Наноматериалы и нанотехнологии

Nanomaterials and nanotechnologies

УДК 537.868.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОСТРУКТУР НА ПОДЛОЖКЕ В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

***Е. П. МИКИТЧУК*[1)], *К. В. КОЗАДАЕВ*[2)]**

[1)]*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь*
[2)]*НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» БГУ, ул. Курчатова, 7, 220108, г. Минск, Республика Беларусь*

Методом конечного интегрирования в рамках программного пакета *CST Studio* рассчитаны оптические спектры экстинкции и пространственные распределения составляющих электромагнитного поля в двумерных серебряных наноструктурах с наночастицами Ag на стеклянной подложке в атмосфере воздуха. Предложены рекомендации для управления характеристиками оптических спектров двумерных массивов наночастиц Ag на стеклянной подложке, основанные на подборе формы, плотности заполнения поверхности и аспектного отношения наночастиц. Установлено, что управление спектральным положением полосы поверхностного плазмонного резонанса в широком диапазоне длин волн от 350 до 750 нм возможно на этапе синтеза наноструктуры путем вариации формы наночастиц, а более тонкое управление спектральной формой полосы поверхностного плазмонного резонанса – путем изменения линейных размеров и плотности заполнения поверхности наночастицами.

Ключевые слова: двумерный массив; наночастицы Ag; спектр экстинкции оптического излучения; поверхностный плазмонный резонанс.

Образец цитирования:
Микитчук Е. П., Козадаев К. В. Моделирование электромагнитных свойств серебряных наноструктур на подложке в атмосфере воздуха // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 1. С. 100–107.

For citation:
Mikitchuk A. P., Kozadaev K. V. Simulation of the electromagnetic properties of silver nanostructures on the solid substrate in the air atmosphere. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2017. No. 1. P. 100–107 (in Russ.).

Авторы:
Елена Петровна Микитчук – аспирантка кафедры интеллектуальных систем факультета радиофизики и компьютерных технологий. Научный руководитель – К. В. Козадаев.
Константин Владимирович Козадаев – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий кафедрой интеллектуальных систем факультета радиофизики и компьютерных технологий.

Authors:
Alena Mikitchuk, postgraduate student at the department of intelligent systems, faculty of radiophysics and computer technologies.
helenay@yandex.by
Konstantin Kozadaev, PhD (physics and mathematics), docent; head of the department of intelligent systems, faculty of radiophysics and computer technologies.
kozadaeff@mail.ru

SIMULATION OF THE ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF SILVER NANOSTRUCTURES ON THE SOLID SUBSTRATE IN THE AIR ATMOSPHERE

A. P. MIKITCHUK [a], ***K. V. KOZADAEV*** [b]

[a]*Belarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Republic of Belarus*
[b]*A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Kurchatova street, 7, 220108, Minsk, Republic of Belarus*
Corresponding author: kozadaeff@mail.ru

Optical spectrum and electromagnetic field distribution for 2D-array of silver nanoparticles on the solid substrate of glass are simulated by means of *CST Studio* software. Design considerations based on the matching of nanoparticle shape, aspect ratio and surface occupation density are formulated for control optical extinction spectrum. It is shown, that surface plasmon resonance peak position can be controlled in the range from 350 to 750 nm by means of nanoparticle shape variation. Fine control of the spectral shape of surface plasmon resonance peak can be realized by variation of nanoparticle aspect ratio and surface occupation density. An approach to simulation of the 2D silver nanostructures on the solid substrate surface is proposed on the basis of the finite integral technique. Simulation of the 2D-array of silver nanoparticles on the solid substrate is performed. Simulation of both the macroscopic (optical extinction spectra) and microscopic (spatial distributions of an electromagnetic field within the nanostructure) properties of the 2D-array of silver nanoparticles is illustrated by several examples. The optical properties, spatial distributions of an electromagnetic field within nanoparticles of different shapes (in the form of sphere, cone, and cylinder) are compared for the nanostructures on the glass substrate in the air atmosphere. Interrelation between the electromagnetic field structure and the surface occupation density or the aspect ratio of a nanoparticle is investigated in detail. The spatial distribution of an electromagnetic field within the nanostructure is studied for different spectral positions on the surface plasmon resonance peak. Also, the nanostructures without interparticle interactions are studied. The influence of the nanoparticle aspect ratio on the properties of optical extinction spectra for the 2D-nanoarray is examined. In general, the possibility to vary the optical spectral properties by controlling shapes, surface occupation density, and aspect ratio of nanoparticles is demonstrated.

Key words: 2D-array; silver nanoparticles; optical extinction spectrum; surface plasmon resonance.

