

Определение удельного угла вращения плоскости поляризации в гиротропных кристаллах средней категории спектрофотометрическим методом

© 2023 г. Е. В. Забелина¹✉, Р. Шахин¹, Н. С. Козлова¹, В. М. Касимова¹

¹ *Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: zabelina.ev@misis.ru

Аннотация. Большое количество современных функциональных монокристаллов средней категории относится к гиротропным средам. В таких кристаллах при распространении света вдоль оптической оси наблюдается вращение его плоскости поляризации. Для получения дисперсионных зависимостей угла вращения плоскости поляризации света использован спектрофотометрический метод. В основе этого метода лежит измерение интенсивности света, проходящего через систему поляризатор—кристалл—анализатор. Кристалл представляет собой полированную плоскопараллельную пластину одноосного гиротропного кристалла, вырезанную перпендикулярно к оптической оси. Измерения проведены на UV–Vis–NIR спектрофотометре Cary–5000 в диапазоне длин волн 200—1200 нм с использованием поляризаторов — призм Глана—Тейлора. В качестве образцов использованы полированные плоскопараллельные пластины известных кристаллов SiO₂ и α–LiIO₃. Полученные дисперсионные зависимости спектральных коэффициентов пропускания имели периодический характер. По экстремумам на этих зависимостях рассчитаны дискретные величины удельных углов вращения плоскости поляризации света. Эти дискретные величины могут быть аппроксимированы формулами Друде, Чандрасекхара и Вышина в зависимости от того, чем определяется природа вращательной способности плоскости поляризации света в каждом конкретном материале. Для исследованных кристаллов построены зависимости модифицированной формулы Друде вида $1/\rho = f(\lambda^2)$, которые должны иметь линейный характер в случае идеального кристалла. Полученные экспериментальные результаты хорошо соотносятся с имеющимися литературными данными. Преимуществами данного метода является оперативность, возможность получения дисперсионных зависимостей удельного угла вращения плоскости поляризации, оценка природы вращательной способности конкретных кристаллов и структурного совершенства исследуемых кристаллов.

Ключевые слова: монокристаллы, одноосные монокристаллы, оптическая ось, оптические свойства, оптическая анизотропия, вращение плоскости поляризации, спектрофотометрия

Благодарности: Исследования проводились при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания вузам FSME–2023–0003. Измерения проведены в МУИЛ Полупроводниковых материалов и диэлектриков «Монокристаллы и заготовки на их основе» (ИЛМЗ) НИТУ МИСИС.

Для цитирования: Забелина Е.В., Шахин Р., Козлова Н.С., Касимова В.М. Определение удельного угла вращения плоскости поляризации в гиротропных кристаллах средней категории спектрофотометрическим методом. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2023; 26(3): 181—189. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202307.543>

Determination of the polarization plane specific rotation in gyrotropic crystals of the middle category by the spectrophotometric method

E. V. Zabelina¹✉, R. Shahin¹, N. S. Kozlova¹, V. M. Kasimova¹

¹ National University of Science and Technology “MISIS”,
4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation

✉ Corresponding author: zabelina.ev@misis.ru

Abstract. A large number of modern functional single crystals of the middle category belong to gyrotropic media. In these crystals, when light propagates along the optical axis, rotation of the plane of its polarization is observed. In this work a spectrophotometric method was used to obtain the dispersion dependences of the rotation angle of the polarization plane. This method is based on measuring the intensity of light passing through the polarizer–crystal–analyzer system, the crystal is a polished plane–parallel plate of a uniaxial gyrotropic crystal cut perpendicular to the optical axis. Measurements were carried out on a UV–Vis–NIR spectrophotometer Cary–5000 in the wavelength range of 200–1200 nm using polarizers — Glan–Taylor prisms. Polished plane–parallel plates of known SiO₂ and α–LiIO₃ crystals were used as samples. The obtained dispersion dependences of the spectral transmission coefficients are oscillating. Discrete values of the specific angles of rotation of the plane of polarization of light are calculated from the extremes on these dependencies. These discrete values can be approximated by the formulas Drude, Chandrasekhar and Vyshina, depending on what determines the nature of the rotational ability of the plane of polarization of light in each particular material. For the studied crystals, dependences of the modified Drude formula of the form $1/\rho = f(\lambda^2)$ are plotted, these dependences should have a linear character in the case of an ideal crystal. The obtained experimental results correlate well with the available literature data. The advantages of this method are efficiency, the possibility of obtaining dispersion dependences of the specific rotation angle of the polarization plane, the need for a single sample, the possibility of assessing the nature of the rotational ability of specific crystals, the possibility of evaluating the structural perfection of the studied crystals.

Keywords: single crystals, uniaxial single crystals, optical axis, optical properties, optical anisotropy, polarization plane rotation, spectrophotometry

Acknowledgments: The experiments were carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of Russia as part of the state assignment for universities FSME–2023–0003 at the Inter–University Test Laboratory for semiconductors and dielectrics “Single Crystals and Stock on their Base” of the National University of Science and Technology “MISIS”.

