

**ПРОСВЕТЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА**

Моисеев С.Г.<sup>1,2,3</sup>, Виноградов С.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,

<sup>2</sup>Ульяновский государственный университет,

<sup>3</sup>Ульяновский государственный технический университет

**Аннотация**

Показана возможность просветления поверхности непоглощающего диэлектрика с помощью гетерогенного композита с наночастицами серебра несферической формы. Представленные результаты теоретического анализа отвечают случаю, когда серебряные наночастицы внедрены непосредственно в просветляемый материал на субволновую глубину.

Ключевые слова: металлодиэлектрический композит, серебряные наночастицы, плазмонный резонанс, просветляющие покрытия.

**Введение**

Матричные металлодиэлектрические композитные среды, представляющие собой диэлектрик с хаотично распределёнными по его объёму металлическими наночастицами, можно рассматривать как однородную среду с примесными оптическими центрами. Оптические свойства подобного искусственного материала (метаматериала) определяются не столько структурной организацией, сколько физическими характеристиками образующих его компонент. При этом его эффективные характеристики могут значительно отличаться как от характеристик металла (включений), так и диэлектрика (матрицы композита), принимая совершенно уникальные значения, не присущие природным материалам: в оптическом диапазоне действительная часть эффективного показателя преломления может быть сверхбольшой ( $n \gg 1$ ) [1 - 3], близкой к единице или много меньше единицы [4 - 8]. К сожалению, широкому практическому применению металлодиэлектрических гетерогенных композитов мешает сильное поглощение света на металлических включениях, которое невозможно устранить без использования лазерной среды (активного компонента) [9].

Уникальные оптические характеристики подобных гетерогенных сред формируются благодаря плазмонному резонансу металлических наночастиц. Частота плазмонного резонанса зависит от геометрии наночастиц, что открывает широкие возможности контроля над оптическими свойствами таких метаматериалов за счёт варьирования формы и размера включений [6-8, 10, 11]. Бурное развитие технологий синтеза наночастиц за последние 10-15 лет предоставляет исследователям широкий «выбор» формы частиц, начиная от наночастиц, наностержней и наночастичек и заканчивая экзотическими структурами типа «нанориса», «наночешуек» и т.п. [12-14]. В работах [7, 8] показано, что применение в качестве включений несферических частиц позволяет уменьшить эффективный коэффициент экстинкции композита. В настоящей статье предложен дизайн матричной металлодиэлектрической композитной среды с малым показателем преломления ( $n < 1,3$ ) и относительно невысоким коэффициентом

экстинкции ( $k \ll 1$ ), пригодной для применения в качестве интерференционного просветляющего покрытия в видимой области спектра. Для расчёта геометрических (форма, концентрация включений) и материальных (диэлектрические функции матрицы и металлических наночастиц) параметров композита с необходимыми оптическими характеристиками используется приближение эффективной среды Максвелла-Гарнета.

**1. Дизайн композитного покрытия с упорядоченными включениями**

В модели Максвелла-Гарнета эффективная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = (n + ik)^2$  композитной среды с одинаково ориентированными включениями, представляющими собой идентичные по форме и размеру сфероиды, определяется следующим уравнением [15]:

$$\frac{\epsilon - \epsilon_m}{L(\epsilon - \epsilon_m) + \epsilon_m} = \eta \frac{\epsilon_p - \epsilon_m}{L(\epsilon_p - \epsilon_m) + \epsilon_m}, \tag{1}$$

где  $\epsilon_m$  – диэлектрическая проницаемость матрицы,  $\epsilon_p$  – диэлектрическая проницаемость включений,  $\eta$  – объёмная доля включений,  $L$  – фактор деполяризации, зависящий от отношения длин полярной  $a$  и экваториальной  $b$  полуосей эллипсоида вращения, а также от направления поля. Фактор  $L$  принимает значение

$$L_{\parallel} = \frac{1}{1 - \xi^2} \left( 1 - \xi \frac{\arcsin \sqrt{1 - \xi^2}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \right) \tag{2}$$

для поля, направленного вдоль оси вращения сфероиды, и

$$L_{\perp} = (1 - L_{\parallel}) / 2 \tag{3}$$

для поля, направленного перпендикулярно оси вращения сфероиды, где  $\xi = a/b$ . Случай  $\xi < 1$  соответствует сплюснутому сфероиду (дису),  $\xi > 1$  – вытянутому сфероиду,  $\xi = 1$  – шару. Соотношение (1) адекватно описывает оптические свойства композитных сред с неупорядоченным распределением

включений по объёму матрицы, если объёмная доля включений не превышает 1/3.

