 © Авторы статьи / Authors of the article

ОПТИКА/OPTICS

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.19 EDN: HLIFAZ

ЛАЗЕРНАЯ КОНОСКОПИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ИЗЛУЧЕНИЕМ С ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ПОЛЯРИЗАЦИЯМИ

Научная статья

Пикуль О.Ю.[1, *], Рудой К.А.[2]
[1] ORCID : 0000-0003-4356-7253;
[1, 2] Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (pikoul2008[at]gmail.com)

Предложена: 21.01.2025; Принята: 02.04.2025; Опубликована: 17.04.2025

Аннотация

Проведено сравнительное исследование коноскопических картин монокристаллов ниобата лития и парателлурита, сформированных лазерным излучением с циркулярной, эллиптической и линейной поляризациями, имеющими ортогональные формы. Установлено, что двум ортогональным формам линейного излучения соответствуют два различных вида коноскопических картин для каждого кристалла, двум ортогональным формам циркулярного излучения — один вид коноскопических картин, двум ортогональным формам эллиптического излучения — один вид коноскопических картин. Показано, что и для циркулярного, и для эллиптического излучений при смене направления вращения вектора E на противоположное ось симметрии коноскопической картины кристалла поворачивается ~ на 90° Приведены результаты компьютерного моделирования коноскопических картин кристаллов с линейным и циркулярным излучениями, коррелирующие с экспериментом.

Ключевые слова: коноскопические картины, монокристалл, гиротропия, поляризация.

LASER CONOSCOPY OF SINGLE CRYSTALS BY RADIATION WITH ORTHOGONAL POLARISATIONS

Research article

Pikoul O.Y.[1, *], Rudoy K.A.[2]
[1] ORCID : 0000-0003-4356-7253;
[1, 2] Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russian Federation

* Corresponding author (pikoul2008[at]gmail.com)

Suggested: 21.01.2025; Accepted: 02.04.2025; Published: 17.04.2025

Abstract

A comparative study of the conoscopic patterns of lithium niobate and paratellurite single crystals formed by laser radiation with circular, elliptical and linear polarisations having orthogonal forms has been carried out. It is found that two different kinds of conoscopic patterns for each crystal correspond to two orthogonal forms of linear radiation, one kind of conoscopic patterns correspond to two orthogonal forms of circular radiation, and one kind of conoscopic patterns correspond to two orthogonal forms of elliptical radiation. It is shown that for both circular and elliptical radiations, when the direction of rotation of the vector E is reversed, the symmetry axis of the conoscopic image of the crystal is rotated ~ by 90° The results of computer modelling of conoscopic images of crystals with linear and circular radiations, which correlate with the experiment, are given.

Keywords: conoscopic images, single crystal, gyrotropy, polarisation.

Введение

Лазерная коноскопия является развивающимся, многофункциональным и чувствительным методом диагностики, актуальна в дефектоскопии и метрологии монокристаллов, применяемых в оптике [1], [4], [7], [10].

С одной стороны, лазерная коноскопия позволяет исследовать оптические характеристики и свойства анизотропных монокристаллов — двулучепреломление, ориентацию и количество оптических осей, наличие или отсутствие гиротропии, дихроизм, оптические аномалии кристаллов, в том числе в динамике при наличии внешних воздействий [1], [3], [6], [8]. В методе коноскопии сходящееся (расходящееся) излучение пропускают через поляризатор, оптический компенсатор и через кристаллическую пластинку, получая при этом коноскопическую (интерференционную) картину кристалла значительных размеров с хорошей четкостью и контрастом. Затем с помощью анализатора изучаются изменения в интенсивности излучения, по которым судят о проявлении оптических характеристик в картине интерференции (коноскопической картине). Эти проявления зависят от геометрии, ориентации монокристаллов относительно направления наблюдения и достаточно хорошо изучены.

С другой стороны, лазерная коноскопия кристаллов проявляет большую чувствительность к поляризации излучения, которая подвергается определенным изменениям практически во всех оптических процессах.

В практике работы лабораторий и на производстве в рамках экспресс-контроля может возникать необходимость простых визуальных методов определения поляризации излучения, особенно при настройке и использовании оптических компенсаторов, меняющих поляризацию излучения в широком диапазоне значений. Такой метод называется инверсной коноскопией, достаточно хорошо описан на примере коноскопических картин негиротропных

 © Авторы статьи / Authors of the article

кристаллов [9], [10], при этом гиротропным кристаллам уделено меньше внимания и отсутствует информация о том, как проявляется ортогональность поляризации излучения на коноскопической картине кристалла.