For citation: Zabelina E.V., Shahin R., Kozlova N.S., Kasimova V.M. Determination of the polarization plane specific rotation in gyrotropic crystals of the middle category by the spectrophotometric method. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2023; 26(3): 181–189. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202307.543>

Введение

Гиротропные кристаллы представляют собой анизотропные среды, свойства которых описываются несимметричным тензором диэлектрической проницаемости [1]. Возможность проявления гиротропии в кристаллах определяется их симметрией. В случае кристаллов средней категории, харак-

теризующихся единственной оптической осью, к гиротропным относят кристаллы с симметриями: 3, 4, 6, 32, 422, 622, 3m, 4mm, 6mm, $\bar{4}$, $\bar{4}2m$ [2]. Такими симметриями характеризуется большое количество функциональных материалов электронной техники — пьезоэлектрических, нелинейно–оптических, электрооптических и акустооптических кристаллов [3–12].

© 2023 National University of Science and Technology “MISIS”.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

В гиротропных кристаллах в каждом направлении могут распространяться две световые волны, имеющие правую и левую круговую (циркулярную) поляризацию и разные фазовые скорости [1]. Это приводит к возникновению эллиптического двулучепреломления и эллиптического дихроизма, частным случаем которого является вращение плоскости поляризации [13].

При распространении плоскополяризованного луча света вдоль оптической оси гиротропного кристалла наблюдается вращение плоскости его поляризации. При отклонении луча света от оптической оси вращательная способность кристалла резко падает, при этом одновременно существенно возрастает величина двулучепреломления и дихроизма [2, 14, 15]. По мере роста отклонения луча света от оптической оси круговая поляризация сменяется эллиптической, причем эллипсы быстро сужаются, и оба луча начинают приближаться к плоскополяризованным [14].

Гиротропия среды может быть или естественной, или созданной искусственно при наложении внешних воздействий [1].

Естественная гиротропия обуславливается как свойствами объектов, формирующих кристалл (молекулы, ионные группировки, комплексы), так и структурными эффектами, связанными с анизотропией расположения этих объектов в кристалле [15, 16].

В общем случае, оптические свойства кристаллов определяются их симметрией, составом и строением. На практике существенное влияние на оптические свойства оказывают неоднородности

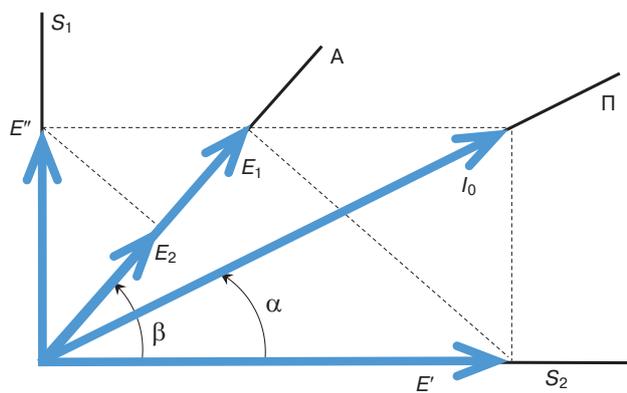


Рис. 1. Схема распространения луча света через систему поляризатор–кристалл–анализатор: А — плоскость колебаний луча света, прошедшего через анализатор; П — плоскость колебаний луча света, прошедшего через поляризатор; S_1 , S_2 — взаимно перпендикулярные плоскости колебаний двух лучей света, распространяющихся в кристаллической пластине [17, 18]

Fig. 1. Scheme of propagation of a light beam through the polarizer–crystal–analyzer system: A is the plane of oscillation of the light beam passing through the analyzer; P is the plane of oscillation of the beam of light that has passed through the polarizer; S_1 , S_2 are mutually perpendicular planes of oscillations of two beams of light propagating in a crystalline plate [17, 18]

и дефекты, имеющиеся в кристаллах. Исследования проявлений гиротропии в кристаллах важно как для полной характеристики свойств кристаллов, так и для установления их структурного совершенства и определения природы дефектных центров.

Как правило, используются прямые измерения удельного угла вращения плоскости поляризации ρ . Для этого образец одноосного гиротропного кристалла, вырезанного перпендикулярно к оптической оси, помещают в оптическую систему, основными компонентами которой являются источник света с известной длиной волны λ , два поляризатора и фотоприемник. При скрещенном положении поляризаторов в случае гиротропного кристалла наблюдается просветление. Далее необходимо вращать поляризатор до тех пор, пока не будет наблюдаться полное погасание света (вращение на угол полного погасания света ϕ). Значение удельного угла вращения плоскости поляризации ρ рассчитывают путем деления полученного угла ϕ на толщину образца d [17]:

$$\rho = \phi/d. \quad (1)$$

При проведении таких измерений необходимо иметь несколько образцов разной толщины, так как плоскость поляризации может поворачиваться более чем на 180° .

На практике требуются быстрые высоконадежные измерения дисперсионных зависимостей удельного угла вращения плоскости поляризации света в одноосных гиротропных кристаллах с использованием минимального количества образцов.

Ниже представлен спектрофотометрический метод экспериментального исследования явления вращения плоскости поляризации в гиротропных кристаллах средней категории и показаны возможности установления связей между результатами полученных экспериментальных исследований и особенностями структуры кристаллов.

Методика эксперимента

В основе методики эксперимента лежит измерение интенсивности света, прошедшего через систему, состоящую из двух поляризаторов (поляризатор и анализатор) и полированной плоскопараллельной пластины кристалла, помещенной между ними: система поляризатор—кристалл—анализатор.

Математическое описание изменения интенсивности света, распространяющегося через такую систему известно и описано в литературе [15, 17, 18].

В общем случае рассматривается прохождение света длиной λ через пластину негиротропного кристалла толщиной d , вырезанную в произволь-

ном направлении (рис. 1). Поглощение и рассеяние света не учитывается.

