

Особенности спектра отраженного и прошедшего света круговой поляризации для тонкого слоя анизотропного кристалла типа вюрцита вблизи фононного резонанса

В.В. Яцышен , И.И. Бородина

Волгоградский государственный университет
400062, Россия, г. Волгоград,
Университетский пр., 100

Аннотация – Обоснование. Поляритоны привлекают внимание исследователей и инженеров своими уникальными свойствами и перспективными приложениями в области микро- и наноэлектроники. Среди таких применений могут быть устройства типа транзистора или даже лазера на поляритонах, о чем сообщалось в научной литературе. **Цель.** В работе проводится анализ частотных спектров отражения при возбуждении поляритонов, а также рассматривается изменение эллипса поляризации при отражении света круговой поляризации от анизотропного кристалла. **Методы.** На основе волнового уравнения в анизотропной среде выводится дисперсионное уравнение для поляритонов для расчета энергетических коэффициентов отражения с использованием метода характеристических матриц. **Результаты.** В качестве объекта анализа выбран кристалл нитрида алюминия AlN. Показано, что применение поляризованного по кругу падающего излучения дает возможность с помощью анизотропного кристалла изменять характер поляризации от круговой до практически линейной. **Заключение.** Найденная зависимость поляризации отраженного света может быть использована в электронных устройствах на базе поляритонов.

Ключевые слова – поляритон; одноосный анизотропный кристалл типа вюрцита; фононный резонанс; эллипсометрия; эллипс поляризации; круговая поляризация; эллиптическая поляризация.

Введение

Использование света круговой поляризации при анализе оптических свойств кристаллических сред привлекает в последнее время повышенный интерес исследователей в связи возможностью получения более детальной информации по сравнению с неполяризованным или линейно поляризованным светом. В ряде работ был проведен анализ таких спектров для сред различной природы.

В работе [1] рассматриваются фундаментальные вопросы физики коллективных явлений, связанных с фотонными, плазмонными, электронными и фононными состояниями, а также использования этих явлений для разработки новых устройств для оптического зондирования и обработка информации. В работе [2] предлагается новый метод, заключающийся в использовании плоскопараллельной пластины для преобразования линейной поляризации в другие состояния поляризации. Авторы [3] предлагают использование твердотельных лазеров для управления поляризацией мощных лазерных лучей и образования оптимальной эллиптической поляризации для технологических целей. В работе [4] рассматривается самомодуляция обыкновенной и необыкновенной волн в анизотропном кристалле, вызывающая энерге-

тическое расщепление результирующих лево- и правосторонних эллиптически поляризованных волн. Работа [5] посвящена анализу электромагнитных свойств киральных метаматериалов, которые, как и поляритонные среды, проявляют уникальные частотные зависимости электродинамических параметров. В работе [6] представлены результаты расчета угловых спектров отражения света при условии возбуждения поверхностных плазмонов в схеме Кречмана. Автором [7] рассмотрено применение эллиптически поляризованного света для целей диагностики параметров тонкой пленки. В работе [8] предложен метод нарушенного полного отражения с использованием циркулярно поляризованного света для эллипсометрии биологических объектов.

В настоящей работе ставится задача расчета спектров отраженного и прошедшего света для кристаллов типа вюрцита вблизи фононного резонанса. В таком случае в кристалле возбуждаются объемные поляритоны, имеющие смешанный фонон-фотонный характер. При этом свойства поляритонов существенно зависят от частоты падающего света, что открывает возможность управления такими возбуждениями при их использовании в микро- и наноустройствах.

