

**С.П. Руденко, М.А. Стеценко, И.М. Крищенко,  
Л.С. Максименко, Э.Б. Каганович, Б.К. Сердега**

## **ДИАГНОСТИКА ЛОКАЛИЗИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОННЫХ РЕЗОНАНСОВ В ПЛЕНКАХ ПОРИСТОГО ЗОЛОТА**

Диагностика локализованных поверхностных плазмонных резонансов выполнена с использованием методов модуляционно-поляризационной спектроскопии в нанокompозитных пористых пленках с массивом наночастиц золота, полученных импульсным лазерным осаждением. Измерены в геометрии Кретчмана спектральные и угловые зависимости поляризационной разности  $\rho(\lambda, \theta)$  коэффициентов внутреннего отражения  $s$ - и  $p$ -поляризованного излучения, а также спектральные зависимости углов изотропного отражения  $\theta_{\rho=0}(\lambda)$ . Обнаружены два типа резонансов: первый – на изолированных невзаимодействующих наночастицах, второй – обусловленный взаимодействием дипольных полей близко расположенных наночастиц. Определены частоты и параметры затухания резонансов. Показано, что дисперсионные соотношения второго типа резонансов характеризуются пространственной дисперсией диэлектрических функций двух массивов наночастиц, различающихся размерами.

**Ключевые слова:** модуляционно-поляризационная спектроскопия, нанокompозитные пленки, наночастицы золота, локализованный поверхностный плазмонный резонанс, метод импульсного лазерного осаждения.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Оптические свойства наночастиц (НЧ) благородных металлов (золото, серебро) изучают как для выяснения их отличия от массивного состояния, так и в связи с необходимостью их использования в оптике, наноплазмонике, сенсорике, биологии, медицине и т.д. При взаимодействии с электромагнитным излучением в Au НЧ возбуждаются локализованные поверхностные плазмоны (ЛПП). Способы формирования Au(Ag) НЧ включают химические процессы (коллоидные наночастицы), вакуумные технологии получения нанокompозитных пленок с массивами наночастиц в различных матрицах, литографическое формирование шаблонов с осаждением в них наночастиц и др. Параметры ЛПП резонансов зависят от условий формирования структуры плазмонных материалов, что определяет отличия резонансно-оптических свойств исследуемых образцов.

Хотя достигнуты значительные успехи в понимании резонансных явлений в наночастицах благородных металлов, актуальными являются вопросы, связанные с диагностикой резонансных эффектов, определением частот плазменных колебаний электронов, частот резонансов ЛПП, получением и анализом дисперсионных кривых и, наконец, с выяснением влияния условий формирования пленок с Au НЧ, структурных свойств пленок на их оптические свойства [1–5].

Традиционно регистрацию ЛПП резонансов осуществляют методами оптической спектроскопии: в спектрах пропускания (поглощения, экстинкции) излучения наблюдают соответствующие минимальные (максимальные) значения. Результаты недостаточно информативные. В работах [6–10] были предложены методы модуляционно-поляризационной спектроскопии (МПС) внутреннего отражения в геометрии Кретчмана, которым присущи аналитические преимущества. Они основаны на измерении спектральных и угловых характеристик поляризационной разности коэффициентов отражения  $s$ - и  $p$ -поляризованного излучения  $\rho(\lambda, \theta) = R_p^2 - R_s^2$  и спектральных характеристик угла изотропного отражения  $\theta_{\rho=0}(\lambda)$ . Эти методы позволяют проводить диагностику ЛПП резонансов, определять их параметры, выявлять взаимосвязи между структурой и

характеристиками ЛПП в кластерных пленках золота, в нанокompозитных пленках, содержащих Au НЧ в различных матрицах и др.