Введение

Стремительный рост числа исследований металлических наноструктур связан с их уникальными оптическими свойствами, которые определяются плазмонами, т. е. собственными коллективными колебаниями электронов металла относительно ионного остова. Резонансное возбуждение плазмонов оптическим излучением проявляется в спектрах экстинкции (поглощение и рассеяние) в виде одного или нескольких резонансных пиков, называемых пиками поверхностного плазмонного резонанса (ППР). Именно параметры спектра экстинкции во многом определяют возможность применения конкретных наноструктур в составе оптических приборов и препаратов нового поколения [1–4].

Как показывает практика [5–8], спектральным положением и формой полосы ППР можно управлять в широком диапазоне длин волн путем выбора морфологии наночастиц (НЧ), а также изменением расположения НЧ и типа подложки. Многообразие типов поверхностных наноструктур настолько велико, что затруднительно экспериментально получить и измерить все возможные комбинации параметров НЧ на подложке, поэтому очень важно комплексно использовать взаимодополняющие экспериментальные данные и численные модели подобных структур. Для этого необходима адекватная реальности модель, которая позволит понять основные физические процессы, происходящие при взаимодействии электромагнитного излучения с такими структурами.

В настоящей работе проведено сравнительное теоретическое исследование электромагнитных свойств наноструктур, представляющих собой двумерные слои наночастиц Ag различной формы (сфера, конус, цилиндр) на стеклянной подложке в атмосфере воздуха. Большое внимание уделено особенностям оптических спектров экстинкции двумерных слоев и влиянию аспектного отношения наночастиц (высоты НЧ к радиусу ее основания) на характеристики спектра экстинкции. Изучение пространственного распределения характеристик электромагнитного поля в наноструктуре при воздействии на нее оптического излучения проводилось путем моделирования с помощью метода конечных интегралов. Предлагаемый подход является развитием предыдущих работ авторов [6] и демонстрирует хорошее соответствие экспериментальным данным.

Моделирование электромагнитных свойств двумерного массива наночастиц на подложке

Все макроскопические электромагнитные явления, наблюдаемые на практике, могут быть математически описаны полным набором уравнений Максвелла, которые применительно к наноструктурам можно численно решить с помощью нескольких методов, например метода конечного интегрирования (МКИ) либо его частного случая – метода конечных разностей во временной области. Данный метод позволяет эффективнее моделировать поверхностные металлические наноструктуры с высоким аспектным отношением [9; 10]. МКИ основан на дискретной формулировке уравнений Максвелла в интегральной форме [10; 11], для численного решения которых сначала определяется область расчета, содержащая моделируемую структуру в виде набора элементарных ячеек [10]. При этом данная область разбивается на конечное число соприкасающихся ячеек, играющих роль расчетной сетки. Важно, что грани ячеек являются двусторонними ориентированными поверхностями (выбранное направление нормали на всей протяженности поверхности остается непрерывным), причем в процессе дискретизации ориентация отдельных ячеек должна совпадать с ориентацией исходной поверхности. В общем случае размеры отдельной ячейки необходимо выбирать исходя из соотношения неопределенностей Гейзенберга. На построенной сетке дискретизируются операторы ротора и дивергенции (закон Фарадея и закон отсутствия магнитных зарядов), в результате дискретные уравнения принимают следующий вид [11]:

$$\mathbb{C}\vec{e} = -\frac{d}{dt}\vec{b}, \tag{1}$$

$$\mathbb{S}\vec{b} = 0, \tag{2}$$

где $\mathbb{C}$ – дискретный матричный оператор ротора; $\mathbb{S}$ – дискретный матричный оператор дивергенции в построенной расчетной сетке. Матричные операторы содержат топологическую информацию об отдельных связях ребер ячейки из расчетной сетки и о взаимной ориентации (состоят из коэффициентов $\{-1, 0, 1\}$); $\vec{e}$ – вектор-столбец электрических напряжений на всех ребрах расчетной сетки; $\vec{b}$ – вектор-столбец магнитных потоков через все ребра расчетной сетки.

Дискретизация двух других уравнений Максвелла в МКИ требует построения дуальной сетки, такой, что каждую грань ячейки основной сетки пересекает только одно ребро дуальной сетки и каждая ячейка основной сетки содержит одну и только одну вершину дуальной сетки. На дуальной сетке рассматриваемые уравнения Максвелла принимают следующий вид:

$$\tilde{\mathbb{C}}\vec{h} = \frac{d}{dt}\vec{d} + \vec{j}, \tag{3}$$

$$\tilde{\mathbb{S}}\vec{d} = q, \tag{4}$$

где дискретные матричные операторы ротора и дивергенции $\tilde{\mathbb{C}}$ и $\tilde{\mathbb{S}}$ в построенной дуальной сетке содержат топологическую информацию об отдельных связях ребер ячейки из расчетной дуальной сетки и об их ориентации (состоят из коэффициентов $\{-1, 0, 1\}$); $\vec{h}$ – вектор-столбец магнитодвижущих сил; $\vec{d}$ – вектор-столбец электрических индукций; $\vec{j}$ – вектор-столбец плотностей тока; q – заряд. На построенных сетках матричное представление оператора дискретного градиента совпадает с отрицательным транспонированным матричным представлением дуального дискретного оператора дивергенции.