Луч света интенсивностью I_0 падает нормально к поверхности (см. рис. 1), проходит через поляризатор, кристаллическую пластину и анализатор. Из поляризатора луч света выйдет с колебаниями по прямой П. Попав в кристалл, этот плоско поляризованный луч разложится на два линейно поляризованных луча с колебаниями по взаимно перпендикулярным плоскостям S_1 и S_2 . Пройдя через анализатор в результате эти лучи будут обладать общей плоскостью колебаний А и некоторой разностью фаз δ , определяющейся длиной волны света, толщиной пластины и величиной двулучепреломления Δn в пластине в направлении распространения света:

$$\delta = \frac{\pi d}{\lambda} \Delta n. \quad (2)$$

Интенсивность света I , прошедшего через такую систему, описывается известной формулой [15, 17, 18]:

$$I = I_0 \cos(\beta - \alpha) - I_0 \sin(2\alpha) \sin(2\beta) \sin^2(\delta/2), \quad (3)$$

где α , β — углы между плоскостью колебаний S_2 одного из лучей света, распространяющихся в кристалле, и плоскостями П и А колебаний лучей света, прошедших через поляризатор и анализатор соответственно.

Если луч света распространяется вдоль оптической оси негиротропного кристалла, двулучепреломление отсутствует и интенсивность света, прошедшего через такую систему, определяется только взаимным положением поляризатора и анализатора:

$$I = I_0 \cos(\beta - \alpha). \quad (4)$$

В случае, когда линейно поляризованный свет распространяется вдоль оптической оси одноосного гиротропного кристалла, в нем будут распространяться две циркулярно поляризованные волны с равными амплитудами, противоположными направлениями обхода (левое и правое) и разными фазовыми скоростями [19]. Это приведет к тому, что на прохождение одного и того же расстояния в кристалле одна волна затратит больше времени, чем вторая, что породит запаздывание по времени. Полный оборот вектора поляризации в обеих волнах происходит за одно и то же время, равное периоду волны. Следовательно, вектор поляризации запаздывающей волны повернется на угол, больший, чем вектор опережающей волны. В результате сложения этих волн наблюдается

одна плоскопараллельная волна, результирующий вектор поляризации которой повернется в сторону вращения более медленной волны [19]. Таким образом, линейно поляризованный свет, пройдя через пластину, останется линейно поляризованным, но плоскость его поляризации повернется на угол φ [15, 19]. Разность фаз δ в таком случае будет определяться циркулярным двулучепреломлением $\Delta n_{\text{ц}}$ [15]:

$$\varphi = \frac{\pi d}{\lambda} \Delta n_{\text{ц}} = \rho d = \frac{\delta}{2}; \quad (5)$$

$$\delta = 2\rho d.$$

Интенсивность света, прошедшего через систему поляризатор—кристалл—анализатор, где кристалл представляет собой пластину гиротропного одноосного кристалла, вырезанного перпендикулярно к оптической оси, описывается уравнением вида [15]

$$I = (1/2) I_0 [1 + \cos 2(\beta - \alpha) \cos \delta + \sin 2(\beta - \alpha) \sin \delta]. \quad (6)$$

С учетом тригонометрических тождеств

$$\sin \mu \sin \nu = \frac{\cos(\mu - \nu) - \cos(\mu + \nu)}{2};$$

$$\cos \mu \cos \nu = \frac{\cos(\mu - \nu) + \cos(\mu + \nu)}{2}$$

уравнение (6) примет вид

$$I = (1/2) I_0 [1 + \cos 2(\beta - \alpha - \delta)]. \quad (7)$$

В случае, если поляризатор и анализатор параллельны, т. е. $\alpha = \beta$, и с учетом тригонометрического тождества

$$\cos(2\mu) = \cos^2 \mu - \sin^2 \mu,$$

интенсивность света будет равна

$$I = I_{\parallel} = I_0 \cos^2(\delta/2). \quad (8)$$

В случае, если поляризатор и анализатор перпендикулярны, т. е. $(\beta - \alpha) = (\pi/2)$, с учетом тригонометрического тождества $\cos\left(\frac{\pi}{2} - \mu\right) = \sin \mu$, интенсивность света будет равна

$$I = I_{\perp} = I_0 \sin^2(\delta/2). \quad (9)$$

Практическое значение имеет не интенсивность прошедшего света I , а доля первоначальной

интенсивности I_0 , прошедшего через систему, — спектральный коэффициент пропускания $T(\lambda)$, который и является измеряемым параметром:

$$T(\lambda) = I/I_0. \quad (10)$$

Спектральные зависимости коэффициентов пропускания $T(\lambda)$, полученные в условиях параллельных или скрещенных поляризаторов в соответствии с уравнениями (8) и (9) имеют периодический характер. Минимумы I_{\parallel} и максимумы I_{\perp} соответствуют величине $pd = \pi/2 + \pi k$. Максимумы I_{\parallel} и минимумы I_{\perp} соответствуют величине $pd = \pi + \pi k$, где k — целое число [2, 20—22].

В качестве образцов мы использовали плоскопараллельные полированные пластины известных кристаллов SiO_2 и $\alpha\text{-LiIO}_3$, вырезанные перпендикулярно к оптической оси. Исследования оптических свойств образцов проводили в аккредитованной лаборатории полупроводниковых материалов и диэлектриков «Монокристаллы и заготовки на

их основе» НИТУ МИСИС [23]. Спектральные зависимости коэффициентов пропускания $T(\lambda)$ измеряли на спектрофотометре Cary-5000 фирмы Agilent Technologies с использованием поляризаторов призм Глана—Тейлора в диапазоне длин волн 200—1200 нм.

