

Отражение и прохождение циркулярно-поляризованного света для слоистой периодической системы с распределенными дефектами

В.В. Яцышен 

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

Аннотация – Обоснование. Периодические слоистые системы формируют одномерные фотонные кристаллы, которые обладают многими свойствами обычных кристаллов. Особый интерес представляют оптические свойства таких структур, которые привлекают внимание исследователей и инженеров перспективой практических применений. **Цель.** В работе приводятся результаты расчета частотных и угловых спектров отражения и прохождения света для периодической структуры со сложными внедренными дефектами. **Методы.** С помощью метода характеристических матриц проводится расчет энергетических коэффициентов отражения и прохождения для такой структуры с использованием циркулярно-поляризованного света. Проводится анализ эллипсометрических параметров отраженного и прошедшего излучения. **Результаты.** В работе показано, что при наклонном падении света на исследуемую периодическую структуру с дефектом приводит к большому разнообразию угловых и частотных спектров отражения и прохождения, что позволяет применять данную структуру для селективного отражения, а также для устройств, изменяющих характер поляризации падающего излучения. **Заключение.** Использование циркулярно-поляризованного излучения при его отражении и прохождении для периодических сред со сложными распределенными дефектами позволяет получить новые управляемые оптические устройства.

Ключевые слова – периодическая структура; диэлектрический дефект; дефект с конечной проводимостью; эллипсометрический метод; круговая и эллиптическая поляризация света.

Введение

Диагностика неоднородных структур с помощью поляризованного оптического излучения позволяет получить важную информацию как для изучения самих объектов, так и для практического использования таких структур. В работах [2–4] проводится анализ оптических свойств тонких пленок с использованием циркулярно-поляризованного света. Особый интерес представляют периодические слоистые структуры, образующие одномерный фотонный кристалл [1]. Идеальные периодические структуры обладают характерными спектрами отраженного и прошедшего света, на фоне которых особенно ярко выделяются особенности, связанные с наличием дефектов в периодической структуре [5–7; 9]. Применение распределенных дефектов в идеальной периодической структуре приводит к возможности получения уникальных устройств для преобразования оптических параметров падающего на такую структуру излучения [8]. В данной работе проводится обобщение модели структуры с распределенными дефектами, предложенными в [8], на случай наклонного падения света и применения света круговой поляризации. Такое обобщение дает более

широкие возможности изучения отклика исследуемой системы на воздействующее поляризованное излучение для практических применений таких периодических структур с распределенными дефектами.

1. Постановка задачи

На периодическую слоистую систему, состоящую из 10 пар слоев, под углом θ_i падает циркулярно-поляризованный свет. В данной системе распределено 4 дефекта – см. рис. 1. Расчет проводился для следующих значений параметров: 1-й слой в периодической паре – диэлектрическая проницаемость $\epsilon_1 = 11,22$, толщина слоя $d_1 = 0,116\mu$, 2-й слой в периодической паре – $\epsilon_2 = 8,35$, $d_2 = 0,134\mu$. Параметры дефекта: $\epsilon_{def} = 25$, толщина слоя дефекта $d_{def} = 2,668\mu$. Длина волны падающего света $\lambda = 1,55\mu$. Требуется провести расчет спектральной и угловой зависимости энергетических коэффициентов отражения и прохождения, а также параметров эллипсометрии.

2. Метод расчета

В качестве основного диагностического метода используется метод эллипсометрии. Эллипсо-

метрические параметры ρ и Δ определяются в данной работе как модуль и аргумент комплексного параметра ρ , являющегося отношением амплитудных коэффициентов отражения для р- и s-поляризации:

$$\rho = \rho e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s}.$$

С помощью метода характеристических матриц [7] проводится расчет энергетических коэффициентов отражения и прохождения как функции длины волны падающего света, а также как функции угла падения. Кроме этого, рассчитываются амплитуды отраженной и прошедшей волн, по ним рассчитываются соответствующие эллипсометрические параметры.

3. Результаты расчетов

Результаты расчета представлены на рис. 2–7.