Целью данной работы является расширение возможностей идентификации входной поляризации излучения, в том числе с ортогональными поляризациями, с помощью коноскопических картин, сформированных как гиротропным, так и негиротропным монокристаллом с известными оптическими характеристиками.

Методы и принципы исследования

Любое состояние поляризации излучения можно рассматривать как фигуру Лиссажу, соответствующую сложению ортогональных колебаний вектора напряженности E поля одной и той же частоты с различным сдвигом фаз. В общем случае это эллипс, двумя предельными формами которого являются окружность (эллипс с равными полуосями) и отрезок прямой (эллипс с одной из полуосей, равной нулю).

В данной работе поляризация излучения преобразуется поворотом оптического компенсатора (фазовой пластинки λ/4), в процессе которого изменяются эллиптичность излучения, ориентация и направление обхода поляризационного эллипса на выходе из пластинки. Далее полученное поляризованное излучение через рассеиватель направляют на кристалл, после которого на экране за анализатором формируется коноскопическая картина кристалла (рис. 1).

Характеристики фазовых пластинок рассчитываются по формулам:

$$tg2\chi = tg2\alpha \cdot cos\delta \quad (1)$$

$$sin2\gamma = sin2\alpha \cdot sin\delta \quad (2)$$

где χ — азимут излучения, вышедшего из фазовой пластинки; γ — эллиптичность излучения на выходе из пластинки; α — угол поворота пластинки относительно направления пропускания поляризатора; δ — фазовый сдвиг, вносимый пластинкой.

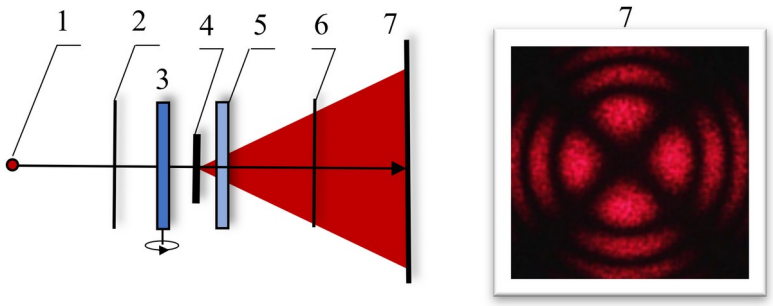


Рисунок 1 - Схема оптической системы для лазерной коноскопии кристалла:
1 – лазер; *2* – поляризатор; *3* – фазовая пластинка λ/4; *4* – рассеиватель; *5* – кристаллическая пластинка, вырезанная перпендикулярно оптической оси; *6* – анализатор; *7* – экран
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.19.1

При повороте фазовой пластинки вокруг лабораторной вертикали на процесс преобразования форм поляризации излучения влияют два фактора, а именно, изменение фазового сдвига δ (при постоянной толщине) и изменение амплитуд колебаний векторов E обыкновенного и необыкновенного лучей, что позволяет получить все формы поляризации излучения, а именно: линейно поляризованные излучения с параллельным и перпендикулярным направлениями векторов E к оси пропускания анализатора, излучения с правой и левой циркулярными и эллиптическими поляризациями.

Из уравнений (1) и (2) понятно, что при δ = 0 и δ = π излучение сохранит линейную поляризацию, но во втором случае вектор E на выходе из фазовой пластинки повернется на 90°, линейная поляризация станет ортогональной. При значениях δ = π/2 и δ = 3π/2 излучение приобретет ортогональные формы циркулярной поляризации – с противоположным направлением обхода.

При значениях фазового сдвига 0 < δ < π/2 и π/2 < δ < π; π < δ < 3π/2 и 3π/2 < δ < 2π излучение будет эллиптическим с ортогональными поляризациями.

Основные результаты и обсуждение

Для получения и анализа коноскопических картин, сформированных излучением с ортогональными поляризациями, были выбраны негиротропный кристалл ниобата лития ($LiNbO_3$) и гиротропный кристалл парателлурита (TeO_2), а оси пропускания поляризатора и анализатора оставались скрещенными. Гиротропный кристалл обладает способностью вращать плоскость поляризации линейного излучения вдоль оптической оси.

