

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ НАНОСТРУКТУРОЙ, СОДЕРЖАЩЕЙ ДЕФЕКТНЫЙ СЛОЙ

**MATHEMATICAL SIMULATION
OF THE INTERACTION OF ELLIPTICALLY
POLARIZED LIGHT WITH A PERIODIC
NANOSTRUCTURE CONTAINING
A DEFECT LAYER**

V. Yatsyshen

Summary. The paper presents the results of modeling the process of reflection of elliptically polarized light from a nanostructure with a defect. It is shown that the angular spectra of the modulus of the complex ellipsometric parameter of the reflected wave have clearly defined maxima, which are achieved at $\theta_i = 42^\circ$ and $\theta_i = 50^\circ$, respectively, for an ideal nanostructure and a structure with a defect. The maximum of this parameter in the second case is approximately 3 times greater than the maximum in the first. The arguments of the complex ellipsometric parameters for the two cases under study show significant differences in the range of incidence angles $27^\circ \div 53^\circ$. Both angular spectra of ellipsometric parameters demonstrate a pronounced difference depending on the angle of incidence for an ideal nanostructure and a structure with a defect, which can serve as a more subtle diagnostic tool compared to conventional reflection and transmission energy spectra. It is shown that the shape and nature of the polarization ellipse of elliptically polarized light reflected from the nanostructure are particularly sensitive to defects.

Keywords: periodic nanostructure, reflected wave defect, ellipsometric parameters, angular spectra, elliptical polarization.

Яцышен Валерий Васильевич

Профессор, Волгоградский государственный
университет
yatsyshen.valeriy@volsu.ru

Аннотация. В работе приводятся результаты моделирования процесса отражения эллиптически поляризованного света от наноструктуры с дефектом. Показано, что угловые спектры модуля комплексного эллипсометрического параметра отраженной волны имеют четко выраженные максимумы, которые достигаются при $\theta_i = 42^\circ$ и $\theta_i = 50^\circ$ соответственно для идеальной наноструктуры и структуры с дефектом. При этом максимум этого параметра во втором случае примерно в 3 раза превосходит максимум в первом. Аргументы комплексных эллипсометрических параметров для исследуемых двух случаев наблюдаются значительные отличия в области углов падения. Оба угловых спектра эллипсометрических параметров демонстрируют ярко выраженное различие в зависимости от угла падения для идеальной наноструктуры и структуры с дефектом, что может служить более тонким инструментом диагностики по сравнению с обычными энергетическими спектрами отражения и прохождения. Показано, что особую чувствительность к дефекту проявляет форма и характер эллипса поляризации отраженного от наноструктуры эллиптически поляризованного света.

Ключевые слова: периодическая наноструктура, отраженная волна дефект, эллипсометрические параметры, угловые спектры, эллиптическая поляризация.

Использование света эллиптической поляризации для диагностики наноструктур дает возможность использовать в полной мере векторный характер электромагнитного поля ([2–4]). Наряду с эллипсометрией, такое применение эллиптически поляризованного света, падающего на исследуемый объект, дает возможность более детальной диагностики материала по возникающему при отражении изменению параметров эллипса поляризации (см. [6]). В настоящей работе будет проведено моделирование процесса изменения характеристик эллипса поляризации при отражении и преломлении для периодической наноструктуры с дефектом. Будет показано, что использование эллиптически поляризованного света позволяет

выделить имеющийся в структуре дефект на фоне отражения от идеально периодической наноструктуры.

Постановка задачи

На периодическую наноструктуру из воздуха падает плоская гармоническая световая волна эллиптической поляризации с длиной волны λ . Структура состоит из 5 повторяющихся пар диэлектрических слоев. Требуется провести анализ угловых спектров комплексного параметра эллипсометрии отраженного света, а также изменения формы эллипса поляризации при отражении света для случаев идеально периодической структуры и структуры с дефектом в первом слое.