Обратим внимание на то, что формула (1) записана для композитной среды с одинаково ориентированными сфероидами, когда вектор напряжённости поля направлен либо вдоль, либо перпендикулярно оси эллипсоидов. Согласно выражениям (2) и (3) фактор деполяризации  $L$  для несферических частиц зависит от направления электрического поля. Поэтому в общем случае мы имеем дело с анизотропной композитной средой, обладающей свойствами одноосного кристалла с оптической осью, совпадающей с направлением полярной оси сфероидов. Для такой среды световой луч будет обыкновенным, если направление его распространения совпадает с направлением полярной оси сфероидов; при этом вектор поляризации светового луча оказывается лежащим в экваториальной плоскости сфероидов ( $L = L_{\perp}$ ).

Анизотропия оптических свойств упорядоченного композитного материала накладывает определённые ограничения на дизайн просветляющего покрытия, изготовленного из подобного материала. Чтобы при нормальном падении света отражательная и пропускная способности плоскопараллельного слоя (пластины) композитного материала не зависели от ориентации светового вектора, оптическая ось композита должна была ориентирована перпендикулярно к границам раздела, то есть экваториальные плоскости сфероидов должны быть ориентированы параллельно плоскости композитной пластины. Учитывая это, далее будем рассматривать оптические свойства композита для обыкновенного луча.

Для определённости рассмотрим в качестве матрицы композита прозрачный диэлектрик с показателем преломления  $n_m = \sqrt{\epsilon_m} = 1,5$  (близкие значения показателя преломления у лёгкого стекла, поликарбоната и других распространённых оптических материалов). Пусть включения представлены наночастицами серебра. Выбор в пользу серебра обусловлен тем, что серебряные частицы обладают наименьшим поглощением в оптическом диапазоне. Поскольку линейные размеры частиц составляют единицы или десятки нанометров, все расчёты в данной работе проведены с учётом размерной коррекции диэлектрической функции серебряных частиц, учитывающей ограничение длины свободного пробега электрона из-за его столкновений с границей частицы [16 - 18]. Значения диэлектрической функции для массивного серебра взяты из справочной литературы [19, 20].

На рис. 1 представлены результаты расчёта спектральных зависимостей эффективных показателей преломления и поглощения композита, полученных из соотношения Максвелла-Гарнета (1). Плазмонным резонансам наночастиц соответствуют максимумы зависимости  $k(\lambda)$ . Заметим, что сфероидальные

частицы имеют по два плазмонных резонанса, каждый из которых отвечает либо «продольной» (вдоль оси вращения сфероида), либо «поперечной» (перпендикулярно оси вращения сфероида) поляризациям сфероида. Чем больше отличие экваториального радиуса от длины полярной полуоси сфероида, тем больше отстройка резонансов сфероида от частоты плазмонного резонанса сферической частицы. При этом как для вытянутых ( $\xi > 1$ ), так и сплюснутых ( $\xi < 1$ ) частиц эти резонансы расположены всегда по разные стороны от плазмонного резонанса сферической ( $\xi = 1$ ) частицы. Целям проводимых исследований наилучшим образом отвечает случай сплюснутых серебряных наносфероидов («нанодисков»): благодаря смещению плазмонного резонанса в сторону длинных волн область малого показателя преломления ( $n < 1,3$ ) при относительно невысоком коэффициенте экстинкции ( $k \ll 1$ ) для обыкновенного луча приходится на видимую часть спектра.

Таким образом, дизайн просветляющего покрытия определяется особенностями оптических свойств самого композитного материала. Согласно полученным результатам, композитное покрытие должно быть образовано наночастицами в форме сплюснутых сфероидов, полярная ось которых ориентирована перпендикулярно поверхности подстилающей среды.

## 2. Отражательная и пропускная способности просветляющего композитного покрытия

Определим значения параметров композитного слоя, при которых достигается эффект просветления поверхности прозрачного диэлектрика (подстилающей среды). Для определённости положим показатель преломления просветляемого диэлектрика равным  $n_s = 1,5$ .

Следует отметить, что прозрачных природных веществ, обладающих достаточной механической прочностью и стабильностью, с показателем преломления меньше чем 1,38 нет. Поэтому с помощью однослойного покрытия из природного материала невозможно устранить френелевское отражение от поверхности диэлектриков с показателем преломления  $n_s < 1,9$  [21].

