

УДК 538.958

**ТЕОРИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ СРЕДЫ КАК ИНСТРУМЕНТ
АНАЛИЗА ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКОМПОЗИТОВ**

**А.Н. Юрасов^{1,@},
М.М. Яшин²**

¹Московский технологический университет (МИРЭА), Москва 119454, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва 105005, Россия

@Автор для переписки, e-mail: alexey_yurasov@mail.ru

Методы эффективной среды применяются для описания оптических и магнитооптических свойств нанокompозитов, представляющих собой неоднородные структуры, в которых металлические гранулы помещены в матрицу полупроводника или диэлектрика. В подобных структурах возможно существование гигантского и туннельного магнито-сопротивления, гигантского аномального эффекта Холла, большой магнитооптической активности, аномального оптического поглощения. Существует несколько методов описания эффективной среды нанокompозита. Основным приближением в случае малой концентрации металлической компоненты (в нашем случае она составляет 7%) является использованный нами метод эффективной среды Максвелла-Гарнетта, который описывает структуру через эффективную диэлектрическую проницаемость ϵ_{eff} . Для средних концентраций применяется приближение Бруггемана; в случае произвольных концентраций хорошо работает симметризованное приближение Максвелла-Гарнетта. В статье исследована спектральная зависимость диэлектрической проницаемости образца нанокompозита в ближней ИК-области спектра. С помощью формул Френеля построены спектральные зависимости коэффициентов отражения и пропускания p -поляризованного света. Обнаружены и обсуждены особые точки приведенных спектральных зависимостей при λ , равных 1 и 4 мкм. Определен состав нанокompозита (Cu+Si), для которого наблюдается хорошее качественное и количественное согласие экспериментальных и модельных зависимостей. Проведенный в статье анализ позволяет прогнозировать оптические свойства любого нанокompозита, что важно для выбора материалов с заданными свойствами. Обсуждены возможности использования нанокompозитов.

Ключевые слова: магнитооптика, нанокompозиты, диэлектрическая проницаемость, коэффициент отражения, формулы Френеля, условие Вульфа-Брэгга, угол Брюстера.

**THE EFFECTIVE MEDIUM THEORY AS A TOOL FOR ANALYZING
THE OPTICAL PROPERTIES OF NANOCOMPOSITES**

**A.N. Yurasov^{1,@},
M.M. Yashin²**

¹Moscow Technological University (MIREA), Moscow 119454, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia

@Corresponding author e-mail: alexey_yurasov@mail.ru

The spectral dependence of the dielectric permittivity of a nanocomposite sample in the near-IR range was investigated. Nanocomposites are inhomogeneous structures in which metal granules are placed in a semiconductor or dielectric matrix. Methods of effective medium are used to describe the optical and magneto-optical properties of nanocomposites. In such structures the existence of giant and tunnel magnetoresistance, giant anomalous Hall effect, large magneto-optical activity and anomalous optical absorption is possible. These effects are of both fundamental and practical interest. Using the Fresnel formula, the spectral dependences of the reflection and transmission coefficients of p-polarized light were constructed. The singular points of the given spectral dependences at $\lambda = 1$ and $4 \mu\text{m}$ were found and discussed. The composition of the nanocomposite (Cu + Si) was determined. The model spectral dependences of the dielectric constant for this nanocomposite were constructed. A good qualitative and quantitative agreement of the experimental and model spectral dependences was observed. The dielectric permittivity values for Cu + Si nanocomposite were calculated by the Maxwell-Garnett method. To date, there are several methods for describing the effective environment of a nanocomposite. The main approximation in the case of a small concentration of the metal component is the Maxwell-Garnett effective medium method, which describes the structure by means of the effective dielectric constant ϵ_{eff} . For medium concentrations the approach of Bruggeman is used. In the case of arbitrary concentrations, the symmetrized Maxwell-Garnett approximation works well. Since the concentration of the metal component was determined in our work, which is 7%, the method of Maxwell-Garnett effective medium method was chosen. The analysis carried out in the article makes it possible to predict the optical properties of any nanocomposite, which is important for the selection of materials with specified properties. The possibilities of using nanocomposites are discussed.

Keywords: magnetooptics, nanocomposites, dielectric permittivity, reflection coefficient, Fresnel formulas, Wolf-Bragg condition, Brewster angle.