Среди различных плазмонных пленок, содержащих Au НЧ, привлекают внимание те, которые сформированы широко и эффективно используемым методом импульсного лазерного осаждения (ИЛО) (методом лазерной абляции). В наших предыдущих работах [11, 12] были выполнены предварительные исследования методом МПС плазмонных нанокompозитных пленок, содержащих Au(Ag) НЧ. Представленная работа является продолжением этих исследований, прежде всего, развитием интерпретации получаемых результатов. Кроме того, диагностика нанокompозитных пористых пленок золота (por-Au) методом МПС, выполняемая в условиях резонансных эффектов, представляет практический интерес с целью определения взаимосвязей параметров резонансов и условий формирования пленок.

Цель данной работы – применение диагностики модуляционно-поляризационной микроскопии для изучения резонансных эффектов в нанокompозитных пористых пленках, содержащих Au НЧ, в пленках пористого золота (por-Au), полученных ИЛО методом.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пленки por-Au получали разработанными методами ИЛО [13–16]. Осаждение проводили при прямом переносе атомов, кластеров золота эрозионного факела на подложку, удаленную от мишени с кусочками золота на расстояние 30 мм. Использовали излучение ИАГ:Nd<sup>3+</sup> лазера (длина волны 1.06 мкм, плотность энергии в импульсе 15 Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульса 10 нс, частота их повторения 25 Гц). Процесс проводили в атмосфере аргона с давлением в диапазоне 10–100 Па, что определяет структурные особенности пленок с Au НЧ. В этих работах было выяснено, что при низких давлениях аргона формируются пленки, содержащие большое количество наночастиц малых размеров, тогда как в пленках, осажденных при высоких давлениях аргона, количество наночастиц меньше, а размеры их больше. Эти результаты согласуются с результатами работы [17], в которой с использованием ПЗС камеры изучали процессы формирования кластеров золота в эрозионном факеле в присутствии аргона. Было показано, что с повышением давления аргона от 10 до 100 Па уменьшается число атомов, которые подвергаются лазерной абляции, и увеличивается число атомов в наночастицах, размеры Au НЧ увеличиваются от нескольких нанометров до 10 нм.

Методом рентгеновской рефлектометрии было установлено, что с увеличением давления аргона пористость пленок увеличивается, зависит от числа импульсов и лежит в пределах от нескольких единиц до 30–50% [15]. Методами атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии было показано, что размеры Au НЧ, пор и толщины пленок сопоставимы и лежат в диапазоне значений 5–15 нм [16].

Исследуемые в данной работе пленки por-Au были получены при давлении аргона  $p_{Ar} = 70$  Па и числе импульсов  $N = 15000$ . Согласно предыдущим измерениям их структурных особенностей они представляют собой нанокompозитные пористые структуры с пористостью  $\approx 50\%$ , содержащие частицы Au НЧ средних размеров (6–7 нм) со значительной их дисперсностью от нескольких нанометров до 10–15 нм.

Спектры пропускания пленок измеряли с помощью спектрофотометра СФ-26 в диапазоне длин волн 360–1000 нм. Как было показано в [13, 14], при изменении давления аргона в диапазоне  $p_{Ar} = 10$ –100 Па и числа импульсов  $N = 15000$ –1000 спектры пропускания характеризовались кривыми с минимумами при длинах волн 540–740 нм. Они были типичными для проявления поглощения, связанного с ЛПП резонансом. Для рассматриваемых пленок, полученных при  $p_{Ar} = 70$  Па,  $N = 15000$ , длина волны минимума пропускания составляла  $\lambda \approx 560$  нм.