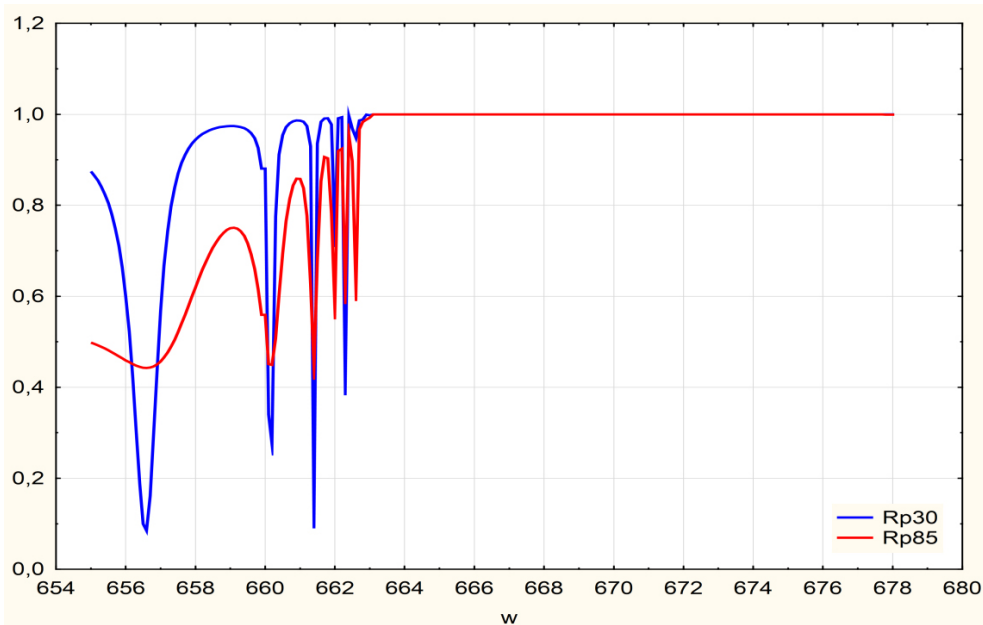


Рис. 1. Зависимость энергетического коэффициента отражения p -поляризации от частоты при значениях угла падения 30° и 85°
Fig. 1. Dependence of the energy reflection coefficient of p -polarization on frequency at the following values of the angle of incidence 30° and 85°

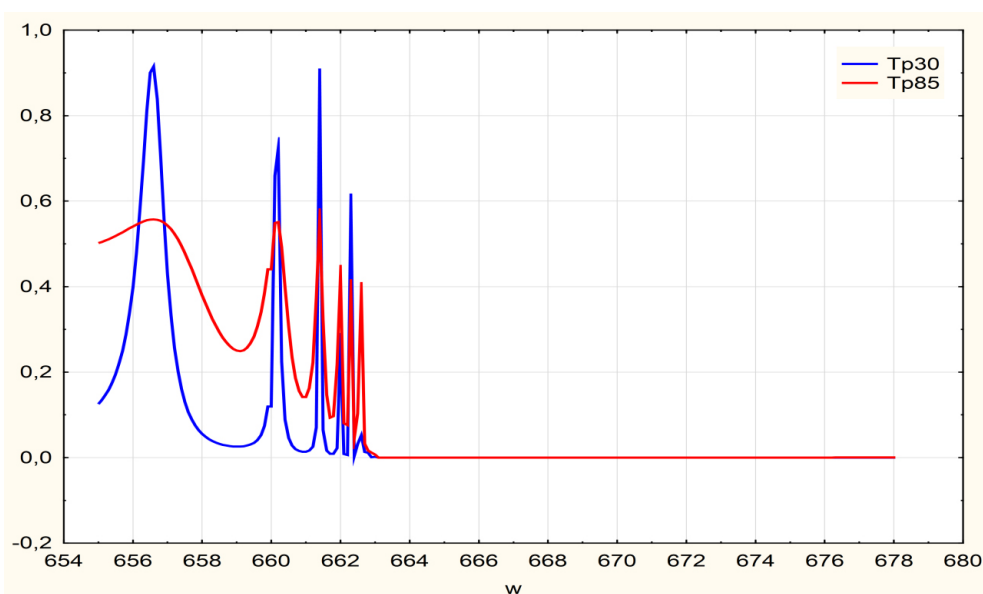


Рис. 2. Зависимость энергетического коэффициента p -поляризации от частоты при значениях угла падения 30° и 85°
Fig. 2. Dependence of the energy coefficient of p -polarization on frequency at the following values of the angle of incidence 30° and 85°