В настоящее время весьма актуальны исследования оптических и магнитооптических свойств нанокompозитов [1–4]. Нанокompозитами называются такие неоднородные структуры, в которых металлические гранулы помещены в матрицу полупроводника или диэлектрика. Для описания оптических и магнитооптических свойств нанокompозитов применяются методы эффективной среды [5–8]. В подобных структурах возможно существование гигантского и туннельного магнитосопротивления, гигантского аномального эффекта Холла, большой магнитооптической активности, аномального оптического поглощения [9–11] и пр. Указанные эффекты представляют фундаментальный и практический интерес.

Цель работы – моделирование оптических свойств любых нанокompозитов методами эффективной среды. Для наглядности дано сравнение модельных и экспериментальных результатов [12–15] для нанокompозитов Cu–Si. Первоначально представлены экспериментальные данные по оптическим свойствам нанокompозитов Cu–Si, а затем обсуждены различные возможности их интерпретации в рамках теории эффективной среды.

В результате стандартных оптических измерений, подробно описанных в работе [3], получены спектральные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ исследуемого образца (нанокompозита Cu–Si) в ИК-диапазоне электромагнитного излучения, которым обладают, например, галогенные и ксеноновые лампы. Образцы получали методом молекулярно-лучевой эпитаксии в атмосфере аргона. Подробно детали эксперимента и получения образцов описаны ранее [3].

Полученные спектральные зависимости представлены на рис. 1. При рассмотрении нанокомпозита мы должны обратить внимание на поглощение, которое учитывается в мнимой части диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2$ и показателя преломления n^* :

$$n^* = n - ik.$$

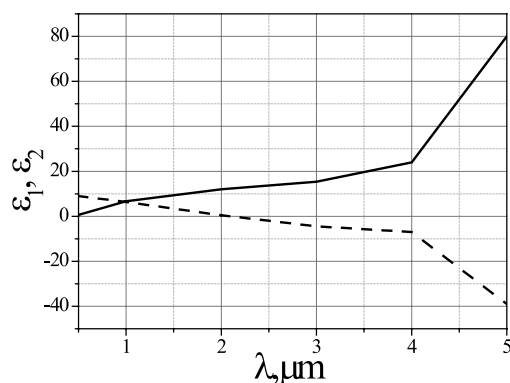


Рис. 1. Спектральная зависимость действительной ε_1 (пунктир) и мнимой ε_2 (сплошная линия) частей диэлектрической проницаемости исследуемого нанокомпозита.

Как видно из рис. 1, данная спектральная зависимость имеет свои особенности в точках с длиной волны λ , равной 1 и 4 мкм. Для анализа оптических свойств нанокомпозита в особых точках проверим выполнение условия Вульфа-Брэгга, т.е. возможна ли интерференция:

$$2d n \sin\theta = m\lambda, \text{ при } \sin\theta = 0.5 \text{ и } m = 1 \Rightarrow dn = \lambda, \quad (1)$$

где d – толщина нанокомпозита;

m – порядок интерференционного максимума;

θ – угол скольжения.

Таким образом, при длине волны $\lambda = 1$ мкм условие Вульфа-Брэгга выполняться не будет: интерференция будет возможна только при $d = 0.36$ мкм, а при $\lambda = 4$ мкм необходимое значение толщины нанокомпозита должно составлять $d = 1.3$ мкм.

Для дальнейших исследований нами рассчитаны и построены спектральные зависимости коэффициентов отражения R_p и пропускания T_p исследуемого образца (рис. 2).

Как показано в [17], для трехслойной структуры (воздух–нанокомпозит–воздух) R_p и T_p , соответственно, равны:

$$R_p = \left| \frac{r_{jk}^p + F^2 \cdot r_{ki}^p}{1 + F^2 \cdot r_{jk}^p \cdot r_{ki}^p} \right|^2; \quad (2)$$

$$T_p = \left| \frac{F \cdot t_{jk}^p \cdot t_{ki}^p}{1 + (F^2) \cdot r_{jk}^p \cdot r_{ki}^p} \right|^2;$$

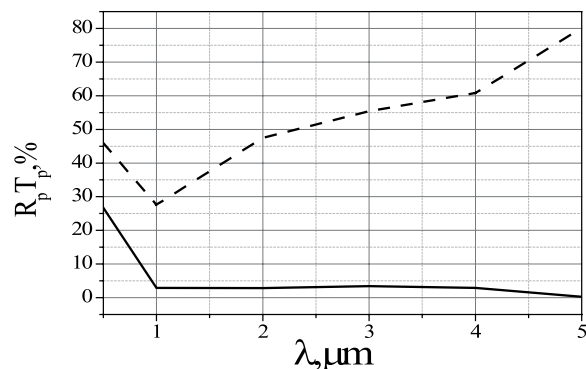


Рис. 2. Спектральные зависимости коэффициентов отражения R_p (пунктирная) и пропускания T_p (сплошная линия) исследуемого образца.

