

## Эллипсометрия одномерного фотонного кристалла с диэлектрическим и проводящим дефектами

В.В. Яцышен , Г.А. Алмохаммад 

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

**Аннотация – Обоснование.** Периодические слоистые системы привлекают в последнее время исследователей и инженеров по причине возможных широких применений в наноэлектронике. В таких системах, помимо их прямого использования как периодической структуры, можно исследовать различные дефекты. На фоне идеальной периодической структуры отражение от структуры с дефектом позволяет получить важную информацию о самом дефекте. Особенный интерес представляет использование в этих целях циркулярно поляризованного света. **Цель.** В работе приводятся результаты расчетов угловых спектров эллипсометрических параметров от периодической структуры с дефектом. В качестве последнего используется диэлектрический слой и слой с конечной проводимостью. **Методы.** В работе используется эллипсометрический метод анализа оптических свойств материальных сред. С помощью метода характеристических матриц проводится расчет эллипсометрических параметров отраженного от слоистой системы циркулярно поляризованного света. **Результаты.** В работе отмечается неэквивалентность результатов расчета при различных расположениях дефекта – эллипсометрические параметры отраженного света существенно зависят от того, в каком месте внутри структуры находится дефект. Такой эффект можно использовать для определения этого места на фоне отражения от идеальной периодической структуры. Кроме этого, показано, что диэлектрический и проводящий дефекты приводят к существенно различным угловым спектрам эллипсометрических параметров, что также может служить определенным маркером самого дефекта. **Заключение.** Использование циркулярно поляризованного излучения для диагностики периодических сред с дефектами позволяет получить важную информацию о дефектах на фоне идеальной периодической структуры.

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

### Введение

Слоистые системы представляют особый интерес для многочисленных применений как для диагностических целей [5; 10; 12], так и для построения базиса новых технологических устройств в силу большого разнообразия возможных структур, обладающих различными свойствами [1; 4; 9]. Широко исследуются слоистые структуры типа D-M-D (диэлектрик – металл – диэлектрик) [2], а также M-D-M (металл – диэлектрик – металл) [3]. Одномерный фотонный кристалл представляет собой конечную систему периодически повторяющихся слоев. Важной особенностью таких сред является наличие запрещенной зоны, как и в обычных кристаллах. Наличие дефекта в таком кристалле может существенно изменить его оптические свойства [7], что может быть использовано для изучения таких дефектов [6; 8; 11]. При этом идеальная периодическая структура служит реперным фоном, на котором ярко проявляются свойства самого дефекта. В настоящей работе будет рассмотрено влияние местоположения дефекта внутри периодической структуры на угловые спектры

эллипсометрических параметров при падении на такую структуру света круговой поляризации.

### 1. Постановка задачи

На периодическую слоистую систему, состоящую из 10 пар слоев, под углом  $g$  падает циркулярно поляризованный свет. Рассмотрено 3 варианта расположения дефекта, внедренного вместо

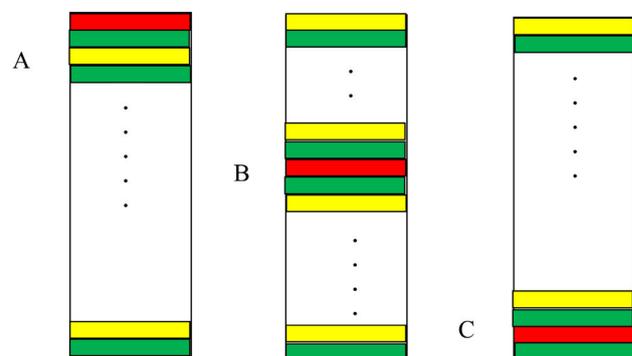


Рис. 1. Три варианта расположения дефекта в периодической структуре: А – дефект в 1-м слое; В – дефект в 9-м слое; С – дефект в 19-м слое

Fig. 1. Three variants of defect location in the periodic structure: А – defect in layer 1; В – defect in layer 9; С – defect in layer 19

