

УДК 621.315:535.012

Опыт визуального определения направления вращения плоскости поляризации света в гиротропных монокристаллах средней категории

© 2022 г. Е. В. Забелина✉, Н. С. Козлова, И. И. Свисткова

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

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

Аннотация. При исследовании и применении кристаллов средней категории необходимо учитывать анизотропию их свойств, в частности оптическую анизотропию. Одним из проявлений оптической анизотропии является вращение плоскости поляризации (эффект гиротропии), которое наблюдается в направлении оптической оси таких кристаллов. Плоскость поляризации света может вращаться как по часовой стрелке, так и против нее. Для определения направления вращения плоскости поляризации могут быть использованы простые визуальные методы, основанные на исследованиях образцов в сходящемся поляризованном свете — наблюдения коноскопических фигур. В общем случае вид коноскопических фигур зависит от взаимного положения поляризаторов, длины волны света в системе, среза монокристалла, перпендикулярно к которому распространяется свет, толщины образца и величины двулучепреломления. Направление вращения плоскости поляризации можно определить по изменению вида коноскопической фигуры образца гиротропного кристалла, вырезанного перпендикулярно к оптической оси: изменение цвета центрального пятна при вращении анализатора, погасание центрального пятна при наблюдении коноскопической фигуры с использованием светофильтров, направление движения колец в монохроматическом свете, наблюдение фигур Эри. Коноскопическая картина в виде фигур Эри (четырёхходовая спираль) возникает при наблюдении в сходящемся поляризованном свете комбинации из двух наложенных друг на друга образцов гиротропных кристаллов, вырезанных перпендикулярно к оптической оси, вращающих плоскость поляризации света в противоположных направлениях. Для использования этого метода необходим известный образец гиротропного кристалла, вырезанного перпендикулярно к оптической оси. По опыту работы в нашей лаборатории «Монокристаллы и заготовки на их основе» (НИТУ «МИСиС»), наиболее простым, оперативным и однозначным визуальным методом определения направления вращения плоскости поляризации является наблюдение фигур Эри.

Ключевые слова: вращение плоскости поляризации, направление вращения, монокристаллы, оптические свойства, оптическая анизотропия, одноосные монокристаллы, поляризационно–оптический метод, оптическая микроскопия

Благодарности: Исследования проводились при финансовой поддержке госзадания FSME–2020–0031 (0718–2020–0031). Измерения проведены в МУИЛ Полупроводниковых материалов и диэлектриков «Монокристаллы и заготовки на их основе» (ИЛМЗ) НИТУ «МИСиС». Авторы выражают благодарность д.ф.–м.н., профессору А.Ф. Константиновой.

© 2022 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.

Для цитирования: Забелина Е.В., Козлова Н.С., Свисткова И.И. Опыт визуального определения направления вращения плоскости поляризации света в гиротропных монокристаллах средней категории. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2022; 25(3): 179–187. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-3-179-187>

Practice of the visual determination of the direction of light polarization plane rotation in the gyrotropic uniaxial single crystals

E. V. Zabelina✉, N. S. Kozlova, I. I. Svistkova

*National University of Science and Technology MISiS,
4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation*

✉ *Corresponding author: zabelina.ev@misis.ru*

Abstract. When studying and applying crystals of the middle category, it is necessary to take into account the manifestations of anisotropy of their properties, in particular, optical anisotropy. One of the manifestations of optical anisotropy is the rotation of the polarization plane (gyrotropy effect), which is observed in the direction of the optical axis of such crystals. The plane of polarization of light can rotate clockwise and counterclockwise. To determine the direction of rotation of the polarization plane, simple visual methods can be used based on studies of samples in converging polarized light – observations of conoscopic figures. In general, the type of conoscopic figures depends on the relative position of the polarizers, the wavelength of light in the system, the cut of the single crystal perpendicular to which the light propagates, the thickness of the sample and the birefringence. The direction of rotation of the polarization plane can be determined by change of the type of conoscopic figure of a sample of a gyrotropic crystal cut perpendicular to the optical axis: change of the central spot color during the analyzer rotation; the extinction of the central spot when observing a conoscopic figure using light filters; the direction of movement of the rings in monochromatic light; observation of Airy patterns. According to the experience of working in our laboratory “Single crystals and Stocke on their Base”, the simplest, most operational and unambiguous visual method for determining the direction of rotation of the polarization plane is the observation of Airy figures. A conoscopic pattern in the form of Airy figures (a four-way spiral) occurs when observing in converging polarized light a combination of two superimposed samples of gyrotropic crystals cut perpendicular to the optical axis, rotating the plane of polarization of light in opposite directions. To use this method, a well-known sample of a gyrotropic crystal cut perpendicular to the optical axis is required.

