

Методы наноплазмоники в угловой спектроскопии наноразмерных биологических объектов

В.В. Яцышен 

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

Аннотация – В работе представлены результаты расчета угловых спектров отражения света при условии возбуждения поверхностных плазмонов в схеме Кречмана. Слой серебра в этой схеме играет роль реперного материала, минимум в угловом спектре которого служит точкой отсчета для сдвига минимума углового спектра при добавлении в рассматриваемую слоистую систему слоя исследуемого биологического материала, в качестве которых выступали меланин и биоткань. В результате выполнения работы получены конкретные ярко выраженные минимумы в угловых спектрах, которые позволяют идентифицировать эти материалы с высокой степенью точности благодаря узким резонансным пикам в угловых спектрах отражения, которые отстоят от пика в отражении от серебряной пленки на определенные значения углов. Метод содержит все характерные особенности метода резонансной спектроскопии, в качестве резонансных условий здесь выступают условия возбуждения поверхностного плазмона на границе металла.

Ключевые слова – поверхностный плазмон, плазмонный резонанс, угловые спектры отражения, схема Кречмана, комплексная диэлектрическая проницаемость.

Введение

В настоящее время наноплазмоника является современным быстро развивающимся направлением наноплазмоники [1–3]. Направление основано на возбуждении в наноструктуре объемных и поверхностных плазмонов – коллективных возбуждений, имеющих смешанный – механический и электромагнитный – характер. Наиболее перспективными для различных практических приложений являются поверхностные плазмоны [2–4], которые при определенных условиях возникают на границе раздела металл–воздух.

Возбуждение поверхностных плазмонов (ПП) на границе благородных металлов характеризуется наличием очень узкого резонанса, что позволяет использовать такое явление в диагностических целях. Схема Кречмана отличается тем, что металлический слой, на границе которого с воздухом возбуждается поверхностный плазмон, находится сразу после призмы, и он играет основную роль в формировании отраженного сигнала. Необходимым условием такого возбуждения являются отрицательные значения действительной части диэлектрической проницаемости. Эта схема представлена на рис. 1.

1. Расчет основных характеристик поверхностных плазмонов

В качестве проводника было выбрано серебро, комплексная диэлектрическая проницаемость

которого на длине волны $\lambda = 633$ нм имеет отрицательную действительную часть $\varepsilon_2 = -18,2 + 0,5i$. Такой металл, как золото, имеет на этой длине волны также большую отрицательную действительную часть и относительно небольшую мнимую часть. Следовательно, эти благородные металлы являются очень хорошими материалами для возбуждения ПП на их границе с воздухом. Сами ПП при распространении по поверхности металла затухают, поэтому имеют конечную длину пути. Последняя – одна из важных характеристик ПП. Сам процесс возбуждения ПП по схеме Кречмана приводит к появлению этих коллективных возбуждений, для которых дисперсионное уравнение имеет вид

$$k^2 = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}.$$

Для действительной и мнимой частей параметра распространения можно получить следующие уравнения:

$$k = k' + ik'',$$

$$k = k_0 (n' + in''),$$

$$k = k_0 (n' + in''), \quad k_0 = \frac{\omega}{c},$$

$$n' = \sqrt{\frac{f' + \sqrt{|f|^2}}{2}}, \quad n'' = \frac{f''}{2n'},$$

$$f = \frac{\varepsilon_1 |\varepsilon_2|^2}{|\varepsilon_2|^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2' - i \varepsilon_1 \varepsilon_2''}.$$

