

Эллипсометрия тонких пленок биологических объектов в условиях полного внутреннего отражения

В.В. Яцышен 

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

Аннотация – Проведен анализ эллипсометрических параметров отраженного света от системы призма - исследуемый материал - воздух при падении на нее циркулярно поляризованного света в условиях наступления явления полного внутреннего отражения. При наступлении полного внутреннего отражения параметр эллипсометрии Δ демонстрирует высокую изменчивость с углом падения в отличие от параметра ρ_0 . Показано, что ПВО наступает при значении угла падения, не равного критическому углу граничащих сред – для двух разных материалов эти углы отличаются друг от друга. В случае пленки явление ПВО наступает при угле, равном критическому углу на границе призма – воздух, и не зависит от материала пленки. Полученные результаты показывают высокую эффективность использования эллипсометрического метода совместно с циркулярно поляризованным падающим излучением для целей диагностики тонких пленок из биологического материала.

Ключевые слова – эллиптически поляризованный свет; параметры эллипсометрии; угловые спектры отражения; полное внутреннее отражение; критический угол.

Введение

В задачах спектроскопии материалов до последнего времени, как правило, использовался поляризованный свет с линейной поляризацией. При этом анализировался отраженный и прошедший свет для взаимно перпендикулярных поляризаций – s и p . Различие в отражательных спектрах для этих поляризаций давало дополнительную информацию по сравнению с диагностикой материалов неполяризованным светом. Наиболее полную информацию о свойствах различных материалов несет спектроскопия с использованием эллиптически поляризованного света. При отражении света от исследуемого образца характер этой поляризации может меняться определенным образом, что может служить дополнительным методом диагностики материала. Например, в работе [1] использовался циркулярно поляризованный свет для анализа оптических свойств квантовой точки. Авторы работы подчеркивают, что возникающая эллиптичность света при воздействии на квантовую точку играет существенную роль. Эллиптически поляризованный свет используется не только для целей диагностики, но и как уникальный способ возбуждения молекулярных систем. Так, в работе [2] описана модель неадиабатического вращательного возбуждения молекул с использованием коротких специфических эллиптически поляризованных лазерных импульсов. В работе [3] показано, что при использовании эллиптически

поляризованного света путем изменения эллиптического параметра можно изменять линейное или нелинейное поглощение световой волны. Одним из самых тонких оптических методов диагностики материалов является метод эллипсометрии. В работе [4] предложен точный эллипсометрический метод анализа когерентного света с малой эллиптичностью. Особую роль занимают способы преобразования поляризации света. В работе [5] сообщается о новом методе преобразования линейно поляризованного света в эллиптический свет с использованием плоскопараллельной пластины. В статье [6] для анализа свойств листа используется свет с круговой поляризацией. В работе автора [7] проведен анализ поляризации отраженного света от различных материалов при

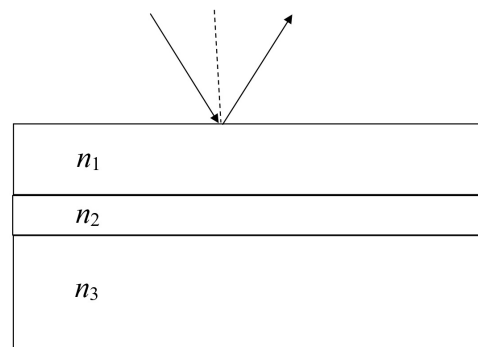


Рис. 1. Геометрия отражения: исследуемая структура с показателями преломления n_1, n_2, n_3
Fig. 1. Geometry of reflection: the structure under study with refractive indices n_1, n_2, n_3