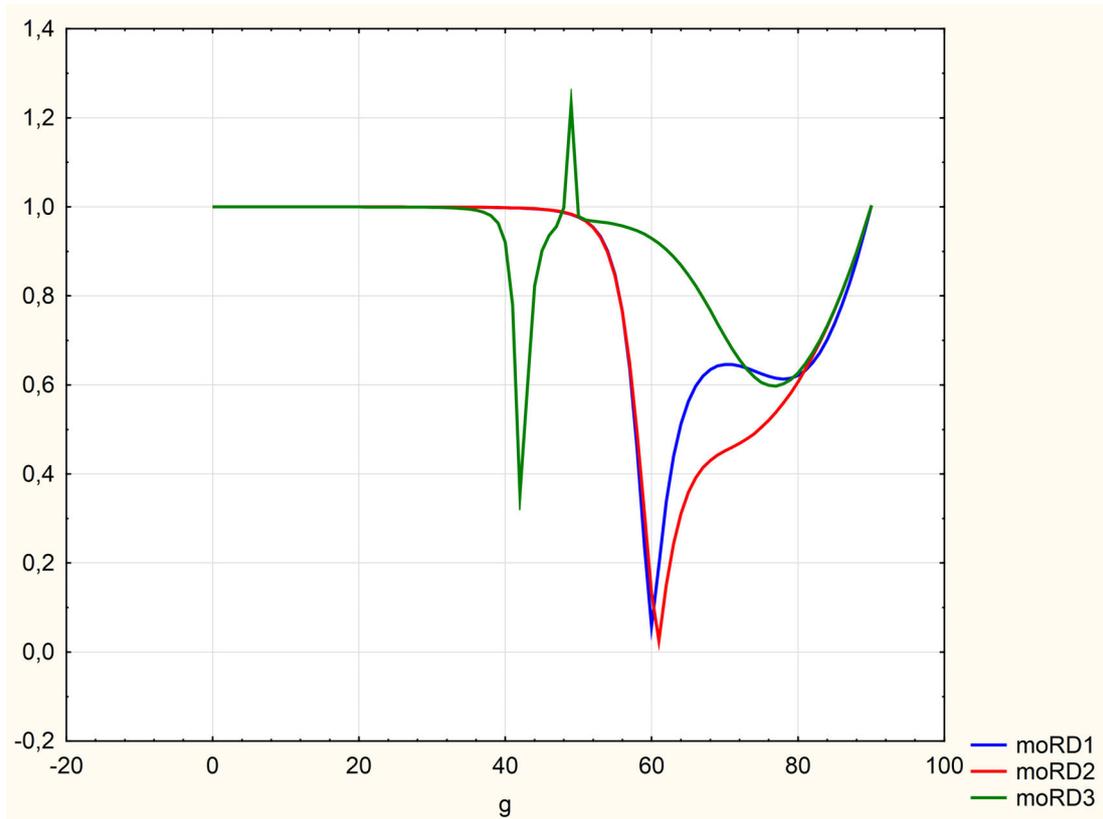


Рис. 2. Диэлектрический дефект. Угловые спектры эллипсометрических параметров  $\rho$  для 3 вариантов расположения дефекта: А – moRD1, В – moRD3, С – moRD2

Fig. 2. Dielectric defect. Angular spectra of ellipsometric parameters  $\rho$  for 3 defect location options: A – moRD1, B – moRD3, C – moRD2

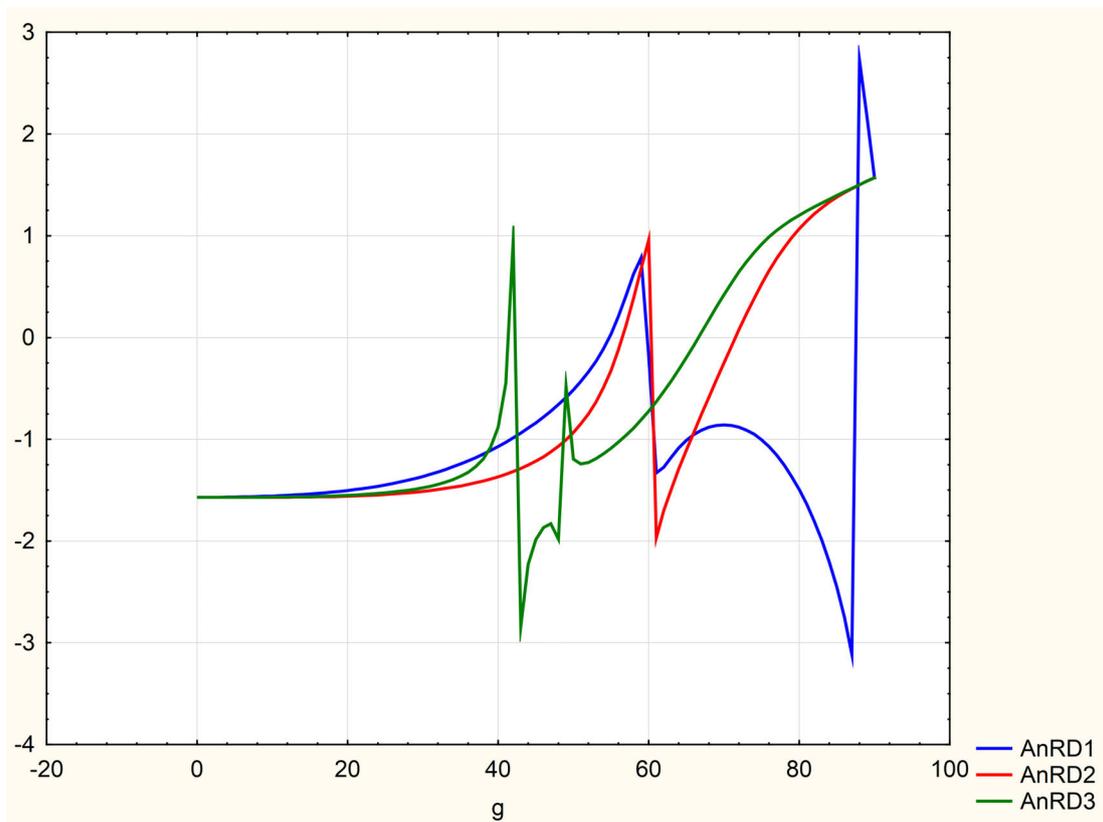


Рис. 3. Диэлектрический дефект. Угловые спектры эллипсометрических параметров  $\Delta$  для 3 вариантов расположения дефекта: А – AnRD1, В – AnRD3, С – AnRD2