4. Обсуждение результатов

Из приведенного анализа мы видим, что слоистая периодическая среда с распределенными дефектами обладает ярко выраженными зависимостями от угла падения света и от его длины волны. Этот результат предоставляет возможность для использования такой слоистой структуры для целей преобразования параметров излучения.

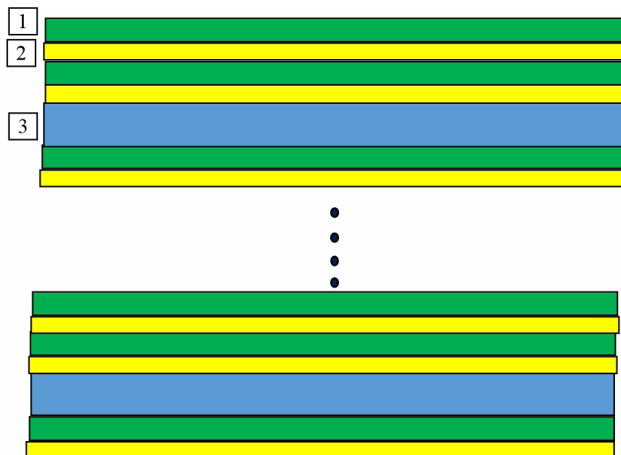


Рис. 1. Периодическая слоистая система с распределенными дефектами
Fig. 1. Periodic layered system with distributed defects

Особенно следует отметить поведение второго эллипсометрического параметра Δ . Как видно из рис. 4, 5 и 7, этот параметр при определенных значениях длин волн и углах падения переходит через нулевые значения. Как показано в наших работах [6; 7], это означает смену поляризации с одной на другую – с левой эллиптической на правую эллиптическую и наоборот. Такое свойство спектров параметров эллипсометрии позволяет использовать его в практических целях для создания устройств, изменяющих поляризацию света.