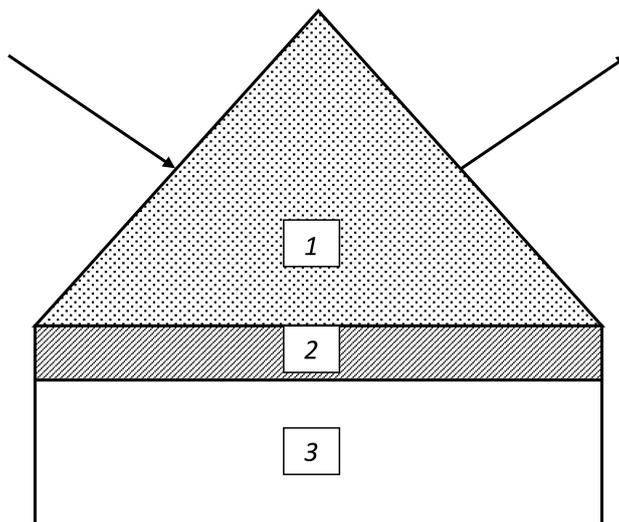


Рис. 1. Схема Кречмана для возбуждения поверхностных плазмонов: 1 – диэлектрическая призма; 2 – металлический слой; 3 – воздух

Fig. 1. Kretschman's scheme for the excitation of surface plasmons: 1 – dielectric prism; 2 – metal layer; 3 – air

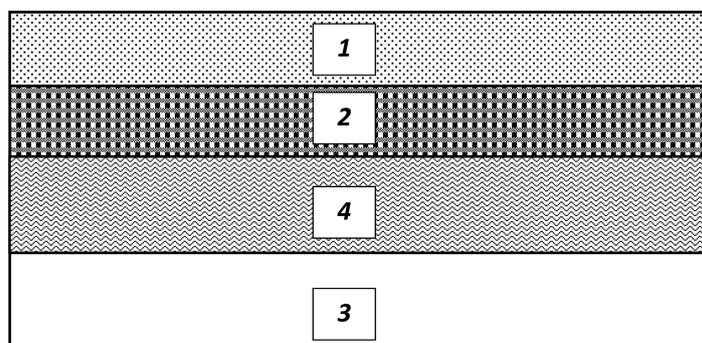


Рис. 2. Схема угловой спектроскопии биологического объекта (слой 4) с участием поверхностных плазмонов. Обозначения остальных слоев такие же, как на рис. 1

Fig. 2. Schematic of angular spectroscopy of a biological object (layer 4) with the participation of surface plasmons. The designations of the remaining layers are the same as in Fig. 1

Здесь $\varepsilon_1 = 1$ – диэлектрическая проницаемость воздуха; ω – частота волны; c – скорость света.

Если сканировать оптическое излучение, падающее на поверхность призмы по схеме Кречмана, по углу падения, то в энергетическом спектре отражения появляется узкий резонансный минимум, характерный для возбуждения ПП на границе серебро–воздух. Такой пик служит точкой отсчета при анализе спектра углового отражения пленки с биоматериалом, нанесенным на серебро из воздуха.

2. Результаты расчетов и обсуждение результатов

Когда наноразмерный слой биологического объекта помещается на поверхность проводника (см. рис. 2), этот резонансный пик смещается на определенную величину. Для различных образцов биологического материала этот сдвиг относитель-

но контрольного значения уникален и, таким образом, служит индикатором этого вещества. Мы провели расчеты такого сдвига для ряда биологических объектов. Расчет проводился для энергетических спектров не только отражения, но также и пропускания. Анализировались эллипсометрические параметры, а также использовался падающий свет различной поляризации. На рис. 3 показан угловой спектр энергетического коэффициента отражения, полученный в результате нашего расчета по схеме рис. 2. В частности, для слоя серебра толщиной $d = 0,05$ мкм и нанослоя биологической ткани толщиной $d_b = 0,03$ мкм положение пика соответствует следующим углам: серебро $\theta_1 = 40,65^\circ$, биоткань $\theta_2 = 43,5^\circ$, меланин $\theta_3 = 45,05^\circ$.

На рис. 4 показаны угловые спектры серебра и слоя воды. В этом случае минимум соответствует углу $\theta_4 = 43^\circ$.