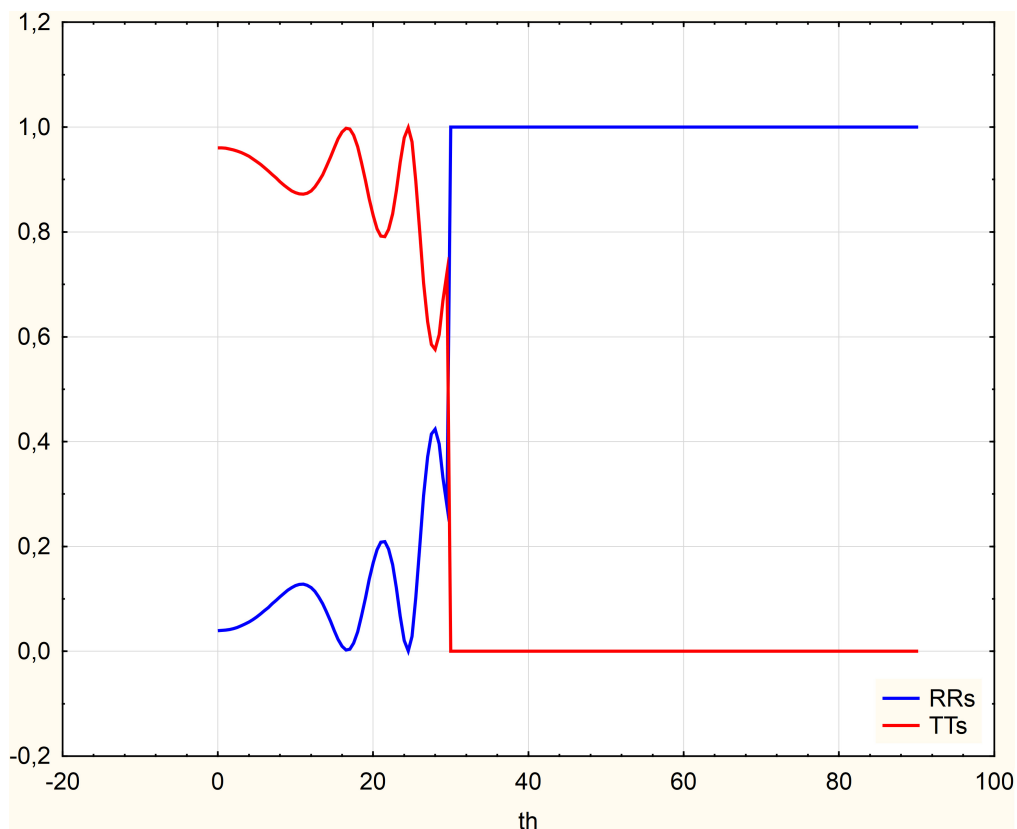


Рис. 2. Угловые энергетические спектры отражения RRs и прохождения TTs для пленки водосодержащей биологической ткани – для s-поляризации

Fig. 2. Angular energy spectra of reflection RRs and transmission TTs for a film of aqueous biological tissue – for s-polarization

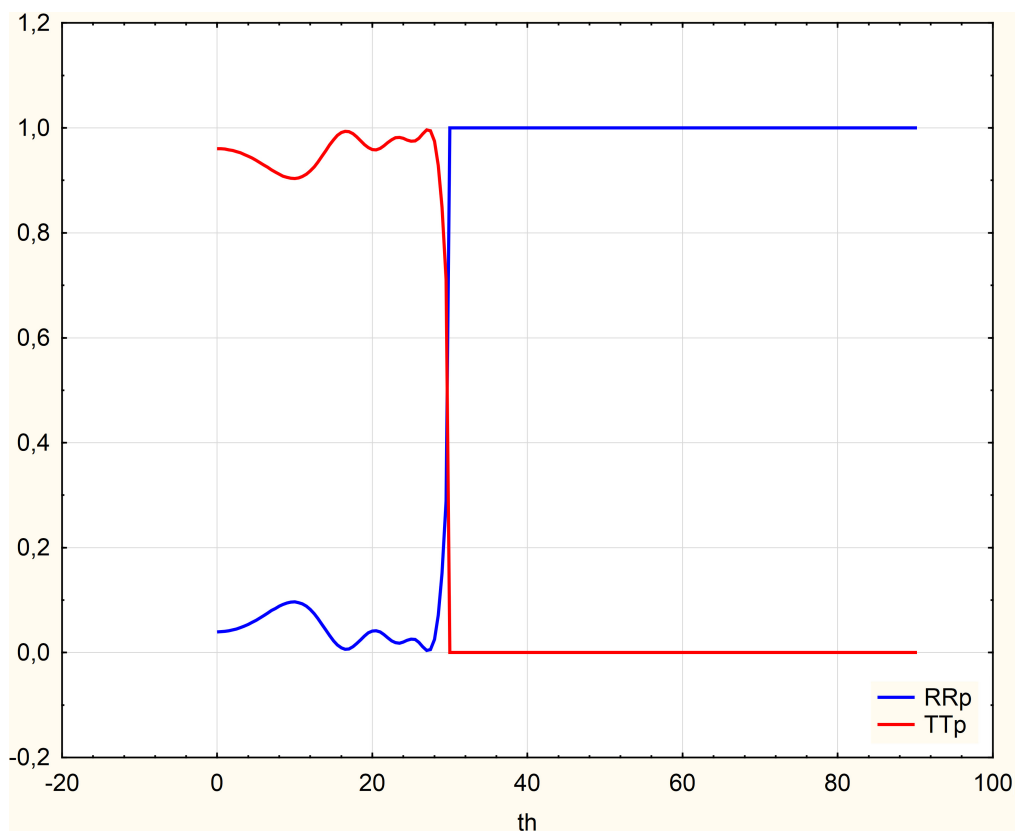


Рис. 3. Угловые энергетические спектры отражения RRp и прохождения TTp для пленки водосодержащей биологической ткани – для p-поляризации

