонтально, а у второго — вертикально и т.д.

В соответствии с методикой эллипсометрических измерений необходимо определить угол, при котором интенсивность излучения максимальна. Этот угол равен азимуту

поляризационного эллипса. Исходя из вида поляризационной индикатрисы можно определить угол поляризации. По результатам эксперимента $\delta d = 1,086 \pm 0,16$ мкм.

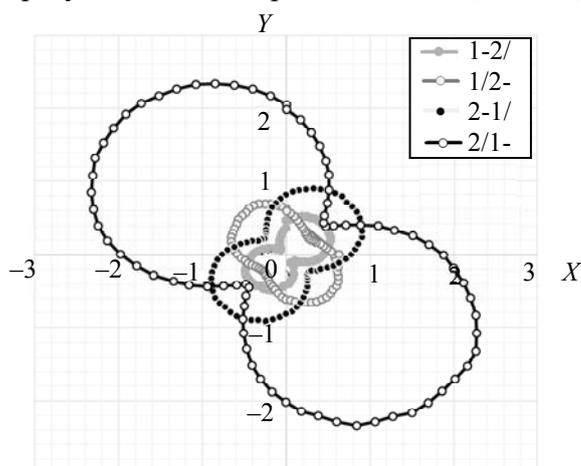


Рис. 3

Для длины волны $\lambda=0,6328$ мкм можно определить минимальную толщину кристалла, при которой будет фиксироваться минимум интенсивности прошедшего излучения:

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{\Delta n} = \frac{0,6328}{0,0903} = 7,007 \text{ мкм},$$

тогда порядок интерференционного минимума

$$N = \frac{\Delta d}{d_{\min}} = \frac{85}{7,007} = 12,31 \approx 12.$$

По параметрам поляризационной индикатрисы можно определить также угол эллиптичности. При одинаковых амплитудах напряженности поля обыкновенной и необыкновенной волн справедливо соотношение

$$\chi = \frac{1}{2} \varphi.$$

Исходя из физического смысла угла эллиптичности и разности фаз можно получить расчетную формулу:

$$\arctg \sqrt{\frac{I_{\min}}{I_{\max}}} = \frac{1}{2} \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \delta d, \quad \delta d = \frac{\lambda}{\pi \Delta n} \arctg \sqrt{\frac{I_{\min}}{I_{\max}}}.$$

По результатам экспериментов и расчетов эффективная толщина кристаллов

$$\Delta d = N d_{\min} + \delta d, \quad \Delta d = 12 \cdot 7,007 + 1,13 \approx 85,2 \text{ мкм}.$$

В результате поляризационных исследований получена уточненная эффективная толщина кристаллов, т.е. определена разница геометрических толщин первого и второго кристаллов.

Предложенный метод повышения точности измерения толщины анизотропных пластин с использованием интерференционного фильтра Шольца позволяет не только сравнить исследуемый кристалл с эталонным, но и определить линейные размеры кристаллических элементов. Для ориентировочной оценки предложено использовать спектроаналитический метод, а для уточнения полученных значений — параметры поляризации излучения. Этот метод позволяет определять толщину кристаллической пластинки с точностью до 0,1 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pikoul O. Y.* Use of $\lambda/4$ phase plate in laser conoscopic method // *Optik*. 2018. Vol. 161. P. 146—150.
2. *Карпеев С. В., Паранин В. Д., Хонина С. Н.* Формирование неоднородно поляризованных вихревых пучков Бесселя на основе интерференционного поляризатора // *Квантовая электроника*. 2018. Т. 48, № 6. С. 521—526.

3. Максименко В. А. и др. Влияние расходимости пучка накачки на форму индикатрисы фотоиндуцированного рассеяния света в кристаллах ниобата лития // Оптич. журн. 2018. Т. 85, № 7. С. 11—16.
4. Gruber M. et al. Atomistic origins of the differences in anisotropic fracture behaviour of LiTaO₃ and LiNbO₃ single crystals // Acta Materialia. 2018. Vol. 150. P. 373—380.
5. Wang C. et al. Nanophotonic lithium niobate electro-optic modulators // Opt. Express. 2018. Vol. 26, N 2. P. 1547—1555.
6. Лопатина П. С. и др. Электрооптическая модуляция широкополосного излучения с гауссовым распределением амплитуды по спектру // Оптика и спектроскопия. 2012. Т. 113, № 2. С. 219—219.
7. Лопатина П. С., Криштон В. В. Электрооптический модулятор для волоконно-оптических линий связи // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 12. С. 67—71.
8. Сюй А. В., Крайцова Н. А., Строганов В. И., Криштон В. В. Параметрический метод построения эллипса поляризации излучения // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 10. С. 65—68.
9. Syuy A. et al. Conformity check of thickness to the crystal plate // J. of Spectroscopy. 2013. Vol. 2013.
10. Goncharova P. S., Syuy A. V., Krishtop V. V. Electro-optic modulation of broadband radiation for the infrared spectral range // Proc. SPIE 10176, Asia-Pacific Conf. on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics. 2016. DOI:10.1117/12.2268240.