На приведенных рисунках наблюдаются очень узкие угловые пики, характерные для каждого

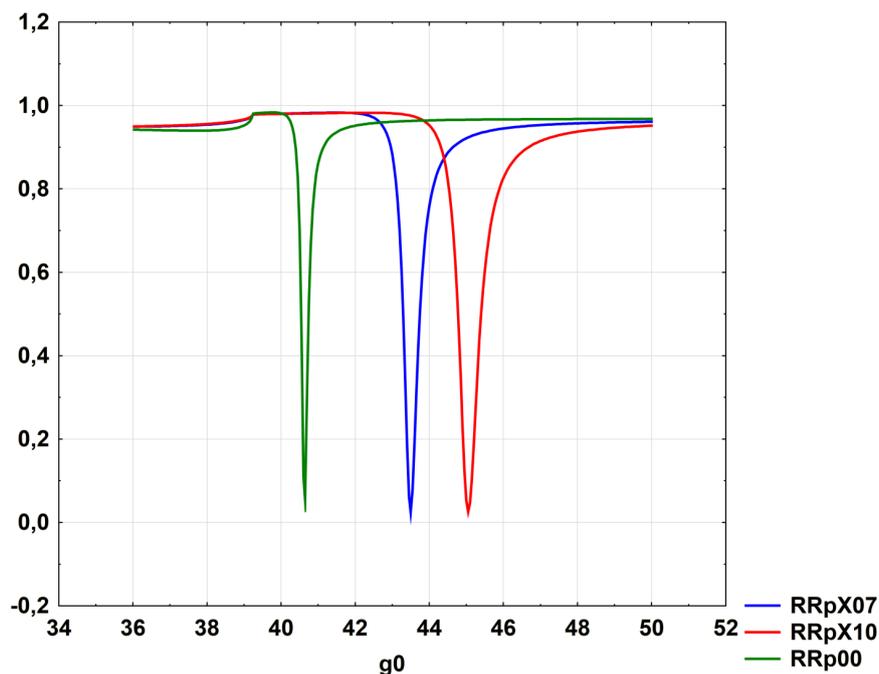


Рис. 3. Угловая зависимость энергетических коэффициентов отражения в следующих случаях: RRp00 – только металлический слой (рис. 1); RRpX07 – слой биологического объекта (ткани) на металлической поверхности (рис. 2); RRpX10 – это слой биологического объекта (меланина). Параметры расчета: толщина слоя серебра $d = 0,05$ мкм, толщина биологического объекта $d_a = 0,03$ мкм
Fig. 3. Angular dependence of the energy reflection coefficients in the following cases: RRp00 – only the metal layer (Fig. 1); RRpX07 – a layer of a biological object (tissue) on a metal surface (Fig. 2); RRpX10 – a layer of a biological object (melanin). Calculation parameters: thickness of the silver layer $d = 0,05$ μm , thickness of the biological object $d_a = 0,03$ μm