Постановка задачи

На анизотропный кристалл типа вюрцита из вакуума под углом падает плоская гармоническая электромагнитная волна левой круговой поляризации с частотой ω . Оптическая ось кристалла находится в плоскости падения и образует с осью OZ угол φ . Необходимо провести анализ частотной зависимости эллипсометрических параметров отраженного и прошедшего света при различных углах падения α , а также выяснить характер из-

менения формы эллипса поляризации при изменении частоты падающего излучения. В качестве объекта исследования выбран кристалл нитрида алюминия AlN, параметры которого зависят от частоты [10].

Методы решения

На основе волнового уравнения для анизотропной среды находится дисперсионное уравнение для нормальных волн вблизи фонованного резонанса.

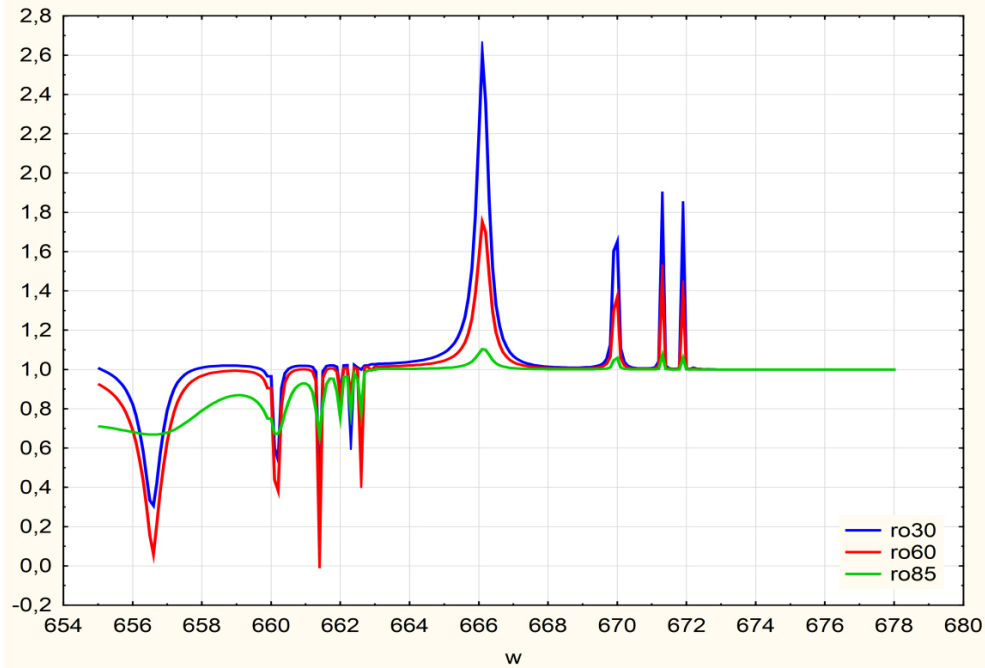


Рис. 3. Зависимость параметра эллипсометрии ρ от частоты при значениях угла падения 30° , 60° , 85°
Fig. 3. Dependence of the ellipsometry ρ parameter on frequency at the following values of the angle of incidence 30° , 60° , 85°