Результаты и их обсуждение

Спектральные зависимости коэффициентов пропускания образцов представлены на рис. 2. В случае параллельных поляризаторов (см. рис. 2, а) минимумы (min) для кристалла $\alpha\text{-LiIO}_3$ наблюдаются на длинах волн 1018, 613, 497, 439 и 402 нм, а максимумы (max) на длинах волн 745, 546, 465, 418 и 387 нм. Для кристалла SiO_2 минимумы наблюдаются на длинах волн 1135, 667, 523, 447 и 399 нм и максимумы — на длинах волн 807, 581, 480, 420 и 381 нм (см. рис. 2, б). Результаты определения значений удельных углов вращения плоскости поляризации образцов $\alpha\text{-LiIO}_3$ и SiO_2 представлены на рис. 3 и в табл. 1.

Из рис. 3, б видно, что экспериментальные результаты для SiO_2 согласуются с результатами исследований, представленными в работе [24]. Для $\alpha\text{-LiIO}_3$ (см. рис. 3, а) заметно небольшое различие между нашими результатами и результатами, представленными в работе [25]. Это различие может быть связано с разными условиями роста кристаллов, так как на оптические свойства $\alpha\text{-LiIO}_3$ сильно влияют условия роста [24—26].

Анализируя спектральные зависимости удельного угла вращения плоскости поляризации можно определить природу гиротропии в кристаллах. В зависимости от того, чем преимущественно определяется вращательная способность кристалла (структурой формирующих его комплексов; структурой самого кристалла; и тем, и другим) дисперсия оптической активности преимущественно аппроксимируется формулами Друде, Чандрасекхара или Вышина соответственно [2, 27]:

– формула Друде

$$\rho = \frac{K_D}{(\lambda^2 - \lambda_D^2)}; \quad (11)$$

– формула Чандрасекхара

$$\rho = \frac{K_C \lambda^2}{(\lambda^2 - \lambda_C^2)^2}; \quad (12)$$

– формула Вышина

$$\rho = \frac{K_{V1} \lambda^2}{(\lambda^2 - \lambda_{V1}^2)^2} + \frac{K_{V2}}{(\lambda^2 - \lambda_{V2}^2)}, \quad (13)$$

где K_D , K_C , K_{V1} , K_{V2} — константы; λ_D , λ_C , λ_{V1} , λ_{V2} — характеристические длины волн, нм.

В формуле (13) первый член уравнения характеризует оптическую активность, возника-

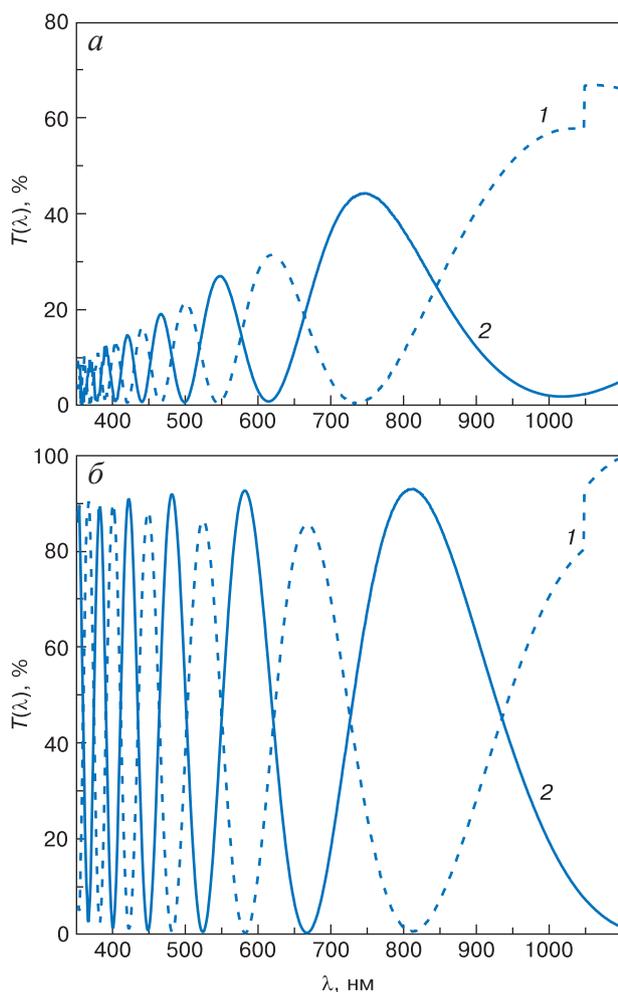


Рис. 2. Спектральные зависимости пропускания образцов $\alpha\text{-LiIO}_3$ (а) и SiO_2 (б) в скрещенных (1) и параллельных (2) поляризаторах

Fig. 2. Spectral dependences of the transmission of (a) $\alpha\text{-LiIO}_3$ and (b) SiO_2 samples in (1) crossed and (2) parallel polarizers