Fig. 3. Dielectric defect. Angular spectra of ellipsometric parameters  $\Delta$  for 3 defect location options: A – AnRD1, B – AnRD3, C – AnRD2

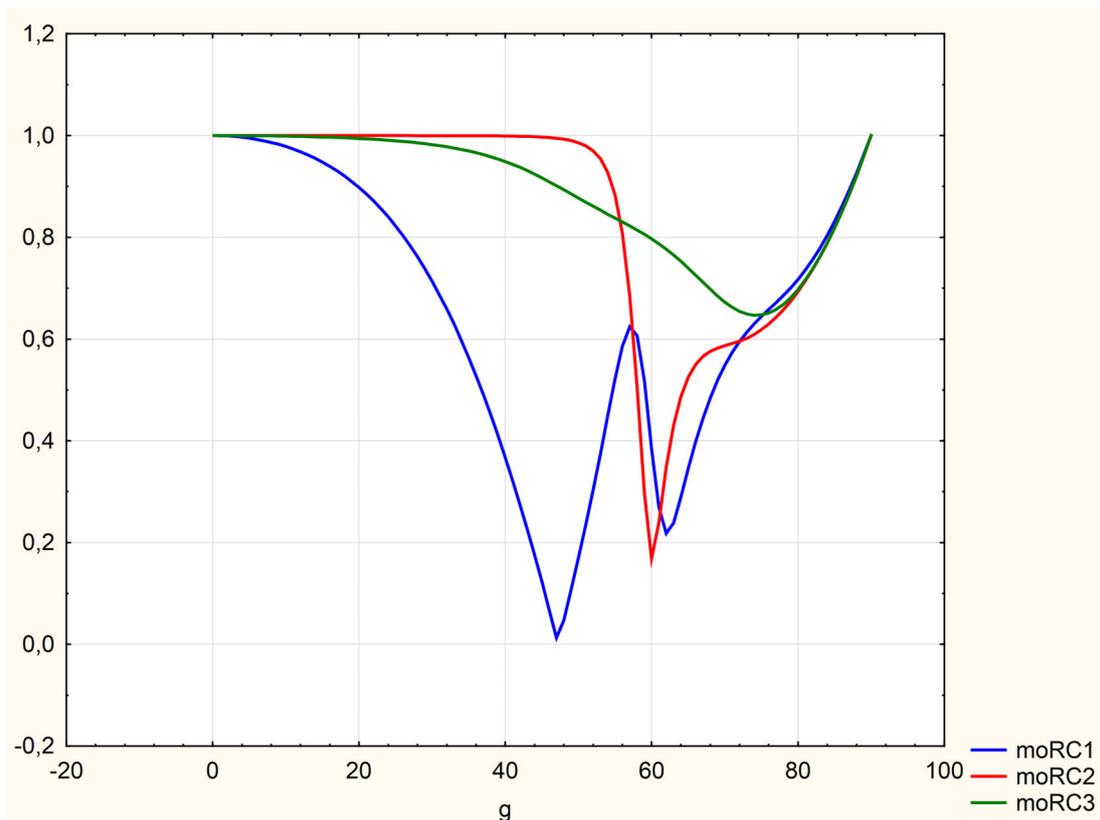


Рис. 4. Дефект с проводимостью. Угловые спектры эллипсометрических параметров  $\rho$  для 3 вариантов расположения дефекта: А - moRC1, В - moRC3, С - moRC2

Fig. 4. Conductive defect. Angular spectra of ellipsometric parameters  $\rho$  for 3 defect location options: A - moRC1, B - moRC3, C - moRC2

исходного слоя: А, В и С (рис. 1). Требуется провести расчет угловых спектров эллипсометрических параметров для вариантов А, В, С в случаях, когда дефект представляет собой диэлектрик и когда дефект обладает проводящими свойствами – комплексная диэлектрическая проницаемость имеет мнимую часть, сравнимую с действительной.

Расчет проводился для следующих значений параметров: 1-й слой в периодической паре – диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_1 = 5,29$ , толщина слоя  $d_1 = 0,0696\mu$ , 2-й слой в периодической паре –  $\epsilon_2 = 1,823$ ,  $d_2 = 0,1186\mu$ , Параметры диэлектрического дефекта:  $\epsilon_{def} = 2,0$ , толщина слоя дефекта  $d_{def} = 0,069\mu$ . Для проводящего дефекта:  $\epsilon_{def} = 2,0 + 2,5i$ ,  $d_{def} = 0,069\mu$ . Длина волны падающего света  $\lambda = 0,64\mu$ .

## 2. Метод расчета

В качестве основного диагностического метода используется метод эллипсометрии. Эллипсометрические параметры  $\rho$  и  $\Delta$  определяются в данной работе как модуль и аргумент комплексного параметра  $\hat{\rho}$ , являющегося отношением ам-

плитудных коэффициентов отражения для р- и s-поляризации:

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

В основе расчета лежит метод характеристических матриц [6; 8]. Характеристическая матрица слоистой системы представляет собой произведение характеристических матриц слоев, а амплитудные коэффициенты отражения и прохождения света выражаются через характеристическую матрицу всей системы. Получив эти амплитуды, по ним рассчитываются эллипсометрические параметры отраженного от системы циркулярно поляризованного света.