Измерения ЛПП резонансов в пленках por-Au выполнены методом МПС, разработанным на установке, что подробно описано в работе [6]. В качестве источника

поляризованного излучения использовали монохроматор МДР-4 с галогенной лампой на входе и линейным поляризатором на выходе в диапазоне длин волн  $\lambda = 400\text{--}1000$  нм. Фотоупругий модулятор поляризации преобразовывал периодически азимут поля падающей электромагнитной волны на полуцилиндр относительно его оси с частотой 50 кГц. В дальнейшем излучение, отраженное в геометрии Кретчмана системой кварцевый полуцилиндр – исследуемая пленка  $\text{por-Au}$  – воздух, преобразовывалось кремниевым фотодиодом в электрический сигнал, усиливающийся lock-in нановольтметром. Показатель преломления кварца цилиндра  $n = 1,456$ , что определило значение критического угла полного внутреннего отражения  $\theta_{\text{кр}} = 43^\circ$ . Измеряли угловые зависимости коэффициентов внутреннего отражения излучения  $s$ - и  $p$ -поляризации,  $R_s^2(\theta)$  и  $R_p^2(\theta)$  соответственно, спектральные зависимости поляризационной разности  $\rho(\theta, \lambda)$  и спектральные зависимости углов изотропного отражения  $\theta_{\rho=0}(\lambda)$ .

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены угловые зависимости коэффициентов отражения  $s$ - и  $p$ -поляризованного излучения и поляризационной разности (соответственно  $R_s^2(\theta)$ ,  $R_p^2(\theta)$ ,  $\rho(\theta)$ ) для длин волн  $\lambda = 700$  (штриховая) и 900 (сплошная) нм для одной типичной пленки  $\text{por-Au}$ . На кривых  $\rho(\theta)$  (кривая 3) в диапазоне углов  $\theta \geq \theta_{\text{кр}}$  четко проявляется минимум с отрицательным знаком амплитуды, что свидетельствует о возбуждении локализованного поверхностного плазмонного резонанса. Из рисунка видно резонансное взаимодействие пленки с излучением обеих  $s$ - и  $p$ -поляризаций. Для  $\lambda = 900$  нм характерно увеличение резонансного отклика пленки для  $s$ -поляризации по сравнению с уменьшением такого для  $p$ -поляризации. Об этом также свидетельствует изменение знака кривизны кривой  $\rho(\theta)$  с отрицательного ( $\lambda = 700$  нм) на положительный ( $\lambda = 900$  нм). Кривая  $\rho(\theta)$  при  $\lambda = 700$  нм пересекает ось абсцисс ( $\rho(\theta) = 0$ ,  $R_p^2(\theta) = R_s^2(\theta)$ ) в точке, соответствующей углу изотропного отражения  $\theta_{\rho=0} = 40,7^\circ$ , а при  $\lambda = 900$  нм –  $\theta_{\rho=0} = 42,6^\circ$ . Для этих углов падения отражение излучения не зависит от состояния поляризации, т.е. является изотропным. Этот случай, характеризуемый спектрально-зависимым параметром  $\theta_{\rho=0}(\lambda)$ , далее будет рассмотрен более детально.

На рис. 2 представлены спектральные зависимости  $\rho(\lambda)$  в диапазоне углов  $\theta < \theta_{\text{кр}}$  с характерными минимумами в окрестности длины волны  $\lambda \approx 525$  нм. При увеличении  $\theta$  от  $20^\circ$  до  $42^\circ$  минимум  $\rho(\lambda)$  смещается по  $\lambda$  от 512 до 539 нм соответственно. При этом резонансное возбуждение ЛПП носит радиационный характер с образованием дипольных мод на изолированных невзаимодействующих наночастицах. В диапазоне углов  $\theta > \theta_{\text{кр}}$  ЛПП резонансные моды обусловлены диполь-дипольным взаимодействием близко расположенных наночастиц [10].