Fig. 3. Angular energy spectra of reflection RRp and transmission TTp for a film of aqueous biological tissue – for p-polarization

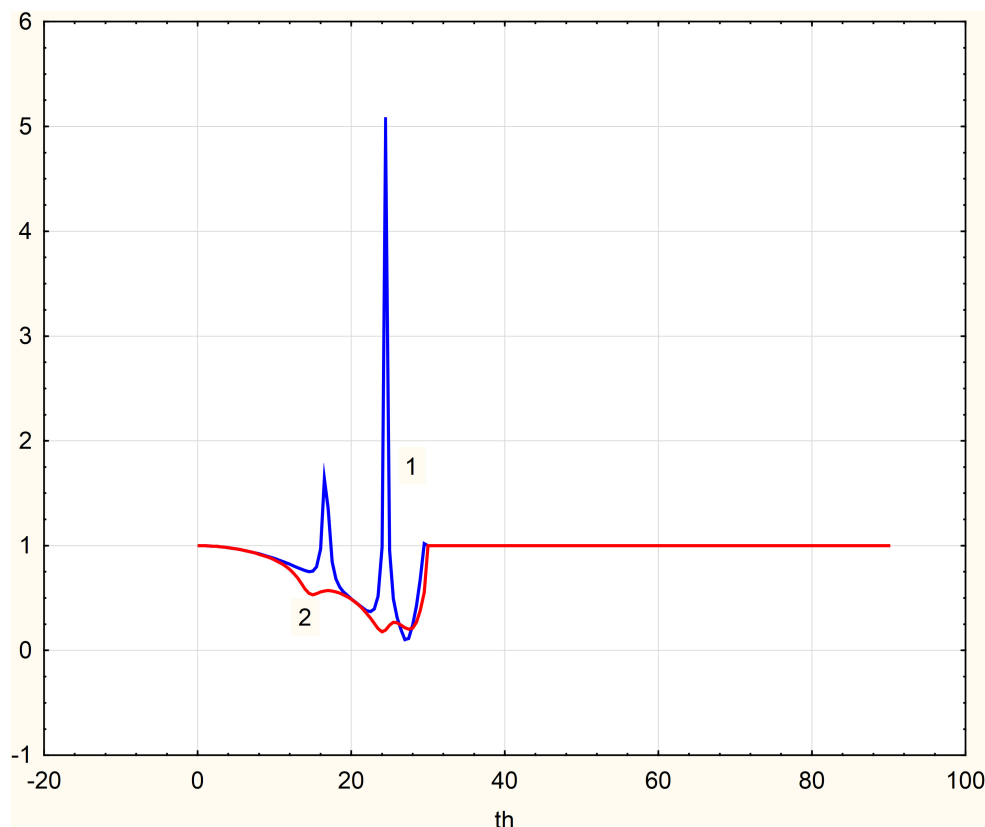


Рис. 4. Угловой спектр эллипсометрического параметра ρ_0 отраженного света для пленок водосодержащей биологической ткани (1) и меланина (2)

Fig. 4. Angular spectrum of the ellipsometric parameter ρ_0 of reflected light for films of aqueous biological tissue and melanin

падении на него циркулярно поляризованного света. При этом была рассмотрена граница только двух сред.

Угловые спектры эллипсометрических параметров в условиях полного внутреннего отражения. Результаты расчетов

В настоящей работе проводится анализ эллипсометрических параметров отраженного от тонкой пленки света круговой поляризации в условиях наступления полного внутреннего отражения на ее границе. Геометрия задачи изображена на рис. 1.