## 3. Результаты расчетов

Результаты расчета представлены на рис. 1–9

## 4. Обсуждение результатов

Из приведенных рисунков мы видим, что местоположение дефекта оказывает существенное влияние на угловой спектр эллипсометрического параметра  $\rho$ . Параметр  $\Delta$  демонстрирует еще

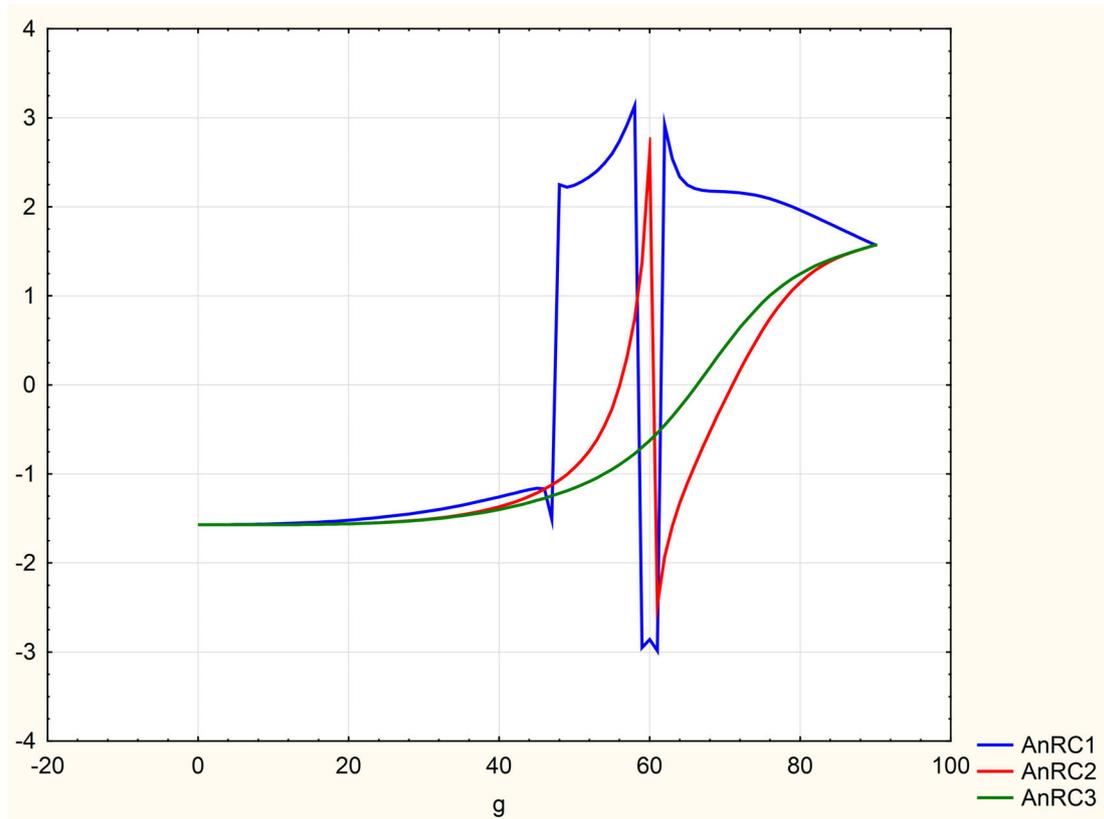


Рис. 5. Дефект с проводимостью. Угловые спектры эллипсометрических параметров  $\Delta$  для 3 вариантов расположения дефекта: А – AnRC1, В – AnRC3, С – AnRC2  
Fig. 5. Conductive defect. Angular spectra of ellipsometric parameters  $\Delta$  for 3 defect location options: A – AnRC1, B – AnRC3, C – AnRC2