Эксперимент показал, что излучение с линейной поляризацией формирует два вида коноскопических картин для каждого кристаллического образца. Первый вид — это коноскопическая картина негиротропного кристалла ниобата лития в виде черного «мальтийского креста» на фоне колец-изохром (линий одинаковой разности фаз) (рис. 2, а). При повороте на 90° вектора E входящего в кристалл излучения (ортогональная поляризация) имеет место второй вид

 © Авторы статьи / Authors of the article

коноскопической картины — она становится дополнительной, при этом черный «мальтийский крест» превращается в светлый (рис. 2, д).

Два вида коноскопических картин гиротропного кристалла парателлурита с ортогональными формами линейной поляризации излучения также являются дополнительными, при этом черный «мальтийский крест» (рис. 3, а) и светлый «мальтийский крест» (рис. 3, д) отсутствуют в центре поля зрения.

Для циркулярной поляризации излучения характерен один вид коноскопической картины кристалла для двух ортогональных поляризаций излучения: для кристалла ниобата лития это две черные точки в центре поля зрения (рис. 2, б, е). Коноскопические картины гиротропного кристалла парателлурита с циркулярным излучением имеют вид двойной спирали (рис. 3, б, е). Ось симметрии изображения поворачивается ~ на 90° при смене направления вращения вектора E в обоих случаях.

Для эллиптической поляризации излучения характерны два вида коноскопических картин как для ниобата лития (рис. 2, в, ж, г, е), так и для парателлурита (рис. 3, в, ж, г, е). Один вид коноскопической картины соответствует случаю, при котором азимуты входящего в пластинку λ/4 излучения и эллипса поляризации на выходе из нее совпадают, и вектор E входящего излучения, и большая ось эллипса поляризации находятся в одном квадранте, что происходит в интервале разности фаз $0 < \delta < \pi/2$ и $3\pi/2 < \delta < 2\pi$ (рис. 2, в, ж), (рис. 3, в, ж).

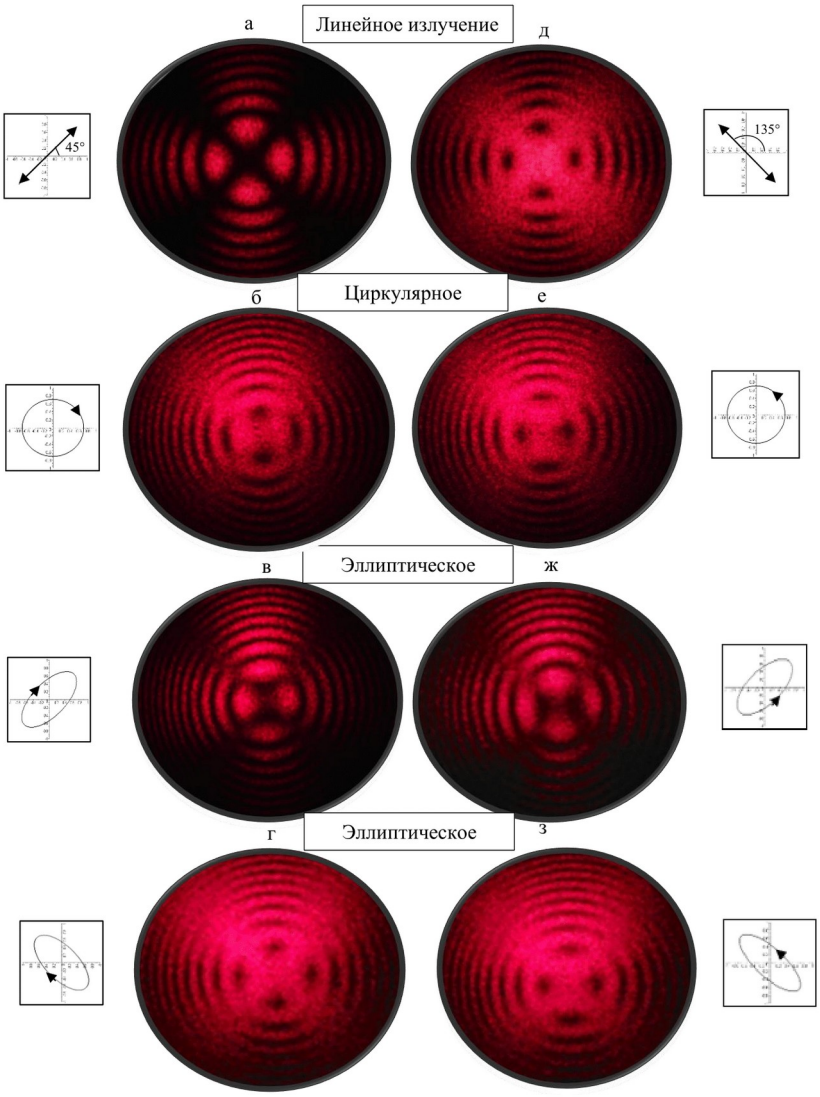
Второй вид картины соответствует случаю, при котором вектор E входящего в пластинку λ/4 излучения и большая ось эллипса поляризации на выходе из нее находятся в соседних квадрантах и составляют угол 90°, что происходит в интервале разности фаз $\pi/2 < \delta < \pi$ и $\pi < \delta < 3\pi/2$ (рис. 2, г, е), (рис. 3, г, е).