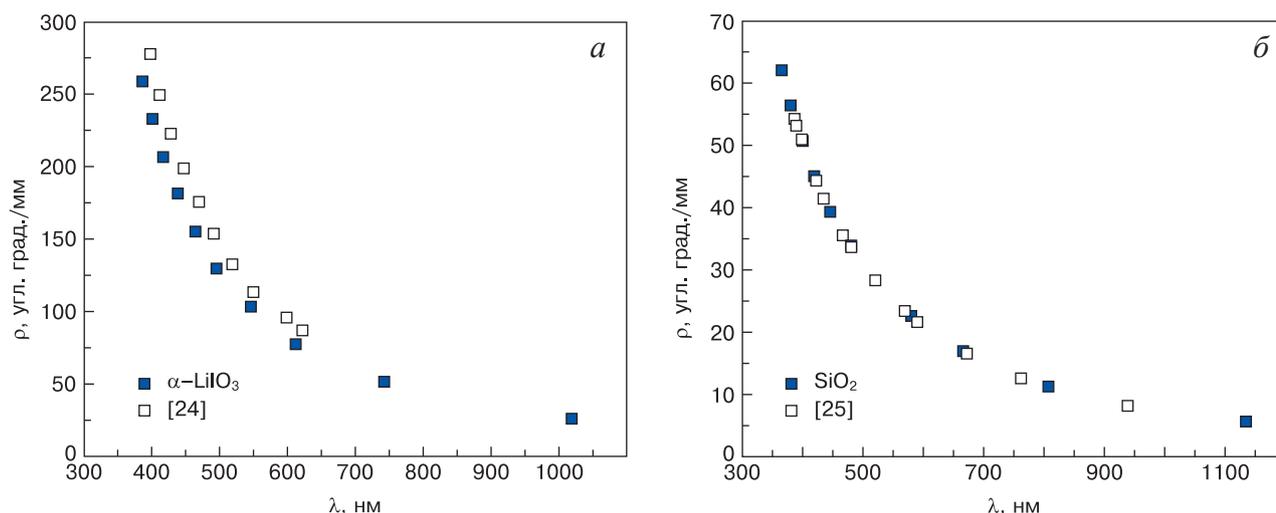


Рис. 3. Спектральные зависимости удельного угла вращения плоскости поляризации образцов α -LiIO₃ (а) и SiO₂ (б)
 Fig. 3. Spectral dependences of the specific angle of rotation of the plane of polarization of samples of α -LiIO₃ (a) and SiO₂ (б)

Таблица 1 / Table 1

Расчетные значения удельного угла вращения плоскости поляризации образцов α -LiIO₃ и SiO₂
 Calculated values of the specific angle of rotation of the plane of polarization of samples α -LiIO₃ and SiO₂

Кристалл	Параметр	Положение экстремумов на спектральных зависимостях $T(\lambda)$ в параллельных поляризаторах									
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
α -LiIO ₃	λ , нм	1018	745	613	546	497	465	439	418	402	387
	k	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
	φ , угл. град.	90	180	270	360	450	540	630	720	810	900
	ρ , угл. град./мм	25,86	51,72	77,59	103,45	129,31	155,17	181,03	206,90	232,76	258,62
SiO ₂	λ , нм	1135	807	667	581	523	480	447	420	399	381
	k	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
	φ , угл. град.	90	180	270	360	450	540	630	720	810	900
	ρ , угл. град./мм	5,63	11,27	16,91	22,54	28,18	33,81	39,44	45,08	50,72	56,36

ющую за счет структуры кристалла, а второй — за счет структуры комплексов, формирующих кристалл.

Аппроксимацию экспериментальных значений удельного угла вращения плоскости поляризации проводили в программном пакете Origin.

Отклонение между экспериментальными данными и аппроксимационной зависимостью оценивали по критерию R-квадрат (R-Square). Значение R-квадрата может меняться от 0 до 1. Чем больше R-квадрат, тем лучше подобранная зависимость соответствует аппроксимируемым данным.

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты аппроксимационных уравнений Друде (11), Чандрасекхара (12), Вышина (13) для удельного угла вращения плоскости поляризации кристаллов SiO₂ и α -LiIO₃
 Coefficients of the Drude (11), Chandrasekhar (12), Vyshin (13) approximation equations for the specific angle of rotation of the polarization plane of SiO₂ and α -LiIO₃ crystals

Кристалл	Коэффициенты аппроксимационных уравнений							
	Друде		Чандрасекхара		Вышин			
	K_D	λ_D , нм	K_C	λ_C , нм	K_{V1}	λ_{V1} , нм	K_{V2}	λ_{V2} , нм
SiO ₂	7,2165	129,9	7,2019	93,99	7,1005	89,01	123526	253,19
α -LiIO ₃	2,5428	227,75	2,4985	171,91	2,3191	172,16	2,4975	1,7847

Вычисленные коэффициенты уравнений (11)—(13) представлены в табл. 2.

Параметр R -квадрат равен 1 для всех аппроксимационных уравнения в случае SiO_2 .

В случае $\alpha\text{-LiIO}_3$ параметр R -квадрат равен 1 при аппроксимации уравнениями Друде и Чандрасекхара, и 0,9999 для случая уравнения Вышина. Таким образом, вращательная способность в исследованных образцах хорошо подчиняется всем трем типам уравнений.

В соответствии с работой [16], вращательная способность $\alpha\text{-LiIO}_3$ обусловлена как электронными переходами группы IO_3^- (структура комплексов, формирующих кристалл), так и ориентацией групп IO_3^- относительно кристаллографических осей (структура самого кристалла). Таким образом, полученные результаты аппроксимаций хорошо соотносятся с известными литературными данными [16] о природе гиротропии в кристаллах $\alpha\text{-LiIO}_3$.

