

Симметризованное приближение Максвелла-Гарнетта как эффективный метод исследования нанокомпозитов

**М.М. Яшин^{1,@},
Х.Б. Мирзокулов²**

¹*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва 105005, Россия*

²*Самаркандинский филиал Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, Ташкент 100200, Узбекистан*

[@]Автор для переписки, e-mail: ihkamax@mail.ru

Рассмотрено приближение симметризованного Максвелла-Гарнетта (СМГ) как наиболее оптимальный метод эффективной среды для описания нанокомпозитных структур. Данное приближение учитывает микроструктуру образца, что делает возможным расчет системы металл-диэлектрик. Приближение применимо также для гранулированных сплавов, которые состоят из металлических компонент. Поэтому данную методику можно рассматривать как универсальное приближение для описания широкого класса наноструктурных материалов. В настоящей статье обсуждаются различные методы эффективной среды. В них металлическая составляющая нанокомпозитов и диэлектрическая матрица заменяются эффективной средой с эффективной диэлектрической проницаемостью ϵ^{eff} . Необходимо, чтобы частицы (гранулы) в таких структурах были малы по сравнению с длиной волны падающего на образец электромагнитного излучения. Основываясь на этом условии, мы рассчитали спектральные зависимости экваториального эффекта Керра (ЭЭК) в магнитных нанокомпозитах на примере структуры $(\text{CoFeZr})(\text{Al}_2\text{O}_3)$ при различных концентрациях магнитной компоненты. Моделирование проводили при малых и больших значениях концентрации (ниже и выше порога перколяции). Спектральные зависимости получали с учетом форм-фактора наночастиц и квазиклассического размерного эффекта. В работе обсуждается вклад различных механизмов, влияющих на вид спектров ЭЭК. С помощью симметризованного приближения Максвелла-Гарнетта найдены эффективные значения размера гранул исследуемых нанокомпозитов и рассчитан эффективный тензор диэлектрической проницаемости (ТДП). Полученные значения ТДП позволили смоделировать спектральные зависимости магнитооптического экваториального эффекта Керра. Сделаны выводы об особенностях полученных спектральных зависимостей в видимой и инфракрасной области спектра. Отмечена фундаментальная и практическая значимость полученных результатов и показана важность методов эффективной среды для изучения оптических, транспортных и магнитооптических свойств магнитных нанокомпозитов.

Ключевые слова: наноструктуры, магнитоэфрактивный эффект, магнитоотражение, магнитопропускание, магнитосопротивление, спин-зависящее рассеяние.

Symmetrized Maxwell-Garnett Approximation as an Effective Method for Studying Nanocomposites

Maksim M. Yashin^{1,@},
Hotam Bakhtiyor ugli Mirzokulov²

¹*Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia*

²*Samarkand branch of Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khorazmiy, Tashkent 100200, Uzbekistan*

[@]*Corresponding author e-mail: ihkamax@mail.ru*

The symmetrized Maxwell-Garnett (SMG) approximation is considered as the most optimal method of an effective medium for the description of nanocomposite structures. This approximation takes into account the microstructure of the sample, which makes it possible to calculate the metal-dielectric system. Thus, SMG describes with good accuracy the structure of the nanocomposite. Besides, this approximation is applicable for granular alloys consisting of metal components. As a result, this technique can be considered as a universal approximation to describe a wide class of nanostructured materials. At the same time, this article discusses various methods of effective environment. In these methods, the metal component of nanocomposites and the dielectric matrix are replaced by an effective medium with effective permittivity ϵ^{eff} . It is necessary that the particles (granules) in such structures be small in comparison with the wavelength of electromagnetic radiation incident on the sample. Based on this, the spectral dependences of the transverse Kerr effect (TKE) in magnetic nanocomposites were calculated with $(\text{CoFeZr})(\text{Al}_2\text{O}_3)$ structure as an example at different concentrations of the magnetic component. The simulation was carried out at small and large concentrations (below and above the percolation threshold). The spectral dependences were obtained taking into account the form factor of nanoparticles and the quasi-classical size effect. Besides, the authors note and discuss in this paper the contribution of various mechanisms that affect the type of spectra of the transverse Kerr effect. Using the symmetrized Maxwell-Garnett approximation, the effective values of the granule size of the nanocomposites under study were found, and the tensor of effective dielectric permittivity (TEDP) was calculated. The obtained TEDP values allowed to simulate the spectral dependences of the magneto-optical transverse Kerr effect. The authors discuss and draw conclusions about the features of the obtained spectral dependences in both the visible and infrared regions of the spectrum. In addition, the practical and fundamental importance of the obtained results is noted. The importance of effective medium methods for the study of optical, transport and magneto-optical properties of magnetic nanocomposites is shown.