И в том, и в другом случаях для эллиптического излучения смена направления обхода вектора E на противоположное при сохранении ориентации эллипса приводит к тому, что ось симметрии коноскопической картины поворачивается ~ на 90°.

Две разновидности коноскопических картин оптических кристаллов как ниобата лития, так и парателлурита с ортогональными формами эллиптически поляризованного излучения, существенно отличаются друг от друга.

Результаты компьютерного моделирования коноскопических картин кристаллов с линейным и циркулярным излучениями, имеющими ортогональные формы (рис. 4), достаточно хорошо коррелируют с результатами эксперимента. Моделирование проведено на основании выражений для интенсивности излучения, прошедшего поляризатор, кристалл и анализатор.

 © Авторы статьи / Authors of the article



 © Авторы статьи / Authors of the article

Рисунок 2 - Коноскопические картины кристалла ниобата лития с излучением, имеющим фазовый сдвиг δ:
а - 0°, 360°; *б* - 45°; *в* - 90°; *г* - 135°; *д* -180°; *е* - 225°; *ж* - 270°; *з* - 315°
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.19.2

Примечание: азимут входящего в фазовую пластинку линейно поляризованного излучения α=45°

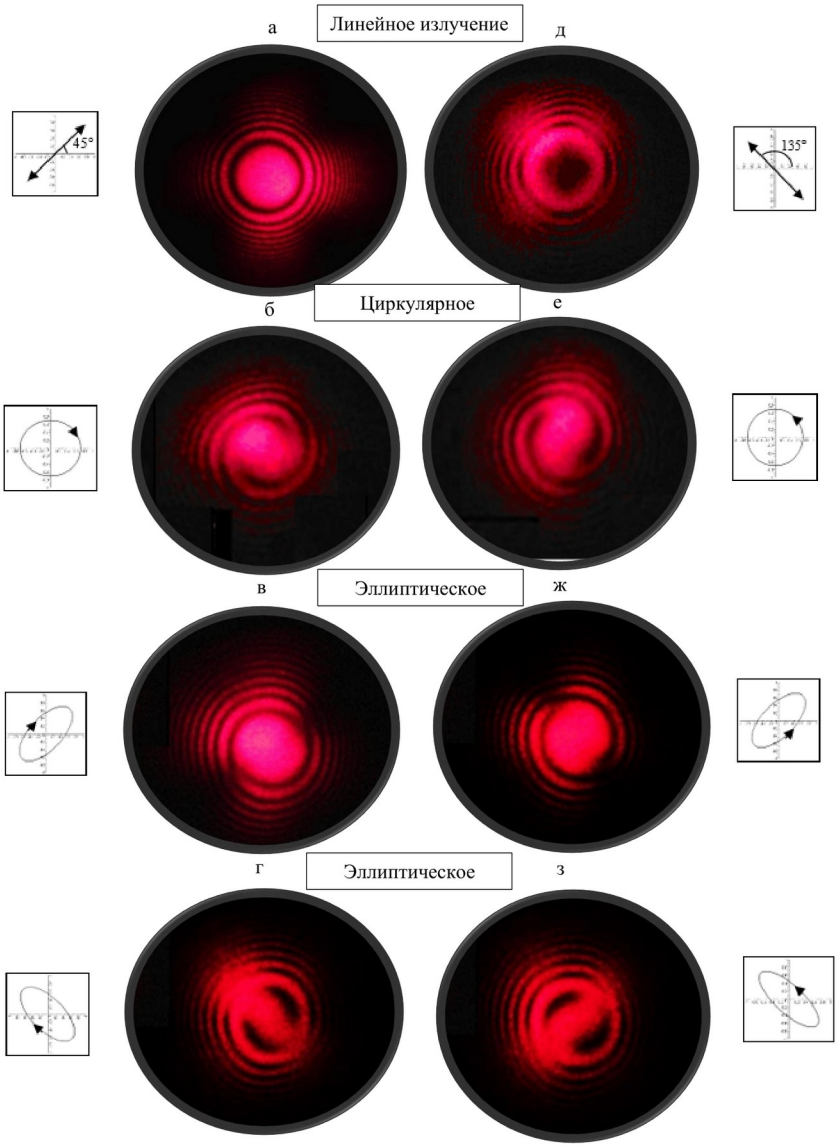


Рисунок 3 - Коноскопические картины кристалла парателлурита с излучением, имеющим фазовый сдвиг δ:
а - 0°, 360°; *б* - 45°; *в* - 90°; *г* - 135°; *д* -180°; *е* - 225°; *ж* - 270°; *з* - 315°
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.19.3

Примечание: азимут входящего в фазовую пластинку линейно поляризованного излучения α=45°