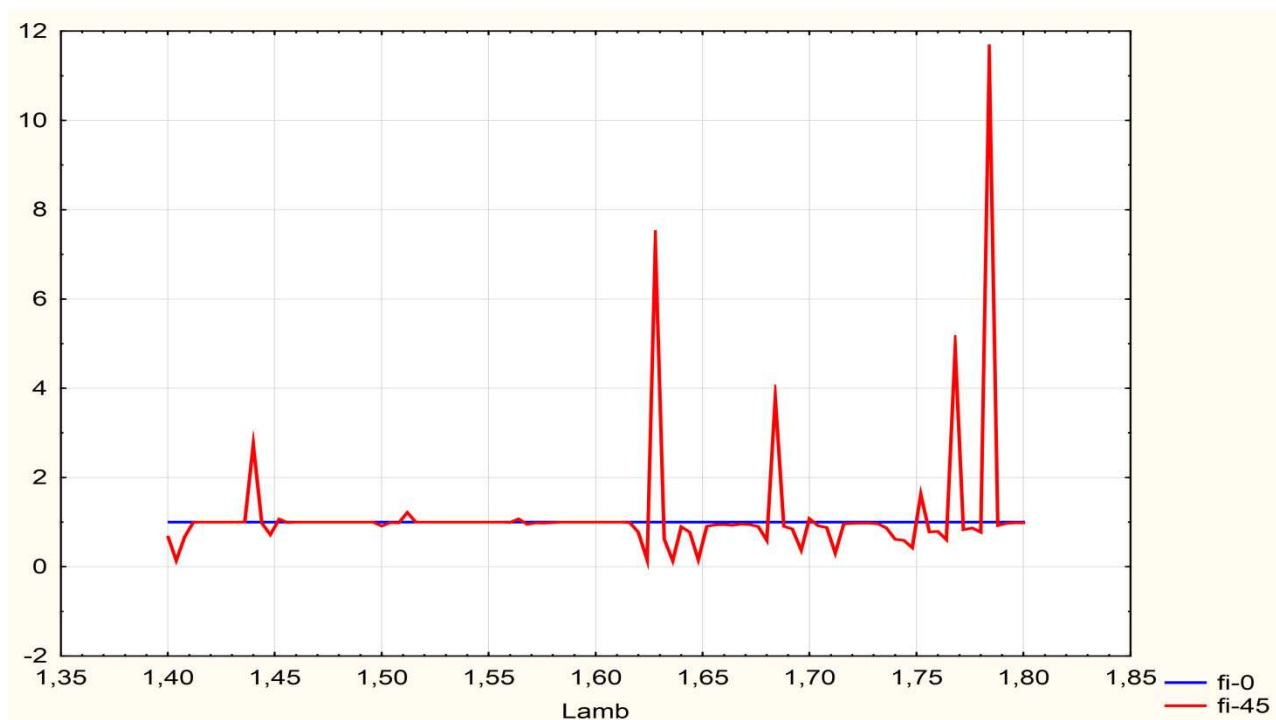


Рис. 2. Зависимость эллипсометрического параметра ρ от длины волны для значений углов падения $fi=0^\circ$ и $fi=45^\circ$
Fig. 2. Dependence of the ellipsometric parameter ρ on the wavelength for the values of the angles of incidence $fi=0^\circ$ and $fi=45^\circ$

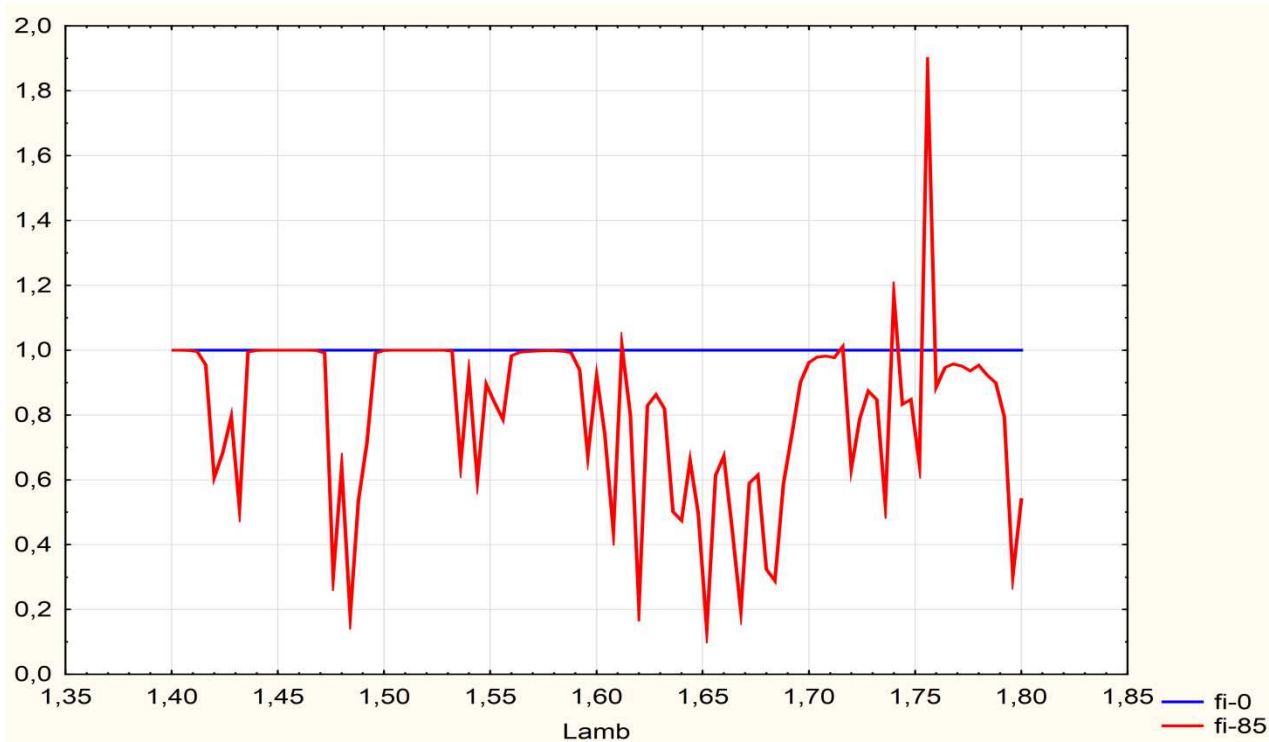


Рис. 3. Зависимость эллипсометрического параметра ρ от длины волны для значений углов падения $fi = 0^\circ$ и $fi = 85^\circ$
Fig. 3. Dependence of the ellipsometric parameter ρ on the wavelength for the values of the angles of incidence $fi = 0^\circ$ and $fi = 85^\circ$