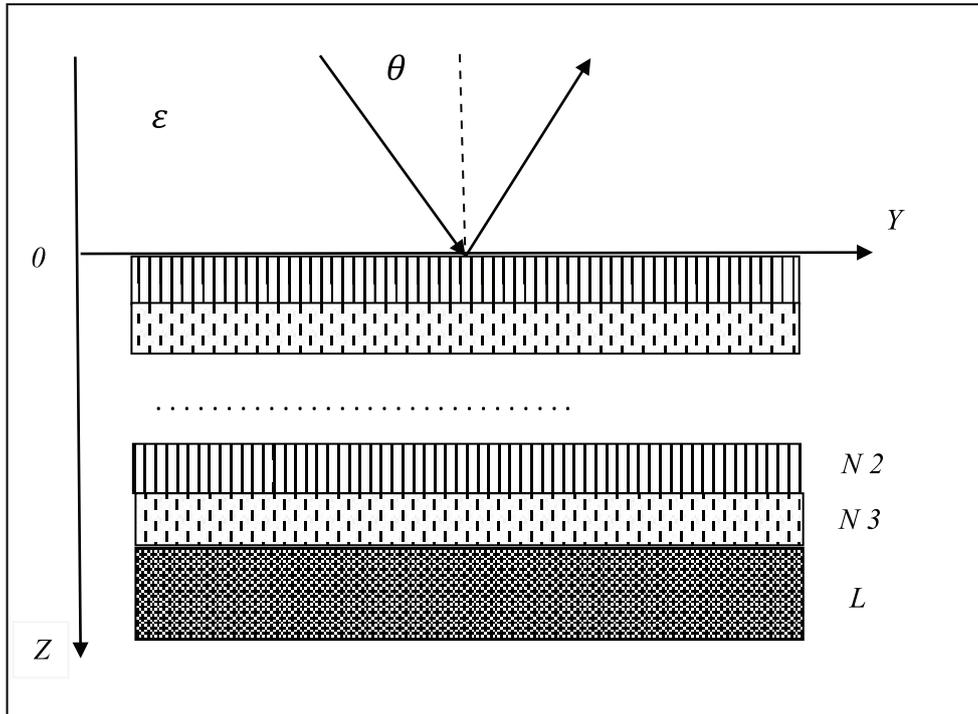


Рис. 1. Геометрия задачи об отражении света от периодической наноструктуры

Метод решения

В основе решения задачи лежит метод характеристических матриц, впервые предложенный в монографии М. Борна и Э. Вольфа ([1]) и частично модифицированный для слоистых плазмонных, поляритонных и наноструктур автором настоящей статьи ([5–7]). Суть метода состоит в том, что из непрерывных на границе раздела проекций векторов поля образуются вектор-столбцы. Затем из уравнений Максвелла находится характеристическая матрица, связывающая эти векторы по обе границы одного слоя. Затем, с учетом непрерывности входящих в вектор-столбцы компонент полей, удается получить общую характеристическую матрицу всей слоистой среды ([6]).

Полученные результаты и их анализ

Геометрия задачи изображена на рисунке 1. Здесь θ_i — угол падения света; ϵ_1 — диэлектрическая проницаемость первой среды; N2 и N3 это слои, образующие периодическую пару; L — подложка. Значения всех параметров приводятся ниже.

Для расчета были выбраны следующие параметры. $\epsilon_1 = 1$, $\epsilon_L = 2.3104$, $\epsilon_2 = 5.29$, $\epsilon_3 = 1.8225$. Длина волны $\lambda = 0.546$ мкм, толщины слоев N2 и N3 выбирались из условия:

$$n_2 d_2 = n_3 d_3 = \frac{\lambda}{k} \tag{1}$$

Здесь k — целое число, которое выбиралось из диапазона $1 \div 5$. В частности, при $k = 2$ речь идет о полуволновой пластинке, n_2 и n_3 — показатели преломления слоев N2 и N3