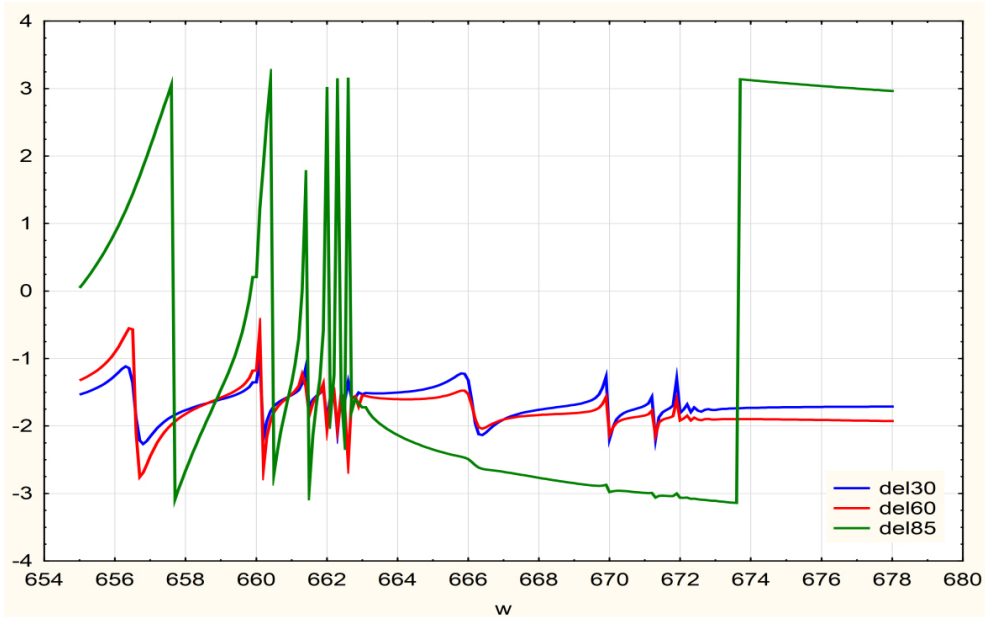


Рис. 4. Зависимость параметра эллипсометрии Δ от частоты при значениях угла падения 30° , 60° , 85°
Fig. 4. Dependence of the ellipsometry Δ parameter on frequency at the following values of the angle of incidence 30° , 60° , 85°

Последние имеют смешанный характер – фотонный и фонный, образуя коллективное возбуждение – поляритон. Задача об отражении решается с помощью метода характеристических матриц [9]. Амплитудные коэффициенты отражения и прохождения света можно выразить через элементы характеристической матрицы. Для исследования характера изменения формы эллипса поляризации света необходимо провести расчет параме-

тров эллипсометрии отраженного и прошедшего света. Эти параметры ρ и Δ определяются следующим образом: $\hat{\rho} = \rho e^{i\Delta}$. Здесь $\hat{\rho} = R_p / R_s$ – отношение комплексных амплитуд отраженного света p - и s -поляризации.

Результаты

На рис. 1–7 представлены результаты расчета эллипсометрических параметров отраженного и