Keywords: rotation of the polarization plane, direction of rotation, single crystals, optical properties, optical anisotropy, uniaxial single crystals, polarization–optical method, optical microscopy

Acknowledgments. The studies were carried out with financial support within State Assignment FSME–2020–0031 (0718–2020–0031). The measurements were carried out at the MUIL of Semiconductor Materials and Dielectrics Single “Crystals and Stock on their Base” of National University of Science and Technology MISiS. The authors are grateful to Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor A.F. Konstantinova.

For citation: Zabelina E.V., Kozlova N.S., Svistkova I.I. Practice of the visual determination of the direction of light polarization plane rotation in the gyrotropic uniaxial single crystals. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering.* 2022; 25(3): 179–187. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-3-179-187>

Введение

К монокристаллам средней категории относятся кристаллы, у которых есть одно особое направление — ось симметрии высшего порядка, то есть порядка выше, чем 2 [1].

К средней категории относятся лазерные и скинтилляционные кристаллы, нелинейно-оптические кристаллы для генерации оптических гармоник и создания параметрических квантовых генераторов, электрооптические кристаллы, акустические и акустооптические кристаллы, а также сегнето-, пьезо- и пироэлектрики [2—12]. Кристаллы средней категории характеризуются анизотропией физических свойств, в том числе оптической анизотропией. Оптическая анизотропия в кристаллах проявляется в виде двулучепреломления, дихроизма и гиротропии [13].

Двулучепреломление заключается в раздвоении световых лучей при их прохождении через анизотропную среду [13, 14].

Дихроизм является частным случаем плеохроизма — зависимости поглощения световых лучей в кристалле от направления их распространения и поляризации [13]. Визуально в кристаллах средней категории дихроизм наблюдается в случае, когда кристаллы окрашены.

Гиротропия, оптическая активность или оптическая вращательная способность, представляет собой совокупность связанных с проявлениями эффектов пространственной дисперсии первого порядка оптических свойств среды, имеющей, по крайней мере, одно направление, не эквивалентное обратному [15].

Впервые вращение плоскости поляризации света было обнаружено Д. Араго при прохождении линейно поляризованного света через пластину кварца, вырезанную перпендикулярно к оптической оси. Поворот плоскости поляризации света пропорционален толщине пластины [16].

Это явление объясняется следующим образом: линейно поляризованная волна света может быть представлена как суперпозиция двух волн с циркулярной поляризацией, противоположными направлениями обхода и одинаковыми амплитудами [16]. Если эти волны распространяются с различными фазовыми скоростями, то на прохождении одного и того же расстояния в кристалле одна волна затратит больше времени, чем вторая, что обусловит 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 больший угол, чем вектор опережающей волны. В результате сложения этих волн наблюдается одна плоскопараллельная волна, результирующий вектор поляризации которой

повернется в сторону вращения более медленной волны [16].

Это явление наблюдается в виде вращения (закручивания) плоскости поляризации света по мере распространения его в кристалле [17, 18].

Вращение плоскости поляризации наблюдается вдоль оптической оси. При отклонении от оптической оси вращательная способность кристалла резко падает, при этом одновременно существенно возрастает величина двулучепреломления и дихроизма [17, 19, 20]. По мере роста отклонения луча света от оптической оси циркулярная поляризация сменяется эллиптической, причем эллипсы быстро суживаются, и оба луча начинают приближаться к плоскополяризованным [17].

Закручивание плоскости поляризации описывается симметрией $\infty/2$. Следовательно, вращение плоскости поляризации будет наблюдаться только в тех классах симметрии кристаллов средней категории, которые являются подгруппой данной группы симметрии [18].

Если плоскость поляризации света поворачивается вправо, то такой кристалл называют «правовращающий», а если влево — «левовращающий» [18]. В кристаллах «правых» и «левых» модификаций вращение плоскости поляризации будет противоположным.

На практике может возникать необходимость выявления наличия или отсутствия самого явления гиротропии и определения направления вращения плоскости поляризации:

- в практике работы лабораторий и отдельных исследователей;
- при исследовании новых материалов;
- на производстве, когда необходимо в рамках входного контроля быстро установить соответствие типа модификации (левая или правая) предъявляемым требованиям.

Таким образом, необходимы простые и быстрые методы качественного определения направления вращения плоскости поляризации.

Цель работы — представление простых оперативных методов определения наличия вращения плоскости поляризации в кристаллах средней категории и определение направления вращения плоскости поляризации.

Образцы и методы исследования

В работе представлены результаты и опыт работ в нашей испытательной лаборатории «Монокристаллы и заготовки на их основе» НИТУ «МИСиС» [21].

В качестве образцов использовали монокристаллы средней категории α - LiIO_3 , SiO_2 , кристаллы семейства лангасита ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$, $\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_{14}$ $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$) и др. в виде призм с полированными

ными рабочими гранями, перпендикулярными к оптической оси.