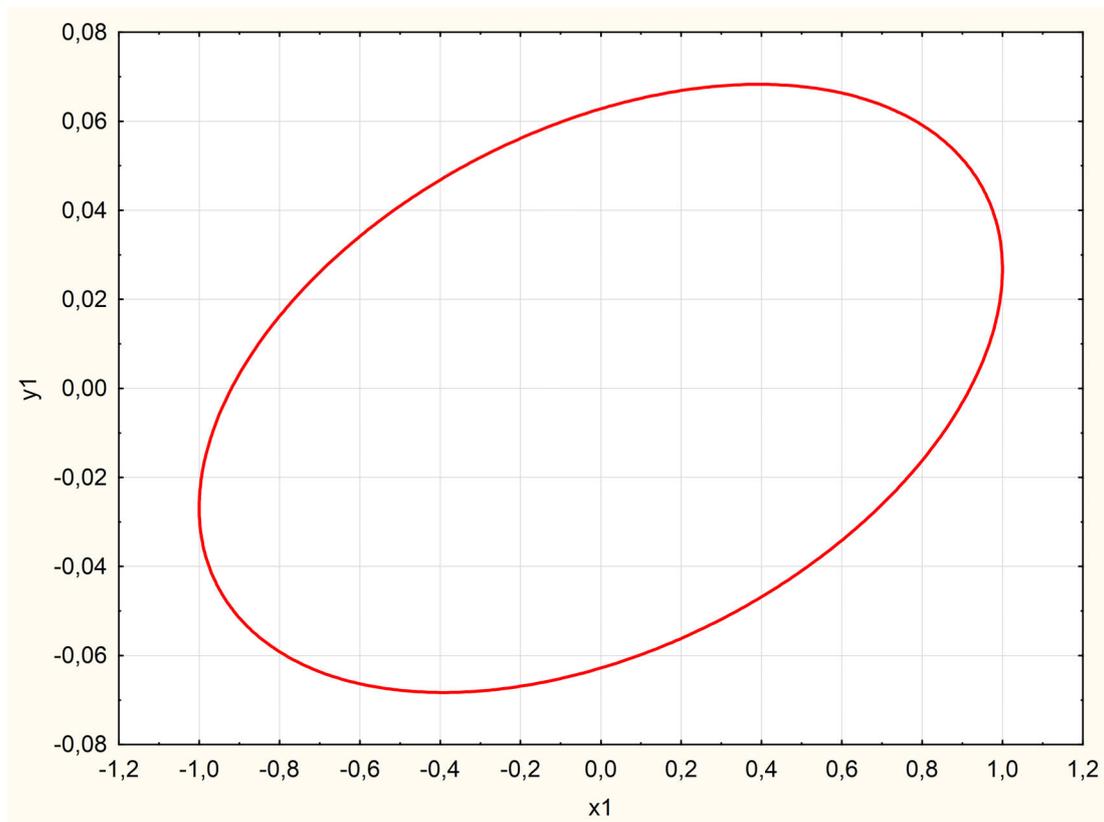


Рис. 6. Дефект с проводимостью. Правая поляризация. Эллипс поляризации  $g = 46^\circ$ ,  $\rho = 0,0683$ ,  $\Delta = -1,167$   
Fig. 6. Conductivity defect. Right polarization. Polarization ellipse  $g = 46^\circ$ ,  $\rho = 0,0683$ ,  $\Delta = -1,167$

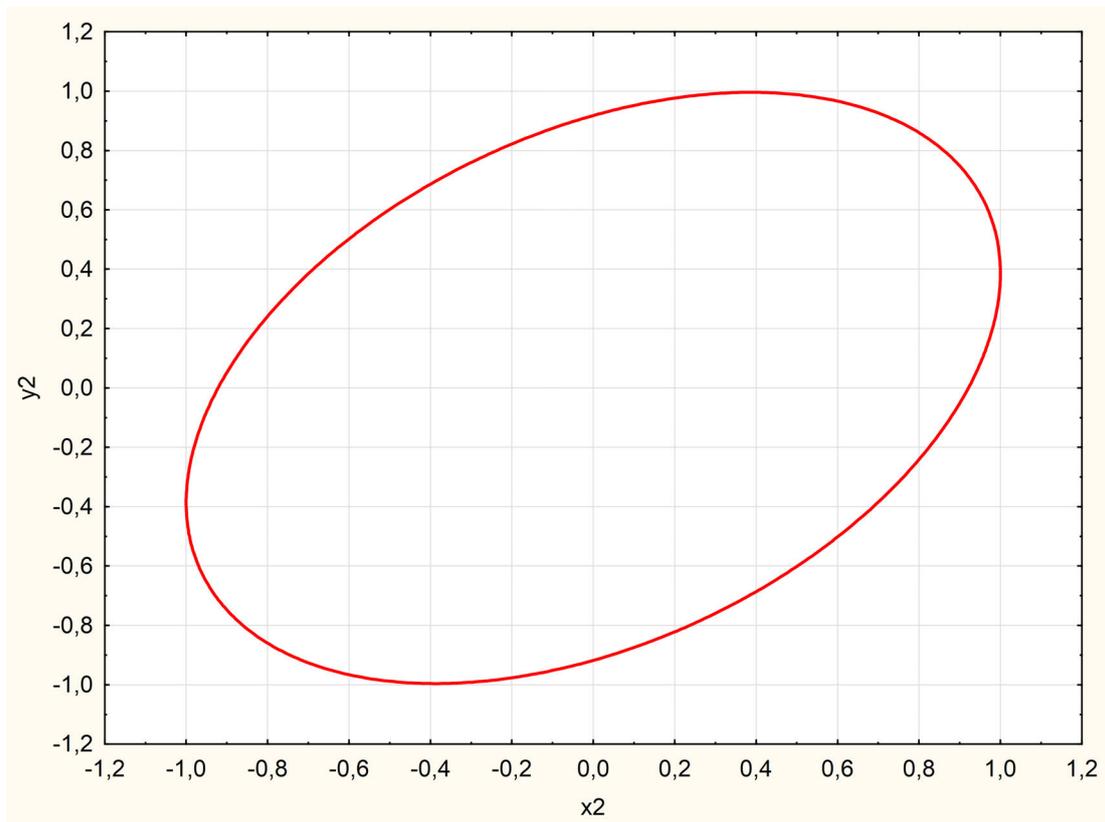


Рис. 7. Дефект с проводимостью. Правая поляризация. Эллипс поляризации  $g = 46^\circ$ ,  $\rho = 0,996$ ,  $\Delta = -1,172$   
Fig. 7. Conductivity defect. Right polarization. Polarization ellipse  $g = 46^\circ$ ,  $\rho = 0,996$ ,  $\Delta = -1,172$