Характеристики  $\rho(\lambda)$  при углах  $\theta = 43^\circ\text{--}60^\circ$  приведены на рис. 3а. Спектрам свойственна форма широкополосных резонансов, а их сложные контуры предполагают участие нескольких типов ЛПП резонансов. Для длинноволнового минимума наблюдается смещение в красную область спектра. Действительно, на рис. 3б этот факт подтверждается приведенной кривой  $\rho(\lambda)$  при  $\theta = 60^\circ$  в привычных для резонансных кривых координатах  $\rho(\omega)$ , где  $\omega$  – частота падающего излучения. Экспериментальная кривая представлена в виде разложения на элементарные компоненты, которые описываются функцией Гаусса с частотами  $\omega_1 = 4,37 \cdot 10^{15}$  Гц,  $\omega_2 = 2,4 \cdot 10^{15}$  Гц,  $\omega_3 = 1,97 \cdot 10^{15}$  Гц при соответствующих константах затухания  $\gamma_1 = 1,03 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$ ,  $\gamma_2 = 0,99 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$ ,  $\gamma_3 = 0,4 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$ . Суммарная аппроксимирующая функция  $\rho(\omega)$ , состоящая из трех функций Гаусса, хорошо согласуется с экспериментальной кривой. Константа затухания, равная обратному среднему времени пробега электронов, в рамках классического размерного эффекта, зависит от соотношения

длины свободного пробега электронов и размера наночастицы. Если допустить, что наночастицы имеют несимметричную форму, то причина зависимости параметров затухания от угла падения излучения связана с топологическим размерным эффектом. Размер (сечение) наночастицы в направлении поля электромагнитной волны при некотором угле становится соразмерным с длиной свободного пробега электронов. С изменением угла падения излучения отношение длины свободного пробега электронов к размеру наночастиц изменяется. Поэтому с изменением угла падения изменяются и значения констант затухания. Анализ спектральных зависимостей  $\rho(\omega)$  для углов  $\theta = 43^\circ - 60^\circ$  указывает на проявление высокочастотного резонанса в более узком диапазоне частот  $\omega_1 = (4,3 - 4,37) \cdot 10^{15}$  Гц, связанного с дипольным, мультипольным возбуждением в изолированных невзаимодействующих наночастицах. Два других, более низкочастотных, резонанса в более широком диапазоне частот,  $\omega_2 = (3,34 - 2,4) \cdot 10^{15}$  Гц и  $\omega_3 = (2,43 - 1,97) \cdot 10^{15}$  Гц, обусловлены проявлением диполь-дипольных взаимодействий между близко расположенными наночастицами в двух массивах наночастиц, отличающихся размерами и формой.

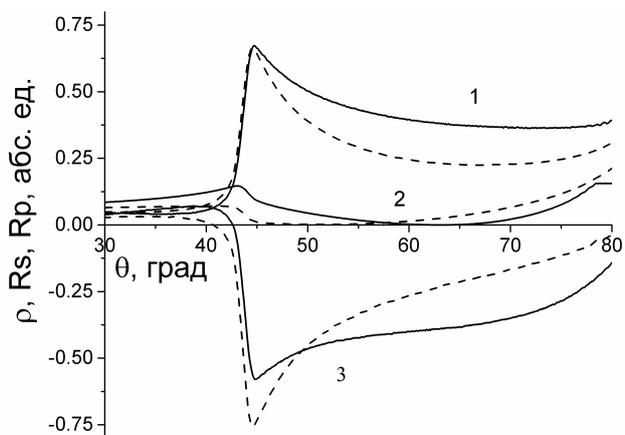


Рис. 1. Угловые зависимости коэффициентов внутреннего отражения излучения  $p$ - и  $s$ -поляризации  $R_p^2(\theta)$  (1),  $R_s^2(\theta)$  (2) и поляризационной разности  $\rho(\theta)$  (3) при  $\lambda = 700$  нм (штриховая) и  $900$  нм (сплошная).