$$n_2 = \sqrt{\epsilon_2}, \quad n_3 = \sqrt{\epsilon_3} \tag{2}$$

Ниже мы приводим результаты расчетов отражения и преломления световой волны от наноструктуры при $k = 5$, при этом для d_2 и d_3 получаются значения $d_2 = 0,0475$ мкм, $d_3 = 0,0809$ мкм. Расчет проводился для 2-х случаев: первый — когда имеется чисто периодическая наноструктура, второй — когда первый слой заменен на дефект с параметрами $\epsilon_d = 2.2$, $d = 0.1$ мкм. Результаты расчетов угловых спектров наиболее важных параметров представлены на Рисунках 2–7. Здесь по оси абсцисс отложен угол падения θ_i в градусах.

Мы видим, что эти угловые спектры имеют четко выраженные максимумы, которые достигаются при $\theta_i = 42^\circ$ и $\theta_i = 50^\circ$ соответственно. При этом максимум moRd примерно в 3 раза превосходит максимум moR . На Рисунке 3 — представлены аргументы комплексных эллипсометрических параметров для исследуемых двух случаев. Из Рисунка 3 видны значительные отличия этих параметров для двух случаев в области углов

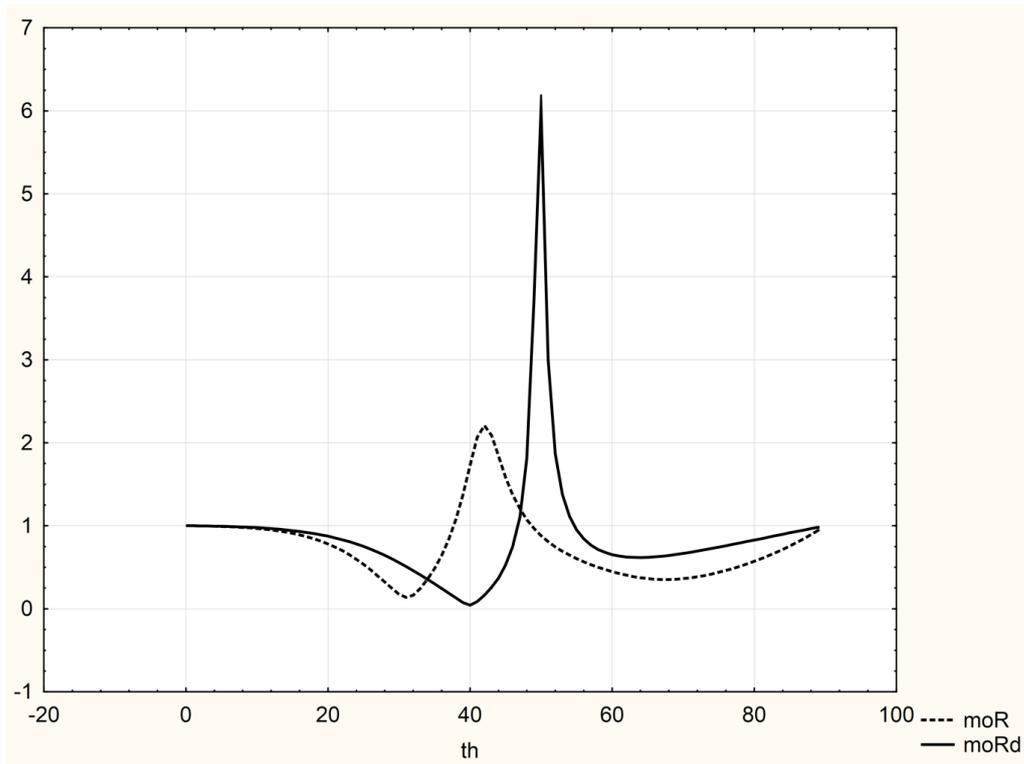


Рис. 2. Угловая зависимость модулей эллипсометрических параметров идеальной наноструктуры (moR) и структуры с дефектом в первом слое (moRd)