Применение модели эффективной среды Максвелла-Гарнета значительно упрощает исследование дисперсионных характеристик композитного покрытия: если пренебречь дискретно-непрерывной структурой композита, для расчёта отражательной и пропускной способностей можно использовать формулы Эйри [21]. Из уравнений Эйри следует, что для нормального падения света отражение от поверхности диэлектрика будет полностью погашено слоем материала с комплексным показателем преломления  $n + ik$ , если его коэффициент экстинкции много меньше единицы ( $k \ll 1$ ), а показатель пре-

ломления  $n$  и толщина  $h$  удовлетворяют следующим условиям:

$$n \approx \sqrt{n_s} \left( 1 - \frac{\pi(n_s - 1)}{4n_s} k \right), \tag{4}$$

$$h \approx \frac{\lambda}{4\sqrt{n_s}} \left( 1 + \frac{4}{\pi(n_s - 1)} k \right). \tag{5}$$

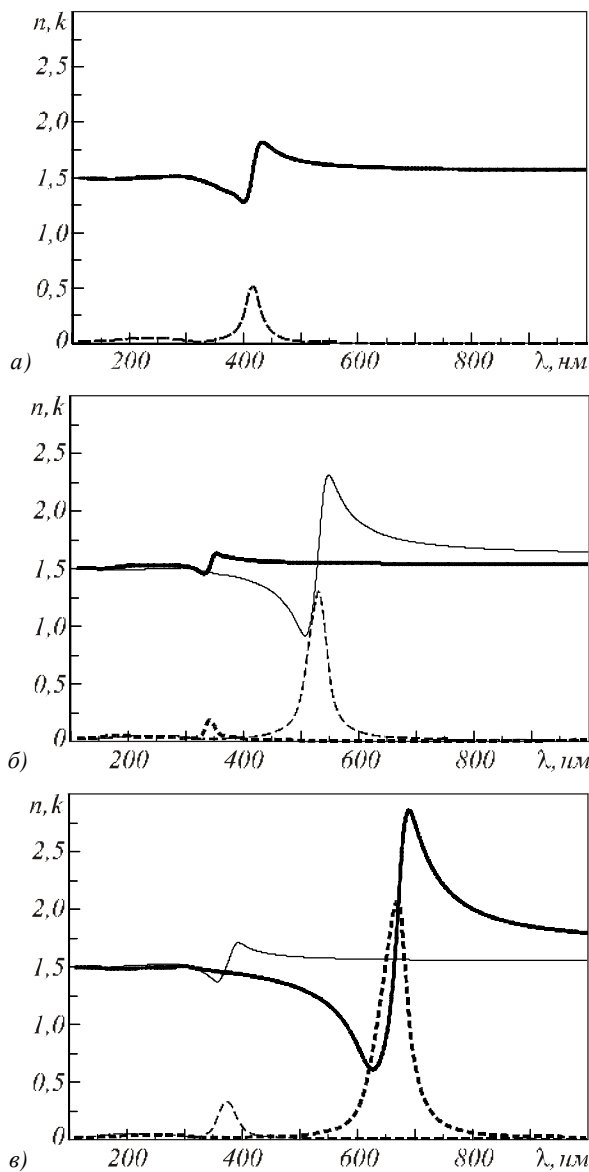


Рис. 1. Дисперсионные зависимости показателя преломления  $n$  (сплошные линии) и коэффициента экстинкции  $k$  (штриховые линии) композитной среды со сферическими включениями (а), включениями в форме сплюснутых (б) или вытянутых (в) сфероидов. На (б) и (в) жирными линиями показан случай ориентации оси вращения сфероидов вдоль светового вектора, тонкими линиями – перпендикулярно световому вектору преломлённой волны. Радиус сферических частиц равен 7 нм; сфероиды имеют объём, равный объёму сферической частицы. Во всех случаях объёмная доля серебряных наночастиц одинакова и составляет 2,5% от объёма композитной среды

Заметим, что из-за поглощения в плёночном материале максимальная пропускная способность слоя всегда меньше 1, однако чем меньше  $k$ , тем она ближе к 1.

Значения параметров композита, при которых будет выполнено условие (4) при одновременном выполнении неравенства  $k \ll 1$ , определим из соотношения (1) с учётом (2) и (3). Расчёт показывает, что всем необходимым условиям для видимой области спектра удовлетворяет композитная среда с умеренной объёмной долей включений  $\eta \sim 0,01 - 0,1$ . На рис. 2 представлены отражательная и пропускная способности просветляющего композитного слоя со следующими значениями параметров:  $\xi = 0,1$ ,  $\eta = 0,05$ . Толщина такого слоя, рассчитанная с помощью формулы (5), составляет  $h = 93$  нм.