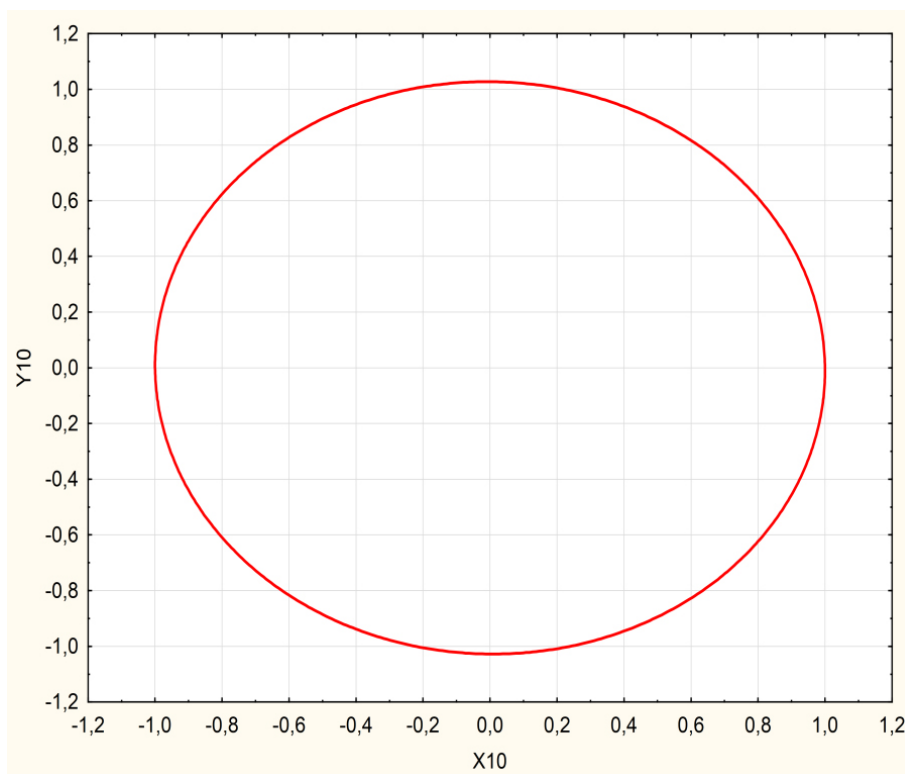


Рис. 5. Форма эллипса поляризации отраженного излучения – правая эллиптическая поляризация $\rho = 1,028$, $\Delta = -1,580$, $\alpha = 10^\circ$, $w = 655 \text{ см}^{-1}$
Fig. 5. Shape of the polarization ellipse of reflected radiation – right-handed elliptical polarization $\rho = 1,028$, $\Delta = -1,580$, $\alpha = 10^\circ$, $w = 655 \text{ см}^{-1}$

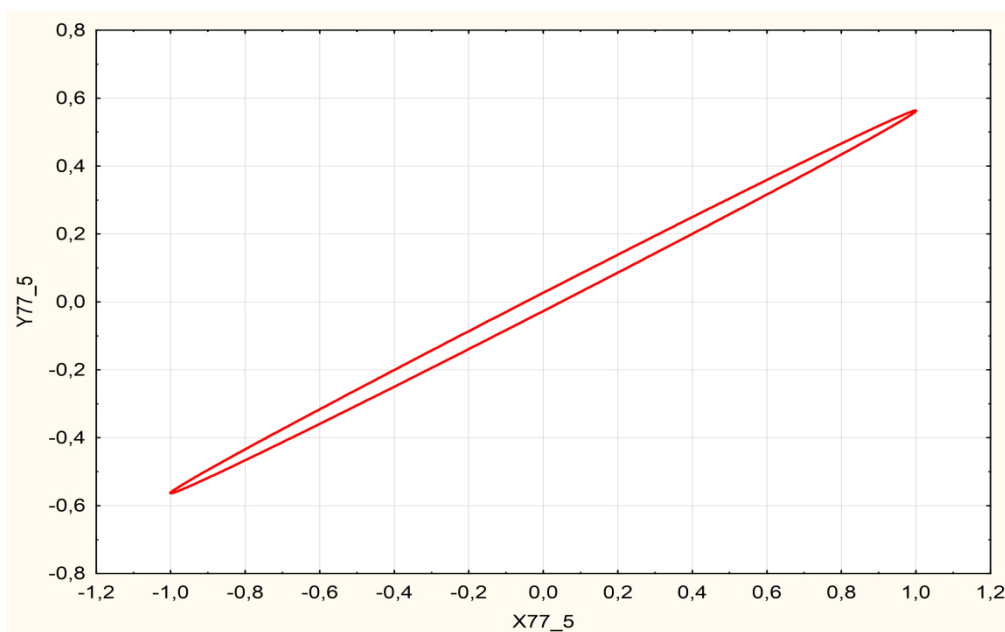


Рис. 6. Форма эллипса поляризации отраженного излучения – правая эллиптическая поляризация $\rho = 0,564$, $\Delta = -0,048$, $\alpha = 77,5^\circ$, $w = 655 \text{ см}^{-1}$
Fig. 6. Shape of the polarization ellipse of reflected radiation – right-handed elliptical polarization $\rho = 0,564$, $\Delta = -0,048$, $\alpha = 77,5^\circ$, $w = 655 \text{ см}^{-1}$