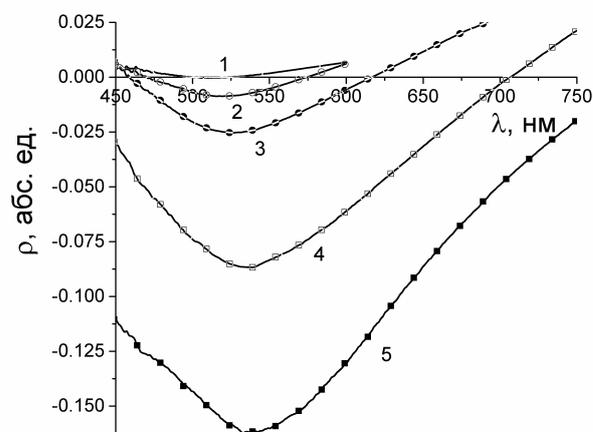


Рис. 2. Спектральные зависимости поляризационной разности  $\rho(\lambda)$  для углов падения  $\theta < \theta_{кр}$ :  $\theta = 20^\circ$  (1),  $30^\circ$  (2),  $35^\circ$  (3),  $40^\circ$  (4),  $42^\circ$  (5).

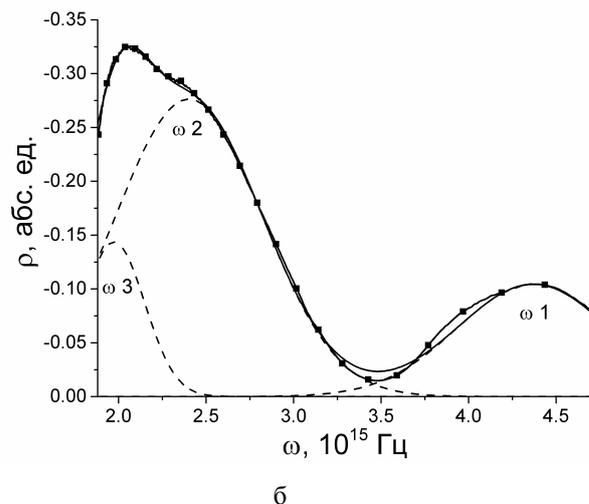
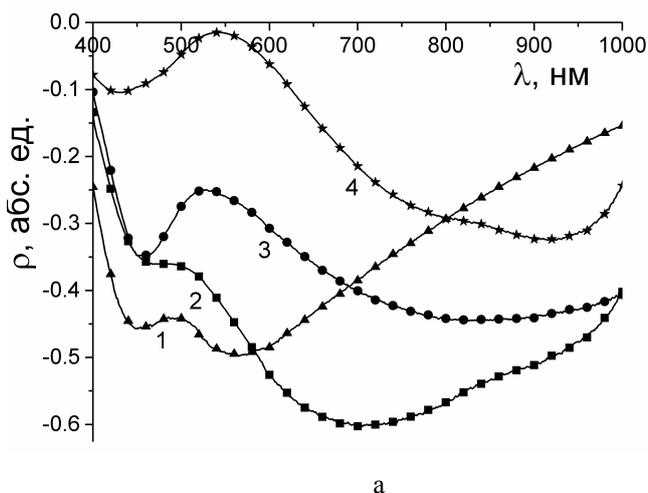


Рис. 3. (а) Спектральные зависимости поляризационной разности  $\rho(\lambda)$  для углов падения  $\theta > \theta_{кр}$ :  $\theta = 43^\circ$  (1),  $47^\circ$  (2),  $50^\circ$  (3),  $60^\circ$  (4). (б) Пример аппроксимации функциями Гаусса одной из экспериментальных зависимостей  $\rho(\lambda)$  для  $\theta = 60^\circ$  с преобразованием в зависимость  $\rho(\omega)$ .