Параметры отражательной эллипсометрии определяются следующим образом:

$$\hat{\rho} = \frac{R_p}{R_s}. \quad (1)$$

Здесь R_p и R_s – амплитудные коэффициенты отражения для s- и p-поляризаций соответственно. Параметр $\hat{\rho}$ можно представить в виде

$$\hat{\rho} = \rho_0 e^{i\Delta}, \quad (2)$$

где ρ_0 – модуль эллипсометрического параметра; Δ – эллипсометрический угол. Часто ρ_0 представляют в виде

$$\rho_0 = \operatorname{tg} \Psi, \quad (3)$$

где Ψ – второй эллипсометрический угол. Эллипсометрические параметры являются более чувствительными, чем обычные энергетические коэффициенты отражения и прохождения. В качестве первой среды была выбрана призма с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1 = 4$. Исследуемые материалы – водосодержащая биологическая ткань $\epsilon_2 = 1,33$, а также меланин $\epsilon_2 = 1,6$. Наконец, третья среда – воздух $\epsilon_3 = 1$. Длина волны падающего излучения $\lambda = 0,64 \mu\text{m}$, толщина пластинки $d = 2 \mu\text{m}$. Показатель преломления каждой среды определяется как корень квадратный из диэлектрической проницаемости. Из приведенных значений диэлектрических проницаемостей видно, что следует ожидать наступления полного внутреннего отражения при критическом угле падения. На рис. 2 показан угловой спектр отражения s-поляризованной составляющей отраженного излучения. А на рис. 3 – p-поляризованной составляющей. Из этих рисунков видно, что после наступления полного внутреннего отражения энергетические спектры отражения для обеих поляризаций становятся равными единице.

На рис. 4 показаны угловые спектры параметра эллипсометрии ρ_0 для двух материалов – биоло-

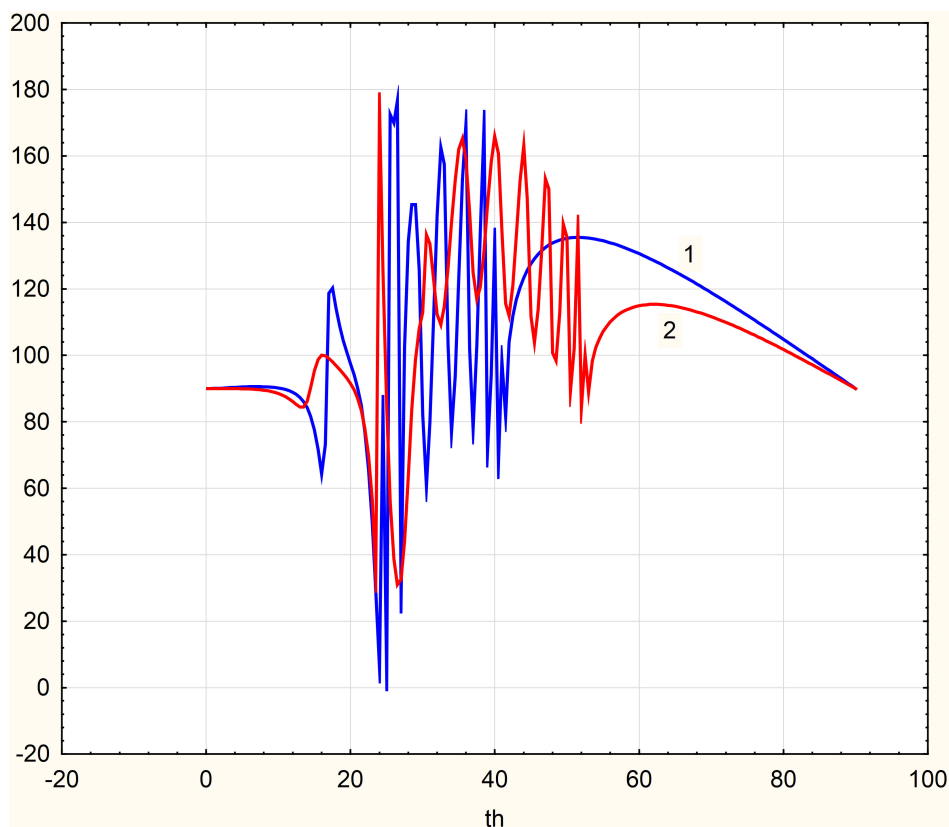


Рис. 5. Угловой спектр эллипсометрического параметра Δ отраженного света для пленок водосодержащей биологической ткани (1) и меланина (2)

Fig. 5. Angular spectrum of the ellipsometric parameter Δ of reflected light for films of aqueous biological tissue and melanin

гической ткани и меланина. Следует отметить необычное поведение этого параметра для ткани – резкое возрастание при некоторых углах падения, особенно выделяется максимум при угле $24,5^\circ$. Детальный анализ причины этого явления показал, что максимумы обусловлены интерференционными минимумами амплитудного коэффициента отражения R_s .