Природа гиротропии кварца все еще однозначна не установлена.

Исследование удельного угла вращения плоскости поляризации позволяет оценить структурное совершенство кристаллов [16, 28]. Согласно теории В.А. Кизеля [16, 28], для оценки структурного совершенства кристалла используется построение в соответствии с модифицированной формулой Друде:

$$1/\rho = A\lambda^2 + \lambda_0, \quad (14)$$

где A — константа; λ_0 — характеристическая длина волны.

В случае идеального кристалла построенная зависимость $1/\rho = f(\lambda^2)$ должна иметь линейный

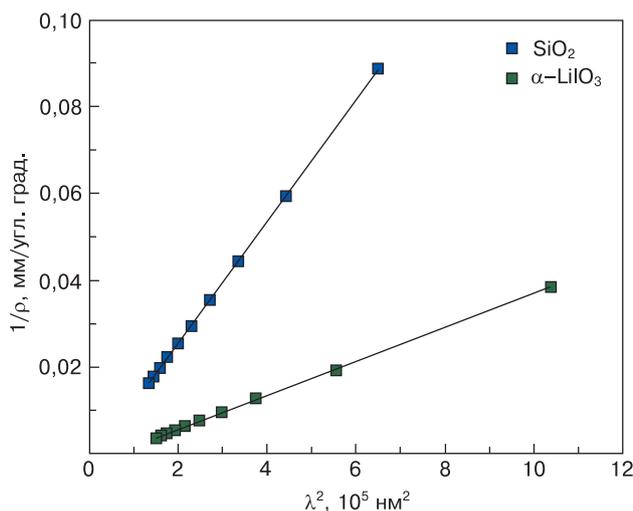


Рис. 4. Зависимости обратного угла вращения плоскости поляризации от квадрата длины волны образцов SiO_2 и $\alpha\text{-LiIO}_3$.

Прямые линии — линейные аппроксимации

Fig. 4. Dependences of the reverse angle of rotation of the plane of polarization on the square of the wavelength of the SiO_2 and $\alpha\text{-LiIO}_3$ samples.

Straight lines is linear approximations

характер. Отклонения от линейности свидетельствуют о разупорядоченности и наличии дефектов кристаллической структуры.

Зависимости, построенные в соответствии с формулой (14), и их линейные аппроксимации представлены на рис. 4.

Среднеквадратическое взвешенное отклонение, характеризующее отклонение экспериментальных данных от линейности, незначительно и составляет $3,91487 \cdot 10^{-7}$ для случая SiO_2 и $2,0027 \cdot 10^{-7}$ для $\alpha\text{-LiIO}_3$. Подобный порядок величин свидетельствует о структурном качестве кристаллов.

Заключение

Представлены возможности спектрофотометрии для измерения удельного угла вращения плоскости поляризации ρ в гиротропных кристаллах средней категории при распространении света вдоль оптической оси.

Предложенная методика позволяет получать дискретные значения ρ в диапазоне длин волн от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного диапазона длин волн в зависимости от химического состава, структуры, симметрии, дефектности, прозрачности и толщины образца.

Вращательная способность кристалла и, следовательно, характер вращения зависят от строения образующих его комплексов или от строения самого кристалла. Полученные дискретные значения ρ можно аппроксимировать формулами Друде, Чандрасекхара и Вышина. В зависимости от того, какие формулы лучше всего соответствуют измеренным значениям ρ , можно сделать вывод, что преимущественно определяет вращательную способность образца.

Структурное совершенство кристаллов (разупорядоченность и наличие дефектов) в кристаллической структуре может быть оценено по отклонениям от линейности спектральных зависимостей, построенных по модифицированной формуле Друде.

Результаты, полученные на образцах кристаллов SiO_2 , $\alpha\text{-LiIO}_3$, хорошо согласуются с известными литературными данными.

Библиографический список

1. Физический энциклопедический словарь. Под ред. А.М. Прохорова. М.: Советская энциклопедия; 1984. 944 с.
2. Калдыбаева К.А., Константинова А.Ф., Перекалина З.Б. Гиротропия одноосных поглощающих кристаллов. М.: Институт социально-экономических и производственно-экологических проблем инвестирования; 2000. 294 с.
3. Блистанов А.А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. М.: МИСиС; 2000. 432 с.