Конкретный вид матричных операторов не несет в себе значимого физического смысла и в основном зависит от геометрии задачи и используемой расчетной схемы. В МКИ система уравнений (1)–(4) дополняется соответствующими дискретными матричными материальными уравнениями [11]. В целях преодоления проблемы ступенчатой аппроксимации криволинейных граничных поверхностей в МКИ для улучшения качества геометрической аппроксимации и материального усреднения внутри ячеек применяется метод идеальной аппроксимации границы (*Perfect Boundary Approximation*) [9; 11]. Следствием пространственной дискретизации для уравнений Максвелла является автоматическое выполнение уравнения непрерывности, гарантирующее отсутствие фиктивных зарядов.

Компьютерная модель МКИ реализована в коммерческом программном пакете *CST Microwave Studio*, в котором алгоритмы уточнения дискретизации применительно к НЧ позволяют достаточно точно решать уравнения Максвелла даже на криволинейных поверхностях. Представленная схема вычисления параметров воспроизведена в рамках *CST Microwave Studio* при использовании в качестве наиболее простой модели поверхностной наноструктуры на подложке двумерного массива монодисперсных монометаллических НЧ, расположенных периодически в двух измерениях на поверхности

стеклянной подложки в атмосфере воздуха. Модельная элементарная ячейка (минимальная ячейка, отвечающая единичной решеточной точке структуры с трансляционной симметрией в двух измерениях; здесь и далее не следует путать с элементарной ячейкой дискретизации) такой наноструктуры включает два соприкасающихся параллелепипеда, один состоит из материала подложки, а второй содержит НЧ и окружающую ее атмосферу воздуха. При этом НЧ располагаются на границе раздела параллелепипедов, основанием касаясь подложки. Важно, что при выборе размеров элементарных ячеек необходимо проводить итерационные расчеты с увеличением густоты сетки до тех пор, пока их результаты не станут эргодичными.

Пример графического представления моделируемой наноструктуры для конических НЧ Ag приведен на рис. 1. Бесконечно плоская структура в направлениях *x* и *y* реализуется с помощью граничных условий элементарной ячейки, когда трансляция осуществляется в двух измерениях до бесконечности [10]. Полубесконечные (в направлении, перпендикулярном границе раздела) слои подложки и воздуха моделируются посредством поглощающих граничных условий, в данном случае реализованных с помощью портов Флоке, представляющих собой в программном пакете *CST Microwave Studio* идеально согласованные слои (за пределами моделируемого объема добавляются несколько слоев дополнительных ячеек, поля в которых вычисляются с учетом больших виртуальных потерь). При расчетах применяется прямоугольная сетка пространственной дискретизации, являющаяся наиболее точной при использовании прямоугольных модельных элементарных ячеек.

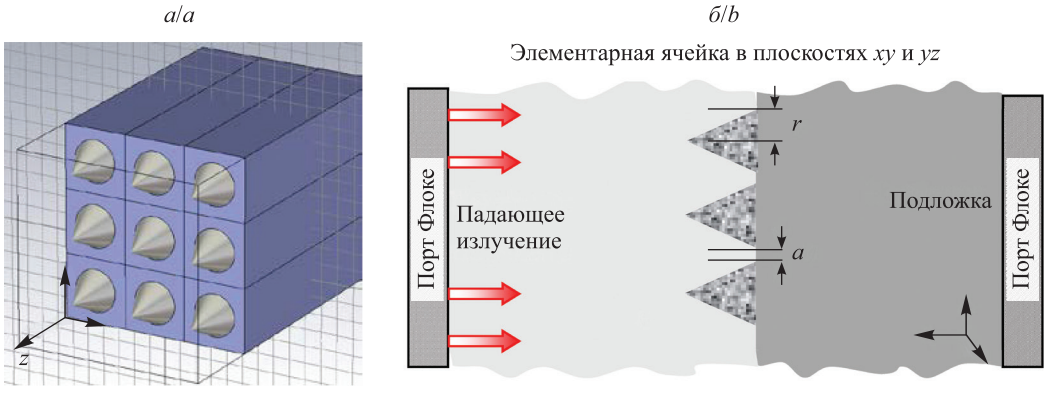


Рис. 1. Моделируемая наноструктура для конических НЧ Ag:
а – набор 3×3 элементарных ячеек; *б* – моделирование электромагнитных свойств двумерного слоя конических НЧ Ag на стеклянной подложке в атмосфере воздуха
Fig. 1. Nanostructure simulated for the case of cone nanoparticles:
a – simulation layout of 3×3 unit cells; *b* – simulation scheme of the 2D-array of cone nanoparticles on the glass substrate in the air