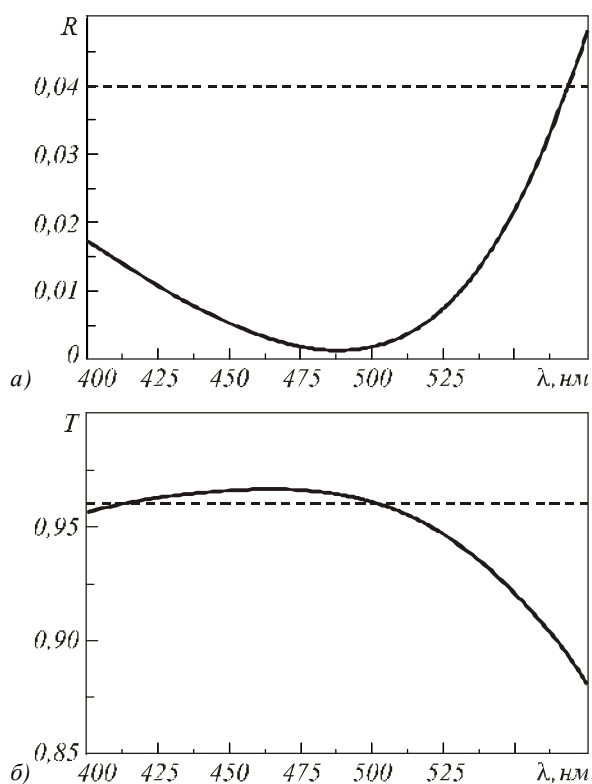


Рис. 2. Отражательная  $R$  и пропускная  $T$  способности композитного слоя с серебряными наночастицами для нормального падения света: результаты расчёта с помощью модели эффективной среды (1). Для сравнения штриховыми линиями показаны значения собственной отражательной и пропускной способностей подстилающей среды (чистой поверхности просветляемого диэлектрика)

Из представленных на рис. 2 зависимостей видно, что наличие на поверхности диэлектрика композитного слоя даёт положительный эффект: в широком ( $>100$  нм) спектральном диапазоне интегральная интенсивность отражённого луча уменьшается более чем в 2 раза, при этом минимальное значение отражательной способности композитного покрытия в 20 раз меньше отража-

тельной способности чистой поверхности просветляемого диэлектрика. К сожалению, интенсивность проходящей волны при этом возрастает слабо. Последнее объясняется тем, что часть энергии световой волны, затраченная на возбуждение колебаний свободных электронов в наночастицах композита, переходит в тепловую форму. Таким образом, энергия световой волны частично поглощается диспергированной подсистемой композитного покрытия, что не позволяет достичь эффекта абсолютного просветления поверхности прозрачного материала.

В области  $\lambda > 580$  нм коэффициент экстинкции рассматриваемого композитного материала значительно возрастает, достигая значений больше единицы, что приводит к нарушению условий интерференционного просветления. В области плазмонного резонанса (длинноволновая часть видимой области спектра и ближнее ИК-излучение) оптические характеристики рассматриваемого композитного материала становятся близки скорее к характеристикам металла, нежели диэлектрика. Ультратонкий слой такого материала обладает в длинноволновой части видимой области спектра довольно высокой отражательной способностью (до 0,55), а доля поглощённой энергии излучения возрастает до 0,2. Так как частота плазмонного резонанса уменьшается с уменьшением величины аспектного отношения  $\xi$  металлических частиц, можно предположить, что при использовании более «сплюснутых» включений область интерференционного ослабления отражения будет смещаться в сторону длинноволновой части спектра, что, в свою очередь, приведёт к уменьшению отражательной способности в области  $\lambda > 580$  нм. Зависимость отражательной и пропускной способностей композитного слоя от формы наночастиц будет исследована в одной из наших последующих статей.

В целях верификации предсказаний модели эффективной среды нами проведено численное моделирование электродинамического взаимодействия световой волны с композитной средой на основе метода конечных элементов (FEM), реализованное в пакете программ для моделирования и решения научных и технических проблем COMSOL Multiphysics [22]. Методика такого моделирования описана в работах [8, 9]. В настоящей работе моделировался композит с включениями, расположенными в плоскостях, ориентированных параллельно поверхности просветляемого диэлектрика (рис. 3). Первый монослой частиц расположен на глубине  $h_1$ , второй отстоит от него на расстоянии  $h_2$  и т.д. Во всех монослоях наночастицы расположены одинаковым образом, образуя двумерную пространственную решётку с квадратной ячейкой со стороной  $d$ . Рассматривался случай, когда наночастицы погружены непосредственно в просветляемый диэлектрик, образуя в нём приповерхностный композитный слой.