4. Цернике Ф., Мидвинтер Дж. Прикладная нелинейная оптика. Пер. с англ. М.: Мир; 1976. 261 с.
5. Nikogosyan D.N. Nonlinear optical crystals: A complete survey. New York: Springer Science and Business Media; 2005. 429 p.
6. Сонин А.С., Василевская А.С. Электрооптические кристаллы. М.: Атомиздат; 1971. 328 с.
7. Акустические кристаллы. Под ред. М.П. Шаскольской. М.: Наука; 1981. 632 с.
8. Иона Ф., Ширане Д. Сегнетоэлектрические кристаллы. Пер. с англ. М.: Мир; 1965. 555 с.
9. Рез И.С., Поплавко Ю.М. Диэлектрики: Основные свойства и применения в электронике. М.: Радио и связь; 1989. 288 с.
10. Мэзон У. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультразвуке. Пер. с англ. М.: Издательство иностранной литературы; 1952. 448 с.
11. Шараров В. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера; 2006. 628 с.
12. Новик В.К., Гаврилова Н.Д., Фельдман Н.Б. Пьезоэлектрические преобразователи. М.: Советское радио; 1979. 176 с.
13. Физическая энциклопедия. В 5 т. Т. 1. Ааронова–Бома эффект — длинные линии. М.: Советская энциклопедия; 1988. 704 с.
14. Меланхолин Н.М. Методы исследования оптических свойств кристаллов. М.: Наука; 1969. 155 с.
15. Константинова А.Ф., Гречушников Б.Н., Бокуть Б.В., Валяшко Е.Г. Оптические свойства кристаллов. Минск: Наука и техника; 1995. 303 с.
16. Кизель В.А., Бурков В.И. Гиротропия кристаллов. М.: Наука; 1980. 304 с.
17. Шубников А.В. Основы оптической кристаллографии. М.: Издательство Академии наук СССР; 1959. 205 с.
18. Шаскольская М.П. Кристаллография. М.: Высшая школа; 1976. 391 с.
19. Федоров Ф.И. Теория гиротропии. Минск: Наука и техника; 1976. 456 с.
20. Wei A., Wang B., Qi H., Yuan D. Optical activity along the optical axis of crystals with ordered langasite structure. *Crystal Research & Technology*. 2006; 41(4): 371—374. <https://doi.org/10.1002/crat.200510589>
21. Heimann R.B., Hengst M., Rossberg M., Bohm J. Giant optical rotation in piezoelectric crystals with calcium gallium germanate structure. *Physica Status Solidi (a)*. 2003; 195(2): 468—474. <https://doi.org/10.1002/pssa.200305950>
22. Wang Z., Yuan D., Wei A., Qi H., Shi X., Xu D., Lu M. Growth and optical activities of $\text{Sr}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ single crystals. *Journal of Crystal Growth*. 2004; 263(1–4): 389—393. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2003.11.098>
23. Kozlova N.S., Goreeva Zh.A., Zabelina E.V. Testing quality assurance of single crystals and stock on their base. *2nd International Ural conf. on measurements, UralCon. Chelyabinsk, Russia. 2017. IEEE; 2017. P. 15—22. <https://doi.org/10.1109/URALCON.2017.8120681>*
24. Chandrasekhar S. Optical rotatory dispersion of crystals. *Proceed. of the Royal Society A. Mathematical, Physical & Engineering Sciences*; 1961. Vol. 259. P. 531—553. <https://doi.org/10.1098/rspa.1961.0007>
25. Jankmú V., Vyšín V. Interpretation of the optical activity of TeO_2 and LiIO_3 . *Optics Communications*. 1971; 3(5): 308—309. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(71\)90093-9](https://doi.org/10.1016/0030-4018(71)90093-9)
26. Herreros–Cedrés J., Hernández–Rodríguez C., Guerrero–Lemus R. Temperature–dependent gyration tensor of LiIO_3 single crystal using the high–accuracy universal polarimeter. *Journal of Applied Crystallography*. 2002; 35(2): 228—232. <https://doi.org/10.1107/S0021889802000778>
27. Vyšín V., Jankú V. Note on the interpretation of the experimental data of the optical activity in crystals. *Optics Communications*. 1971; 3(5): 305—307. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(71\)90092-7](https://doi.org/10.1016/0030-4018(71)90092-7)
28. Dimov T., Bunzarov Zh., Iliev I., Petkova P., Tzoukrovski Y. Dispersion of optical activity of magnesium sulfite hexahydrate single crystals. *Journal of Physics: Conference Series*. 2010; 253(1): 012080. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/253/1/012080>

References

1. Prokhorov A.M., ed. Physical encyclopedic dictionary. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya; 1984. 944 p. (In Russ.)
2. Kaldybaeva K.A., Konstantinova A.F., Perekalina Z.B. Gyrotropy of uniaxial absorbing crystals. Moscow: Institut sotsial'no–ekonomicheskikh i proizvodstvenno–ekologicheskikh problem investirovaniya; 2000. 294 p. (In Russ.)
3. Blistanov A.A. Crystals of quantum and nonlinear optics. Moscow: MISiS; 2000. 432 p. (In Russ.)
4. Zernike F., Midwinter J.E. Applied nonlinear optics. New York; Sydney; Toronto; London: John Wiley and Sons; 1973. 261 p. (Russ. Transl.: Zernike F., Midwinter J.E. Prikladnaya nelineinaya optika. Moscow: Mir; 1976. 261 p.)
5. Nikogosyan D.N. Nonlinear optical crystals: A complete survey. New York: Springer Science and Business Media; 2005. 429 p.
6. Sonin A.S., Vasilevskaya A.S. Electrooptical crystals. Moscow: Atomizdat; 1971. 328 p. (In Russ.)
7. Shaskol'skaya M.P., ed. Acoustic crystals. Moscow: Nauka; 1981. 632 p. (In Russ.)
8. Jona F., Shirane G. Ferroelectric crystals. Macmillan; 1962. 402 p. (Russ. Transl.: Jona F., Shirane G. Segnetoelektricheskie kristally. Moscow: Mir; 1965. 555 p.)
9. Rez I.S., Poplavko Yu.M. Dielectrics: Basic properties and applications in electronics. Moscow: Radio i svyaz; 1989. 288 p. (In Russ.)
10. Mason W.P. Piezoelectric crystals and their application to ultrasonics. New York, Van Nostrand; 1950. 448 p. (Russ. Transl.: Mason W.P. P'ezoelektricheskie kristally i ikh primenenie v ul'traakustike. Moscow: Izdatel'stvo inostranoi literatury; 1952. 448 p.)
11. Sharapov V. Piezoelectric sensors. Moscow: Tekhnosfera; 2006. 628 p. (In Russ.)
12. Novik V.K., Gavrilova N.D., Fel'dman N.B. Pyroelectric converters. Moscow: Sovetskoe radio; 1979. 176 p. (In Russ.)
13. Physical encyclopedia. In 5 vol. Vol. 1. Aharonov–Bohm effect – Long lines. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya; 1988. 704 p. (In Russ.)
14. Melancholin N.M. Methods for studying the optical properties of crystals. Moscow: Nauka; 1969. 155 p. (In Russ.)
15. Konstantinova A.F., Grechushnikov B.N., Bokut' B.V., Valyashko E.G. Optical properties of crystals. Minsk: Navuka i tekhnika; 1995. 303 p. (In Russ.)
16. Kizel' V.A., Burkov V.I. Gyrotropy of crystals. Moscow: Nauka; 1980. 304 p. (In Russ.)