На рис. 5 показан ход спектральной зависимости эллипсометрического угла Δ . Необходимо подчеркнуть, что для падающего циркулярно поляризованного излучения эллипсометрические параметры равны $\rho_0 = 1$, $\Delta = 90$ соответственно. Из рис. 2 видно, насколько сильно может исказиться исходно падающее излучение – из круговой поляризации в эллиптическую поляризацию отраженного света со значительно отличающимися полуосями за счет большого значения параметра ρ_0 .

Особенно интересна изменчивая картина второго эллипсометрического параметра – мы видим, что даже после наступления явления полного внутреннего отражения этот параметр испытывает сильную угловую зависимость. Для различных материалов эта зависимость отличается, в то время как первый эллипсометрический параметр ведет

себя в области ПВО одинаково для различных материалов. Проведенный анализ показал, что обнаружен интересный факт – полное внутреннее отражение наступает раньше, чем, если бы граничили только две среды – призма и исследуемый материал. Фактически ПВО наступает при угле падения 30 градусов, что соответствует критическому углу призма – воздух независимо от материала пленки.

Заключение

Проведен анализ эллипсометрических параметров отраженного света от системы «призма – исследуемый материал – воздух» при падении на нее циркулярно поляризованного света в условиях наступления явления полного внутреннего отражения. Показано, что изначально поляризованное по кругу падающее излучение при отражении превращается в эллиптически поляризованное, причем существуют фиксированные области углов падения, где это изменение поляризации наиболее выражено. При наступлении полного внутреннего отражения параметр эллипсометрии демонстрирует высокую изменчивость с углом падения в отличие от параметра ρ_0 . Показано, что ПВО

наступает при значении угла падения, не равного критическому углу граничащих сред – для двух разных материалов эти углы отличаются. В случае пленки явление ПВО наступает при угле, равном критическому углу на границе призма – воздух и не зависит от материала пленки.

Список литературы

1. Lahon S., Jha P.K., Mohan M. Effect of elliptically polarized laser field on linear and non-linear properties of quantum dot // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2010. Vol. 43, no. 1. P. 211–215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physe.2010.07.010>
2. Maan A., Tyagi A., Prasad V. Field-free molecular orientation by delayed elliptically polarized laser pulses // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2018. Vol. 188. P. 268–275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.07.012>
3. Solookinejad G. Polarized dependence of nonlinear susceptibility in a single layer graphene system in infrared region // *Physica B: Condensed Matter*. 2016. Vol. 497. P. 67–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2016.06.014>
4. Bibikova E., Al-wassiti N., Kundikova N. New ellipsometric approach for determining small light ellipticities // *Optics and Lasers in Engineering*. 2019. Vol. 116. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.12.004>
5. Xu L., Liu J., Wang C. 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>
6. Fuertes M.-A., Flores J.-A., Sierro F. J. The use of circularly polarized light for biometry, identification and estimation of mass of coccoliths // *Marine Micropaleontology*. 2014. Vol. 113. P. 44–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2014.08.007>
7. Yatsishen V., Amelchenko Y. Ellipsometry of biological objects in the mode of attenuated total reflection (ATR) using a circularly polarized laser light // *Proc. SPIE. Saratov Fall Meeting 2019: Laser Physics, Photonic Technologies, and Molecular Modeling*. 2020. Vol. 11458. P. 114580S. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2564203>

References


1. Lahon S., Jha P.K., Mohan M. Effect of elliptically polarized laser field on linear and non-linear properties of quantum dot. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2010, vol. 43, no. 1, pp. 211–215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physe.2010.07.010>
2. Maan A., Tyagi A., Prasad V. Field-free molecular orientation by delayed elliptically polarized laser pulses. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2018, vol. 188, pp. 268–275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.07.012>
3. Solookinejad G. Polarized dependence of nonlinear susceptibility in a single layer graphene system in infrared region. *Physica B: Condensed Matter*, 2016, vol. 497, pp. 67–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2016.06.014>
4. Bibikova E., Al-wassiti N., Kundikova N. New ellipsometric approach for determining small light ellipticities. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, vol. 116, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.12.004>
5. Xu L., Liu J., Wang C. Novel Polarization conversion method of linearly polarized light at specific incident angle based on plane-parallel plate. *Optik*, 2019, vol. 188, pp. 187–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.05.039>
6. Fuertes M.-A., Flores J.-A., Sierro F. J. The use of circularly polarized light for biometry, identification and estimation of mass of coccoliths. *Marine Micropaleontology*, 2014, vol. 113, pp. 44–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2014.08.007>
7. Yatsishen V., Amelchenko Y. Ellipsometry of biological objects in the mode of attenuated total reflection (ATR) using a circularly polarized laser light. *Proc. SPIE. Saratov Fall Meeting 2019: Laser Physics, Photonic Technologies, and Molecular Modeling*, 2020, vol. 11458, p. 114580S. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2564203>