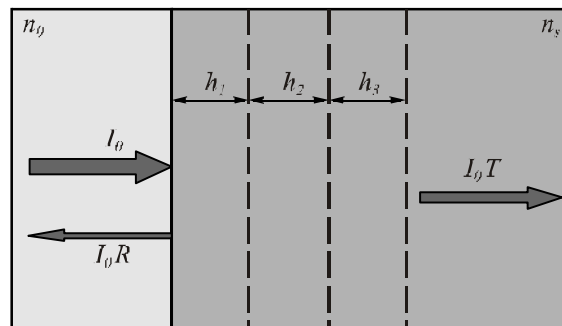


Рис. 3. Моделируемая структура. Световая волна падает из среды с показателем преломления  $n_0$  на поверхность диэлектрика с показателем преломления  $n_s$ , в приповерхностном слое которого размещены монослои наночастиц серебра. Штриховыми линиями условно показано положение монослоёв наночастиц

Следует заметить, что одному и тому же значению объёмной доли включений  $\eta$  отвечает множество различных комбинаций параметров  $d$  и  $h_i$ . Иными словами, число моделей композитной среды, отвечающих заданному  $\eta$ , всегда больше 1. Используя эту возможность, мы рассмотрели различные варианты распределения наночастиц в диэлектрике (при этом форма и размер наночастиц не изменялись).

Как следует из представленных на рис. 4 результатов компьютерного моделирования, эффект просветления может быть достигнут как для двух-, так и трёхслойного распределения наночастиц в объёме матрицы. Видно, что параметры двухслойной структуры лучше удовлетворяют условиям просветления поверхности диэлектрика: более широкий и глубокий минимум отражательной способности наблюдается при более широком и высоком максимуме пропускной способности. Этому имеется простое объяснение: при меньшем количестве слоёв частиц серебра на пути светового луча уменьшается доля энергии, поглощённой частицами. Действительно, в случае двухслойной структуры в спектральной области просветления поглощается почти на 1% меньше энергии по сравнению со случаем структуры с тремя монослоями серебряных наночастиц.

В целом следует отметить хорошее качественное согласие результатов компьютерного моделирования (рис. 4) с результатами, предсказанными в рамках теории эффективной среды (рис. 2): с помощью соотношения (1) достаточно точно предсказано положение экстремумов отражательной и пропускной способностей. Это означает, что модель эффективной среды Максвелла-Гарнета может успешно применяться для оценки необходимых параметров тонких слоёв гетерогенного композита с наперед заданными оптическими характеристиками. Однако необходимо помнить, что модель Максвелла-Гарнета разработана для композита с хаотичным расположением включений по объёму матрицы, поэтому в ней не учитываются интерференционные эффекты на включениях. Хорошее согласие предсказаний модели эффективной среды с результатами

численного расчёта обусловлено тем, что расстояние между монослоями наночастиц и между наночастицами в монослоях много меньше длины световой волны, и, как следствие, влияние интерференционных эффектов на оптические характеристики двух упорядоченных структур, рассмотренных в настоящей работе, оказывается очень слабым: упорядочение включений приводит лишь к появлению небольшого «провала» на кривых  $T(\lambda)$  вблизи  $\lambda = 490$  нм (рис. 4б).