Keywords: magnetic nanocomposites, transverse Kerr effect, spectral dependence, symmetric Maxwell-Garnett approximation, effective medium, size effect.

Введение

Внастоящее время особую актуальность приобретают исследования оптических и магнитооптических свойств нанокомпозитов [1–4]. Нанокомпозитом называется многокомпонентная структура, в которой хотя бы один из компонентов в одном, двух или трех измерениях имеет размеры, не превышающие 100 нм. В подобных структурах воз-

можно существенное усиление таких эффектов, как туннельное магнитосопротивление, экваториальный эффект Керра (ЭЭК), магнитооптическая активность, аномальный эффект Холла и др. Данные эффекты представляют фундаментальный и практический интерес. Для исследования различных магнитооптических свойств наноструктур применяются множество методов, описывающих характеристические параметры нанокомпозитов.

Целью настоящей работы является рассмотрение особенностей магнитооптических свойств нанокомпозитов в видимом и ближнем ИК-диапазоне спектра в рамках самого оптимального метода эффективной среды – симметризованного приближения Максвелла–Гарнетта. Моделирование спектров проводили на примере нанокомпозитов $(\text{CoFeZr})(\text{Al}_2\text{O}_3)$.

Теоретическая часть

Как отмечалось выше, для моделирования магнитооптических свойств нанокомпозитных материалов используются различные методы эффективной среды. В этих методах металлическая составляющая нанокомпозитов и диэлектрическая матрица заменяются эффективной средой с эффективной диэлектрической проницаемостью ϵ^{eff} , причем необходимо, чтобы частицы (гранулы) в таких структурах были малы по сравнению с длиной волны падающего на образец электромагнитного излучения. Для описания магнитооптических свойств наноструктур в зависимости от концентрации X магнитной компоненты применяются различные приближения, например, при малых концентрациях X – приближение Максвелла–Гарнетта (МГ) [5], при средних – приближение Бруггемана (ЕМА) [5]. Наиболее оптимальным представляется являться симметризованное приближение Максвелла–Гарнетта (СМГ). Преимущество СМГ заключается в возможности изучения нанокомпозитов и при малых, и при больших концентрациях металлической (магнитной) компоненты, а также вблизи переколяционного перехода, где кардинальным образом меняются электрические, магнитные, оптические и другие свойства [6, 7].

Финальные формулы СМГ имеют следующий вид для диагональных компонент (оптическая составляющая) тензора диэлектрической проницаемости (ТДП):

$$P_A \frac{\epsilon_A^{\text{MG}} - \epsilon^{\text{EMA}}}{\epsilon^{\text{EMA}} + \frac{1}{2}(1-L_A)(\epsilon_A^{\text{MG}} - \epsilon^{\text{EMA}})} + P_B \frac{\epsilon_B^{\text{MG}} - \epsilon^{\text{EMA}}}{\epsilon^{\text{EMA}} + \frac{1}{2}(1-L_B)(\epsilon_B^{\text{MG}} - \epsilon^{\text{EMA}})} = 0, \quad (1.1)$$

а для недиагональных компонент (магнитооптическая составляющая):

$$P_A \frac{\gamma_A^{\text{MG}} - \gamma^{\text{EMA}}}{\epsilon^{\text{EMA}} + \frac{1}{2}(1-L_A)(\epsilon_A^{\text{MG}} - \epsilon^{\text{EMA}})} + P_B \frac{\gamma_B^{\text{MG}} - \gamma^{\text{EMA}}}{\epsilon^{\text{EMA}} + \frac{1}{2}(1-L_B)(\epsilon_B^{\text{MG}} - \epsilon^{\text{EMA}})} = 0 \quad (1.2)$$

где P_A и P_B – вероятность присутствия частиц A и B ;

$L_{A,B}$ – форм-факторы соответствующих эллипсоидальных частиц;

ϵ^{MG} и ϵ^{EMA} – эффективная диэлектрическая проницаемость, полученная с помощью методов Максвелла–Гарнетта и Бруггемана, соответственно, при этом ϵ является комплексной величиной и равна $\epsilon^i = \epsilon_1^i - i\epsilon_0^i$;

γ^{EMA} и γ^{MG} – магнитооптические компоненты ТДП.

$$P_A = \frac{u_1}{u_1 + u_2}, \quad P_B = \frac{u_2}{u_1 + u_2} \quad (2)$$

где $u_1 = (1 - X^{\frac{1}{3}})^3$, $u_2 = (1 - (1 - X^{\frac{1}{3}}))^3$.