Сведения об авторах

- Алена Валентиновна Попова** — Дальневосточный государственный университет путей сообщения, кафедра автоматике, телемеханики и связи; ст. преподаватель; E-mail: raveinp@mail.ru
- Полина Сергеевна Гончарова** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Дальневосточный государственный университет путей сообщения, кафедра физики и теоретической механики; E-mail: p_lopatina@mail.ru
- Николай Васильевич Сидоров** — д-р физ.-мат. наук, профессор; ИХТРЭМС КНЦ РАН, лаборатория материалов электронной техники, сектор колебательной спектроскопии и структурных исследований; зав. сектором; E-mail: sidorov@chemy.kolasc.net.ru
- Михаил Николаевич Палатников** — д-р техн. наук; ИХТРЭМС КНЦ РАН, лаборатория материалов электронной техники, сектор твердотельных материалов акусто- и оптоэлектроники; зав. сектором; E-mail: palat_mn@chemy.kolasc.net.ru
- Александр Вячеславович Сюй** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Дальневосточный государственный университет путей сообщения, кафедра физики и теоретической механики; зав. кафедрой, профессор; Тихоокеанский государственный университет; E-mail: alsyuy271@gmail.com
- Абрам Ильич Ливаишвили** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Дальневосточный государственный университет путей сообщения, кафедра высшей математики; E-mail: livbru@mail.ru
- Виктор Владимирович Криштон** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Дальневосточный государственный университет путей сообщения, кафедра физики и теоретической механики; E-mail: krishtop@list.ru

Поступила в редакцию
18.10.18 г.

Ссылка для цитирования: Попова А. В., Гончарова П. С., Сидоров Н. В., Палатников М. Н., Сюй А. В., Ливаишвили А. И., Криштон В. В. Использование оптического фильтра Шольца для определения толщины кристаллических пластинок // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 3. С. 285—290.

USING THE SOLC OPTICAL FILTER FOR DETERMINATION OF CRYSTALLINE PLATES THICKNESS

A.V. Popova¹, P. S. Goncharova¹, N. V. Sidorov², M. N. Palatnikov²,
A. V. Syuy^{1,3}, A. I. Livashvili¹, V. V. Krishtop¹

¹Far Eastern State Transport University, 680021, Khabarovsk, Russia
E-mail: krishtop@list.ru

²I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials,
Kola Science Center of the RAS, 184209, Apatity, Russia

³Pacific National University, 680035, Khabarovsk, Russia

A new method for increasing the accuracy of measuring the difference in the thicknesses of two anisotropic plates using the Solc interference filter is proposed. Non-monochromatic radiation, after passing through the crossed Solc filter, has a periodic distribution of radiation intensity over wavelengths. The distance between neighboring radiation minima is proposed to be used for a rough estimate, and the study of polarization parameters of the radiation makes it possible to refine the obtained data. This method allows to determine a crystal plate thickness with an accuracy of 0.1 μm.

Keywords: interference polarization filter, effective thickness, polarization, ellipsometry, phase difference

REFERENCES

1. Pikoul O.Y. *Optik*, 2018, vol. 161, pp. 146–150.
2. Karpeev S.V., Parani V.D., Khonina S.N. *Quantum Electronics*, 2018, no. 6(48), pp. 521–526.
3. Maksimenko V.A., Krishtop V.V., Surits V.V., Povarov N.D. *Journal of Optical Technology*, 2018, no. 7(85), pp. 383–387.
4. Gruber M. et al. *Acta Materialia*, 2018, vol. 150, pp. 373–380.
5. Wang C. et al. *Optics express*, 2018, no. 2(26), pp. 1547–1555.
6. Lopatina P.S., Krishtop V.V., Stroganov V.I., Syui A.V., Maksimenko V.A., Tolstov E.V., Litvinova M.N. *Optics And Spectroscopy*, 2012, no. 2(113), pp. 194–196.
7. Lopatina P.S., Krishtop V.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2009, no. 12(52), pp. 62–67. (in Russ.)
8. Syuy A.V. et al. *Journal of Instrument Engineering*, 2008, no. 10(51), pp. 58–65. (in Russ.)
9. Syuy A. et al. *Journal of Spectroscopy*, 2013, vol. 2013.
10. Goncharova P.S., Syuy A.V., Krishtop V.V. *Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics*, December 14, 2016, Proc. SPIE, 2016, vol. 10176. DOI: 10.1117/12.2268240.

Data on authors

- Alena V. Popova** — Far Eastern State Transport University, Department of Automatics, Telemechanics and Communication; Senior Lecturer; E-mail: paveinp@mail.ru
- Polina S. Goncharova** — PhD, Associate Professor; Far Eastern State Transport University, Department of Physics and Theoretical Mechanics; E-mail: p_lopatina@mail.ru
- Nikolay V. Sidorov** — Dr. Sci., Professor; I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials, Kola Science Center of the RAS, Laboratory of Materials for Electronic Engineering, Sector of Vibrational Spectroscopy and Structural Studies; Head of the Sector; E-mail: sidorov@chemy.kolasc.net.ru
- Mikhail N. Palatnikov** — Dr. Sci.; I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials, Kola Science Center of the RAS, Laboratory of Materials for Electronic Engineering, Sector of Solid-State Materials of Acoustic and Optoelectronics; Head of the Sector; E-mail: palat_mn@chemy.kolasc.net.ru
- Alexander V. Syuy** — PhD, Associate Professor; Far Eastern State Transport University, Department of Physics and Theoretical Mechanics; Head of the Department, Professor; Pacific National University; E-mail: alsyuy271@gmail.com
- Abram I. Livashvili** — PhD, Associate Professor; Far Eastern State Transport University, Department of Higher Mathematics; E-mail: livbru@mail.ru
- Victor V. Krishtop** — Dr. Sci., Professor; Far Eastern State Transport University, Department of Physics and Theoretical Mechanics; E-mail: krishtop@list.ru

For citation: Popova A.V., Goncharova P. S., Sidorov N. V., Palatnikov M. N., Syuy A. V., Livashvili A. I., Krishtop V. V. Using the Solc optical filter for determination of crystalline plates thickness. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 3. P. 285–290 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-3-285-290