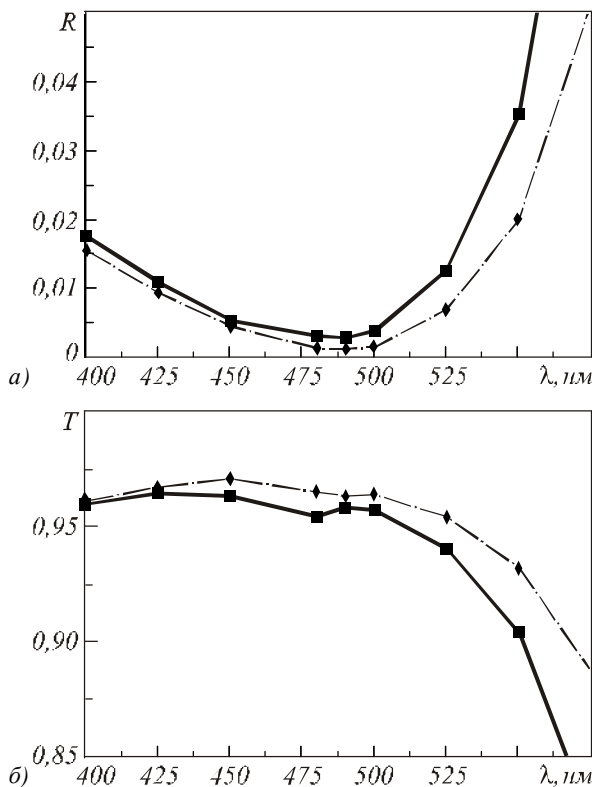


Рис. 4. Отражательная  $R$  и пропускная  $T$  способности композитного слоя с серебряными наночастицами для нормального падения света: результаты точного электродинамического расчёта. Сплошными линиями с маркерами ■ показаны результаты моделирования 3-слойной структуры для  $h_1 = 15,5$  нм,  $h_2 = h_3 = 2h_1$ . Штрихпунктирными линиями с маркерами ♦ показаны результаты моделирования 2-слойной структуры для  $h_1 = 23$  нм,  $h_2 = 2h_1$ . Остальные параметры расчёта те же, что и на рис. 2

Более строгое описание взаимодействия световой волны с подобными структурами должно учитывать многократное рассеяние на дипольных центрах – наночастицах, являющихся структурными элементами «плазмонной решётки» в объёме диэлектрика. В последующей статье будет представлено соответствующее рассмотрение и на его основе будут исследованы условия просветления поверхности диэлектрика с помощью одного монослоя наночастиц.

### Заключение

Итак, в данной работе продемонстрирована возможность широкополосного просветления поверх-

ности непоглощающих диэлектриков с помощью наночастиц серебра. Показано, что просветляющий слой может представлять собой природный материал со взвешенными наночастицами серебра несферической формы. Более того, просветляющий слой может быть сформирован непосредственно в приповерхностном слое просветляемого диэлектрика (результаты расчётов, представленные в данной работе, получены именно для этого случая). Подобная технология просветления не требует модифицирования поверхности материала (например, формирования наноструктурированного профиля), поэтому при использовании стекла, поликарбоната, кварца или других достаточно прочных, химически устойчивых оптических материалов такое покрытие будет обладать высокими эксплуатационными качествами, в частности, высокой устойчивостью к механическому воздействию, загрязнению, воздействию агрессивных сред. Эта особенность, а также возможность «настройки» спектральной области, в которой френелевское отражение будет ослаблено, за счёт использования включений иной формы или из другого материала делают такие покрытия уникальными в своём роде.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» Министерства образования и науки РФ.

### Литература

1. **Ораевский, А.** Высокий показатель преломления и другие особенности оптических свойств гетерогенных сред / А. Ораевский, И. Проценко // Письма в ЖЭТФ. – 2000. – Т. 72, № 9. – С. 641-646.
2. **Ораевский, А.** Оптические свойства гетерогенных сред / А. Ораевский, И. Проценко // Квантовая Электроника. – 2001. – Т. 31, № 3. – С. 252-256.
3. **Займидорога, О.А.** Проблема получения высокого показателя преломления и оптические свойства гетерогенных сред / О. А. Займидорога, В. Н. Самойлов, И.Е. Проценко // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2002. – Т. 33, Вып. 1. – С. 101-157.
4. **Сухов, С.В.** Гетерогенная среда с единичным показателем преломления / С.В. Сухов // Известия Самарского научного центра. – 2004. – Т. 6. – С. 149-154.
5. **Сухов, С.В.** Нанокompозитный материал с единичным показателем преломления / С.В. Сухов // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 8. – С. 741-744.
6. **Cai, W.** Optical cloaking with metamaterials / W. Cai, U. Chettiar, A. Kildishev, V. Shalaev // Nature Photonics. – 2007. – V. 1. – P. 224-227.
7. **Moiseev, S.G.** Active Maxwell-Garnett composite with the unit refractive index / S.G. Moiseev // Physica B: Physics of Condensed Matter. – 2010. – V. 405(14). – P. 3042-3045.
8. **Моисеев, С.Г.** Оптические свойства композитной среды Максвелла-Гарнета с серебряными включениями несферической формы / С.Г. Моисеев // Известия ВУЗов. Физика. – 2009. – Т. 52, № 11. – С. 7-12.