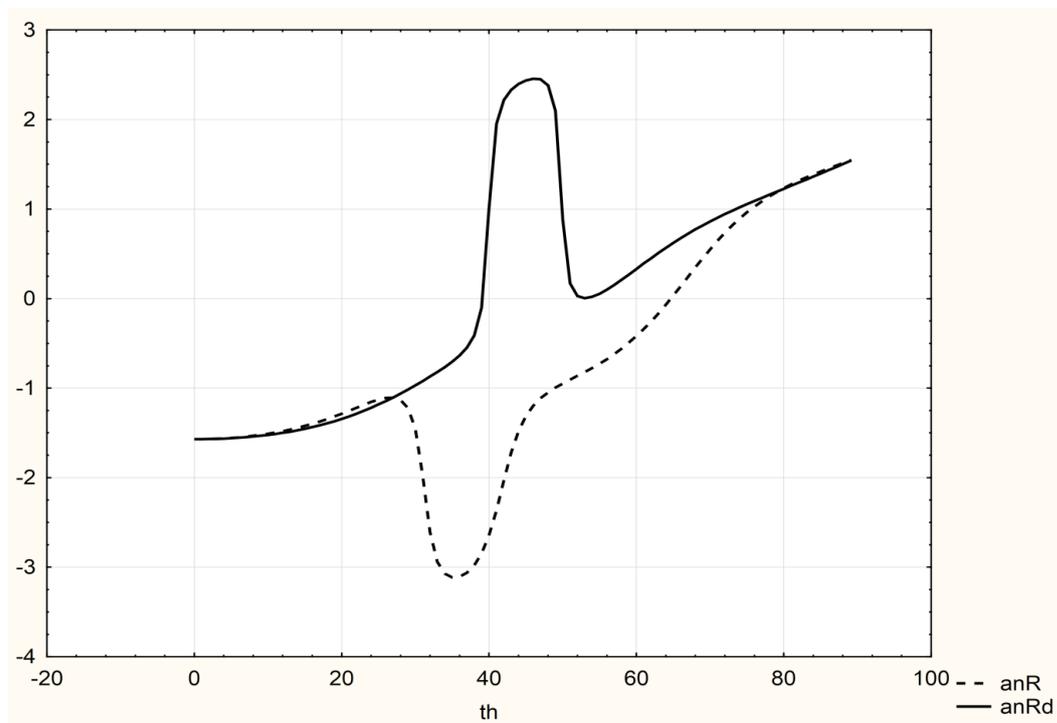


Рис. 3. Угловая зависимость аргументов эллипсометрических параметров идеальной наноструктуры (anR) и структуры с дефектом в первом слое (anRd)