В предлагаемой модели применяется приближение линейно поляризованного (вектор поляризации направлен вдоль оси *y*) излучения с плоским фронтом (основные моды – TE_{00} и TM_{00}), распространяющегося перпендикулярно границе раздела воздух/подложка. В такой схеме моделирования исследовался процесс прохождения оптического излучения через наноструктуру, а также пространственное распределение напряженности электрического поля внутри наноструктуры. В модели использовались следующие входные данные: тип материала, форма и размеры НЧ, тип материала подложки и атмосферы, а также $\rho = \frac{S_{NP}}{S_{US}}$ – степень заполнения поверхности, равная отношению площади горизонтальной проекции НЧ S_{US} к площади основания ячейки S_{NP}, например для конических НЧ $\rho = \frac{\pi}{(2 + a/r)^2}$, где обозначения приведены в соответствии с рис. 1 [6].

Оптические свойства наноструктур с наночастицами различной формы

В настоящей работе теоретическое исследование наноструктур проводится в целях установления взаимосвязи их оптических характеристик с микроскопическими параметрами размера, формы, а также степени заполнения поверхности НЧ. На рис. 2, *а*, показаны типичные оптические спектры для наноструктур с НЧ Ag различной формы (сфера, конус, цилиндр) на стеклянной подложке (показатель преломления подложки – 1,52) в атмосфере воздуха (показатель преломления воздуха – 1). Видно, что при одинаковой степени заполнения поверхности в случае сферических НЧ длина волны пика ППР

составляет около 400 нм, цилиндрических – 530 нм, а конических НЧ – 650 нм. Из рис. 2, *а*, также следует, что грубое управление спектральным положением полосы ППР в широком диапазоне длин волн от 350 до 750 нм возможно на этапе синтеза наноструктуры путем вариации формы наночастиц. Необходимо отметить, что для каждой из приведенных форм НЧ более тонкое управление спектральной формой полосы ППР достигается путем изменения параметров НЧ: линейных размеров r (нм) и плотности заполнения поверхности ρ (%).

Спектры экстинкции для сферических НЧ Ag радиусом r = 25 нм на стеклянной подложке в атмосфере воздуха и с различной плотностью заполнения поверхности приведены на рис. 2, *б*. Из данного рисунка видно, что при уменьшении расстояния между НЧ (увеличении степени заполнения поверхности) полоса ППР в спектре экстинкции сдвигается в длинноволновую область спектра, при этом ширина полосы ППР на полувысоте увеличивается [12]. Следует отметить, что изменение степени заполнения поверхности позволяет перестраивать спектральное положение полосы ППР более чем на 50 нм.

Оптические спектры экстинкции для наноконусов и наноцилиндров с радиусом основания Ag r = 25 нм, высотой $h = r$ в двумерном массиве на стеклянной подложке в атмосфере воздуха для