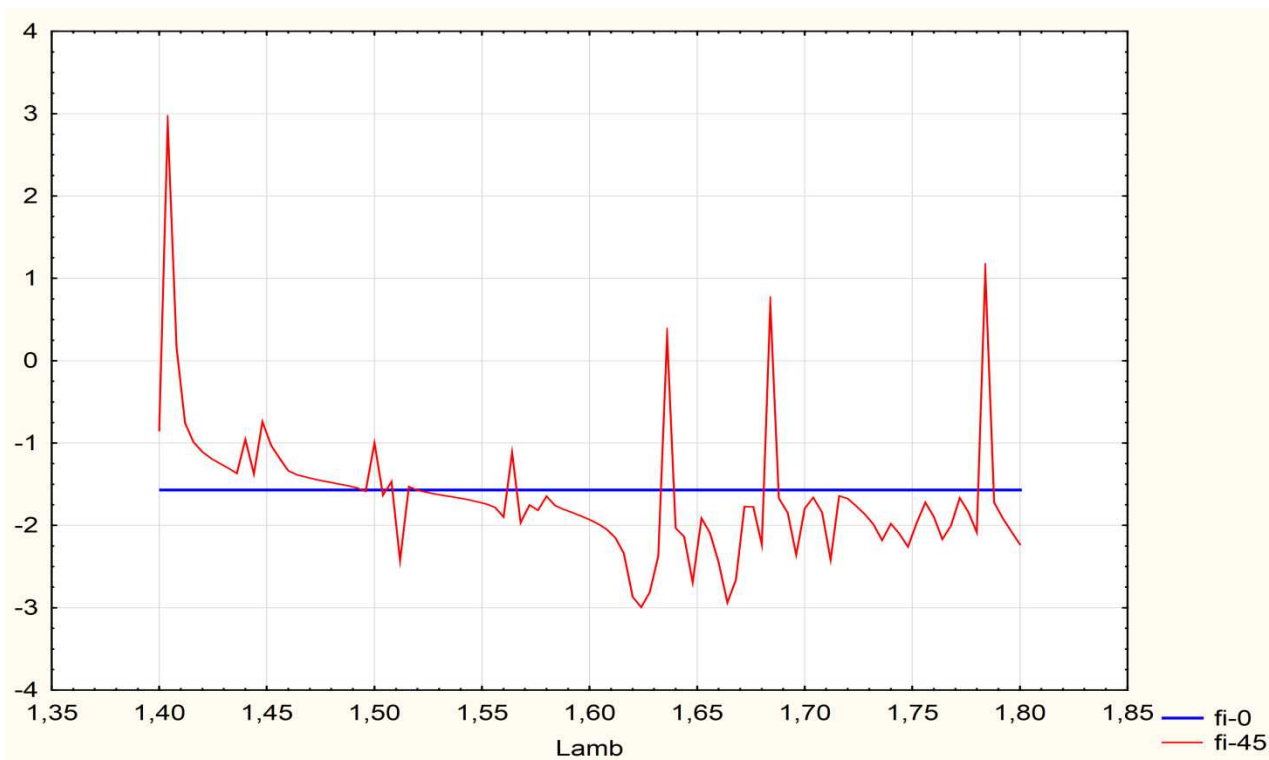


Рис. 4. Зависимость эллипсометрического параметра Δ от длины волны для значений углов падения $fi = 0^\circ$ и $fi = 45^\circ$
Fig. 4. Dependence of the ellipsometric parameter Δ on the wavelength for the values of the angles of incidence $fi = 0^\circ$ and $fi = 45^\circ$