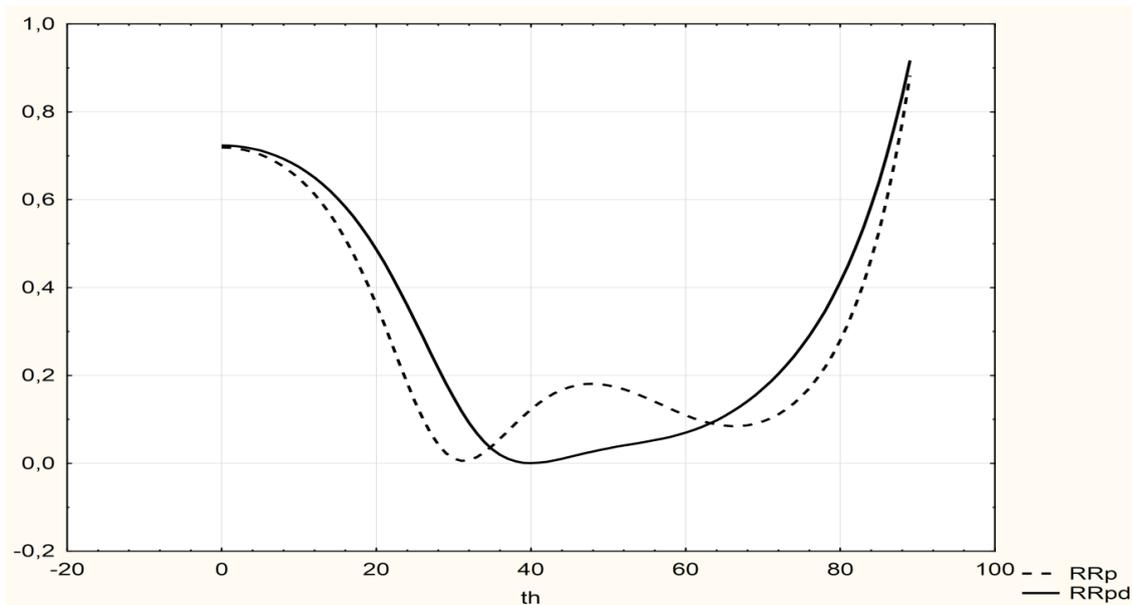


Рис. 4. Угловая зависимость энергетических коэффициентов отражения p — поляризации для идеальной наноструктуры (RRp) и структуры с дефектом в первом слое (RRpd)