На рис. 4 даны спектральные характеристики углов изотропного отражения  $\theta_{\rho=0}(\lambda)$ . Видно резонансный характер поведения кривых  $\theta_{\rho=0}(\lambda)$ . При углах падения  $\theta < \theta_{кр}$  экстремум резонанса находится при  $\lambda = 510$  нм. Здесь же приведена кривая зависимости  $\rho(\lambda)$  при угле  $\theta = 20^\circ$  (рис. 2) с тем же минимумом при  $\lambda = 510$  нм, соответствующим кривой  $\theta_{\rho=0}(\lambda)$ . Минимальное значение соответствующих частотных зависимостей определяет значение плазменной частоты электронов в Au НЧ  $\omega_p = 3,7 \cdot 10^1$  Гц. Собственные колебания плазмы имеют радиационный характер. В диапазоне углов  $\theta < \theta_{кр}$  и этой области длин волн падающего излучения проявляются моды дипольного типа в изолированных Au НЧ. При углах падения  $\theta > \theta_{кр}$  экстремум  $\theta_{\rho=0}(\lambda)$  находится при  $\lambda = 550$  нм. Рядом приведена кривая зависимости  $\rho(\lambda)$  при угле  $\theta = 60^\circ$  (рис. 3а) с минимумом при  $\lambda = 550$  нм. В этой области длин волн падающего излучения и углов падения проявляются моды диполь-дипольного взаимодействия в близко расположенных Au НЧ.

На рис. 5 приведена построенная по результатам измерений система дисперсионных зависимостей  $\omega(k)$  локализованных поверхностных плазмонных резонансов, на основании которой становится возможным идентифицировать их природу в пленках por-Au. Слева от дисперсионной кривой фотонов (сплошная кривая) находится ветка радиационных мод, справа – две ветки нерадиационных мод. Кривая радиационных мод построена по данным зависимости  $\rho(\lambda)$  для  $\theta = 20-42^\circ$  (рис. 2). Одна из этих точек совпадает со значением минимума кривой  $\theta_{\rho=0}(\lambda)$  (рис. 4, кривая 1) и соответствует значению плазменной частоты электронов в изолированных Au НЧ ( $\omega_p$ ). Три кривые справа от дисперсионной кривой фотонов относятся к нерадиационным модам ЛППР. Верхняя, высокочастотная, соответствует ЛПП резонансу, проявляющемуся во невзаимодействующих Au НЧ с дисперсией их размеров и формы; две нижние, низкочастотные, относятся к ЛПП резонансам, обусловленным взаимодействием между диполями близко расположенных наночастиц двух отличающихся размерами групп массивов. Отрицательные знаки обеих этих ветвей согласно [17, 18] объясняются пространственной дисперсией с нелокальным диэлектрическим откликом на электромагнитное возбуждение. Проявление пространственной дисперсии в двух ветвях указывает на наличие двух групп наночастиц с отличающимися размерами.

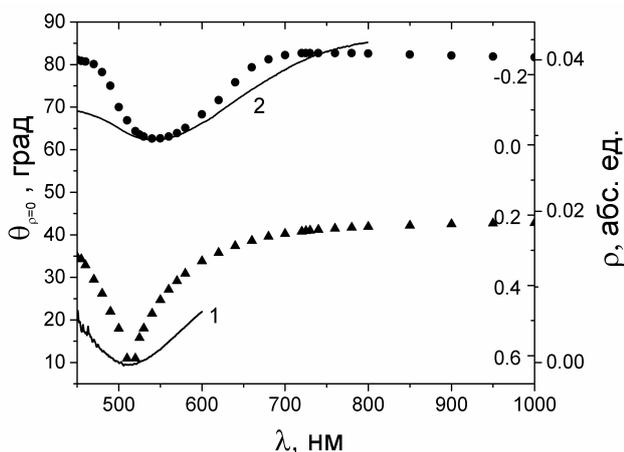


Рис. 4. Сопоставление спектральных зависимостей углов изотропного отражения  $\theta_{\rho=0}(\lambda)$  (символы) и зависимостей  $\rho(\lambda)$ , справа – при  $\theta = 20^\circ$  (1) и слева – при  $60^\circ$  (2).