Формулы (1.1), (1.2) и (2) были получены в [7, 8].

Поскольку для исследования выбран магнитный нанокомпозит (CoFeZr)(Al₂O₃), то в данном приближении рассматривается взвесь сферических частиц CoFeZr с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1 = \epsilon_1' - i\epsilon_1''$ и частицы Al₂O₃ с диэлектрической постоянной частиц $\bar{\epsilon}_0 = \epsilon_0' - i\epsilon_0''$, где $\bar{\epsilon}_1 = \epsilon_1^{MG}$ и $\bar{\epsilon}_0 = \epsilon_0^{MG}$.

Рассчитав оптические и магнитооптические параметры нанокомпозита, по известным формулам [7] находят величину экваториального эффекта Керра (ЭЭК). Важно отметить, что выбранное приближение учитывает микроструктуру образца и делает возможным расчет системы металл–диэлектрик, т. е. нанокомпозита. Оно применимо также для гранулированных сплавов, состоящих из металлических компонент. Таким образом, указанную методику можно рассматривать как универсальное приближение для описания широкого класса наноструктур.

Квазиклассический размерный эффект

В ИК-области спектра при исследовании оптических и магнитооптических величин необходимо учитывать рассеяние на поверхностях гранул, которое приводит к квазиклассическому размерному эффекту [1, 3]. Это особенно важно вблизи порога переколяции при сильном изменении оптических, электрических, транспортных, магнитооптических и других свойств нанокомпозитов.

Размерный эффект можно учесть по следующим формулам для оптических [5]:

$$\epsilon_{\text{mod}} = \epsilon_0 + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + \frac{i}{\tau_{\text{bulk}}})} + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + \frac{i}{\tau_{\text{part}}})} \quad (3)$$

где ω – частота электромагнитного излучения;

ω_p – плазменная частота;

ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость магнитной компоненты;

τ_{bulk} – время свободного пробега в образце;

τ_{part} – время свободного пробега в грануле;

и магнитооптических величин [7]:

$$\gamma_{\text{mod}} = \gamma + \frac{4\pi\sigma_{xy}^{\text{bulk}} / \tau_{\text{bulk}}^2}{\omega(\omega + \frac{i}{\tau_{\text{bulk}}})} + \frac{4\pi\sigma_{xy}^{\text{gr}} / \tau_{\text{part}}^2}{\omega(\omega + \frac{i}{\tau_{\text{part}}})} \quad (4)$$

где $\sigma_{xy}^{bulk} = 4\pi M_s R_{bulk} / \rho_{bulk}^2$, $\sigma_{xy}^{gr} = 4\pi M_s R_{rg} / \rho_{rg}^2$;

R_{gr} – коэффициент аномального эффекта Холла (АЭХ);

M_s – намагниченность насыщения;

ρ_{bulk} – удельное сопротивление образца;

ρ_{rg} – удельное сопротивление гранулы.

Размерный эффект оказывает влияние на удельное сопротивление.

$$\rho_{rg} = \rho_{bulk} (1 + l / r_0) \quad (5)$$

и на коэффициент АЭХ:

$$R_{gr} = R_{bulk} + 0.2 R_s \frac{l}{r_0} \left(1 + \frac{l}{r_0} \right) \quad (6)$$

где R_s – значение коэффициента АЭХ гранул.

Таким образом, в рамках приближения СМГ можно моделировать комплексное изменение параметров в широком спектральном диапазоне. Необходимо подчеркнуть, что преимуществом данного метода является возможность использования моделирования для определения значения коэффициента аномального эффекта Холла (R_s/R_{bulk}), которое нельзя определить экспериментальным путем. Это чрезвычайно важно для исследования магнитооптических свойств нанокомпозитов [8].

Результаты и их обсуждение

Расчеты ЭЭК проводили в рамках СМГ с учетом всего вышеизложенного на примере нанокомпозита (CoFeZr)(Al₂O₃). По формулам (1)–(6) в рамках приближения СМГ были рассчитаны спектральные зависимости ЭЭК исследуемых нанокомпозитных материалов (CoFeZr)_x(Al₂O₃)_{1-x} при различных значениях X. Спектральные зависимости ЭЭК при X = 23% (ниже порога перколяции) представлены на рис. 1. В рамках моделирования при размере частиц $r_0 = 1.2$ нм и значении отношения $R_s/R_{bulk} = 1.85 \cdot 10^6$, что соответствует реальным параметрам нанокомпозитов, получены спектральные зависимости ЭЭК при различных значениях L_A и L_B (форм-факторов частиц эффективной среды) для трех различных случаев.