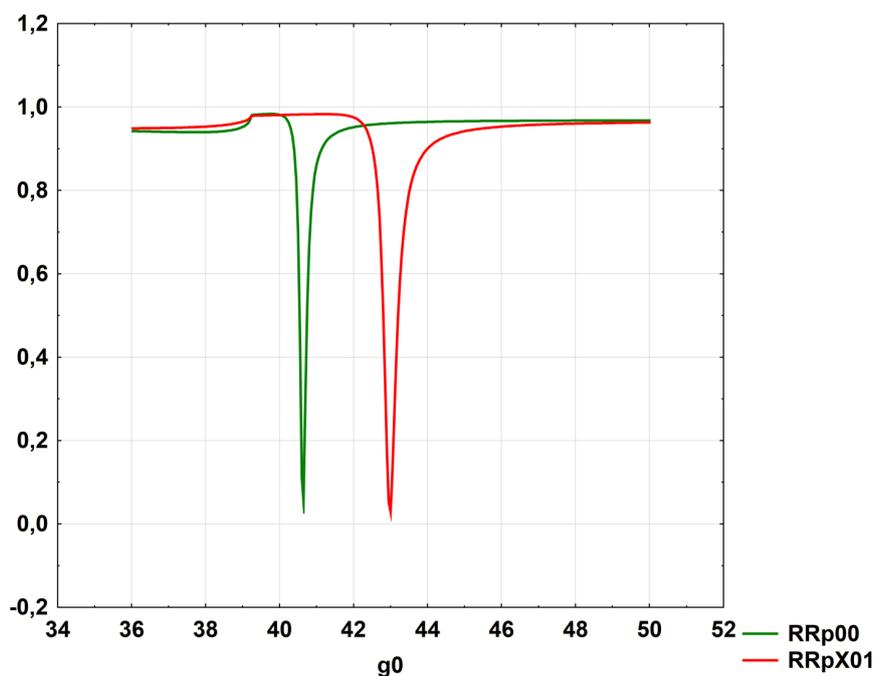


Рис. 4. Угловая зависимость энергетических коэффициентов отражения в следующих случаях: RRp00 – только металлический слой (рис. 1); RRpX01 – это слой воды на металлической поверхности (рис. 2). Параметры расчета: толщина слоя серебра $d = 0,05$ мкм, толщина биологического объекта $d_a = 0,03$ мкм
Fig. 4. Angular dependence of the energy reflection coefficients in the following cases: RRp00 – only the metal layer (Fig. 1); RRpX01 – a layer of water on a metal surface (Fig. 2). Calculation parameters: thickness of the silver layer $d = 0,05$ μm , thickness of the biological object $d_a = 0,03$ μm

материала, угловые расстояния которых от главного пика, обусловленного возбуждением поверхностных плазмонов на границе металла, и представляют в данном методе количественную спектрометрическую информацию относительно конкретного вещества.

Следовательно, метод возбуждения поверхностных плазмонов на границе раздела воздух–серебро по схеме Кречмана позволяет проводить диагностику биологических объектов нанометрового масштаба.

Заключение

В работе представлены результаты расчета угловых спектров отражения для слоя нанобъекта с применением методов наноплазмоники. Показана высокая чувствительность метода при диагностике биологических объектов наноразмерной толщины. Рассмотренный метод оперирует с очень узкими резонансами в угловых спектрах, что позволяет проводить идентификацию исследуемого биологического объекта с высокой степенью надежности, характерной для методов резонансной спектроскопии.

Список литературы

1. Polarization-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons / J. Lin [et al.] // *Science*. 2013. Vol. 340, No. 6130. P. 331-334. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1233746>.
2. Александров Ю.М., Яцышен В.В. Отрицательная групповая скорость поверхностных поляритонов в металлической пленочной наноструктуре // *Журнал нано- и электронной физики*. 2017. Т. 9, № 3. С. 03039-1-03039-4. DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.9\(3\).03039](https://doi.org/10.21272/jnep.9(3).03039).
3. Александров Ю.М., Яцышен В.В. Поверхностные поляритоны с отрицательной групповой скоростью в структуре с переходным слоем // *Журнал нано- и электронной физики*. 2016. Т. 8, № 1. С. 01013-1-01013-3. DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.8\(1\).01013](https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).01013).
4. Mishra A.K., Mishra S.K., Verma R.K. Graphene and beyond graphene MoS₂: A new window in surface-plasmonresonance-based fiber optic sensing // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2016. Vol. 120, No. 5. P. 2893–2900. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b08955>.