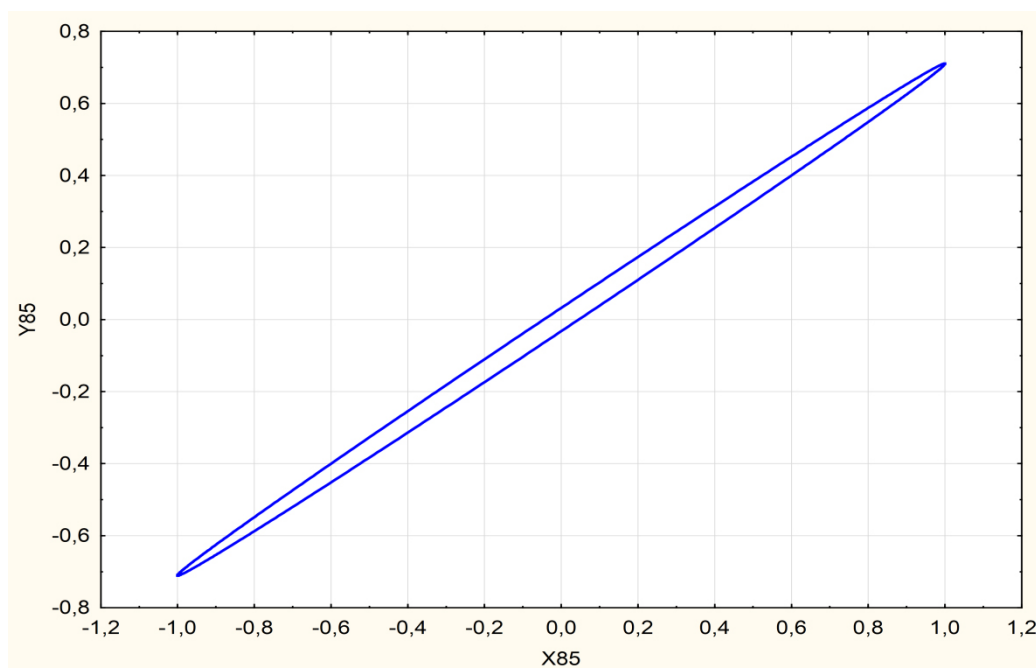


Рис. 7. Форма эллипса поляризации отраженного излучения – правая эллиптическая поляризация $\rho=0,711$, $\Delta=0,046$, $\alpha=85^\circ$, $w=655 \text{ cm}^{-1}$

Fig. 7. Shape of the polarization ellipse of reflected radiation – right-handed elliptical polarization $\rho=0,711$, $\Delta=0,046$, $\alpha=85^\circ$, $w=655 \text{ cm}^{-1}$

прошедшего света, а также изменение формы эллипса поляризации при различных значениях параметров. В последнем случае левая поляризация обозначена синим цветом, а правая – красным. Угол между оптической осью кристалла и нормалью к границе раздела равен $\varphi = 60^\circ$.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что использование света круговой поляризации при его отра-

жении от анизотропного кристалла типа вюрцита приводит к изменению эллипса поляризации отраженного света. При этом характер изменения последнего существенно зависит от параметров, характеризующих оптические свойства кристалла: резонансных фононных частот, угла между оптической осью кристалла и нормалью к границе раздела, а также от частоты и угла падения света на кристалл.

Список литературы

1. Collective phenomena in photonic, plasmonic and hybrid structures / S.V. Boriskina [et al.] // Optics Express. 2011. Vol. 19, no. 22. P. 22024–22028. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.19.022024>
2. Liangfa X., Juan L., Conghe W. Novel polarization conversion method of linearly polarized light at specific incident angle based on plane-parallel plate // Optik. 2019. Vol. 188. P. 187–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.05.039>
3. Rodrigues G.C., Dufloy J.R. Theoretical and experimental aspects of laser cutting with elliptically polarized laser beams // Journal of Materials Processing Technology. 2019. Vol. 264. P.448–453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.09.035>
4. Tan C.Z. Correlation of the left- and the right-handed circularly polarized waves in an anisotropic crystal // Optik. 2014. Vol. 125, no. 3. P. 1120–1123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.07.140>
5. Исследование кирального метаматериала СВЧ-диапазона на основе равномерной совокупности С-образных проводящих элементов / И.Ю. Бучнев [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26, № 1. С. 79–92. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.1.79-92>
6. Яцышен В.В. Методы наноплазмоники в угловой спектроскопии наноразмерных биологических объектов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 4. С. 111–115. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.4.111-115>
7. Yatsyshen V.V. The use of plasmon resonance spectroscopy to analyze the parameters of thin layers // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1515, no. 2. P. 022047. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/2/022047>
8. Yatsishen V., Amelchenko Y. Ellipsometry of biological objects in the mode of attenuated total reflection (ATR) using a circularly polarized laser light // Proc. SPIE 11458, Saratov Fall Meeting 2019: Laser Physics, Photonic Technologies, and Molecular Modeling. 2020. Vol. 11458. P. 114580S. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2564203>