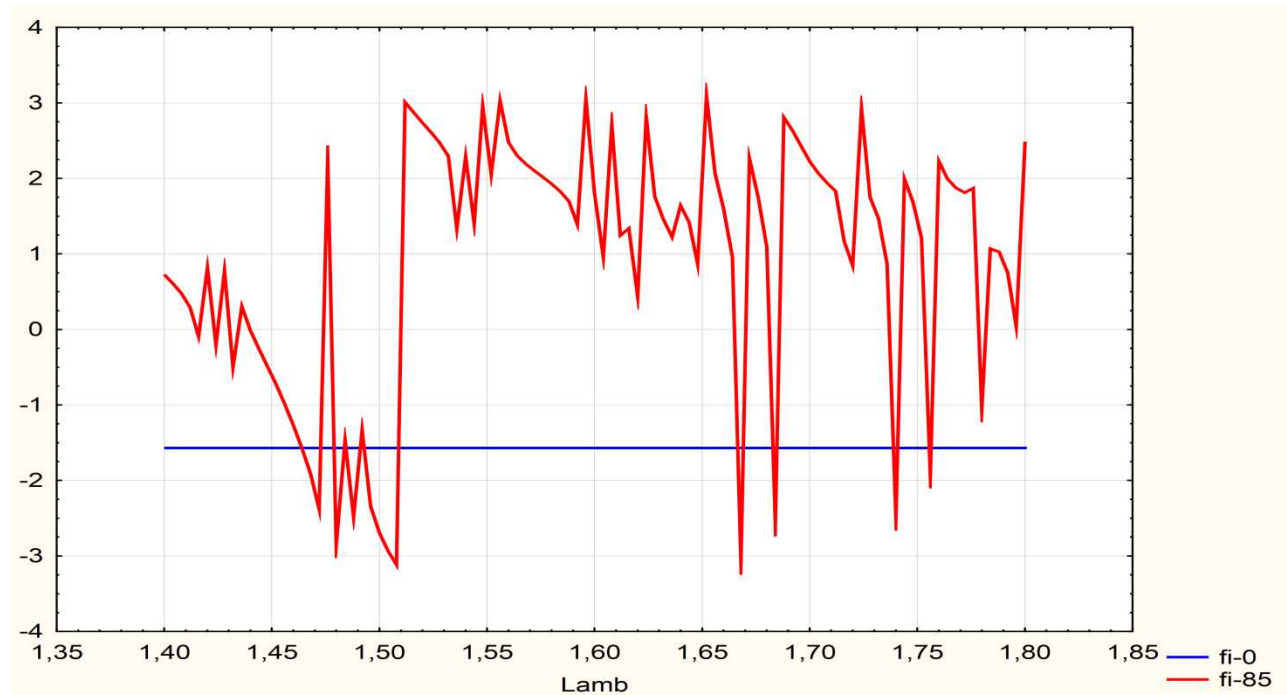


Рис. 5. Зависимость эллипсометрического параметра Δ от длины волны для значений углов падения $fi = 0^\circ$ и $fi = 85^\circ$
Fig. 5. Dependence of the ellipsometric parameter Δ on the wavelength for the values of the angles of incidence $fi = 0^\circ$ and $fi = 85^\circ$