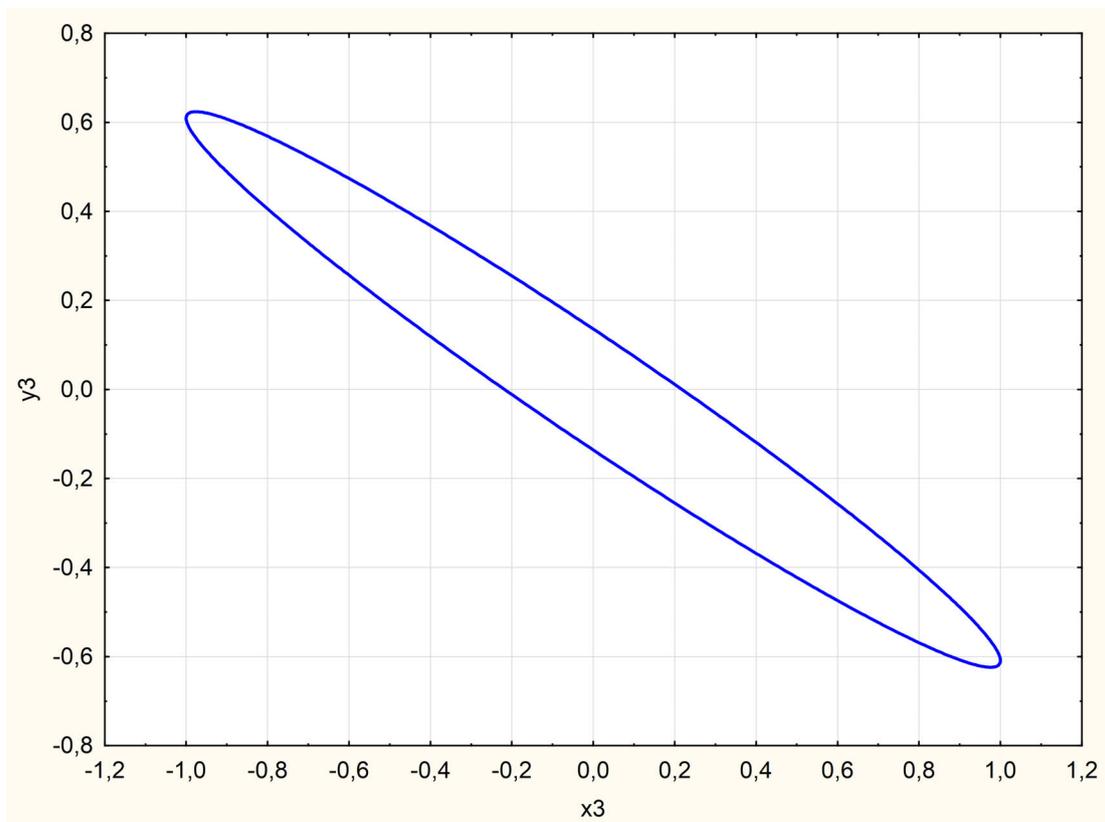


Рис. 8. Дефект с проводимостью. Левая поляризация. Эллипс поляризации  $g = 57^\circ$ ,  $\rho = 0,624$ ,  $\Delta = 2,922$   
Fig. 8. Conductivity defect. Left polarization. Polarization ellipse  $g = 57^\circ$ ,  $\rho = 0,624$ ,  $\Delta = 2,922$