9. Яцышен В.В., Слюсарев М.В. Ультразвуковая диагностика дефектов зоны сплавления в слоистых композиционных материалах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14, № 4. С. 103–105. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17272418>
10. Строшио М., Дутта М. Фононы в наноструктурах. М.: Физматлит, 2006. 320 с.

Информация об авторах

Яцышен Валерий Васильевич, доктор технических наук (специальность 01.04.03 Радиофизика), кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.03 Радиофизика, включая квантовую радиофизику), профессор кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения Института приоритетных технологий Волгоградского государственного университета, г. Волгоград, Россия. Окончил физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в 1976 г., а в 1979 г. – аспирантуру физфака МГУ. В 1980 г. в МГУ защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 «Радиофизика, включая квантовую радиофизику». В 1997 г. в Московском государственном институте радиотехники, электроники и информатики (технический университет) защитил докторскую диссертацию по специальности 01.04.03 «Радиофизика» в области технических наук.

Область научных интересов: влияние эффектов неоднородности, нелинейности и пространственной дисперсии на электромагнитные свойства сред и распространение электромагнитных волн в таких средах; электромагнитные свойства плазмонных, поляритонных и нанокomпозитных материалов.

E-mail: yatsishen@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4185-2333>

Бородина Ирина Игоревна, аспирант Института прикладных технологий Волгоградского государственного университета (ВолГУ), г. Волгоград, Россия. В 2018 г. окончила бакалавриат ВолГУ по направлению «Наноинженерия», а в 2020 г. – магистратуру по тому же направлению.

Область научных интересов: исследование электромагнитных свойств плазмонных, поляритонных и нанокomпозитных материалов.

E-mail: potapova.irina@volsu.ru

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2023, vol. 26, no. 4, pp. 10–16

DOI [10.18469/1810-3189.2023.26.4.10-16](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.4.10-16)

UDC 535.32

Original Research

Received 24 September 2023

Accepted 25 October 2023

Published 29 December 2023

Peculiarities of the spectrum of reflected and transmitted light of circular polarization for a thin layer of an anisotropic wurtzite-type crystal near phonon resonance

Valery V. Yatsyshen , Irina I. Borodina

Volgograd State University
100, University Avenue,
Volgograd, 400062, Russia

Abstract – Background. Polaritons attract the attention of researchers and engineers with their unique properties and promising applications in the field of micro- and nanoelectronics. Such applications could include devices such as transistors or even polaritons lasers, as have been reported in the scientific literature. **Aim.** The work analyzes the frequency reflection spectra upon excitation of polaritons, and also considers the change in the polarization ellipse upon reflection of circularly polarized light from an anisotropic crystal. **Methods.** Based on the wave equation in an anisotropic medium, a dispersion equation for polaritons is derived. To calculate energy reflection coefficients using the characteristic matrix method. **Results.** An aluminum nitride AlN crystal was chosen as the object of analysis. It is shown that the use of circularly polarized incident radiation makes it possible, using an anisotropic crystal, to change the nature of polarization from circular to almost linear polarization. **Conclusion.** The found dependence of the polarization of reflected light can be used in electronic devices based on polaritons.