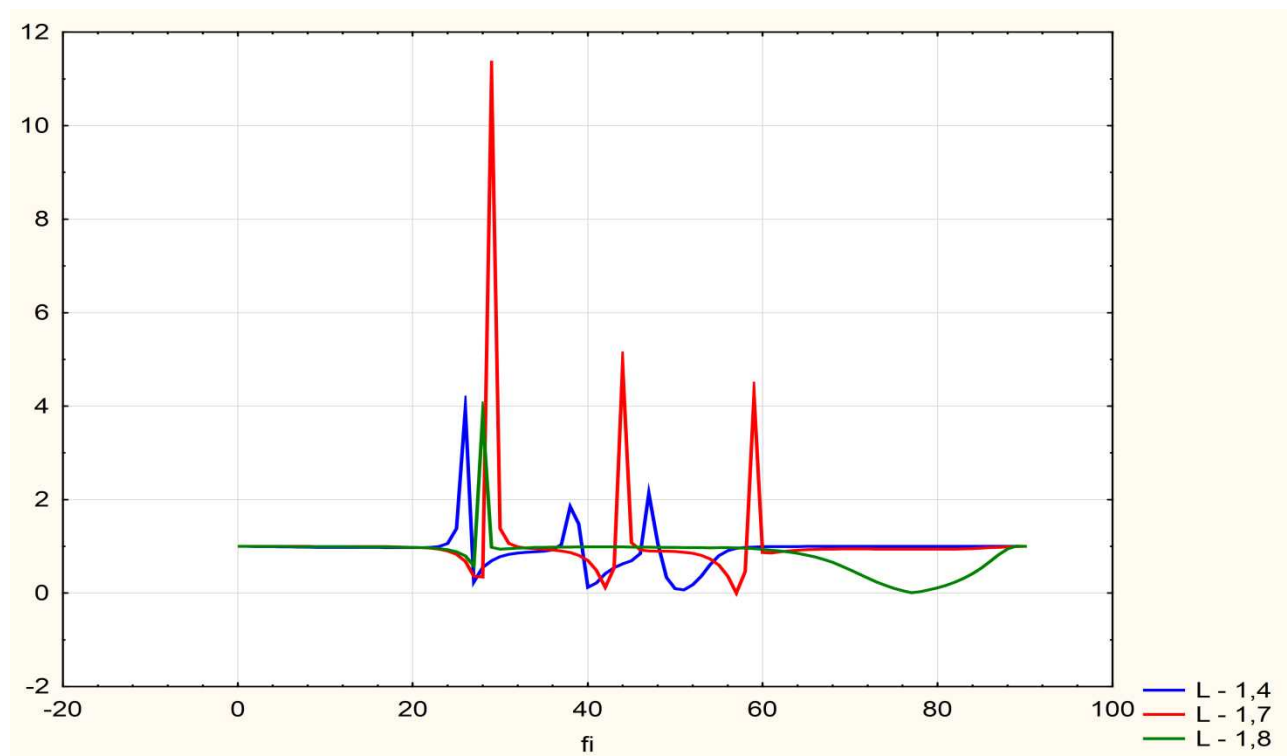


Рис. 6. Угловые спектры эллипсометрического параметра ρ для трех значений длины волны $\lambda = 1,4\mu$, $\lambda = 1,7\mu$, $\lambda = 1,8\mu$
Fig. 6. Angular spectra of the ellipsometric parameter ρ for three wavelength values $\lambda = 1,4\mu$, $\lambda = 1,7\mu$, $\lambda = 1,8\mu$