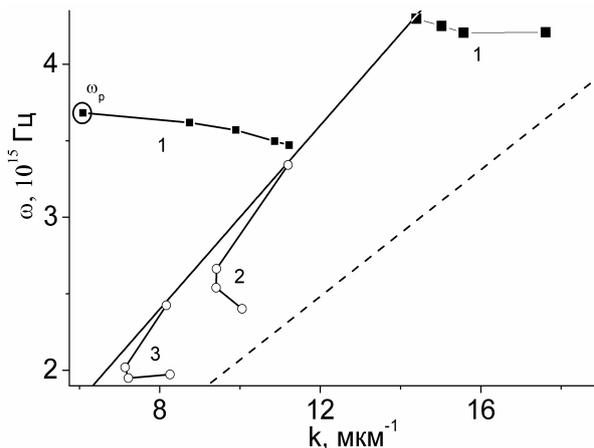


Рис. 5. Дисперсионные характеристики  $\omega(k)$  радиационных – слева и нерадиационных мод – справа от дисперсионной кривой фотонов в воздухе ЛПП резонанса, связанного с дипольными модами невзаимодействующих Au НЧ (1) и с диполь-дипольным взаимодействием Au НЧ (2, 3) соответственно.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диагностика локализованных поверхностных плазмонных резонансов в нанокompозитных пористых пленках с массивом наночастиц золота выполнена с применением метода модуляционно-поляризационной спектроскопии. Обнаружены два типа ЛПП резонансов: обусловленных дипольным возбуждением в изолированных Au НЧ и диполь-дипольным взаимодействием в близлежащих Au НЧ. Построены дисперсионные соотношения и приведены частоты плазменных колебаний электронов и частот обоих типов резонансов. По результатам анализа экспериментальных спектров построены дисперсионные характеристики  $\omega(k)$  ЛПП резонансов, состоящие из нескольких ветвей, отражающих взаимодействия между наночастицами. Показано проявление пространственной дисперсии диэлектрических функций для двух групп массивов наночастиц, отличающихся размерами.

**S.P. Rudenko, M.O. Stetsenko, I.M. Krishchenko, L.S. Maksimenko,  
E.B. Kaganovich, B.K. Serdega**

#### **DIAGNOSTIC OF LOCALIZED SURFACE PLASMON RESONANCES ON POROUS GOLD FILMS**

Diagnostic of localized surface plasmon resonances has been performed using the technique of modulation-polarization spectroscopy in nanocomposite porous films with array of gold nanoparticles produced by pulsed laser deposition. Spectral and angular dependences of the polarization difference  $\rho(\lambda, \theta)$  of internal reflection coefficients for *s*- and *p*-polarized radiation as well spectral dependences of isotropic reflection angles  $\theta_{p=0}(\lambda)$  have been measured in Kretschmann geometry. Two types of the resonances have been obtained. The first one was revealed on isolated non-interacting nanoparticles and the second one – between nanoparticles due to interaction of dipole fields inherent to neighboring nanoparticles. Frequencies and damping parameters of the resonances have been determined. It has been shown that dispersion relations of the second type resonance are characterized by spatial dispersion of dielectric functions of two nanoparticle arrays with different sizes.

**Keywords:** polarization-modulation spectroscopy, nanocomposite films, gold nanoparticles, localized surface plasmon resonance, pulsed laser deposition method.