17. Shubnikov A.V. Fundamentals of optical crystallography. Moscow: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR; 1959. 205 p. (In Russ.)
18. Shaskol'skaya M.P. Crystallography. Moscow: Vysshaya shkola; 1976. 391 p. (In Russ.)
19. Fedorov F.I. Theory of gyrotropy. Minsk: Nauka i tekhnika; 1976. 456 p. (In Russ.)
20. Wei A., Wang B., Qi H., Yuan D. Optical activity along the optical axis of crystals with ordered langasite structure. *Crystal Research & Technology*. 2006; 41(4): 371—374. <https://doi.org/10.1002/crat.200510589>
21. Heimann R.B., Hengst M., Rossberg M., Bohm J. Giant optical rotation in piezoelectric crystals with calcium gallium germanate structure. *Physica Status Solidi (a)*. 2003; 195(2): 468—474. <https://doi.org/10.1002/pssa.200305950>
22. Wang Z., Yuan D., Wei A., Qi H., Shi X., Xu D., Lu M. Growth and optical activities of $\text{Sr}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ single crystals. *Journal of Crystal Growth*. 2004; 263(1–4): 389—393. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2003.11.098>
23. Kozlova N.S., Goreeva Zh.A., Zabelina E.V. Testing quality assurance of single crystals and stock on their base. *2nd International Ural conference on measurements, UralCon. Chelyabinsk, Russia*. 2017. IEEE; 2017. P. 15—22. <https://doi.org/10.1109/URALCON.2017.8120681>
24. Chandrasekhar S. Optical rotatory dispersion of crystals. *Proceed. of the Royal Society A. Mathematical, Physical & Engineering Sciences*; 1961. Vol. 259. P. 531—553. <https://doi.org/10.1098/rspa.1961.0007>
25. Jankmú V., Vyšín V. Interpretation of the optical activity of TeO_2 and LiIO_3 . *Optics Communications*. 1971; 3(5): 308—309. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(71\)90093-9](https://doi.org/10.1016/0030-4018(71)90093-9)
26. Herreros-Cedrés J., Hernández-Rodríguez C., Guerrero-Lemus R. Temperature-dependent gyration tensor of LiIO_3 single crystal using the high-accuracy universal polarimeter. *Journal of Applied Crystallography*. 2002; 35(2): 228—232. <https://doi.org/10.1107/S0021889802000778>
27. Vyšín V., Jankú V. Note on the interpretation of the experimental data of the optical activity in crystals. *Optics Communications*. 1971; 3(5): 305—307. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(71\)90092-7](https://doi.org/10.1016/0030-4018(71)90092-7)
28. Dimov T., Bunzarov Zh., Iliev I., Petkova P., Tzoukrovski Y. Dispersion of optical activity of magnesium sulfite hexahydrate single crystals. *Physics: Conference Series*. 2010; 253(1): 012080. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/253/1/012080>

Информация об авторах / Information about the authors

Забелина Евгения Викторовна — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, лаборатория «Монокристаллы и заготовки на их основе», Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5844-5673>; e-mail: zabelina.ev@misis.ru

Шахин Рим — магистр, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9292-6404>; e-mail: reem.shaheen.r.2001@gmail.com

Козлова Нина Семеновна — канд. физ.-мат. наук, ведущий эксперт, лаборатория «Монокристаллы и заготовки на их основе», Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4057-9718>; e-mail: kozlova_nina@mail.ru

Касимова Валентина Маратовна — канд. физ.-мат. наук, ведущий инженер, лаборатория «Монокристаллы и заготовки на их основе», Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1362-953X>; e-mail: kasimova.vm@misis.ru

Evgenia V. Zabelina — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, Laboratory “Single Crystals and Stock on their Base”, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5844-5673>; e-mail: zabelina.ev@misis.ru

Reem Shahin — Master, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9292-6404>; e-mail: reem.shaheen.r.2001@gmail.com

Nina S. Kozlova — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Expert, Laboratory “Single Crystals and Stock on their Base”, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4057-9718>; e-mail: kozlova_nina@mail.ru

Valentina M. Kasimova — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Lead Engineer, Laboratory “Single Crystals and Stock on their Base”, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1362-953X>; e-mail: kasimova.vm@misis.ru

Поступила в редакцию 13.07.2023; поступила после доработки 20.07.2023; принята к публикации 07.08.2023
Received 13 July 2023; Revised 20 July 2023; Accepted 7 August 2023