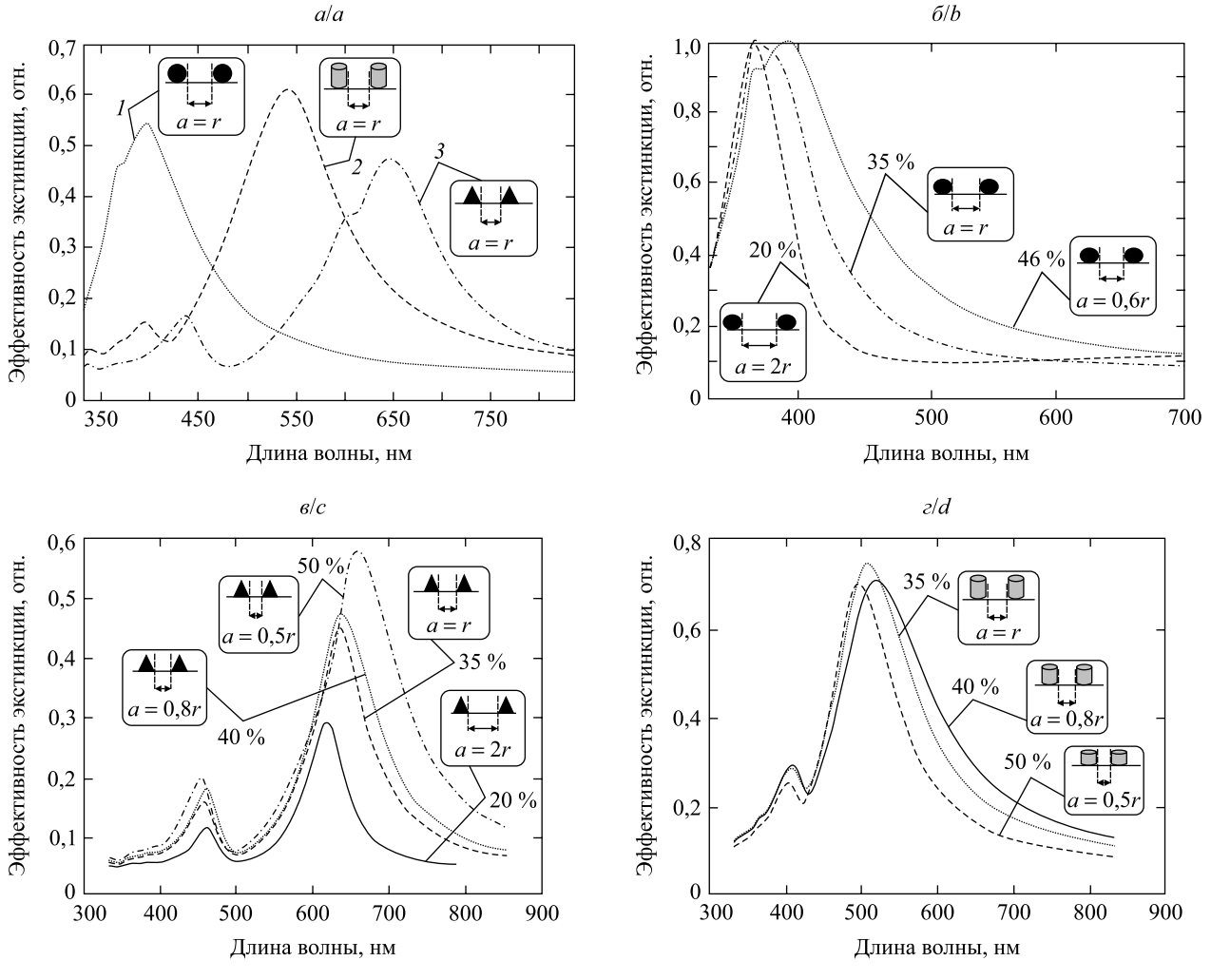


Рис. 2. Спектры экстинкции наноструктур с НЧ Ag различной формы на стеклянной подложке в атмосфере воздуха: *а* – спектры экстинкции для сфер (*1*), цилиндров (*2*), конусов (*3*) для ρ = 35 %; *б* – сравнение спектров экстинкции для сфер с различной плотностью заполнения поверхности; *в* – сравнение спектров экстинкции для конусов с различной плотностью заполнения поверхности; *г* – сравнение спектров экстинкции для цилиндров с различной плотностью заполнения поверхности. Для рис. *б* – *г*: радиус проекции НЧ на основании 25 нм, для конусов и цилиндров высота $h = r$

Fig. 2. Extinction spectra for the nanostructures based on nanoparticles of different shapes on the glass substrate in air: *a* – presents comparison of extinction spectra for spheres (*1*), cylinders (*2*), cones (*3*) at the surface occupation density 35 %; *b* – comparison of extinction spectra for the spheres with different surface occupation densities; *c* – comparison of extinction spectra for the cones with different surface occupation densities; *d* – comparison of extinction spectra for the cylinders with different surface occupation densities. The nanoparticle normal projection radius is 25 nm for figures *b* – *d*, and $h = r$ for cones or cylinders

различных степеней заполнения поверхности приведены на рис. 2, *в* и *г*. Из рисунка видно, что при увеличении степени заполнения поверхности полоса ППР в спектре экстинкции сдвигается в длинноволновую область спектра как для конических, так и для цилиндрических НЧ, при этом ширина полосы ППР на полувысоте увеличивается в большей мере для конических. Изменение степени заполнения поверхности коническими НЧ позволяет перестраивать спектральное положение полосы ППР более чем на 50 нм, а цилиндрическими – более чем на 30 нм.

Таким образом, установлено, что грубое управление спектральным положением полосы ППР в широком диапазоне длин волн от 350 до 750 нм возможно на этапе синтеза наноструктуры путем вариации формы наночастиц, а более тонкое управление спектральной формой полосы ППР и положением полосы в пределах 30–50 нм достигается путем изменения линейных размеров и плотности заполнения поверхности наночастицами.

Распределение напряженности электрического поля и параметры спектров экстинкции

Пространственное распределение напряженности электрического поля *E* при взаимодействии оптического излучения в одинаковой фазе с двумерными слоями сферических НЧ Ag на поверхности стеклянной подложки представлено на рис. 3, *а – г*.