Использованные методы визуального определения направления плоскости поляризации наиболее полно изложены в работе [17].

В основе этих методов лежат интерференционные явления, возникающие при прохождении света через кристаллическую пластину. Для возникновения интерференции необходимо, чтобы пучки были когерентны, т. е. должны происходить от одного источника или появляться в результате того, что одна световая волна разделилась на две [20, 23], что и происходит при распространении света через оптически анизотропную среду.

Рассмотрим простой случай, когда пластина монокристалла толщиной d помещена между двумя поляризаторами и вдоль оптической оси этой системы направлен параллельный пучок света интенсивностью I_0 с длиной волны λ . Так как в кристалле этот луч распадется на два луча, распространяющихся с разными скоростями и коэффициентами преломления, то на выходе из пластины будут складываться два луча с линейной и взаимноперпендикулярной поляризацией с разностью фаз δ [1, 24]:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n. \quad (1)$$

Интенсивность света I , прошедшего через такую систему, будет описываться формулой пропускания [18]:

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

где α , β — углы между плоскостью колебаний одного из лучей и плоскостью колебаний, пропускаемых первым и вторым поляризатором (плоскость поляризации поляризатора) соответственно.

В соответствии с формулой (2), интенсивность света, прошедшего через систему, состоящую из двух поляризаторов и кристалла между ними зависит от следующих факторов:

- взаимного положения поляризаторов, длины волны света в системе;
- характеристик образца (среза монокристалла, перпендикулярно которому распространяется свет, толщины образца и величины двулучепреломления).

Исследование интерференционных картин в сходящемся свете позволяет наблюдать в одной картине все интерференционные явления, которые можно было бы наблюдать в параллельном свете при последовательном вращении кристаллической пластины вокруг соответствующих осей. [18]. Такие сложные интерференционные картины называются «коноскопические фигуры» [1, 18, 24].

Коноскопические фигуры состоят из двух типов линий [1, 18, 24]:

- изохроматические линии (изохромы) при наблюдении в белом свете представляют собой полосы различных интерференционных цветов, каждая из них соответствует тем направлениям в кристалле, в которых оптическая разность хода одинакова (изохромы наблюдаются только при больших значениях разности хода);
- изогирь — темные полосы, все точки которых соответствуют тем направлениям в кристалле, по которым распространяются лучи с плоскостями колебаний, параллельными плоскостям поляризации поляризаторов.

На рис. 1 представлен пример коноскопической картины полированного плоскопараллельного образца одноосного негиротропного кристалла LiNbO_3 , вырезанного перпендикулярно к оптической оси, с ярко выраженными изохромами и изогирями.

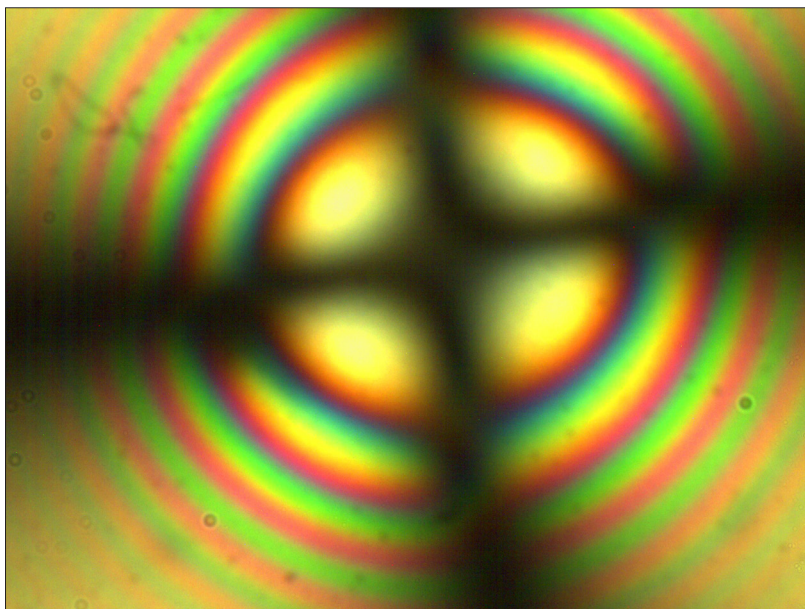


Рис. 1. Типичный пример реальной коноскопической картины при исследовании в белом свете в плоскопараллельном образце одноосного негиротропного кристалла LiNbO_3 , вырезанного перпендикулярно к оптической оси

Fig. 1. Typical example of a real conoscopic pattern in a plane-parallel sample of a uniaxial non-gyrotropic LiNbO_3 crystal cut perpendicular to the optical axis in white light

В нашей работе для наблюдения коноскопических картин использовали исследовательский поляризационный микроскоп проходящего и отраженного света Axio Imager M1m производства Carl Zeiss.