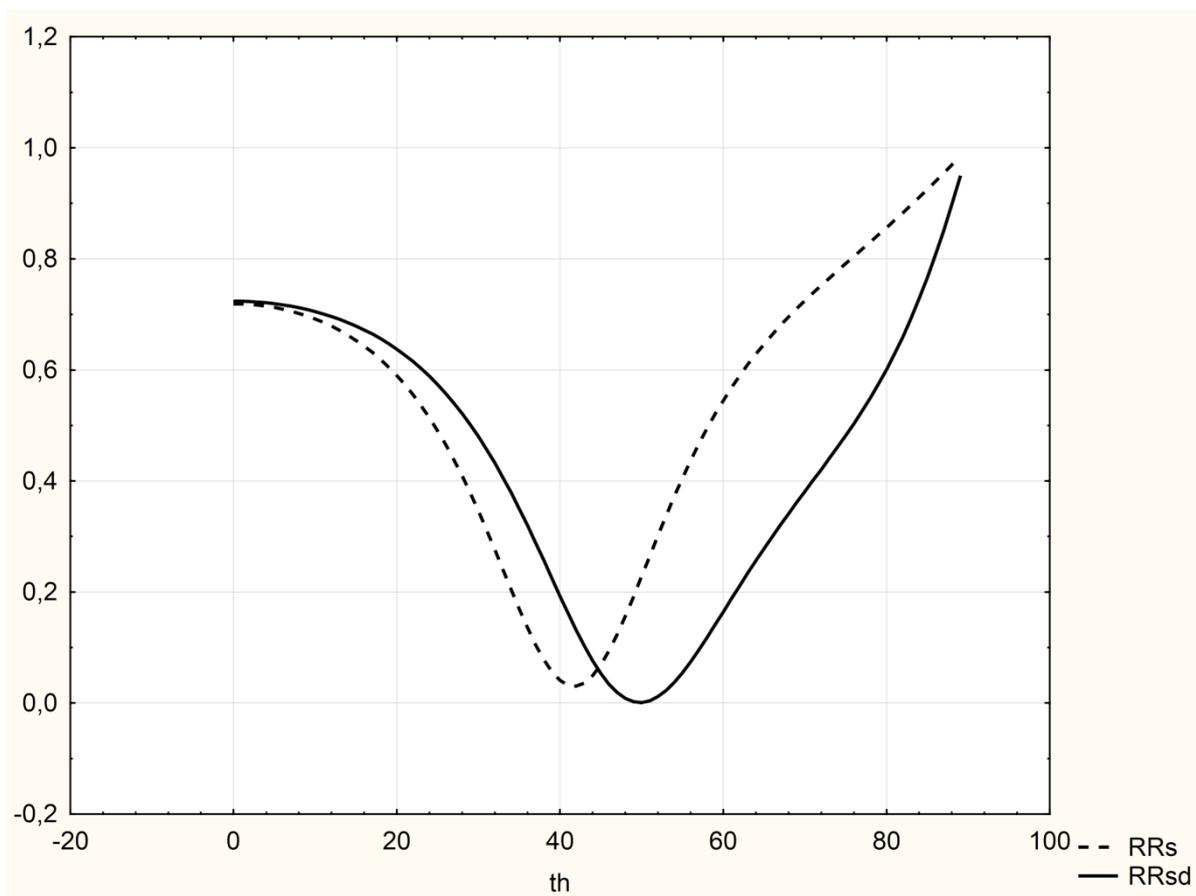


Рис. 5. Угловая зависимость энергетических коэффициентов отражения s — поляризации для идеальной наноструктуры (RRp) и структуры с дефектом в первом слое (RRpd)

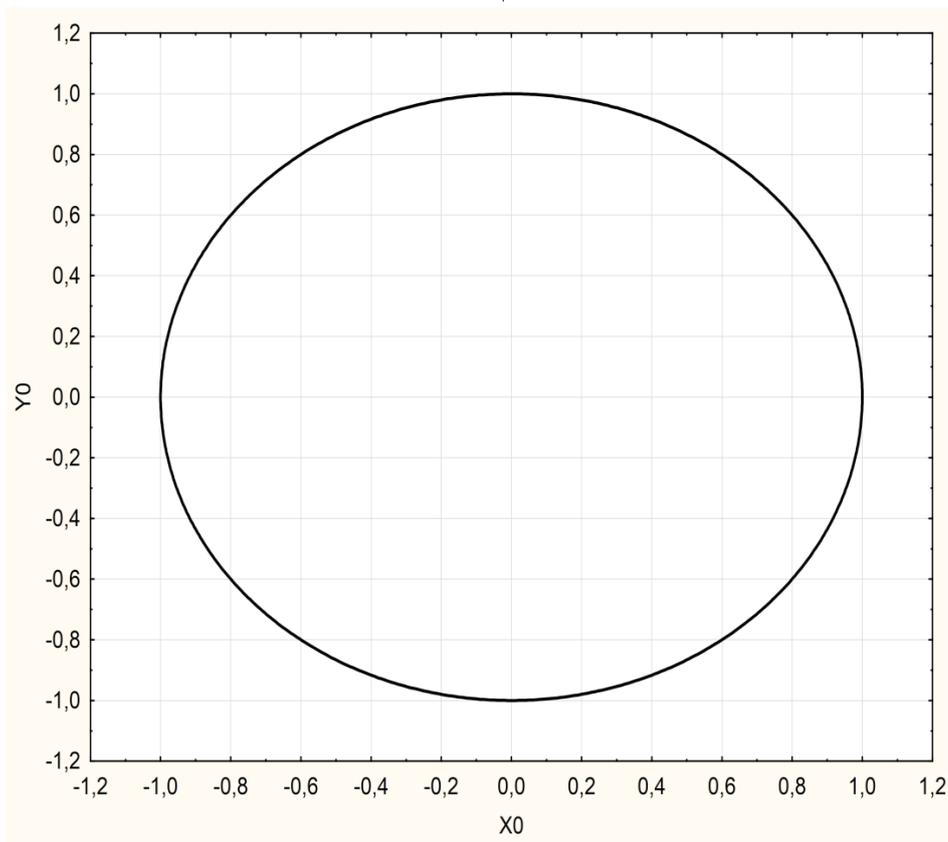


Рис. 6. Эллипс поляризации падающего излучения: характер поляризации круговая, левая