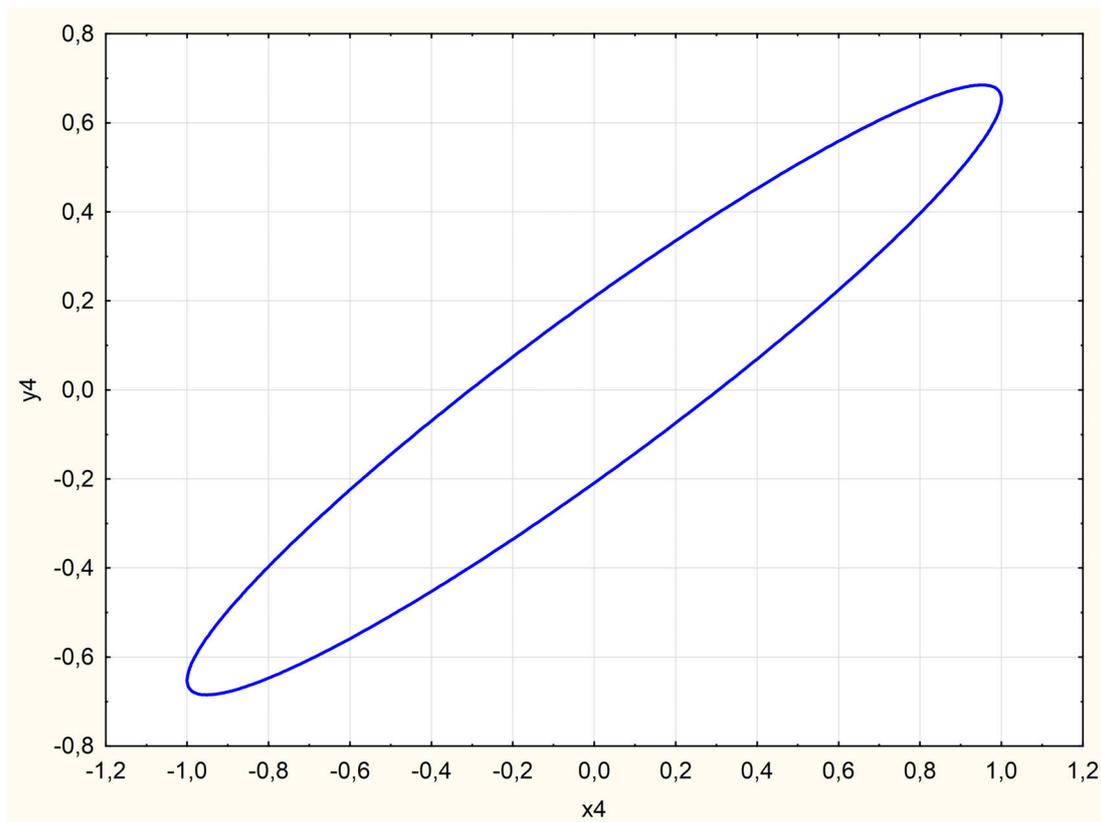


Рис. 9. Дефект с проводимостью. Левая поляризация. Эллипс поляризации  $g = 57^\circ$ ,  $\rho = 0,685$ ,  $\Delta = 0,31$   
Fig. 9. Conductivity defect. Left polarization. Polarization ellipse  $g = 57^\circ$ ,  $\rho = 0,685$ ,  $\Delta = 0,31$

более сильную зависимость от местоположения дефекта, при этом каждое прохождение спектральных кривых через 0 в данном случае свидетельствует о смене характера поляризации с левой на правую и наоборот. На рис. 6–9 мы приводим виды поляризационных эллипсов при отражении циркулярно поляризованного света от слоистой системы с дефектом. Следовательно, анализ спектров эллипсометрических параметров с помощью циркулярно поляризованного падающего света позволяет получить детальную информацию о характере дефекта. Кроме этого, такие периодические структуры с дефектом – диэлектрическим и

проводящим – могут служить основой для преобразователей поляризации света.

### Заключение

В работе показана высокая чувствительность эллипсометрических параметров отраженного света от характера и местоположения дефекта в периодической структуре при падении на нее циркулярно поляризованного света. Продемонстрирована возможность управления характером поляризации отраженного света с помощью периодической структуры с дефектом.

### Список литературы

1. Transfer-matrix formalism for the calculation of optical response in multilayer systems: From coherent to incoherent interference / M.C. Tropicovsky [et al.] // *Optics Express*. 2010. Vol. 18, no. 24. P. 24715–24721. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.18.024715>
2. P-191: Dielectric-metal-dielectric structure and its application as top cathode in highly efficient top-emitting WOLEDs / Q. Huang [et al.] // *SID Symposium Digest of Technical Papers*. 2019. Vol. 50, no. 1. P. 1946–1949. DOI: <https://doi.org/10.1002/sdtp.13347>
3. Электропроводность структур металл-диэлектрик-полупроводник на основе сегнетоэлектрических пленок / М.С. Афанасьев [и др.] // *Физика твердого тела*. 2020. Т. 62, № 1. С. 121–124. DOI: <https://doi.org/10.21883/FTT.2020.01.48748.570>
4. Efficient scattering model of multi-layer systems with anisotropic films / J.R. Gill [et al.] // *Journal of the Optical Society of America A*. 2021. Vol. 38, no. 5. P. 595–605. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.416265>
5. 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>

6. 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. URL: <http://www.nauteh-journal.ru/files/59f7ab1f-e327-41ce-a3f8-c3ad31f508f3>
7. Вережкина 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>
8. 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>
9. Large sliding regulation in van der waals layered nonlinear optical ternary chalcogenides / Q. Wu [et al.] // npj Computational Materials. 2023. Vol. 9, no. 1. P. 171. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41524-023-01127-z>
10. Яцышен В.В., Бородина И.И. Особенности спектра отраженного и прошедшего света круговой поляризации для тонкого слоя анизотропного кристалла типа вюрцита вблизи фононного резонанса // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26, № 4. С. 10–16. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.4.10-16>
11. Яцышен В.В., Алмохаммад Г.А. Влияние дефекта периодической наноструктуры на ее оптические свойства // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: сб. ст. XI Всероссийской научной школы-семинара. Саратов, 2024. С. 155–157. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67356718>
12. Яцышен В.В. Диагностика тонких полупроводниковых слоев с помощью спектроскопии поверхностного плазмонного резонанса с использованием света круговой поляризации // НБИ технологии. 2024. Т. 18, № 1. С. 15–19. URL: <https://ti.jvolsu.com/index.php/ru/archive-ru/318-nbi-technologies-2024-vol-18-no-1-nbi-tekhnologii-2024-t-18-1/nanotekhnologii-i-nanomaterialy/1205-yatsyshen-v-v-diagnostika-tonkikh-poluprovodnikovyx-sloev-s-pomoshchyu-spektroskopii-poverkhnostnogo-plazmonnogo-rezonansa-s-ispolzovaniem-sveta-krugovoj-polyarizatsii>

### Информация об авторах

**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](mailto: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

**Гофран А. Алмохаммад**, аспирантка кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения Волгоградского государственного университета, г. Волгоград, Россия.

*Область научных интересов:* оптические свойства периодических слоистых материалов, включая фотонные кристаллы и метаматериалы.