Наблюдение коноскопической фигуры возможно при непосредственном рассмотрении на фокальной поверхности объектива или при наблюдении увеличенного изображения картины через линзу Бертрана. При введении линзы Бертрана с помощью перемещения вдоль тубуса добиваются фокусировки изображения на фокальной поверхности объектива и получают увеличенное обратное изображение коноскопической фигуры. При использовании линзы четкость коноскопической картины ниже, чем при непосредственном наблюдении, но само это изображение крупнее. Предел фокусировки линзы Бертрана допускает использование объективов средних и больших увеличений ($\times 20$, $\times 50$, $\times 100$). По нашему опыту оптимальным является объектив $\times 50$. При меньших увеличениях фокальная поверхность расположена слишком высоко и может не фокусироваться [17, 25].

Результаты и их обсуждение

Коноскопические картины гиротропных кристаллов средней категории и негиротропных кристаллов отличаются друг от друга. Ветви черного креста, образованного изогирами, не доходят до центра фигуры, а на месте их пересечения наблюдается цветное пятно. Цвет центрального пятна совпадает с окраской исследуемого образца в параллельном свете.

По изменению вида коноскопической фигуры можно определить направление вращения плоскости поляризации в исследуемом образце [17]. Для этого применяются следующие методы:

- оценка изменения цвета центрального пятна при вращении анализатора;
- оценка положения погасания центрального пятна при наблюдении коноскопической фигуры с использованием светофильтров;
- оценка направления движения колец в монохроматическом свете;
- наблюдение фигур Эри.

Изменение цвета центрального пятна. Если при вращении анализатора по часовой стрелке интерференционная окраска центрального пятна изменяется в порядке последовательности цветов спектра от красного к фиолетовому (красный — оранжевый — желтый — зеленый — голубой — синий — фиолетовый), то исследуемый кристалл правовращающий, если в обратном порядке, то левовращающий. Этот метод применим, если изменение окраски центрального пятна наблюдается с ярким проявлением цветов. В отдельных случаях окраска центрального пятна бледна и ненасыщена, и фактически наблюдается чередование розового и бледнозеленого цвета [26]. Пример подобных картин представлен на рис. 2.

Погасание центрального пятна при использовании светофильтров. В этом методе необходимо иметь два монохроматических светофильтра. Вращая анализатор, последовательно приводят центральное пятно к погасанию сначала с одним фильтром, потом со вторым. Направление, в котором нужно повернуть анализатор от погасания

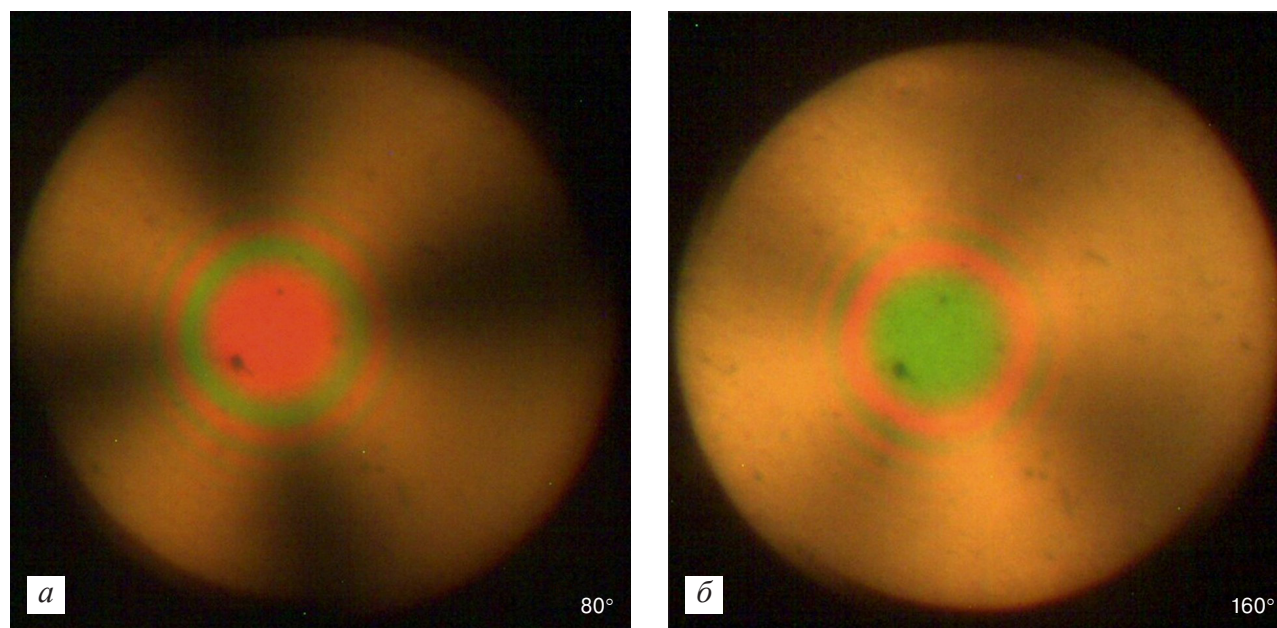


Рис. 2. Чередование розового (а) и бледно-зеленого (б) цвета центрального пятна в гиротропном кристалле средней категории