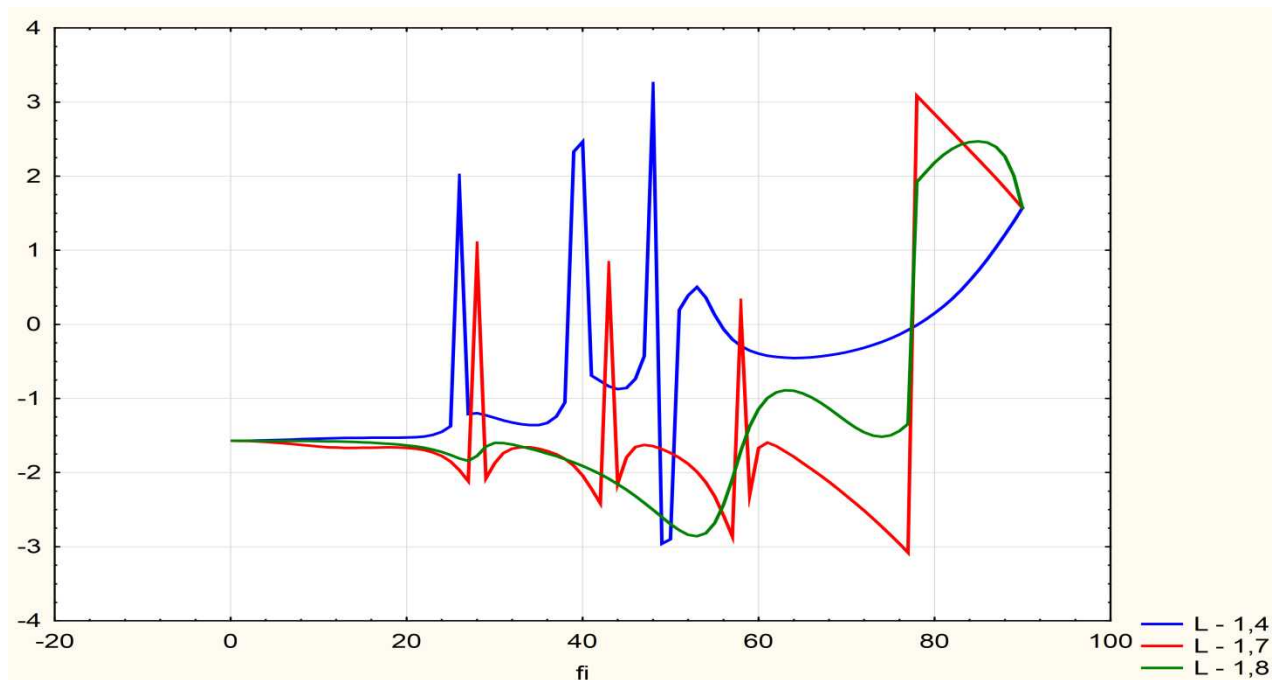


Рис. 7. Угловые спектры эллипсометрического параметра Δ для трех значений длины волны $\lambda = 1,4\mu$, $\lambda = 1,7\mu$, $\lambda = 1,8\mu$
Fig. 7. Angular spectra of the ellipsometric parameter Δ for three wavelength values $\lambda = 1,4\mu$, $\lambda = 1,7\mu$, $\lambda = 1,8\mu$

Заключение

В работе показана высокая чувствительность эллипсометрического метода при анализе спектров

отраженной световой волны от слоистой периодической структуры с распределенными дефектами. Отмечена возможность управления характером поляризации света с помощью такой структуры.

Список литературы

1. Joannopoulos J.D., Meade R.D., Winn J.N. Photonic Crystals. Princeton: Princeton University Press, 2008. 286 p.
2. 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>
3. 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>
4. Яцышен В.В. Эллипсометрия тонких пленок биологических объектов в условиях полного внутреннего отражения // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24, № 4. С. 7–12. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.4.7-12>
5. Яцышен В.В. Математическое моделирование взаимодействия эллиптически поляризованного света с периодической наноструктурой, содержащей дефектный слой // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 12. С. 107–113.
6. Веревкина К.Ю., Вережкин И.Ю., Яцышен В.В. Оптическая диагностика дефектов в слоистых периодических наноструктурах // НБИ технологии. 2022. Т. 16, № 1. С. 19–26. DOI: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2022.1.4>
7. Yatsyshen V.V. Diagnosis of a periodic nanostructure with a defect using circularly polarized light // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2373, no. 4. P. 042006. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/4/042006>
8. Глухов И.А., Моисеев С.Г. Спектральные характеристики каскадных фотонно-кристаллических структур с междоменными дефектами // Оптика и спектроскопия. 2023. Т. 131, № 11. С. 1475–1478. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/57005>
9. Яцышен В.В., Алмохаммад Г.А. Влияние дефекта периодической наноструктуры на ее оптические свойства // Взаимодействие СВЧ, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: сб. ст. XI Всероссийской научной школы-семинара. Саратов, 23–24 мая 2024 г. Саратов: Саратовский источник, 2024. С. 155–157. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67356718>

Информация об авторе

Яцышен Валерий Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения Волгоградского государственного университета, г. Волгоград, Россия.

Область научных интересов: радиофизика и квантовая радиофизика, оптические свойства конденсированных сред, фотонные кристаллы, метаматериалы.