Отметим, что в процессе моделирования спектров ЭЭК наблюдались значительные изменения спектров в ИК-области. Наблюдаемые результаты позволяют сделать вывод, что данный эффект зависит от размера частиц r_0 и коэффициента R_s/R_{bulk} . Полученные результаты хорошо согласуются с работами [9, 10].

Обращает на себя внимание тот факт, что при средних концентрациях (30% < X < 50%) CoFeZr значения ЭЭК чувствительны к величинам форм-фактора, размерам частиц и коэффициенту R_s/R_{bulk} как в ИК-, так и в видимой области спектра. Причиной данного эффекта является порог перколяции, который наблюдается при средних концентрациях магнитной компоненты нанокомпозита. Теоретический порог перколяции для трехмерных структур проявляется при концентрации X_c = 0.33, а для двумерных – X_c = 0.67, если частицы имеют сферическую форму.

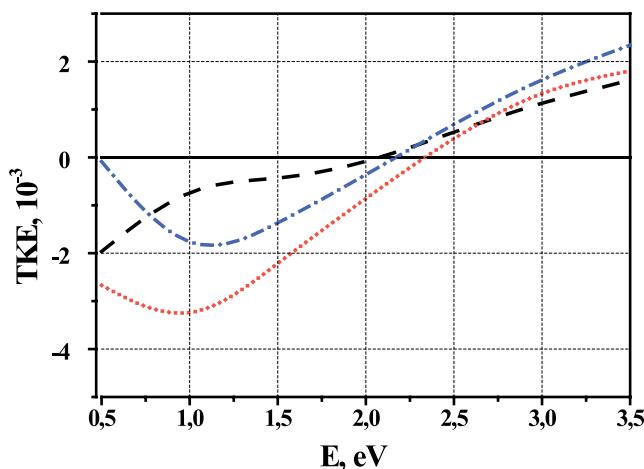


Рис. 1. Спектральные зависимости ЭЭК нанокомпозита $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$:
 при $L_A = 0.42$ и $L_B = 0.8$ – пунктирная линия (черный);
 при $L_A = 0.95$ и $L_B = 0.9$ – штрих-пунктирная линия (синий);
 при $L_A = 0.95$ и $L_B = 0.9$ – точки (красный).

В качестве другого примера использования СМГ выполнено моделирование спектров ЭЭК при концентрации магнитной компоненты $X = 48\%$ (выше порога переколяции). Спектры приведены на рис. 2, при этом $r_0 = 1.1$ нм и $R_s/R_{bulk} = -100$.

Необходимо подчеркнуть, что при больших концентрациях магнитной составляющей CoFeZr также основной вклад в спектральные кривые в ИК-области за счет внутризонных переходов вносят размер частиц и коэффициент R_s/R_{bulk} . Кроме того, резко меняется форма модельной кривой при малых изменениях размера частиц, что во многом связано с близостью к порогу переколяции.

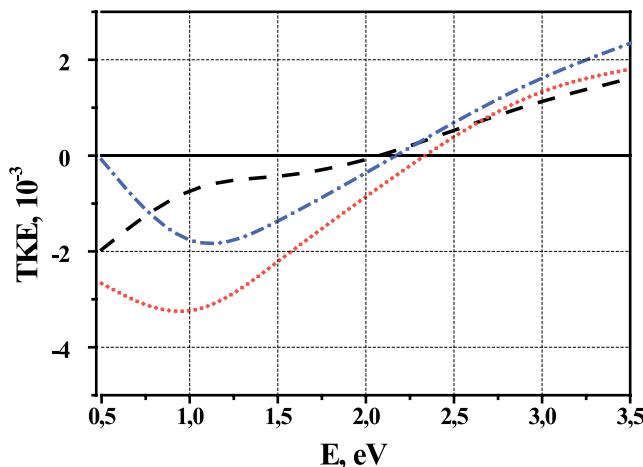


Рис. 2. Спектральные зависимости ЭЭК нанокомпозита $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$:
 при $L_A = 0.525$ и $L_B = 0.43$ – пунктирная линия (красный);
 при $L_A = 0.515$ и $L_B = 0.42$ – штрих-пунктирная линия (синий);
 при $L_A = 0.515$ и $L_B = 0.42$ – точки (черный).