 © Авторы статьи / Authors of the article

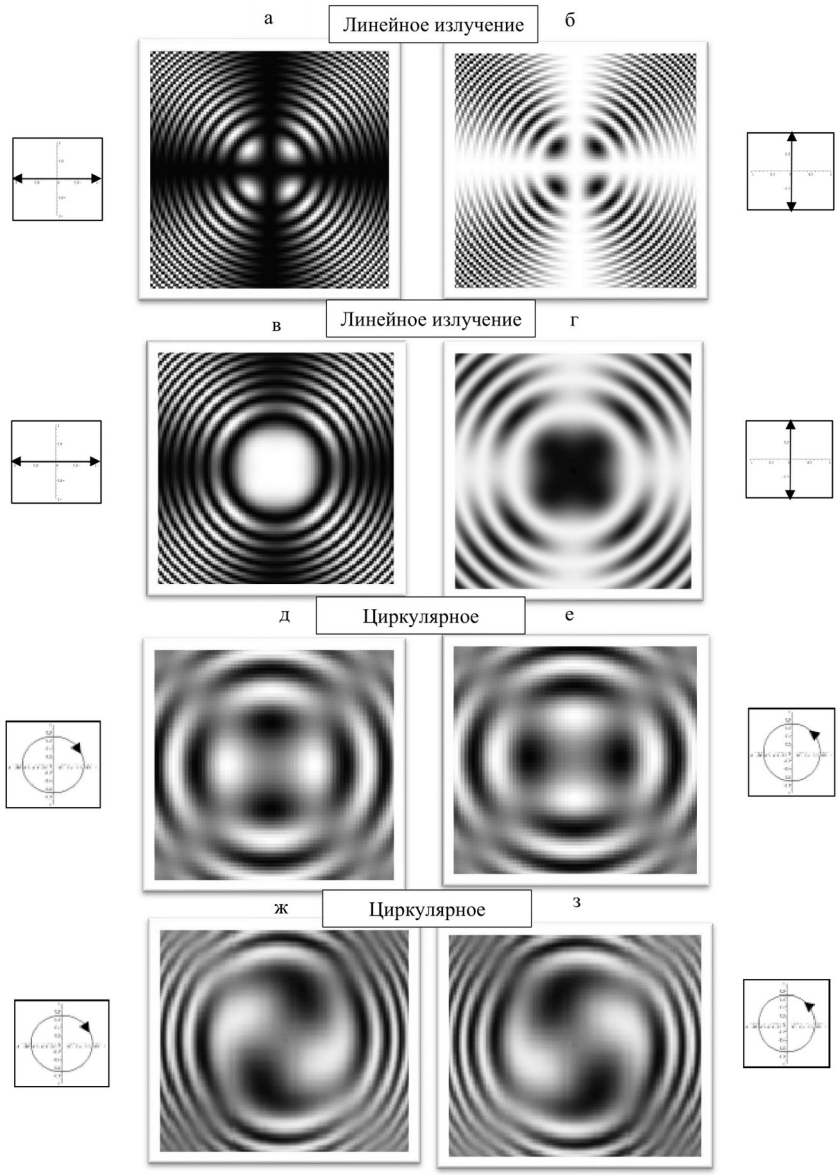


Рисунок 4 - Результаты компьютерного моделирования коноскопических картин кристалла ниобата лития: *а*, *б* – с ортогональными линейными поляризациями; *д*, *е* – с циркулярным излучением (ортогональные поляризации); кристалла парателлурита: *в*, *г* – с ортогональными линейными поляризациями; *ж*, *з* – с циркулярным излучением (ортогональные поляризации)

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.19.4

Заключение

Представлен опыт оперативной визуальной идентификации ортогональных форм поляризации излучения на основе коноскопических картин как гиротропных, так и негиротропных кристаллов.

Показано расширение возможностей инверсной коноскопии за счет уточнения видов коноскопических картин как гиротропных, так и негиротропных кристаллов, соответствующих ортогональным формам поляризации излучения, что является новизной.

Компьютерное моделирование коноскопических картин кристаллов подтверждено экспериментальными результатами, которые могут быть использованы в визуализаторах поляризации оптического излучения.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Список литературы / References

1. Меланхолин Н.М. Методы исследования оптических свойств кристаллов / Н.М. Меланхолин. — М.: Наука, 1970. — 155 с.

2. Dumitrascu L. Conoscopic method for determination of main refractive indices and thickness of a uniaxial crystal cut out parallel to its optical axis / L. Dumitrascu, I. Dumitrascu, D.O. Dorohoi // J. Appl. Cryst. — 2009. — Vol. 42. — № 5. — P. 878–884.

3. Haigh J.A. Inverse conoscopy: a method to measure polarization using patterns generated by a single birefringent crystal / J.A. Haigh, Y. Kinebas, A.J. Ramsay //Applied Optics. — 2014. — Vol. 53. — № 2. — P. 184–188.