E-mail: yatsyshen.valeriy@volsu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4185-2333>
SPIN-код (eLibrary): 9693-4494
AuthorID (eLibrary): 148248
ResearcherID (WoS): AAZ-6993-2021

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2025, vol. 28, no. 1, pp. 88–94

DOI [10.18469/1810-3189.2025.28.1.88-94](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2025.28.1.88-94)
UDC 535.33:535.015
Original Research

Received 23 September 2024
Accepted 24 October 2024
Published 31 March 2025

Reflection and transmission of circularly polarized light for a layered periodic system with distributed defects

Valeriy V. Yatsyshen 

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

Abstract – Background. Periodic layered systems form one-dimensional photonic crystals that have many properties of conventional crystals. Of particular interest are the optical properties of such structures, which attract the attention of researchers and engineers due to the prospects for practical applications. **Aim.** The paper presents the results of calculating the frequency and angular spectra of reflection and transmission of light for a periodic structure with complex embedded defects. **Methods.** Using the characteristic matrix method, the energy reflection and transmission coefficients are calculated for such a structure using circularly polarized light. The ellipsometric parameters of the reflected and transmitted radiation are analyzed. **Results.** The paper shows that oblique incidence of light on the studied periodic structure with a defect leads to a wide variety of angular and frequency reflection and transmission spectra, which allows using this structure for selective reflection, as well as for devices that change the nature of the polarization of incident radiation. **Conclusion.** The use of circularly polarized radiation during its reflection and transmission for periodic media with complex distributed defects allows obtaining new controlled optical devices.

Keywords – periodic structure; dielectric defect; defect with finite conductivity; ellipsometric method; circular and elliptical polarization of light.

yatsyshen.valeriy@volsu.ru (Valeriy V. Yatsyshen)

 © Valeriy V. Yatsyshen, 2025

References

1. J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals*. Princeton: Princeton University Press, 2008.
2. 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, p. 022047, 2020, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/2/022047>.
3. 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.)
4. V. V. Yatsyshen, “Ellipsometry of thin films of biological objects under conditions of total internal reflection,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 7–12, 2021, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.4.7-12>. (In Russ.)
5. V. V. Yatsyshen, “Mathematical simulation of the interaction of elliptically polarized light with a periodic nanostructure containing a defect layer,” *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, no. 12, pp. 107–113, 2022. (In Russ.)
6. K. Yu. Verevkin, I. Yu. Verevkin, and V. V. Yatsyshen, “Optical diagnosis of defects in layered periodic nanostructures,” *NBI tekhnologii*, vol. 16, no. 1, pp. 19–26, 2022, doi: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2022.1.4>. (In Russ.)
7. V. V. Yatsyshen, “Diagnosis of a periodic nanostructure with a defect using circularly polarized light,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2373, no. 4, p. 042006, 2022, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/4/042006>.
8. I. A. Glukhov and S. G. Moiseev, “Spectral characteristics of cascading photon-critical structures with interdemans defects,” *Optika i spektroskopiya*, vol. 131, no. 11, pp. 1475–1478, 2023, url: <https://journals.ioffe.ru/articles/57005>. (In Russ.)
9. V. V. Yatsyshen and G. A. Almokhammad, “The effect of a defect in the periodic nanostructure on its optical properties,” in *Proc. Vzaïmodeystvie SVCh, teragertsovogo i opticheskogo izlucheniya s poluprovodnikovymi mikro- i nanostrukturami, metamaterialami i bioob'ektami: XI Vserossiyskoy nauchnoy shkoly-seminara*, Saratov, May 23–24 2024. Saratov: Saratovskiy istochnik, pp. 155–157, 2024, url: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67356718>. (In Russ.)

Information about the Author

Valeriy V. Yatsyshen, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Forensic Science and Physical Materials Science, Volgograd State University, Volgograd, Russia.

Research interests: radiophysics and quantum radiophysics, optical properties of condensed matter, photonic crystals, metamaterials.

E-mail: yatsyshen.valeriy@volsu.ru

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

SPIN-code (eLibrary): 9693-4494

AuthorID (eLibrary): 148248

ResearcherID (WoS): AAZ-6993-2021