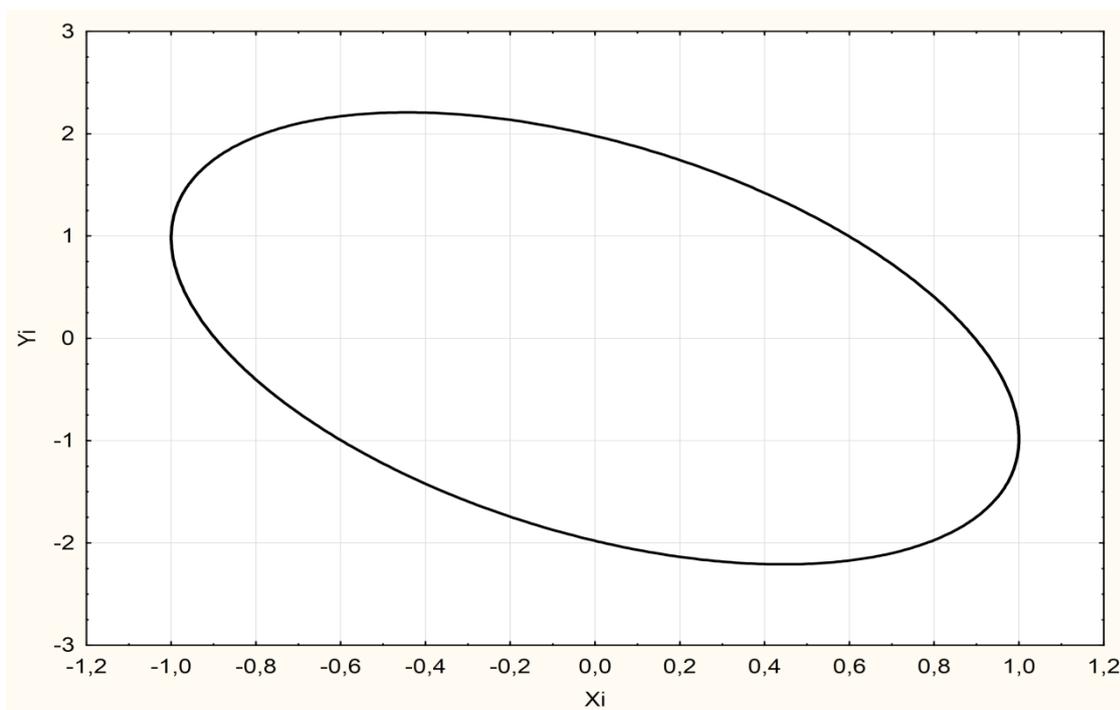


Рис. 7. Эллипс поляризации отраженного от идеальной наноструктуры излучения: характер поляризации эллиптическая, правая