Keywords – polariton; uniaxial anisotropic wurtzite-type crystal; phonon resonance; ellipsometry; polarization ellipse; circular polarization; elliptical polarization.

✉ yatsishen@yandex.ru (Valery V. Yatsyshen)

 © Valery V. Yatsyshen, Irina I. Borodina, 2023

References

1. S. V. Borisikina et al., “Collective phenomena in photonic, plasmonic and hybrid structures,” *Optics Express*, vol. 19, no. 22, pp. 22024–22028, 2011, doi: <https://doi.org/10.1364/OE.19.022024>.
2. X. Liangfa, L. Juan, and W. Conghe, “Novel polarization conversion method of linearly polarized light at specific incident angle based on plane-parallel plate,” *Optik*, vol. 188, pp. 187–192, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.05.039>.

3. G. C. Rodrigues and J. R. Duflou, "Theoretical and experimental aspects of laser cutting with elliptically polarized laser beams," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 264, pp. 448–453, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.09.035>.
4. C. Z. Tan, "Correlation of the left- and the right-handed circularly polarized waves in an anisotropic crystal," *Optik*, vol. 125, no. 3, pp. 1120–1123, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.07.140>.
5. I. Yu. Buchnev et al., "Investigation of the microwave chiral metamaterial based on a uniform set of C-shaped conductive inclusions," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 79–92, 2023, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.1.79-92>. (In Russ.)
6. V. V. Yatsyshen, "Nanoplasmonic methods in angular spectroscopy of nanoscale biological objects," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 111–115, 2020, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.4.111-115>. (In Russ.)
7. V. V. Yatsyshen, "The use of plasmon resonance spectroscopy to analyze the parameters of thin layers," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1515, no. 2, pp. 022047, 2020, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/2/022047>.
8. V. Yatsishen and Y. Amelchenko, "Ellipsometry of biological objects in the mode of attenuated total reflection (ATR) using a circularly polarized laser light," *Proc. SPIE 11458, Saratov Fall Meeting 2019: Laser Physics, Photonic Technologies, and Molecular Modeling*, vol. 11458, pp. 114580, 2020, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2564203>.
9. V. V. Yatsyshen and M. V. Slyusarev, "Ultrasonic diagnostic for a layered composite materials with defect in the alloying zone," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 14, no. 4, pp. 103–105, 2011, url: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17272418>. (In Russ.)
10. M. Strohio and M. Dutta, *Phonons in Nanostructures*. Moscow: Fizmatlit, 2006. (In Russ.)

Information about the Authors

Valeriy V. Yatsishen, Doctor of Technical Sciences (specialty 01.04.03 Radiophysics), Candidate of Physical and Mathematical Sciences (specialty 01.04.03 Radiophysics, including quantum radiophysics), professor of the Department of Forensic Science and Physical Materials Science of the Institute of Priority Technologies, Volgograd State University, Volgograd, Russia. Graduated from the Faculty of Physics of Moscow State University M.V. Lomonosov in 1976, and in 1979 – postgraduate studies at the Physics Department of Moscow State University. In 1980, at Moscow State University he defended his dissertation for the academic degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences in specialty 01.04.03 «Radiophysics, including quantum radiophysics». In 1997, at the Moscow State Institute of Radio Engineering, Electronics and Informatics (Technical University), he defended his doctoral dissertation in specialty 01.04.03 «Radiophysics» in the field of technical sciences.

Research interests: the influence of the effects of heterogeneity, nonlinearity and spatial dispersion on the electromagnetic properties of media and the propagation of electromagnetic waves in such media; electromagnetic properties of plasmonic, polariton and nanocomposite materials.

E-mail: yatsishen@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4185-2333>

Irina I. Borodina, graduate student at the Institute of Applied Technologies, Volgograd State University (VolSU), Volgograd, Russia. In 2018, she graduated from VolSU with a bachelor's degree in Nanoengineering, and in 2020, a master's degree in the same field.

Research interests: research of electromagnetic properties of plasmonic, polariton and nanocomposite materials.

E-mail: potapova.irina@volsu.ru