9. **Моисеев, С.Г.** К проблеме прозрачности металлодиэлектрических композитных сред с диссипативными и усиливающими компонентами / С.Г. Моисеев, Е.А. Пашинина, С.В. Сухов // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37, № 5. – С. 446-452.
10. **Protsenko, I.E.** Heterogeneous medium as a filter of electromagnetic radiation / I.E. Protsenko, O.A. Zaimidoroga and V.N. Samoilov // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2007. – V. 9. – P. 363-368.
11. **Kubo, S.** Tunability of the Refractive Index of Gold Nanoparticle Dispersions / Shoichi Kubo, Andres Diaz, Yan Tang, Theresa S. Mayer, Iam Choon Khoo, and Thomas E. Mallouk // Nano Lett. – 2007. – V. 7. – P. 3418-3423.
12. **Дыкман, Л.А.** Наночастицы золота: получение, функционализация, использование в биохимии и иммунохимии / Л.А. Дыкман, В.А. Богатырёв // Успехи химии. – 2007. – Т. 76. – С. 199-213.
13. **Daniel, M.-Ch.** Gold Nanoparticles: Assembly, Supramolecular Chemistry, Quantum-Size-Related Properties, and Applications toward Biology, Catalysis, and Nanotechnology / M.-Ch. Daniel, D. Astruc // Chem. Rev. – 2004. V. 104. – P. 293-346.
14. **Wang, H.** NanoRice: a hybrid nanostructure / H. Wang, D.W. Brandl, R. Le, P. Nordlander, N.J. Halas // Nano Lett. – 2006. – V. 6. – P. 827-832.
15. **Головань, Л.** Оптические свойства нанокompозитов на основе пористых систем / Л. Головань, В. Тимошенко, П. Кашкаров // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177, № 6. – С. 619-638.
16. **Kreibig, U.** Optical properties of metal clusters / U. Kreibig, M. Vollmer. – Berlin, Heidelberg: Springer, 1995. – 529 p.
17. **Yannopapas, V.** Scattering and absorption of light by periodic and nearly periodic metallodielectric structures / V. Yannopapas, A. Modinos, N. Stefanou // Optical and Quantum Electronics. – 2002. – V. 34, N. 1-3. – P. 227-234.
18. **Хлебцов, Н.** Оптика и биофотоника наночастиц с плазмонным резонансом / Н. Хлебцов // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38, № 6. – С. 504-529.
19. **Ordal, M.** Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared / M.A. Ordal, L.L. Long, R.J. Bell, S.E. Bell, R.R. Bell, R.W. Alexander, Jr., and C.A. Ward // Applied Optics. – 1983. – V. 22. – P. 1099-1119.
20. **Palik, E.D.** Handbook of Optical Constants of Solids / Ed. E.D. Palik – N.Y.: Academic, 1985. – 703 p.
21. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 721 с.
22. COMSOL Multiphysics (<http://www.comsol.com/products/multiphysics/>).
4. **Sukhov, S.V.** Heterogeneous medium with the unit refractive index / S.V. Sukhov // Izv. Samarskogo Nauch. Tsentra. – 2004. – V. 6. – P. 149-154. – (in Russian).
5. **Sukhov, S.V.** Nanocomposite material with the unit refractive index / S.V. Sukhov // Quantum Electron. – 2005. – V. 35(8). – P. 741-744.
6. **Cai, W.** Optical cloaking with metamaterials / W. Cai, U. Chettiar, A. Kildishev, V. Shalaev // Nature Photonics. – 2007. – V. 1. – P. 224-227.
7. **Moiseev, S.G.** Active Maxwell-Garnett composite with the unit refractive index / S.G. Moiseev // Physica B: Physics of Condensed Matter. – 2010. – V. 405(14). – P. 3042-3045.
8. **Moiseev, S.G.** Optical properties of a Maxwell-Garnett composite medium with nonspherical silver inclusions / S.G. Moiseev // Russian Physics Journal. – 2009. – V. 52(11). – P. 1121-1127.
9. **Moiseev, S.G.** On the problems of transparency of metal-dielectric composite media with dissipative and amplifying components / S.G. Moiseev, E.A. Pashinina, S.V. Sukhov // Quantum Electron. – 2007. – V. 37(5). – P. 446-452.
10. **Protsenko, I.E.** Heterogeneous medium as a filter of electromagnetic radiation / I.E. Protsenko, O.A. Zaimidoroga and V.N. Samoilov // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2007. – V. 9. – P. 363-368.
11. **Kubo, S.** Tunability of the Refractive Index of Gold Nanoparticle Dispersions / Shoichi Kubo, Andres Diaz, Yan Tang, Theresa S. Mayer, Iam Choon Khoo, and Thomas E. Mallouk // Nano Lett. – 2007. – V. 7. – P. 3418-3423.
12. **Dykman, L.A.** Gold nanoparticles: preparation, functionalisation and applications in biochemistry and immunochimistry / L.A. Dykman, V.A. Bogatyrev // Russian Chemical Reviews. – 2007. – V. 76(2). – P. 181-194.
13. **Daniel, M.-Ch.** Gold Nanoparticles: Assembly, Supramolecular Chemistry, Quantum-Size-Related Properties, and Applications toward Biology, Catalysis, and Nanotechnology / M.-Ch. Daniel, D. Astruc // Chem. Rev. – 2004. – V. 104. – P. 293-346.
14. **Wang, H.** NanoRice: a hybrid nanostructure / H. Wang, D.W. Brandl, R. Le, P. Nordlander, N.J. Halas // Nano Lett. – 2006. – V. 6. – P. 827-832.
15. **Golovan, L.A.** Optical properties of porous-system-based nanocomposites / L.A. Golovan, V.Yu. Timoshenko, P.K. Kashkarov // Phys. Usp. – 2007. – V. 50. – P. 595-612.
16. **Kreibig, U.** Optical properties of metal clusters / U. Kreibig, M. Vollmer. – Berlin, Heidelberg: Springer, 1995. – 529 p.
17. **Yannopapas, V.** Scattering and absorption of light by periodic and nearly periodic metallodielectric structures / V. Yannopapas, A. Modinos, N. Stefanou // Optical and Quantum Electronics – 2002. – V. 34, N. 1-3. – P. 227-234.
18. **Khlebtsov, N.G.** Optics and biophotonics of nanoparticles with a plasmon resonance / N.G. Khlebtsov // Quantum Electron. – 2008. – V. 38(6). – P. 504-529.
19. **Ordal, M.** Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared / M.A. Ordal, L.L. Long, R.J. Bell, S.E. Bell, R.R. Bell, R.W. Alexander, Jr., and C.A. Ward // Applied Optics. – 1983. – V. 22. – P. 1099-1119.
20. **Palik, E.D.** Handbook of Optical Constants of Solids / Ed. E.D. Palik. – N.Y.: Academic, 1985. – 703 p.
21. **Born, M.** Principles of Optics / M. Born, E. Wolf – 7th (expanded) edition, Cambridge University Press, Cambridge: 1999. – 952 pp.
22. COMSOL Multiphysics (<http://www.comsol.com/products/multiphysics/>).