где параметр F определен выражением $F_k = \exp(-2\pi i \cdot \lambda^{-1} \cdot g_k \cdot d_k)$;

коэффициенты r и t p -поляризованного света на границе раздела j -й и k -й сред с показателями преломления n_j и n_k равны:

$$r_{jk}^p = \frac{g_j \cdot n_k^2 - g_k n_j^2}{g_j \cdot n_k^2 + g_k n_j^2};$$

$$t_{jk}^p = \frac{2 \cdot g_j \cdot n_j n_k}{g_j \cdot n_k^2 + g_k n_j^2};$$
(3)

Параметр g определен следующим выражением: $g_i = \sqrt{n_j^2 - n_i^2 \sin^2 \varphi}$,
здесь: n_j – показатель преломления внешней среды (обычно это воздух, и $n_j = 1$);
 φ – угол падения света.

С использованием формул (2) и (3) построены также спектральные зависимости коэффициента отражения R_p (рис. 3) и пропускания T_p (рис. 4) при переменном угле падения $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$ электромагнитного излучения.

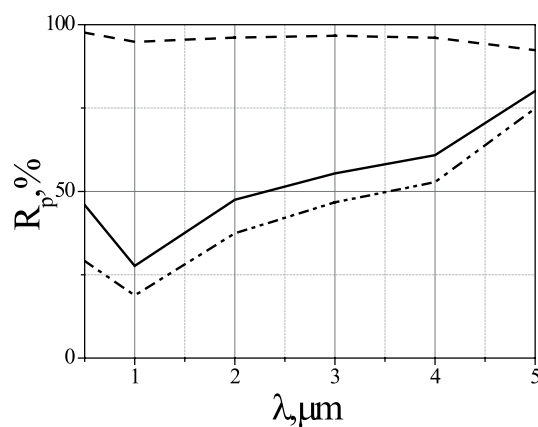


Рис. 3. Спектральная зависимость коэффициента отражения R_p (для p -поляризованного света) при различных углах падения электромагнитного излучения: $\varphi = 90^\circ$ (пунктир); $\varphi = 0$ (точки); $\varphi = 45^\circ$ (сплошная).

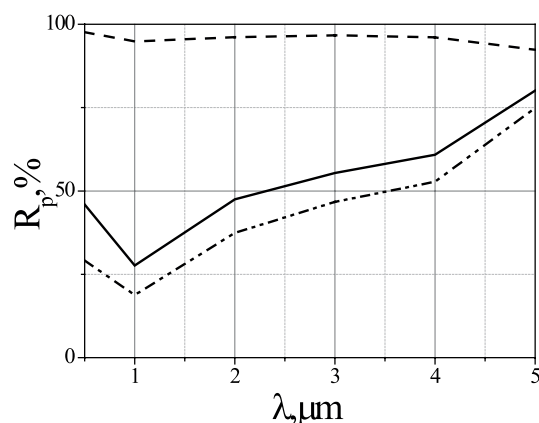


Рис. 4. Спектральная зависимость коэффициента пропускания T_p (для p -поляризованного света) при различных углах падения электромагнитного излучения: $\phi = 90^\circ$ (пунктир); $\phi = 0$ (точки); $\phi = 45^\circ$ (сплошная).

Очевидно, что на представленных на рис. 3 и 4 зависимостях имеются те же характерные особые точки при длинах волн λ , равных 1 и 4 мкм, аналогично имеющимся на рис. 2. Необходимо отметить, что в области $\lambda = 4$ мкм наблюдается резкое увеличение (уменьшение) коэффициента отражения (прохождения) при $\phi \rightarrow 90^\circ$. Отсюда логично предположить существование угла Брюстера или главного угла металла в данной спектральной области.

Рассчитаем угол Брюстера:

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{n_2}{n_1} \quad (4)$$

Тогда при $\lambda = 1$ мкм: $\operatorname{tg}(\varphi) = 2.8 \Rightarrow \varphi \approx 70^\circ$; при $\lambda = 4$ мкм: $\operatorname{tg}(\varphi) = 3 \Rightarrow \varphi \approx 72^\circ$.