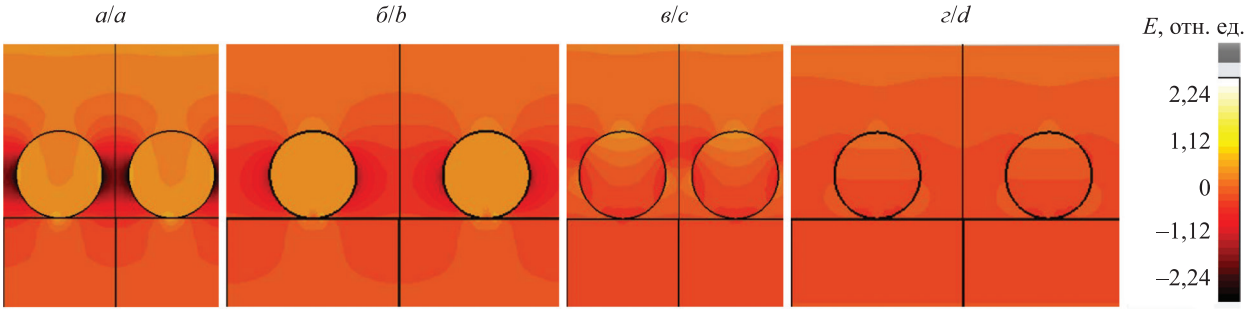


Рис. 3. Пространственное распределение напряженности электрического поля в одинаковой фазе при взаимодействии оптического излучения с двумерными слоями НЧ Ag на поверхности стеклянной подложки (сагиттальное сечение):
а – близко расположенные НЧ, длина волны 393 нм; *б* – разнесенные НЧ, длина волны 393 нм; *в* – близко расположенные НЧ, длина волны 456 нм; *г* – разнесенные НЧ, длина волны 456 нм
Fig. 3. Spatial distribution of the electric field with a constant phase during the interaction of optical radiation with a 2D-array of nanoparticles on the glass substrate in the air (sagittal cut):
a – high-density nanostructure, wavelength is 393 nm; *b* – low-density nanostructure, wavelength is 393 nm; *c* – high-density nanostructure, wavelength is 456 nm; *d* – low-density nanostructure, wavelength is 456 nm

Случай близко расположенных НЧ Ag, взаимодействующих с электромагнитным излучением на длине волны пика ППР, составляющей 393 нм, приведен на рис. 3, *а*. Здесь между НЧ в слое хорошо видны перекрывающиеся области аномально высоких значений напряженности (значения напряженностей, многократно превышающие напряженность изначально падающей волны [12]) электрического поля, свидетельствующие об интенсивном межчастичном взаимодействии. При изменении длины волны падающего излучения (например, как показано на рис. 3, *в*, на длине волны 341 нм) этого эффекта не наблюдается (в случае 456 нм он также проявляется слабее), что говорит о резонансном характере коллективного взаимодействия между НЧ в слое.

На рис. 4 приведена зависимость длины волны пика ППР в спектре экстинкции от аспектного отношения НЧ Ag для различных величин плотности заполнения поверхности НЧ для частиц конической (см. рис. 4, *а*) и цилиндрической (см. рис. 4, *б*) форм. Видно, что для конических НЧ при увеличении аспектного отношения НЧ происходит уменьшение длины волны максимума пика ППР в спектре экстинкции. Большей степени заполнения поверхности соответствует менее резкое уменьшение длины волны максимума пика ППР, что, вероятно, связано с коллективными взаимодействиями плазмонов в составе наноструктуры. При этом, однако, для аспектных отношений менее 1,4 максимумы пиков ППР (в случае наноконусов) оказываются очень близкими для степеней заполнения поверхности до 40 %. Это, в свою очередь, связано с тем, что НЧ слабо взаимодействуют друг с другом. По этой причине конические наноструктуры с длиной волны пика ППР в спектре экстинкции от 620 до 840 нм могут быть синтезированы путем подбора аспектного отношения конических НЧ, образующих данную структуру, в пределах 0,6–1,4, при этом степень заполнения поверхности должна составлять менее 40 %. Важно

также, что в резонансном случае (см. рис. 4, *а*, вставку *1*) напряженность электрического поля достигает максимального значения вблизи основания конуса. Для цилиндрических наночастиц, напротив, при увеличении аспектного отношения НЧ происходит снижение длины волны максимума пика ППР в спектре экстинкции. Это, вероятно, связано с постоянным аксиальным сечением НЧ, что вызывает более однородное распределение поля внутри НЧ, а это, в свою очередь, обусловливает пропорциональность энергии, накопленной в объеме НЧ, с ее аспектным отношением. Анализ напряженности электрического поля свидетельствует, что в резонансном случае (см. рис. 4, *б*, вставку *1*) напряженность электрического поля оказывается практически однородной во всем объеме НЧ.