*E-mail:* [ghofranhussain1993@gmail.com](mailto:ghofranhussain1993@gmail.com)

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-5548-0011>

## Physics of Wave Processes and Radio Systems 2025, vol. 28, no. 2, pp. 16–23

DOI [10.18469/1810-3189.2025.28.2.16-23](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2025.28.2.16-23)

UDC 535.33:535.015

Original Research

Received 21 July 2024

Accepted 22 August 2024

Published 30 June 2025

### Ellipsometry of a one-dimensional photonic crystal with dielectric and conductive defects

Valeriy V. Yatsyshen , Gofran A. Almohammad 

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

**Abstract – Background.** Periodic layered systems have recently attracted researchers and engineers due to their possible wide applications in nanoelectronics. In such systems, in addition to their direct use as a periodic structure, various defects can be studied. Against the background of an ideal periodic structure, reflection from a structure with a defect allows one to obtain important information about the defect itself. Of particular interest is the use of circularly polarized light for these purposes. **Aim.** The paper presents the results of calculations of the angular spectra of ellipsometric parameters from a periodic structure with a defect. The latter uses a dielectric layer and a layer with finite conductivity. **Methods.** Spatial. The work uses the ellipsometric method for analyzing the optical properties of material media. Using the method of characteristic matrices,

the ellipsometric parameters of circularly polarized light reflected from the layered system are calculated. **Results.** The work notes the non-equivalence of the calculation results for different locations of the defect - the ellipsometric parameters of the reflected light significantly depend on where the defect is located inside the structure. This effect can be used to determine this location against the background of reflection from an ideal periodic structure. In addition, it has been shown that dielectric and conductive defects lead to significantly different angular spectra of ellipsometric parameters, which can also serve as a certain marker of the defect itself. **Conclusion.** The use of circularly polarized radiation to diagnose periodic media with defects makes it possible to obtain important information about defects against the background of an ideal periodic structure.

**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, Gofran A. Almohammad, 2025

## References

1. M. C. Tropicovsky et al., “Transfer-matrix formalism for the calculation of optical response in multilayer systems: From coherent to incoherent interference,” *Optics Express*, vol. 18, no. 24, pp. 24715–24721, 2010, doi: <https://doi.org/10.1364/OE.18.024715>.
2. Q. Huang et al., “P-191: Dielectric-metal-dielectric structure and its application as top cathode in highly efficient top-emitting WOLEDs,” *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 50, no. 1, pp. 1946–1949, 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/sdtp.13347>.
3. M. S. Afanas'ev et al., “The electrical conductivity of the structures of the metal-dielectric-substratum based on semiconductor films,” *Fizika tverdogo tela*, vol. 62, no. 1, pp. 121–124, 2020, doi: <https://doi.org/10.21883/FTT.2020.01.48748.570>. (In Russ.)
4. J. R. Gill et al., “Efficient scattering model of multi-layer systems with anisotropic films,” *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 38, no. 5, pp. 595–605, 2021, doi: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.416265>.
5. 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.)
6. V. V. Yatsyshen, “Mathematical simulation of the interaction of elliptically polarized light with a periodic nanostructure containing a defective layer,” *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, no. 12, pp. 107–113, 2022, url: <http://www.nauteh-journal.ru/files/59f7ab1f-e327-41ce-a3f8-c3ad31f508f3>. (In Russ.)
7. K. Yu. Verevkin, I. Yu. Verevkin, and V. V. Yatsyshen, “Optical diagnostics 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.)
8. 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>.
9. Q. Wu et al., “Large sliding regulation in van der waals layered nonlinear optical ternary chalcogenides,” *npj Computational Materials*, vol. 9, no. 1, p. 171, 2023, doi: <https://doi.org/10.1038/s41524-023-01127-z>.
10. V. V. Yatsyshen and I. I. Borodina, “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,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 10–16, 2023, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.4.10-16>. (In Russ.)
11. V. V. Yatsyshen and G. A. Almohammad, “The effect of a defect in the periodic nanostructure on its optical properties,” *Vzaimodeystvie sverkhvysokochastotnogo, teragertsovogo i opticheskogo izlucheniya s poluprovodnikovymi mikro- i nanostrukturami, metamaterialami i bioob'ektami: sb. st. XI Vserossiyskoy nauchnoy shkoly-seminara, Saratov*, pp. 155–157, 2024, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67356718>. (In Russ.)
12. V. V. Yatsyshen, “Diagnosis of thin semiconductor layers with spectroscopy of surface plasmon resonance using circularly polarized light,” *NBI tekhnologii*, vol. 18, no. 1, pp. 15–19, 2024, url: <https://ti.jvolsu.com/index.php/ru/archive-ru/318-nbi-technologies-2024-vol-18-no-1-nbi-tekhnologii-2024-t-18-1/nanotekhnologii-i-nanomaterialy/1205-yatsyshen-v-v-diagnostika-tonkikh-poluprovodnikovyx-sloev-s-pomoshchyu-spektroskopii-poverkhnostnogo-plazmonnogo-rezonansa-s-ispolzovaniem-sveta-krugovoj-polyarizatsii>. (In Russ.)

## Information about the Authors

**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

**Gofran A. Almohammad**, postgraduate student of the Department of Forensic Science and Physical Materials Science, Volgograd State University, Volgograd, Russia.

*Research interests:* optical properties of periodic layered materials, including photonic crystals and metamaterials.

*E-mail:* ghofranhussain1993@gmail.com

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-5548-0011>