Чтобы проанализировать полученные результаты, целесообразно построить зависимости коэффициентов отражения R_p и пропускания T_p от угла падения света φ при $\lambda = 1$ мкм (рис. 5) и $\lambda = 4$ мкм (рис. 6).

Как видно из рис. 5, при угле $\varphi \approx 70^\circ$ наблюдается особая точка. Это согласуется с оценкой угла Брюстера в рассматриваемой спектральной области, при $\lambda = 1$ мкм. Подчеркнем, что при толщине образца $d = 0.36$ мкм выполняется условие интерференции (1). При указанном значении d коэффициент отражения R_p достигает своего максимального значения, а пропускание при этом равно нулю $T_p = 0$.

Такие же выводы справедливы и для другой особой точки, при $\lambda = 4$ мкм (рис. 6).

Нами выполнен детальный анализ широкого спектра структур по их известным оптическим константам [18] и построены теоретические зависимости диэлектрических проницаемостей ϵ_1 и ϵ_2 от длины волны λ электромагнитного излучения в сравнении с зависимостями, представленными на рис. 1. Спектральные зависимости ϵ_1 и ϵ_2 для соединения Cu+Si сопоставлены на рис. 7. Они позволили рассчитать оптимальную концентрацию меди в матрице кремния. Для простой оценки рассчитано значение эффективного показателя преломления нанокомпозита по следующей формуле [19, 20]:

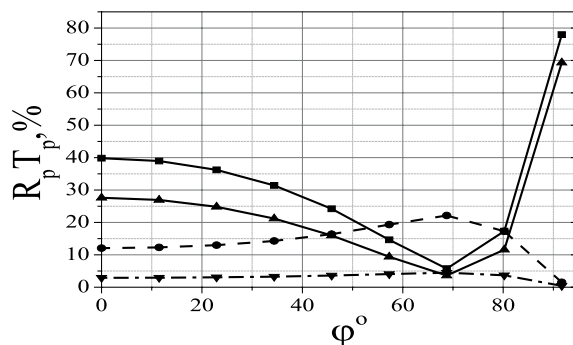


Рис. 5. Спектральная зависимость коэффициента отражения R_p (пунктир) и пропускания T_p (сплошная линия) от угла падения φ ($0 \leq \varphi \leq 90^\circ$) p -поляризованного света в спектральной области $\lambda = 1$ мкм при $d = 0.1$ мкм (квадраты) и $d = 1$ мкм (треугольники).

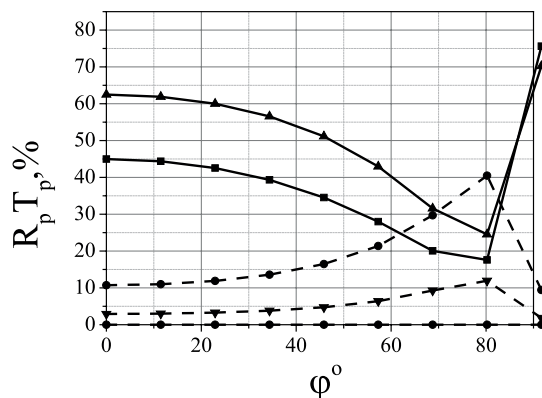


Рис. 6. Спектральная зависимость коэффициента отражения R_p (пунктир) и пропускания T_p (сплошная линия) от угла падения φ ($0 \leq \varphi \leq 90^\circ$) p -поляризованного света в спектральной области $\lambda = 4$ мкм, при $d = 0.1$ мкм (квадраты) и $d = 1$ мкм (треугольники).

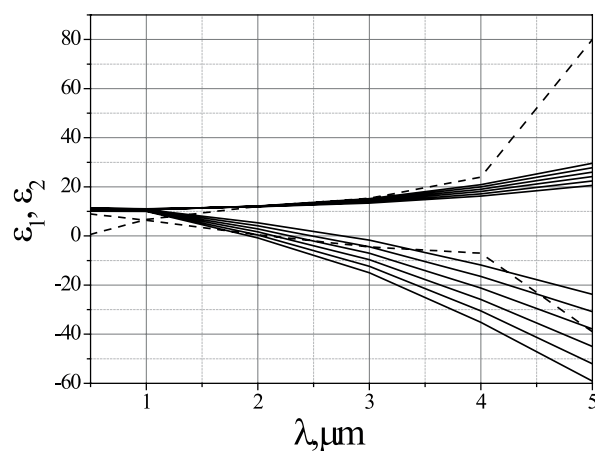


Рис. 7. Спектральные зависимости диэлектрических проницаемостей ϵ_1 и ϵ_2 исследуемого образца (пунктирная линия) в сравнении ϵ_1 и ϵ_2 для сплава Cu+Si (сплошная линия) при различной концентрации меди в матрице кремния $5\% < X < 10\%$.