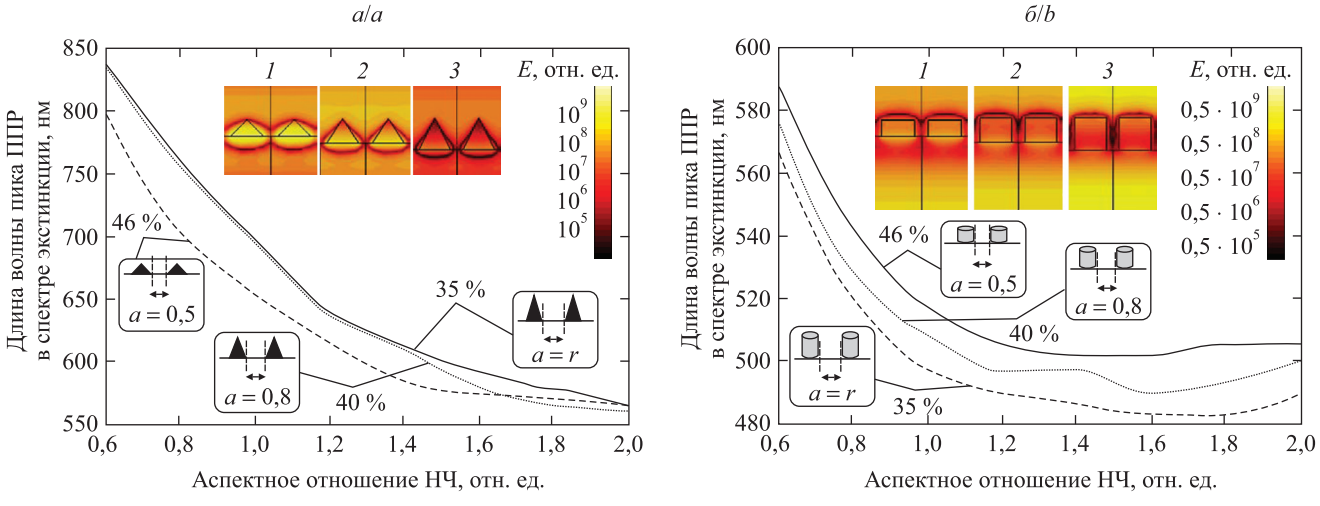


Рис. 4. Зависимость длины волны пика ППР в спектре экстинкции от аспектного отношения наноконусов (*а*) и наноцилиндров (*б*) НЧ Ag для различных величин плотности заполнения поверхности. На вставках приведено распределение напряженности электрического поля с одинаковой фазой в сагиттальном сечении наноструктур со следующими параметрами для наноконусов: длина волны 693 нм, аспектное отношение 1, плотность заполнения поверхности 40 % (*1*), 35 % (*2*), 46 % (*3*), а также следующими параметрами для наноцилиндров: длина волны 509 нм, аспектное отношение 1, плотность заполнения поверхности 40 % (*1*), 46 % (*2*), 35 % (*3*)

Fig. 4. Wavelength of the surface plasmon resonance peak in the extinction spectrum versus aspect ratio of Ag nanocones (*a*) and nanocylinders (*b*) for different surface occupation densities. The spatial electric-field distributions with a constant phase in a sagittal cut of the nanostructures are shown in the insertions. Parameters for nanocones: wavelength 693 nm, aspect ratio 1, surface occupation density 40 % (*1*), 35 % (*2*), 46 % (*3*). Parameters for nanocylinders: wavelength 509 nm, aspect ratio 1, surface occupation density 40 % (*1*), 35 % (*2*), 46 % (*3*)

Заключение

В настоящей работе описана возможность управления характеристиками оптических спектров двумерных массивов НЧ Ag на стеклянной подложке, основанная на подборе формы, плотности заполнения поверхности и аспектного отношения НЧ. Установлены особенности распределения напряженности электрического поля в наноструктуре в пике, а также на границах полосы поверхностного плазмонного резонанса. Исследованы параметры наноструктур, при которых обеспечивается отсутствие межчастичного взаимодействия. Полученные результаты могут быть полезны для развития технологий формирования устройств, содержащих в качестве активных поверхностей двумерные массивы НЧ Ag.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Оптические сенсоры на основе поверхностного плазмонного резонанса для высокочувствительного биохимического анализа / Д. А. Мамичев [и др.] // Молекулярная медицина. 2012. № 6. С. 19–27.

2. *Zhu S. L., Zhou W.* Numerical Design Methods of Nanostructure Array for Nanobiosensing // Plasmonics. 2010. Vol. 5, № 3. P. 267–271.

3. Conical nanoparticles for blood disease detection / L. L. Spada [et al.] // Adv. nanoparticles. 2013. Vol. 2, № 3. P. 259–265.

4. *Yugang Sun, Changhua An.* Shaped gold and silver nanoparticles // Front. mater. sci. 2011. Vol. 5, issue 1. P. 1–24.

5. Liquid-phase formation of silver nanoparticles on a glass substrate regulated by gold nanoparticles / K. Hanada [et al.] // Sens. Mater. 2011. Vol. 23, № 5. P. 251–261.

6. *Goncharov V. K., Kozadaev K. V., Mikitchuk A. P.* Diagnostics of the monolayer silver nanostructures on a solid substrate using the bifactorial analysis of the SPR-band // High temp. mater. process. 2014. Vol. 18, issue 3. P. 217–229.