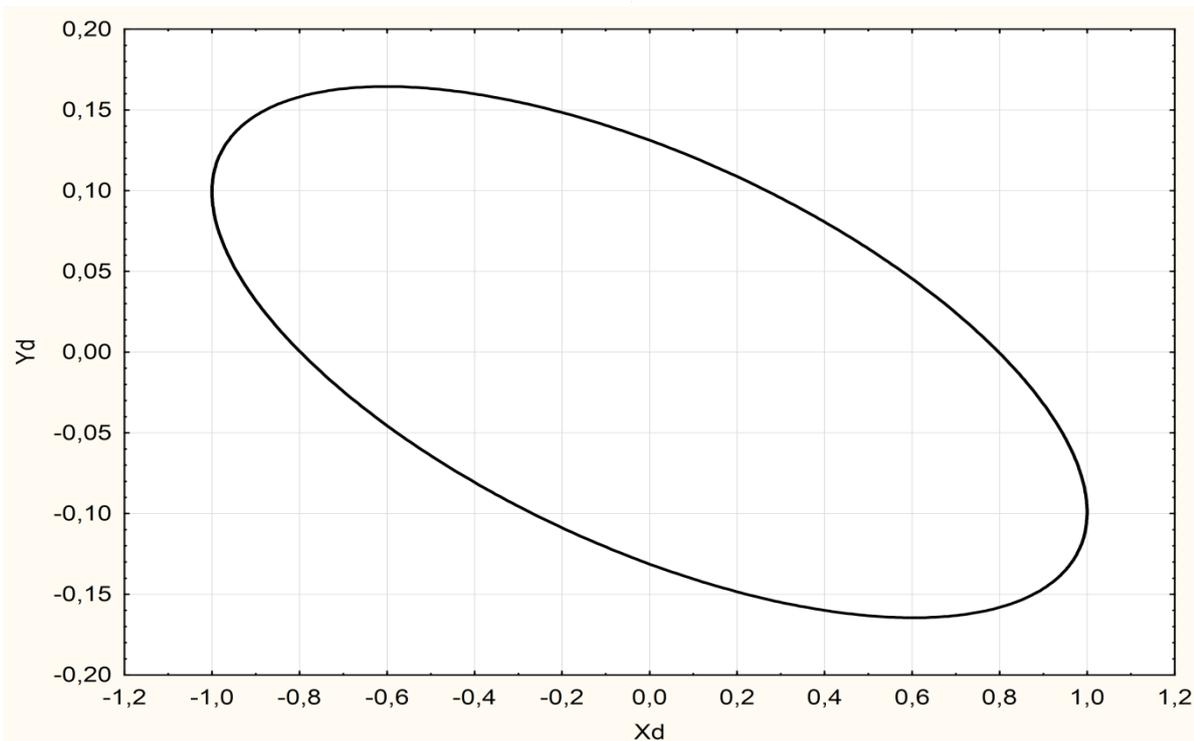


Рис. 8. Эллипс поляризации отраженного излучения от наноструктуры с дефектом: характер поляризации эллиптическая, левая

падения $27^\circ \div 53^\circ$. Оба угловых спектра эллипсометрических параметров демонстрируют ярко выраженное различие в зависимости от угла падения для идеальной наноструктуры и структуры с дефектом, что может служить более тонким инструментом диагностики по сравнению с обычными энергетическими спектрами отражения и прохождения.

Из рисунков 4—5 видно, что энергетические спектры отражения для идеальной наноструктуры и структуры с дефектом также демонстрируют определенное различие, однако оно менее выражено, чем в случае спектров эллипсометрических параметров (рис. 2 и рис. 3).

Следовательно, эллипсометрический метод оказывается более чувствительным к дефекту периодиче-

ской наноструктуры чем обычный метод, основанный на энергетическом спектре отражения.

Особенную чувствительность к дефекту проявляет, как мы увидим ниже, форма и характер эллипса поляризации отраженного от наноструктуры эллиптически поляризованного света.

Следовательно, проведенный анализ отражения от периодической наноструктуры с дефектом эллиптически поляризованного излучения показывает, что данный метод в сравнении с традиционным методом проявляет значительно большую чувствительность к наличию дефекта как эллипсометрических параметров, так и формы, и направления вращения вектора поля в эллипсе поляризации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Born M., Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light // Cambridge University Press. 7th Edition. 952 p.
2. de Sande J.C.G., Piquero G., Santarsiero, M. Polarimetry with azimuthally polarized light // Optics Communications 2018, 410, pp. 961–965
3. Rodrigues G.C., Duflo J.R. Theoretical and experimental aspects of laser cutting with elliptically polarized laser beams // Journal of Materials Processing Tech. 2019 264, pp. 448–453
4. Yongqi L., Qi Q., Yu F. et al. Reflective triple-band line-to-circular polarization conversion based on diamond-shaped graphene metasurface // Optical Materials, 2021, 114, p. 110984

5. Yatsyshen V.V. The use of plasmon resonance spectroscopy to analyze the parameters of thin layers // Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1515(2), p. 022047
6. Yatsishen V.V., Amelchenko Y., Ellipsometry of biological objects in the mode of attenuated total reflection (ATR) using a circularly polarized laser light // Progress in Biomedical Optics and Imaging — Proceedings of SPIE, 2020, p. 11458
7. Yatsyshen V.V., Potapova I.I., Verevkina K.Y. Ellipsometry of nanocomposite layered materials // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021, 155, p. 258–268

© Яцышен Валерий Васильевич (yatsyshen.valeriy@volsu.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



г. Волгоград