$$n_{eff} = \sqrt{n_{Cu}^2 \cdot X + n_{Si}^2 \cdot (1 - X)} \quad (5)$$

где n_{Cu} – показатель преломления меди;

n_{Si} – показатель преломления кремния;

X – объемная концентрация металлической компоненты (в нашем случае, меди).

У кремния показатель преломления остается практически постоянным во всей ИК-области электромагнитного излучения и составляет $n_{Si} = 3.4$, для меди: $n_{Cu} = n + ik$. Отсюда и была рассчитана оптимальная, с точки зрения описания экспериментальных данных, концентрация меди в матрице кремния: она составила 7%. Данная спектральная зависимость представлена на рис. 8.

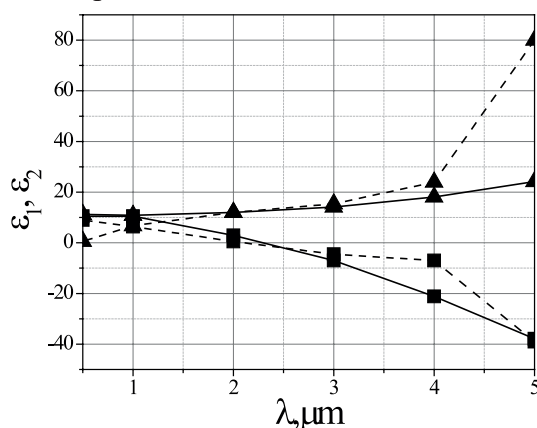


Рис. 8. Спектральные зависимости диэлектрических проницаемостей ϵ_1 (квадраты) и ϵ_2 (треугольники) исследуемого образца в сравнении с ϵ_1 и ϵ_2 для нанокompозита Cu+Si при концентрации меди $X = 7\%$. Сплошные линии соответствуют ϵ_1 и ϵ_2 нанокompозита Cu+Si, пунктирные – исходного образца.

Таким образом, в целом объяснена спектральная зависимость действительной ϵ_1 и мнимой ϵ_2 частей диэлектрической проницаемости исследуемого нанокompозита (рис. 1), найдена оптимальная структура, соответствующая составу образца нанокompозита.

Для уточнения вычислений необходимо рассмотреть теорию эффективной среды. На сегодняшний день существует несколько методов описания эффективной среды нанокompозита [21]. Основным приближением в случае малой концентрации металлической компоненты является метод эффективной среды Максвелла-Гарнетта, который описывает структуру через эффективную диэлектрическую проницаемость ϵ_{eff} . Для средних концентраций применяется приближение Бруггемана. В случае произвольных концентраций хорошо работает симметризованное приближение Максвелла-Гарнетта [22]. Так как в представленной здесь работе определена концентрация металлической компоненты, равная 7%, выбран метод эффективной среды Максвелла-Гарнетта. В данном приближении рассматривается взвесь сферических частиц металла $\epsilon_1 = \epsilon_1' - i\epsilon_1''$ в среде с диэлектрической постоянной $\epsilon_0 = \epsilon_0' - i\epsilon_0''$. В рамках приближения Максвелла-Гарнетта и с учетом малости частиц условие эффективной среды приводит к уравнению для диэлектрической проницаемости $\epsilon_e \equiv \epsilon^{MG}$:

$$\epsilon^{MG} = \epsilon_0 \frac{\epsilon_1 + 2\epsilon_0 + 2X(\epsilon_1 - \epsilon_0)}{\epsilon_1 + 2\epsilon_0 - X(\epsilon_1 - \epsilon_0)} \quad (6)$$

В нашем случае $X = 0.07$. Зависимости действительной ϵ_1 и мнимой ϵ_2 частей диэлектрической проницаемости нанокompозита Cu+Si в сравнении с ϵ_1 и ϵ_2 , рассчитанными методом эффективной среды Максвелла-Гарнетта, изображены на рис. 9. Как видно, полученные спектральные зависимости хорошо согласуются.