7. *Хлебцов Н. Г.* Оптика и биофотоника наночастиц с плазмонным резонансом // Квантовая электроника. 2008. Т. 38, № 6. С. 504–529.

8. *Дынич Р. А., Ковтун-Кужель В. А., Понявина А. Н.* Моделирование характеристик рассеяния электромагнитного излучения упорядоченным ансамблем диэлектрических цилиндров // Журн. прикл. спектроскопии. 2011. Т. 78, № 6. С. 874–879.

9. *Fritzen F., Bohlke T.* Influence of the type of boundary conditions on the numerical properties of unit cell problems // Technische mech. 2010. Vol. 30, № 4. P. 354–363.

10. *Голованов О. А.* Автономные блоки с виртуальными каналами Флоке и их применение для решения прикладных задач электродинамики // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 12. С. 1423–1430.

11. *Курушин А. А., Пластиков А. Н.* Численные методы расчета // Проектирование СВЧ-устройств в среде CST Microwave Studio. М., 2010. С. 47–73.

12. *Микитчук Е. П., Козадаев К. В.* Моделирование взаимодействия между серебряными наночастицами в двумерном массиве на стеклянной подложке // Журн. прикл. спектроскопии. 2016. Т. 83, № 6. С. 947–953.

REFERENCES

1. Mamichev D. A., Kuznetsov I. A., Maslova N. E., et al. Optical sensors based on surface plasmon resonance for high-sensitive biochemical analysis. *Molekulyarnaya meditsina.* 2012. No. 6. P. 19–27 (in Russ.).

2. Zhu S. L., Zhou W. Numerical Design Methods of Nanostructure Array for Nanobiosensing. *Plasmonics.* 2010. Vol. 5, No. 3. P. 267–271. DOI: 10.1007/s11468-010-9137-8.

3. Spada L. L., Lovine R., Tarparelli R., et al. Conical nanoparticles for blood disease detection. *Adv. nanoparticles.* 2013. Vol. 2, No. 3. P. 259–265. DOI: 10.4236/anp.2013.23036.

4. Yugang Sun, Changhua An. Shaped gold and silver nanoparticles. *Front. mater. sci.* 2011. Vol. 5, issue 1. P. 1–24. DOI: 10.1007/s11706-011-0100-1.

5. Hanada K., Uchida K., Citterlo D., et al. Liquid-phase formation of silver nanoparticles on a glass substrate regulated by gold nanoparticles. *Sens. Mater.* 2011. Vol. 23, No. 5. P. 251–261.

6. Goncharov V. K., Kozadaev K. V., Mikitchuk A. P. Diagnostics of the monolayer silver nanostructures on a solid substrate using the bifactorial analysis of the SPR-band. *High temp. mater. process.* 2014. Vol. 18, issue 3. P. 217–229. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2015015636.

7. Khlebtsov N. G. Optics and biophotonics of nanoparticles with a plasmon resonance. *Kvant. electron.* 2008. Vol. 38, No. 6. P. 504–529 (in Russ.).

8. Dynich R. A., Kovtun-Kuzhel V. A., Ponyavina A. N. Modelirovanie kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnogo izlucheniya uporyadochennym ansamblem dielektricheskikh tsilindrov [Modeling the characteristics of electromagnetic radiation scattering by an ordered assembly of dielectric cylinders]. *Zhurnal prikl. spektrosk.* 2011. Vol. 78, No. 6. P. 874–879 (in Russ.).

9. Fritzen F., Bohlke T. Influence of the type of boundary conditions on the numerical properties of unit cell problems. *Technische mech.* 2010. Vol. 30, No. 4. P. 354–363.

10. Golovanov O. A. Avtonomnye bloki s virtual'nymi kanalami Floke i ikh primenenie dlya resheniya prikladnykh zadach elektrodinamiki [Solution of Applied Problems of Electromagnetics Based on the Use of Autonomous Blocks with Virtual Floquel Channels]. *Radiotekh. elektron*. 2006. Vol. 51, No. 12. P. 1423–1430 (in Russ.).

11. Kurushin A. A., Plastikov A. N. Chislennye metody rascheta. *Proektirovanie SVCh ustroistv v srede CST Microwave Studio.* Mosc., 2010. S. 47–73 (in Russ.).

12. Mikitchuk E. P., Kozadaev K. V. Modelirovanie vzaimodeistviya mezhdu serebryanymi nanochastitsami v dvumernom massive na steklyannoi podlozhke [Modeling the Interaction between Silver Nanoparticles in a 2D-Array on a Glass Substrate]. *Zhurnal prikl. spektrosk.* 2016. Vol. 83, No. 6. P. 947–953 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 02.09.2016.
Received by editorial board 02.09.2016.