4. Wang P. Visualizing the conoscopic isochromatic interference fringes in anisotropic crystals by spinning polarizer and analyzer / P. Wang // Optics Letters. — 2012. — Vol. 37. — № 21. — P. 4392–4394.

5. Сидоров Н.В. Лазерная коноскопия и фотоиндуцированное рассеяние света в исследованиях свойств нелинейно-оптического кристалла ниобата лития / Н.В. Сидоров, О.Ю. Пикуль, Н.А. Теплякова [и др.]. — Москва : РАН, 2019. — 350 с.

6. Pikoul O.Yu. Determination of the optical sign of a crystal by a conoscopic method / O.Yu. Pikoul // Journal of Applied Crystallography. — 2010. — Vol. 43. — № 5. — Pt. 1. — P. 955–958.

7. Rudoy K.A. Laser conoscopy of two-component optical systems from gyrotropic crystals / K.A. Rudoy, O.Yu. Pikoul // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2022. — Vol. 86. — № S1. — P. S183–S186.

8. Pikoul O.Yu. Laser conoscopy of crystal plates with input face parallel to optical axis / O.Yu. Pikoul, K.A. Rudoy // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2023. — Vol. 87. — № S3. — P. S436–S440.

9. Pikoul O.Yu. Visualization of light polarization forms in the laser conoscopic method / O.Yu. Pikoul // Optik. — 2018. — Vol. 158. — P. 349–354.

10. Pikoul O.Yu. Visualization of the effect of an impurity on the optical homogeneity of lithium niobate doped with boron cations / O.Yu. Pikoul, N. Sidorov, M. Palatnikov // Key Engineering Materials. — 2021. — Vol. 887 KEM. — P. 65–70.

11. Pikoul O.Yu. Laser conoscopy of optically active crystals / O.Yu. Pikoul // Materials Science Forum. — 2020. — Vol. 992. — P. 976–980.

12. Pikoul O.Yu. Use of λ/4 phase plate in laser conoscopic method / O.Yu. Pikoul // Optik — International Journal for Light and Electron Optics. — 2018. — Vol. 161. — P. 146–150.