Fig. 2. Alternation of pink (a) and pale green (б) colors of the central spot in a gyrotropic crystal of the middle category

с более длинноволновым фильтром к менее длинноволновому, совпадает с направлением вращения плоскости поляризации.

Основными сложностями при использовании этого метода является необходимость наличия монохроматических светофильтров. В нашей лаборатории имеется 2 полных набора цветных стекол, однако, спектры пропускания этих стекол отличаются широкими полосами поглощения. На практике нам не удалось добиться полного погасания центрального пятна ни для одного образца гиротропного кристалла, который мы исследовали.

Направление движения колец в монохроматическом свете. При повороте анализатора по часовой стрелке в зависимости от знака вращения плоскости поляризации изохроматические кольца могут или сходиться, или расходиться. Если кольца расходятся, то кристалл правовращающий, если

сходятся, то левовращающий. Примеры подобных картин, полученные этим методом при использовании красного светофильтра КС 10, представлены на рис. 3.

В динамике при вращении анализатора направление движения колец ясно и понятно. Таким образом, этот метод позволяет оперативно получить необходимую информацию.

Фигуры Эри представляют собой интерференционную фигуру в виде четырехходовой спирали. Фигуры Эри возникают при наблюдении в сходящемся поляризованном свете комбинации из двух наложенных друг на друга образцов гиротропных кристаллов, вращающих плоскость поляризации света в противоположных направлениях и вырезанных перпендикулярно к оптической оси.

Таким образом, если между пластиной с неизвестным направлением вращения плоскости поля-

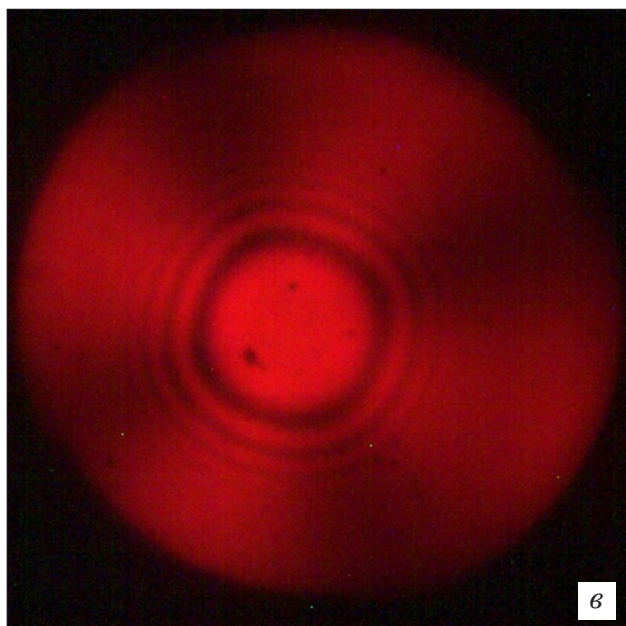
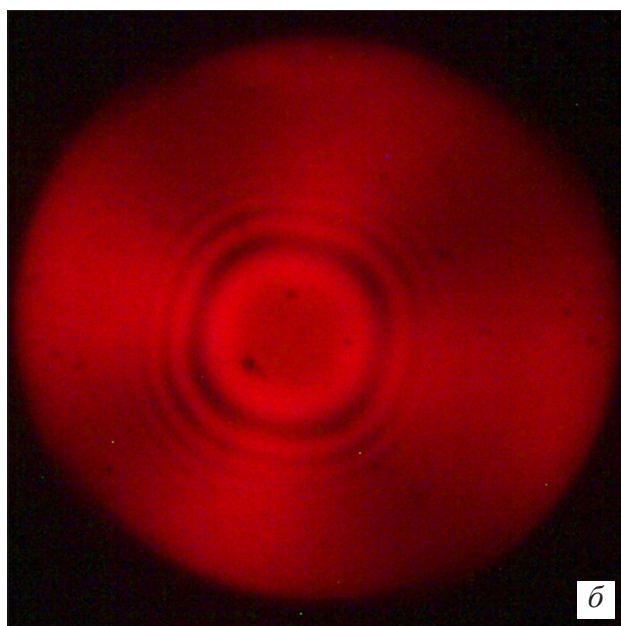
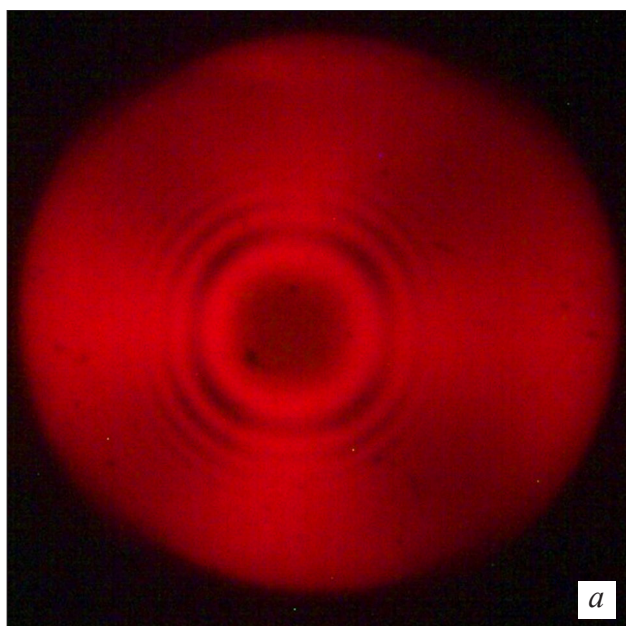