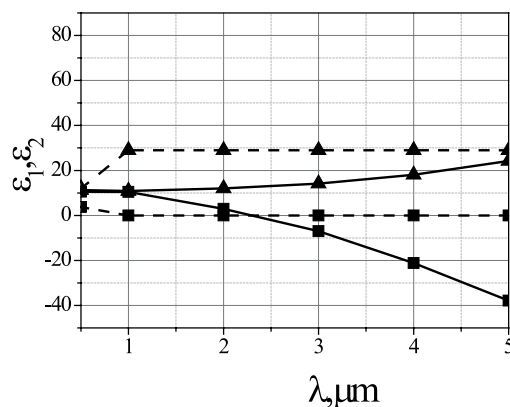


Рис. 9. Спектральные зависимости диэлектрических проницаемостей ϵ_1 (квадраты) и ϵ_2 (треугольники) сплава Si+Cu (сплошная линия) в сравнении с ϵ_1 и ϵ_2 , рассчитанными методом эффективной среды Максвелла-Гарнетта (пунктирная линия).

Заключение

Проведенный в статье анализ позволяет прогнозировать оптические свойства любого нанокompозита, что важно для выбора материалов с заданными свойствами. Выполнено моделирование оптических свойств нанокompозитов с использованием подходов эффективной среды. Расчет спектральных зависимостей действительной ϵ_1 и мнимой ϵ_2 частей диэлектрической проницаемости нанокompозита Cu+Si выполнен с использованием простейшего подхода и в рамках метода Максвелла-Гарнетта (рис. 9). Как видно из этого рисунка, наблюдается хорошее согласие полученных экспериментальных и модельных спектральных зависимостей. Все результаты статьи представляют значительный интерес для дальнейшего исследования оптических свойств нанокompозитов и поиска перспективных материалов с заданными свойствами.

Подобные нанокompозиты могут использоваться как высокочувствительные магниторезистивные датчики и миниатюрные магнитосчитывающие головки. По нашему мнению, они могут найти применение в качестве селективных усилителей и модуляторов света, а также приемников теплового излучения [1]. Полученные результаты представляют как фундаментальный, так и практический интерес в широкой области применения нанокompозитов.

Литература:

1. Юрасов А.Н. Магниторефрактивный эффект, как бесконтактный метод исследования функциональных материалов // Материаловедение. 2014. № 6. С. 32–38.
2. Sukhorukov Yu.P., Telegin A.V., Bessonov V.D., Gan'shina E.A., Kaul' A.R., Korsakov I.E., Perov N.S., Fetisov L.Yu., Yurasov A.N. Magnetorefractive effect in the $\text{La}_{1-x}\text{K}_x\text{MnO}_3$ thin films grown by MOCVD // J. Magn. Magn. Mat. 2014. V. 367. P. 53–59.