### References

1. **Oraevskii, A.N.** High refractive index and other properties of heterogenic media / A.N. Oraevskii, I.E. Protsenko // JETP. Lett. – 2000. – V. 72(9). – P. 445-449.
2. **Oraevskii, A.N.** Optical properties of heterogeneous media / A.N. Oraevskii, I.E. Protsenko // Quantum Electron. – 2001. – V. 31(3). – P. 252-256.
3. **Zaimidoroga, O.A.** The problem of realization of a high refractive index and the optical properties of heterogeneous media / O.A. Zaimidoroga, V.N. Samoilov, and I.E. Protsenko // Phys. Particles & Nuclei. – 2002. – V. 33(1). – P. 52-79.



**ANTIREFLECTION OF DIELECTRIC SURFACE BY SILVER NANOPARTICLES***S.G. Moiseev<sup>1,2,3</sup>, S.V. Vinogradov<sup>3</sup>*<sup>1</sup> *V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk Branch,*<sup>2</sup> *Ulyanovsk State University,*<sup>3</sup> *Ulyanovsk State Technical University***Abstract**

The possibility of antireflection of nonabsorbing dielectric surface with the help of heterogeneous composite with silver nanoparticles of nonspherical forms is shown. The presented results of theoretical investigation correspond to the case when silver nanoparticles are embedded at sub-wavelength depth in the antireflected medium.

**Key words:** metal-dielectric composite, silver nanoparticles, plasmon resonance, antireflection coatings.

**Сведения об авторах**

**Моисеев Сергей Геннадьевич**, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Область научных интересов: оптика композитных материалов, оптика наноструктур, наноплазмоника, метод интегральных полевых уравнений в оптике.

**E-mail:** [serg-moiseev@yandex.ru](mailto:serg-moiseev@yandex.ru)

**Sergey Gennad'evich Moiseev**, PhD, Associate Professor, Senior Research Scientist, Ulyanovsk Branch of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences. Scientific interests: optics of composite media, optics of nanostructures, nanoplasmonics, method of integral equations in optics.



**Виноградов Сергей Викторович**, студент кафедры радиотехники, опто- и наноэлектроники, Ульяновский государственный технический университет. Область научных интересов: оптика композитных материалов.

**E-mail:** [sergeigen131@rambler.ru](mailto:sergeigen131@rambler.ru)

**Sergey Viktorovich Vinogradov**, student of chair Radio Engineering, Opto- and Nanoelectronics, Ulyanovsk State Technical University. Scientific interests: optics of composite media.

*Поступила в редакцию 13 августа 2010 г.*