Рис. 3. Вид коноскопической картины гиротропного одноосного кристалла в направлении, перпендикулярном к оптической оси при использовании светофильтра КС 10 при вращении анализатора на 20 (а), 40 (б) и 60° (в)

Fig. 3. View of the conoscopic pattern of a gyrotropic uniaxial crystal in the direction perpendicular to the optical axis when using a KS 10 light filter with the analyzer rotated by 20 (a), 40 (б), and 60 deg. (в)

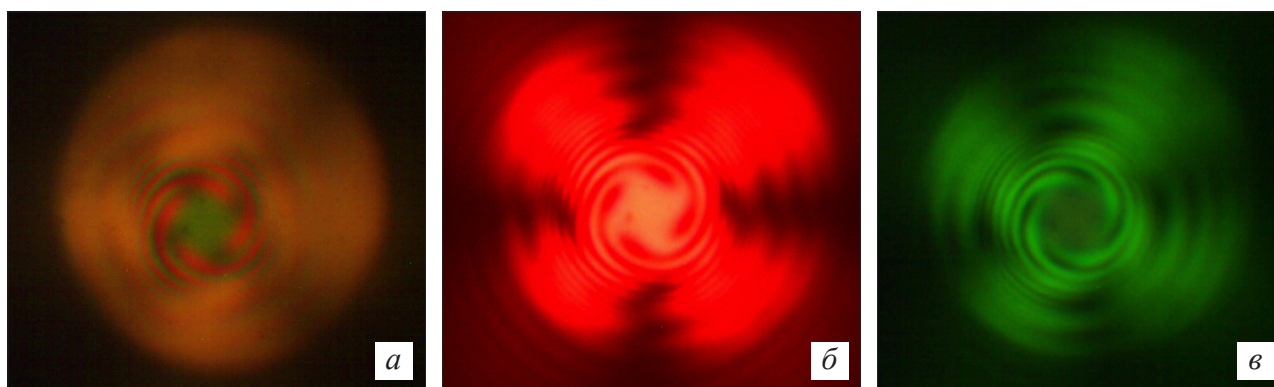


Рис. 4. Вид спиралей Эри в отсутствии светофильтров (а), со светофильтрами КС10 (б) и ЗС1 (в)
 Fig. 4. View of Airy spirals in the absence of light filters (a), with light filters KS10 (б) and ZC1 (в)

ризации и объективом микроскопа ввести пластину с известным направлением вращения плоскости поляризации, то можно определить направление вращения первой пластины. В случае, когда направления вращения этих двух пластин совпадают, вид коноскопической картины не изменится. А при наблюдении спиралей Эри направление вращения плоскости поляризации «неизвестного» образца противоположно направлению вращения «известного» образца.

В нашей лаборатории в качестве известного образца используется пластина α -LiIO₃, вырезанная перпендикулярно к оптической оси, с известным направлением плоскости поляризации (левовращающей).

Вид спиралей Эри, полученный на реальном гиротропном кристалле с использованием известного образца, представлен на рис. 4.

Заключение

Представлен опыт использования методов визуализации направления вращения плоскости поляризации в образцах гиротропных кристаллов средней категории, вырезанных перпендикулярно к оптической оси.

Направление вращения плоскости поляризации можно определить по изменению вида коноскопической фигуры: изменение цвета центрального пятна при вращении анализатора, погасание центрального пятна при наблюдении коноскопической фигуры с использованием светофильтров, направление движения колец в монохроматическом свете и наблюдение фигур Эри.