13. Пикуль О.Ю. Использование метода лазерной коноскопии для анализа и оценки оптического качества кристаллов ниобата лития / О.Ю. Пикуль, Н.В. Сидоров, М.Н. Палатников // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2019. — Т. 62. — № 3. — С. 256–260.

14. Снопко В.Н. Поляризационные характеристики оптического излучения и методы их измерения / В.Н. Снопко; АН Беларуси, Ин-т физики им. Б.И. Степанова. — Минск : Навука і тэхніка, 1992. — 334 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Melanholin N.M. Metody issledovanija opticheskih svojstv kristallov [Methods of studying optical properties of crystals] / N.M. Melanholin. — M.: Nauka, 1970. — 155 p. [in Russian]

2. Dumitrascu L. Conoscopic method for determination of main refractive indices and thickness of a uniaxial crystal cut out parallel to its optical axis / L. Dumitrascu, I. Dumitrascu, D.O. Dorohoi // J. Appl. Cryst. — 2009. — Vol. 42. — № 5. — P. 878–884.

3. Haigh J.A. Inverse conoscopy: a method to measure polarization using patterns generated by a single birefringent crystal / J.A. Haigh, Y. Kinebas, A.J. Ramsay //Applied Optics. — 2014. — Vol. 53. — № 2. — P. 184–188.

4. Wang P. Visualizing the conoscopic isochromatic interference fringes in anisotropic crystals by spinning polarizer and analyzer / P. Wang // Optics Letters. — 2012. — Vol. 37. — № 21. — P. 4392–4394.

5. Sidorov N.V. Lazernaja konoskopija i fotoinducirovannoe rassejanie sveta v issledovanijah svojstv nelinejno-opticheskogo kristalla niobata litija [Laser conoscopy and photoinduced light scattering in studies of properties of nonlinear optical lithium niobate crystal] / N.V. Sidorov, O.Ju. Pikul', N.A. Tepljakova [et al.]. — Moscow : RAS, 2019. — 350 p. [in Russian]

6. Pikoul O.Yu. Determination of the optical sign of a crystal by a conoscopic method / O.Yu. Pikoul // Journal of Applied Crystallography. — 2010. — Vol. 43. — № 5. — Pt. 1. — P. 955–958.

7. Rudoy K.A. Laser conoscopy of two-component optical systems from gyrotropic crystals / K.A. Rudoy, O.Yu. Pikoul // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2022. — Vol. 86. — № S1. — P. S183–S186.

8. Pikoul O.Yu. Laser conoscopy of crystal plates with input face parallel to optical axis / O.Yu. Pikoul, K.A. Rudoy // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2023. — Vol. 87. — № S3. — P. S436–S440.

9. Pikoul O.Yu. Visualization of light polarization forms in the laser conoscopic method / O.Yu. Pikoul // Optik. — 2018. — Vol. 158. — P. 349–354.

10. Pikoul O.Yu. Visualization of the effect of an impurity on the optical homogeneity of lithium niobate doped with boron cations / O.Yu. Pikoul, N. Sidorov, M. Palatnikov // Key Engineering Materials. — 2021. — Vol. 887 KEM. — P. 65–70.

11. Pikoul O.Yu. Laser conoscopy of optically active crystals / O.Yu. Pikoul // Materials Science Forum. — 2020. — Vol. 992. — P. 976–980.

12. Pikoul O.Yu. Use of λ/4 phase plate in laser conoscopic method / O.Yu. Pikoul // Optik — International Journal for Light and Electron Optics. — 2018. — Vol. 161. — P. 146–150.

 © Авторы статьи / Authors of the article

13. Pikul' O.Ju. Ispol'zovanie metoda lazernoj konoskopii dlja analiza i ocenki opticheskogo kachestva kristallov niobata litija [Use of laser conoscopy method for analysis and assessment of optical quality of lithium niobate crystals] / O.Ju. Pikul', N.V. Sidorov, M.N. Palatnikov // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie [Proceedings of Universities. Instrument engineering]. — 2019. — Vol. 62. — № 3. — P. 256–260. [in Russian]

14. Snopko V.N. Poljarizacionnye harakteristiki opticheskogo izluchenija i metody ih izmerenija [Polarisation characteristics of optical radiation and methods of their measurement] / V.N. Snopko; Academy of Sciences of Belarus, Institute of Physics named after B.I. Stepanov. — Minsk : Navuka i tjehnika, 1992. — 334 p. [in Russian]