3. Buravtsova V., Gan'shina E., Lebedeva E., Syr'ev N., Trofimenko I., Vyzulin S., Shipkova I., Phonghirun S., Kalinin Yu., Sitnikov A. The features of TKE and FMR in nanocomposites-193 semiconductors multilayers // *Solid State Phenomena*. 2011. V. 168-169. P. 533–536.
4. Hrabovský D., Caicedo J.M., Herranz G., Infante I.C., Sánchez F., Fontcuberta J. Jahn-Teller contribution to the magneto-optical effect in thin-film ferromagnetic manganites // *Phys. Rev. B*. 2009. V. 79(5). P. 052401-1–052401-4.
5. Bergman L.J. The dielectric constant of a composite material – a problem in classical physics // *Phys. Rev. Lett.* 1980. V. 44. P. 1285–1287.
6. Gerady J.M., Ausloos M. Absorption spectrum of clusters of spheres from the general solution of Maxwell's equations. The long-wavelength limit // *Phys. Rev. B*. 1980. V. 22(12). P. 4950–4959.
7. Gerady J.M., Ausloos M. Effects of high polar orders on the infrared absorption spectrum of ionic clusters // *Surface Sci.* 1981. V. 106. P. 319–326.
8. Антонов В.А., Пшеницин В.И. Эффективная диэлектрическая проницаемость гетерогенной системы // *Оптика и спектроскопия*. 1981. Т. 50. С. 362–370.
9. Касаткин С.И., Васильева Н.П., Муравьев А.М. Спинтронные магниторезистивные элементы и приборы на их основе. М.: Электроинформ, 2005. 168 с.
10. Xiao J.Q., Jiang J.S., Chien C.L. Giant magnetoresistance in nonmultilayer magnetic systems // *Phys. Rev. Lett.* 1992. V. 68. P. 3749–3756.
11. Ведяев А.В., Грановский А.Б., Калицев А.В., Брауерс Ф. Аномальный эффект Холла гранулированных сплавов // *ЖЭТФ*. 1997. Т. 112. С. 2198–2209.
12. Балабанов В. И. Нанотехнологии. Наука будущего. М.: Эксмо, 2009. 256 с.
13. Вызулин С.А., Горобинский А.В., Калинин Ю.Е., Лебедева Е.В., Ситников А.В., Сырьев Н.Е., Трофименко И.Т., Чекрыгина Ю.И., Шипкова И.Г. ФМР, магнитные и резистивные свойства мультислойных наноструктур $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}/\text{Si}$ // *Известия РАН, сер. физическая*. 2010. Т. 74. № 10. С. 1441–1443.
14. Naik S.R., Rai S., Tiwari M.K., Lodha G.S. Structural asymmetry of Si/Fe and Fe/Si interface in Fe/Si multilayers // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. V. 41. P. 115307–115312.
15. Ханикаев А.Б., Грановский А.Б., Клерк Ж.-П. Влияние распределения гранул по размерам и притяжения между гранулами на порог перколяции в гранулированных сплавах // *Физика твердого тела*. 2002. Т. 44. С. 1537–1540.
16. Price P.J. Anisotropic conduction in solids near surfaces // *IBM J. Res. Develop.* 1960. V. 4. P. 152–157.
17. Маевский В.М. Теория магнетооптических эффектов в многослойных системах с произвольной ориентацией намагниченности // *Физика металлов и материаловедение (ФММ)*. 1985. Т. 59. № 2. С. 213–219.
18. Bass M., DeCusatis C., Enoch J.M., Lakshminarayanan V., Li G., MacDonald C., Mahajan V.N., Van Stryland E. Handbook of optics: Third Edition. Vol. IV: Optical properties of materials, nonlinear optics, quantum optics. McGraw-Hill Education, 2009. V. 4. 1152 p.
19. Gorelik V.S., Yashin M.M., Vodchits A.I. Reflection spectra of 1D photonic crystals based on aluminum oxide // *Physics of Wave Phenomena*. 2017. V. 25. № 3. P. 175–179.
20. Горелик В.С., Яшин М.М. Узкополосные фильтры в видимом спектральном диапазоне на основе пористого фотонного кристалла // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*.

Серия: естественные науки. 2016. № 5(68). С. 105–114.

21. Сушко М.Я., Криськив С.К. Метод компактных групп в теории диэлектрической проницаемости гетерогенных систем // Журн. техн. физики. 2009. Т. 79. Вып. 3. С. 97–101.

22. Granovsky A.B., Gan'shina E.A., Vinogradov A.N., Rodin I.K., Yurasov A.N., Khan H.R. Magneto-optical spectra of ferromagnetic Co-CoO composites // Physics of Metals and Metallography. 2001. V. 91. № 1 suppl. S52–S55.

References:

1. Yurasov A.N. Magnetorefractive effect as contactless method for investigation of functional materials // Materialovedenie (Materials Science). 2014. № 6. P. 32–38. (in Russ.).

2. Sukhorukov Yu.P., Telegin A.V., Bessonov V.D., Gan'shina E.A., Kaul' A.R., Korsakov I.E., Perov N.S., Fetisov L. Yu., Yurasov A.N. Magnetorefractive effect in the $\text{La}_{1-x}\text{K}_x\text{MnO}_3$ thin films grown by MOCVD // J. Magnetism and Magnetic Materials. 2014. V. 367. P. 53–59.

3. Buravtsova V., Gan'shina E., Lebedeva E., Syr'ev N., Trofimenko I., Vyzulin S., Shipkova I., Phonghirun S., Kalinin Yu., Sitnikov A. The features of TKE and FMR in nanocomposites-193 semiconductors multilayers // Solid State Phenomena. 2011. V. 168-169. P. 533–536.

4. Hrabovský D., Caicedo J.M., Herranz G., Infante I.C., Sánchez F., Fontcuberta J. Jahn-Teller contribution to the magneto-optical effect in thin-film ferromagnetic manganites // Phys. Rev. B. 2009. V. 79(5). P. 052401-1–052401-4.