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2021, vol. 24, no. 4, pp. 7–12

DOI 10.18469/1810-3189.2021.24.4.7-12

Received 28 September 2021
Accepted 29 October 2021

Ellipsometry of thin films of biological objects under conditions of total internal reflection

Valeriy V. Yatsishen 

Volgograd State University
100, Prospekt Universitetsky,
Volgograd, 400062, Russia

Abstract – An analysis of the ellipsometric parameters of the reflected light from the prism – test material – air system is carried out when circularly polarized light is incident on it under the conditions of the onset of the phenomenon of total internal reflection. At the onset of total internal reflection, the ellipsometry parameter Δ shows high variability with the angle of incidence, in contrast to the parameter ρ_0 . It is shown that TIR occurs when the angle of incidence is not equal to the critical angle of the adjacent media – for two different materials, these angles differ from each other. In the case of a film, the TIR

phenomenon occurs at an angle equal to the critical angle at the prism-air interface and does not depend on the film material. The results obtained show the high efficiency of using the ellipsometric method together with circularly polarized incident radiation for diagnostics of thin films made of biological material.

Keywords – elliptically polarized light; ellipsometry parameters; angular reflection spectra; total internal reflection; critical angle.

Информация об авторе

Яцышен Валерий Васильевич, доктор технических наук, 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: электродинамика и оптика конденсированных сред, включая наноматериалы, метаматериалы, композитные наноматериалы и среды с пространственной дисперсией; нелинейные волновые процессы в средах и нелинейная оптика.

E-mail: yatsyshen.valeriy@volsu.ru

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

Information about the Author

Valeriy V. Yatsishen, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Forensic Science and Physical Materials Science, Institute of Priority Technologies, Volgograd State University, Volgograd, Russia. Graduated from the Physics Department of Lomonosov Moscow State University in 1976, and in 1979 – post-graduate study at the Physics Department of Lomonosov Moscow State University. In 1980 at Lomonosov Moscow State University he defended his thesis for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences in the 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 the specialty 01.04.03 «Radiophysics» in the field of technical sciences.

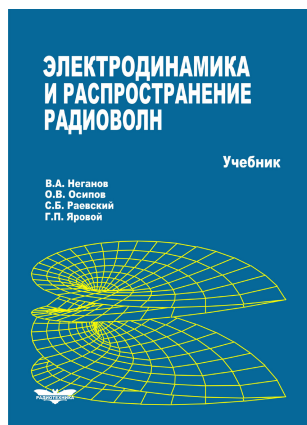
Research interests: electrodynamics and optics of condensed media, including nanomaterials, metamaterials, composite nanomaterials and media with spatial dispersion; nonlinear wave processes in media and nonlinear optics.

E-mail: yatsyshen.valeriy@volsu.ru

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

Неганов, В.А.

Электродинамика и распространение радиоволн: учебник / В.А. Неганов [и др.]; под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. – Изд. 4-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2009. – 744 с.



ISBN 978-5-88070-154-4

УДК 537.87(075.3)

ББК 22.3

Н 41

Книга написана активно работающими в области электродинамики учеными. Излагаются теория электромагнитного поля с акцентом на радиотехническую электродинамику и анализ волновых процессов; рассматриваются отражение и преломление волн, излучение и дифракция; описываются основные закономерности распространения электромагнитных волн в различных безграничных средах (изотропных, анизотропных, диспергирующих, неоднородных), в направляющих и резонансных структурах, в природных условиях. Обсуждаются методы математического моделирования в электродинамике, опирающегося на применение ЭВМ.

Отличительной особенностью книги является обсуждение современных проблем электродинамики: расчет электромагнитных волн в ближних зонах излучающих структур (самосогласованный метод расчета), комплексных волн в волноводах и др.

Предназначается для студентов радиотехнических и радиофизических специальностей вузов, а также инженеров-радиотехников и радиофизиков.