Наблюдение в монохроматическом свете направления движения изохроматических колец на коноскопических фигурах позволяет в динамике просто и однозначно установить направление вращения плоскости поляризации.

Наиболее простым, оперативным и однозначным методом определения направления вращения плоскости поляризации является наблюдение коноскопических фигур при наложении на неизвестный образец гиротропного кристалла, вырезанного перпендикулярно к оптической оси, образца известного гиротропного кристалла, вырезанного аналогичным образом. В случае, если направления вращения этих двух образцов совпадут, то вид коноскопической картины не изменится. Если же направление вращения плоскости поляризации неизвестно образца противоположно известному, то будут наблюдаться фигуры Эри — четыреххвостые спирали.

Библиографический список

1. Шаскольская М.П. Кристаллография. М.: Высшая школа; 1976. 391 с.
2. Блистанов А.А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. М.: МИСиС; 2000. 432 с.
3. Цернике Ф., Мидвингер Дж. Прикладная нелинейная оптика / пер с англ. Б.В. Жданова, Н.И. Коротева. М.: Мир; 1976. 261 с.
4. Гурзадян Г.Г., Дмитриев В.Г., Никогосян Д.Н. Нелинейно-оптические кристаллы. Свойства и применения в квантовой оптике. М.: Радио и связь, 1991. 160 с.
5. Nikogosyan D.N. Nonlinear optical crystals: a complete survey. NY, USA: Springer Science and Business Media, Inc; 2005. 429 p.
6. Сонин А.С., Василевская А.С. Электрооптические кристаллы. М.: Атомиздат; 1971. 328 с.
7. Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Шаскольская М.П., Чкалова В.В. Акустические кристаллы / под ред. М.П. Шаскольской. М.: Наука; 1981. 632 с.
8. Иона Ф., Ширане Д. Сегнетоэлектрические кристаллы / пер. с англ. Л.А. Фейгина, Б.К. Севастьянова. 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. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера; 2006. 628 с.

12. Новик В.К., Гаврилова Н.Д., Фельдман Н.Б. Пироэлектрические преобразователи. М.: Советское радио; 1979. 176 с.
13. Физический энциклопедический словарь / гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия; 1984. 944 с.
14. Переломова Н.В., Тагиева М.М. Кристаллофизика. М.: Издательский Дом НИТУ «МИСиС»; 2013. 407 с.
15. Физическая энциклопедия. В 5 т. Т. 1 Ааронова—Бома эффект — Длинные линии / гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия; 1988. 704 с.
16. Федоров Ф.И. Теория гиротропии. М.: Наука и техника, 1976. 456 с.
17. Меланхолин Н.М. Методы исследования оптических свойств кристаллов. М.: Наука; 1970. 156 с.
18. Шубников А.В. Основы оптической кристаллографии. М.: Издательство Академии наук СССР; 1958. 205 с.
19. Константинова А.Ф., Гречушников Б.Н., Бокуть Б.В., Валяшко Е.Г. Оптические свойства кристаллов. Минск: Наука і тэхніка; 1995. 303 с.
20. Калдыбаева К.А., Константинова А.Ф., Перекалина З.Б. Гиротропия одноосных поглощающих кри-

сталлов. М.: Институт социально-экономических и производственно-экологических проблем инвестирования. 2000. 294 с.

21. Kozlova N.S., Goreeva Zh.A., Zabelina E.V. Testing quality assurance of single crystals and stock on their base. *Proc. 2nd Inter. Ural Conf. on Measurements (UralCon)*. 16–19 октября. 2017 г. USA: IEE Xplore; 2017: 15–22. <https://doi.org/10.1109/URALCON.2017.8120681>

22. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / пер. с англ. М.: Наука; 1973. 713 с.

23. Кларк Э.Р., Эберхардт К.Н. Микроскопические методы исследования материалов / пер. с англ. С.Л. Баженова. М.: Техносфера; 2007. 371 с.

24. Акимов Б.А., Александров В.В., Александровский А.Л., Берман И.В. Физика твердого тела. М.: Издательство МГУ; 1983. 295 с.

25. Шишловский А.А. Прикладная физическая оптика. М.: Физматгиз; 1961. 822 с.

26. Забелина Е.В. Неоднородности в кристаллах лантан-галлиевого танталата и их влияние на оптические свойства: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М.: НИТУ «МИСиС»; 2018. 150 с.