1. *Kreibig U., Volmer M.* Optical properties of metals clusters. Springer Series in Materials Science. – Berlin: Springer-Verlag. – 1995.
2. *Дмитрук Н.Л., Малинич С.З.* Поверхностные плазмонные резонансы и их проявление в оптических свойствах наноструктур благородных металлов // УФЖ. – 2014. – **9**, №1. – С. 3-37.
3. *Maier A.* Plasmonic fundamentals and application. – UK: Springer. – 2007.
4. *Plasmons in strongly coupled metallic nanostructures / N.J. Halas, S. Lal, W-S. Chang et al. // Chem. Rev. – 2011. – **111**. – P. 3913-3961.*
5. *Венгер Е.Ф., Гончаренко Ф.В., Дмитрук Н.Л.* Оптика малых частиц и дисперсных сред. – Киев: Наук. думка. – 1999.
6. *Поляризационно-модуляционная спектроскопия поверхностного плазмонного резонанса / Л.И. Бережинский, Л.С. Максименко, И.Е. Матяш и др. // Оптика и спектроскопия. – 2008. – **105**, №2. – С. 281-289.*
7. *Размерные эффекты внутреннего отражения кластерных пленок золота в модуляционно-поляризационном представлении / Л.И. Бережинский, О.С. Литвин, Л.С. Максименко и др. // Оптика и спектроскопия. – 2009. – **107**, №2. – С. 277-282.*
8. *Модуляционная поляриметрия топологического эффекта в пленках нанокompозитов золото-органика / Д.А. Гринько, Ю.М. Барабаш, Л.С. Максименко и др. // ФТТ. – 2012. – **54**, №11. – С. 2165-2172.*
9. *Laser-assisted implantation of gold nanoparticles, formed under surface plasmon-polariton resonant conditions in polymer layer / L. Fedorenko, I. Matyash, Z. Kazantseva et al. // Appl. Surf. Sci. – 2014. – **290**. – P. 1-5.*

10. *Diagnostic of surface plasmon resonances in nano-sized gold films by modulation of polarization spectroscopy* / S.P. Rudenko, L.S. Maksimenko, I.E. Matyash et al. // *Plasmonics*. – doi: 10.1007/s11468-015-0080-6. – 2015. – 7 p.
11. *Поляризаційно-модуляційна спектроскопія поверхневого плазмонного резонансу в наноструктурах золота, отриманих методом імпульсного лазерного осадження* / Е.Б. Каганович, І.М. Кізяк, Е.Г. Манойлов та ін. // *УФЖ*. – 2009. – **54**, №6. – С. 624-629.
12. *Поляризационные свойства пористых пленок золота и серебра* / Э.Б. Каганович, С.А. Кравченко, Л.С. Максименко и др. // *Оптика и спектроскопия*. – 2011. – **110**, №4. – С. 552-560.
13. *Формирование ансамбля Au(Ag) наночастиц методом импульсного лазерного осаднения* / Э.Б. Каганович, И.М. Крищенко, С.А. Кравченко и др. // *Физика и химия твердого тела*. – 2013. – **14**, №3. – С. 649 – С. 653.
14. *Рішення про видачу патенту № u 2014 14138, Україна, МПК В82У 30/00. Спосіб одержання плазмонної плівкової наноструктури золота* / Е.Б. Каганович, І.М. Крищенко, Е.Г. Манойлов, В.П. Кладько, О.Й. Гудименко, С.Б. Кривий.
15. *Рефлектометрические исследования нанопористых пленок с массивом наночастиц золота* / В.П. Кладько, А.И. Гудыменко, С.Б. Кривый и др. // *УФЖ*. – 2014. – **59**, №9. – С. 917-924.
16. *Структура и оптические свойства пористых пленок золота и серебра, полученных импульсным лазерным осаднением в вакууме* / Э.Б. Каганович, И.М. Крищенко, Э.Г. Манойлов и др. // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*. – 2012. – **10**, №4. – С. 859-867.
17. *Au nanoparticle arrays produced by pulsed laser deposition for Surface Enhanced Raman Spectroscopy* / N.R. Agarwal, F. Neri, S. Trusso et al. // *Appl. Surf. Sci.* – 2012. – **258**. – P. 9148-9152.
18. *Агранович В.М., Гарштейн Ю.Н. Пространственная дисперсия и отрицательное преломление света* // *УФН*. – 2006. – **176**, №10. – С. 1051-1068.

Институт физики полупроводников  
им. В.Е. Лашкарева НАН Украины,  
проспект Науки, 45,  
03680 Киев, Украина  
e-mail: bserdega@isp.kiev.ua

Получено 15.05.15