References

1. Lin J. et al. Polarization-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons. *Science*. 2013. Vol. 340, No. 6130, pp. 331-334. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1233746>.
2. Aleksandrov Yu.M., Yatsishen V.V. Negative group velocity of surface polaritons in a metallic film nanostructure. *Zhurnal nano-i elektronnoj fiziki*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 03039-1. DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.9\(3\).03039](https://doi.org/10.21272/jnep.9(3).03039). (In Russ.)
3. Aleksandrov Yu.M., Yatsishen V.V. Surface polaritons with negative group velocity in a structure with a transition layer. *Zhurnal nano-i elektronnoj fiziki*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 01013-1. DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.8\(1\).01013](https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).01013). (In Russ.)
4. Mishra A.K., Mishra S.K., Verma R.K. Graphene and beyond graphene MoS₂: A new window in surface-plasmonresonance-based fiber optic sensing. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016, vol. 120, no. 5, pp. 2893–2900. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b08955>.

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2020, vol. 23, no. 4, pp. 111–115

DOI 10.18469/1810-3189.2020.23.4.111-115

Received 2 December 2020
Accepted 18 December 2020

Nanoplasmonic methods in angular spectroscopy of nanoscale biological objects

Valeriy V. Yatsishen Volgograd State University
100, Universitetskii prospect,
Volgograd, 400062, Russia

Abstract – The paper presents the results of calculating the angular spectra of light reflection under the condition of excitation of surface plasmons in the Kretschman scheme. The silver layer in this scheme plays the role of a reference material, the minimum in the angular spectrum of which serves as a reference point for the shift of the minimum of the angular spectrum when a layer of the studied biological material is added to the considered layered system, which were melanin and biological tissue. As a result of the work, specific pronounced minima in the angular spectra were obtained, which make it possible to identify these materials with a high degree of accuracy due to the narrow resonance peaks in the angular reflection spectra, which are spaced from the peak in the reflection from the silver film by certain angles. The method contains all the characteristic features of the resonance spectroscopy method; the conditions for the excitation of a surface plasmon at the metal boundary act as resonance conditions.

Keywords – surface plasmon, plasmon resonance, angular reflection spectra, Kretschman's scheme, complex dielectric constant.

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 Moscow State University M.V. Lomonosov in 1976, and in 1979 – postgraduate study at the Physics Department of Moscow State University. In 1980 at 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.

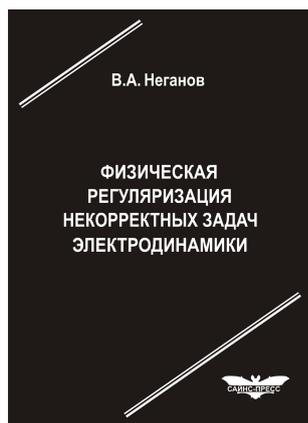
Research interests: electrodynamic and optics of condensed media, including nanomaterials, metamaterials, composite nanomaterials and media with spatial dispersion; nonlinear wave processes in media and nonlinear optics.

E-mail: yatsyshen.valeriy@volsu.ru

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

Неганов, В.А.

Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики: линии передачи, антенны, дифракция электромагнитных волн / В.А. Неганов. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008. – 432 с., 122 ил.



ISBN 978-5-88070-161-2

УДК 537.87

ББК 32.84

Н 41

Изложены основы физической регуляризации некорректных задач электродинамики, связанной с особенностями физических и математических моделей задач (физические допущения, некорректные математические выкладки, отсутствие предельного перехода). Подход, по мнению автора, обладает большими возможностями, чем метод регуляризации Тихонова А.Н. интегральных уравнений Фредгольма первого рода, названный в книге методом математической регуляризации. Метод физической регуляризации (МФР) применен к анализу волноведущих и излучающих структур, а также задачам дифракции электромагнитных волн на некоторых телах. МФР позволил впервые корректно осуществить анализ полей в ближних зонах некоторых антенн, устранить несамосогласованное приближение Кирхгофа в задачах дифракции, установить связь поверхностной плотности тока проводимости с напряженностями электрического и магнитного полей для диполя Герца и т. п.

Для специалистов в области радиотехники и радиофизики СВЧ, электромагнитной совместимости РТС, математической теории дифракции и математического моделирования электродинамических структур самого широкого назначения. Может быть полезна преподавателям вузов, докторантам, аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.