References

1. Shaskol'skaya M.P. Crystallography. Moscow: Vysshaya shkola; 1976. 391 p. (In Russ.)
2. Blistanov A.A. Crystals of quantum and nonlinear optics. Moscow: MISiS; 2000. 432 p. (In Russ.)
3. Zernike F., Midwinter J. Applied nonlinear optics. NY; Sidney; Toronto; London: John Wiley & Sons; 1973. 261 p. (Russ. Transl.: Zernike F., Midwinter J. Prikladnaya nelineinaya optika. Moscow: Mir; 1976. 261 p.)
4. Gurzadyan G.G., Dmitriev V.G., Nikogosyan D.N. Nonlinear optical crystals. Properties and applications in quantum optics. Moscow: Radio i svyaz'; 1991. 160 p. (In Russ.)
5. Nikogosyan D.N. Nonlinear optical crystals: a complete survey. NY, USA: Springer Science and Business Media, Inc; 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. Blistanov A.A., Bondarenko V.S., Shaskol'skaya M.P., Chkalova V.V. Acoustic crystals. Moscow: Nauka; 1981. 632 p. (In Russ.)
8. Iona F., Shirane D. Ferroelectric crystals. Oxford: Pergamon Press; 1962. 402 p. (Russ. Transl.: Iona F., Shirane D. 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 U. Piezoelectric crystals and their application in ultraacoustics. NY, USA: Van Nostrand; 1950. 448 p. (Russ. Transl.: Mezon U. P'ezoelektricheskie kristally i ikh primeneniye v ul'traakustike Moscow: Izdatel'stvo inostrannoi literatury; 1952. 448 p.)
11. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. Piezoelectric sensors. Moscow: Technosfera; 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. Prokhorov A.M., ed. Physical encyclopedic dictionary. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya; 1984. 944 p. (In Russ.)

14. Perelomova N.V., Tagieva M.M. Crystal physics. Moscow: Izdatel'skii Dom NITU "MISiS"; 2013. 407 p. (In Russ.)

15. Prokhorov A.M., ed. Physical encyclopedia. In 5 vol. Vol. 1 Aharonov-Bohm effect – Long lines. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya; 1988. 704 p. (In Russ.)

16. Fedorov F.I. The theory of gyrotropy. Moscow: Nauka i tekhnika; 1976. 456 p. (In Russ.)

17. Melancholin N.M. Methods for studying the optical properties of crystals. Moscow: Nauka; 1970. 156 p. (In Russ.)

18. Shubnikov A.V. Fundamentals of optical crystallography. Moscow: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR; 1958. 205 p. (In Russ.)

19. Konstantinova A.F., Grechushnikov B.N., Bokut' B.V., Valyashko Ye.G. Optical properties of crystals. Minsk: Navuka i tekhnika; 1995. 303 p. (In Russ.)

20. 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.)

21. Kozlova N.S., Goreeva Zh.A., Zabelina E.V. Testing quality assurance of single crystals and stock on their base. *Proc. 2nd Inter. Ural Conf. on Measurements (UralCon)*. October 16–19, 2017. USA: IEE Xplore; 2017: 15–22. <https://doi.org/10.1109/URALCON.2017.8120681>

22. Born M., Volf E. Fundamentals of optics. Oxford: Pergamon Press; 1959. 855 p. (Russ. Transl.: Born M., Vol'f E. Osnovy optiki. Moscow: Nauka; 1973. 855 p.)

23. Klark E.R., Eberkhardt K.N. Microscopic methods for studying materials. UK: Woodhead Publishing; 2002. 424 p. (Russ. Transl.: Klark E.R., Eberkhardt K.N. Mikroskopicheskie metody issledovaniya materialov. Moscow: Tekhnosfera; 2007. 371 p.)

24. Akimov B.A., Aleksandrov V.V., Aleksandrovskii A.L., Berman I.V. Solid state physics. Moscow: Moscow University Press; 1983. 295 p. (In Russ.)

25. Shishlovskii A.A. Applied physical optics. Moscow: Fizmatgiz; 1961. 822 p. (In Russ.)

26. Zabelina E.V. Inhomogeneities in lanthanum-gallium tantalate crystals and their influence on optical properties. Diss. Cand. Sci. (Phys.–Math.). Moscow; 2018. 150 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Забелина Евгения Викторовна — канд. физ.–мат. наук, научный сотрудник; 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

Evgenia V. Zabelina — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Researcher; 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

Козлова Нина Семеновна — канд. физ.–мат. наук, ведущий эксперт; 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

Nina S. Kozlova — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Leading Expert; 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

Свисткова Ирина Ивановна — магистрант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; e-mail: svistkovair@gmail.com

Irina I. Svistkova — Master's Student; National University of Science and Technology MISiS, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; e-mail: svistkovair@gmail.com

Поступила в редакцию 27.06.2022; поступила после доработки 08.07.2022; принята к публикации 14.07.2022
Received 27 June 2022; Revised 8 July 2022; Accepted 14 July 2022

* * *