5. Bergman L.J. The dielectric constant of a composite material – a problem in classical physics // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 44. P. 1285–1287.

6. Gerady J.M., Ausloos M. Absorption spectrum of clusters of spheres from the general solution of Maxwell's equations. The long-wavelength limit // Phys. Rev. B. 1980. V. 22(12). P. 4950–4959.

7. Gerady J.M., Ausloos M. Effects of high polar orders on the infrared absorption spectrum of ionic clusters // Surface Sci. 1981. V. 106. P. 319–326.

8. Antonov V.A., Pshenitsin V.I. Effective permittivity of a heterogeneous system // Optika i spektroskopiya (Optics and Spectroscopy). 1981. V. 50. P. 362–370. (in Russ.).

9. Kasatkin S.I., Vasilyeva N.P., Muraviev A.M. Spintronic magnetoresistive elements and devices based on them. Moscow: Elektroinform Publ., 2005. 168 p. (in Russ.).

10. Xiao J.Q., Jiang J.S., Chien C.L. Giant magnetoresistance in nonmultilayer magnetic systems // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 68. P. 3749–3756.

11. Vedyayev A.V., Granovskii A.B., Kalitsev A.V., Brauers F. Anomalous Hall effect in granular alloys // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 1997. V. 85. P. 1204–1210.

12. Balabanov V.I. Nanotechnologies. Science of the future. Moscow: Eksmo Publ., 2009. 256 p. (in Russ.).

13. Vyzulin S.A., Gorobinskii A.V., Kalinin Y.E., Sitnikov A.V., Lebedeva E.V., Syr'ev N.E., Trofimenko I.T., Chekrygina Y.I., Shipkova I.G. Ferromagnetic resonance, magnetic properties, and resistivity of $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}/\text{Si}$ multilayer nanostructures // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2010. V. 74. № 10. P. 1380–1382.

14. Naik S.R., Rai S., Tiwari M.K., Lodha G.S. Structural asymmetry of Si/Fe and Fe/Si interface in Fe/Si multilayers // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. P. 115307–115312.

15. Khanikaev A.B., Granovskii A.B., Clerc J.P. Influence of the size distribution of granules

and of their attractive interaction on the percolation threshold in granulated alloys // *Physics of the Solid*. 2002. V. 44. № 9. P. 1611–1513.

16. Price P.J. Anisotropic conduction in solids near surfaces // *IBM J. Res. Develop.* 1960. V. 4. P. 152–157.

17. Majewski VM The theory of magneto-optical effects in multilayer systems with an arbitrary orientation of the magnetization // *Fizika metallov i metallovedenie (Physics of Metals and Metallography)*. 1985. V. 59. № 2. P. 213–219 (in Russ.).

18. Bass M., DeCusatis C., Enoch J.M., Lakshminarayanan V., Li G., MacDonald C., Mahajan V.N., Van Stryland E. *Handbook of optics: Third Edition. Vol. IV: Optical properties of materials, nonlinear optics, quantum optics*. McGraw-Hill Education, 2009. V. 4. 1152 p.

19. Gorelik V.S., Yashin M.M., Vodchits A.I., Reflection spectra of 1D photonic crystals based on aluminum oxide // *Physics of Wave Phenomena*. 2017. V. 25. № 3. P. 175–179.

20. Gorelik V.S., Yashin M.M. Narrow-band filters in the visible spectral range based on porous photonic crystal // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta imeni N.E. Baumana, Estestv. nauki (Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.)*. 2016. № 5. P. 105–114. (in Russ.).

21. Sushko M.Y., Kriskiv S.K. Compact group method in the theory of permittivity of heterogeneous systems // *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 2009. V. 54. № 3. P. 423–427.

22. Granovsky A.B., Gan'shina E.A., Vinogradov A.N., Rodin I.K., Yurasov A.N., Khan H.R. Magneto-optical spectra of ferromagnetic Co-CoO composites // *Physics of Metals and Metallography*. 2001. V. 91. № 1 suppl. S52–S55.

Об авторах:

Юрасов Алексей Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры нанoeлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Яшин Максим Михайлович, ассистент кафедры физики МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5).

About the authors:

Alexey N. Yurasov, Dr.Sc., Docent, Professor of Chair of Nanoelectronics, Physical Technological Institute, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Maxim M. Yashin, Assistant of Chair of Physics, Bauman Moscow State Technical University (5, 2nd Bauman st., Moscow 105005, Russia).