Заключение

В ходе выполнения работы подробно рассмотрено симметризованное приближение Максвелла–Гарнетта как оптимальный метод исследования нанокомпозитов. При рас-

четах спектров ЭЭК варьировались значения форм-фактора (L), размера частиц (r_0) и коэффициента R_s/R_{bulk} . Если значения форм-фактора и размер частиц можно определить с помощью экспериментальных методов, то коэффициент R_s/R_{bulk} измерить нельзя. Выполненная нами оценка указанного параметра является важным научным результатом. Исследование спектральных зависимостей экваториального эффекта Керра нанокомпозитов показало, что размер частиц и коэффициент R_s/R_{bulk} вносят значительный вклад в ЭЭК в ИК-области спектра при больших и при малых концентрациях магнитной компоненты. Установлено, что форм-фактор при малых концентрациях существенно меняет ЭЭК в видимой области спектра, а при больших – во всем спектральном диапазоне.

Таким образом, исследование магнитооптических свойств нанокомпозитных материалов оптимальным методом эффективной среды – симметризованным приближением Максвелла–Гарнетта – является важной и перспективной областью исследования [11, 12]. В рамках данного метода можно разделить вклад различных механизмов в магнитооптические свойства нанокомпозитов. Методы эффективной среды позволяют, не разрушая структуру нанокомпозита, изучать их свойства, что найдет широкое применение в электронике и наноэлектронике [13–16].

Литература:

1. Фостер Л. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности. М.: Техносфера, 2008. 352 с.
2. Kulkarni S., Ramaswamy B., Horton E., Gangapuram S., Nacev A., Depireux D., Shimoji M., Shapiro B. Quantifying the motion of magnetic particles in excised tissue: Effect of particle properties and applied magnetic field // J. Magn. Magn. Mater. 2015. V. 393 P. 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.05.069>
3. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2009. 416 с.
4. Вызуллин С.А., Горобинский А.В., Калинин Е. Ю., Лебедева Е.В., Ситников А.В., Сарiev 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. Серия физическая. 2010. Т. 74. № 10. С. 1441–1443.
5. Niklasson G.A., Granqvist C.G. Optical properties and solar selectivity of coevaporated Co-Al₂O₃ composite // J. Appl. Phys. 1984. V. 55. P. 3382–3410. <https://doi.org/10.1063/1.333386>
6. Ganshina E., Kumaritova R., Bogoroditsky A., Kuzmichev M., Ohnuma S. J. Magneto-optical spectra of insulating granular system Co-Al-O // J. Magn. Magn. Mater. 1999. V. 203. № 1-3. P. 241–243. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00275-9](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00275-9)
7. Granovsky A., Kuzmichev M., Clerc J.P. The symmetrized Maxwell-Garnett approximation for magneto-optical spectra of ferromagnetic composites // J. Magn. Soc. Japan. 1999. V. 23. P. 382–386. <https://doi.org/10.3379/jmsjmag.23.382>
8. Sheng P. Theory for the dielectric function of granular composite media // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 45. P. 60–63. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.45.60>
9. Грановский А.Б., Кузьмичев М.В., Юрцов А.Н. Влияние квазиклассического размерного эффекта на оптические и магнитооптические свойства гранулированных сплавов // Вестник МГУ. Серия 3: Физика. Астрономия. 2000. № 6. С. 67–69.
10. Ландау Л., Лифшиц Е. Теоретическая физика: в 10-ти т. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2017. 661 с.
11. Юрцов А.Н. О распределении размера гранул в нанокомпозитах // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 1 С. 25–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2016-4-1-25-27>
12. Чаплыгин Ю.А. Нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 2016. 480 с.
13. Buravtsova V., Gan'shina E., Lebedeva E., Syr'ev N., Trofimenco I., Vyzulin S., Shipkova I., Phonghirun S., Kalinin Yu., Sitnikov A. The features of TKE and FMR in nanocomposites-semiconductor multilayers // Solid State Phenomena. 2011. V. 168-169. P. 533–536. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.168-169.533>
14. Sarkar T., Muscas G., Barucca G. Tunable single-phase magnetic behavior in chemically synthesized $\text{AFeO}_3\text{-MFe}_2\text{O}_4$ ($\text{A} = \text{Bi}$ or La , $\text{M} = \text{Co}$ or Ni) nanocomposites // Nanoscale. 2018. V. 10. № 48. P. 22990–23000. <https://doi.org/10.1039/C8NR06922K>
15. Rashid Z., Soleimani M., Ghahremanzadeh R. Effective surface modification of $\text{MnFe}_2\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{PMIDA}$ magnetic nanoparticles for rapid and high-density antibody immobilization // Appl. Surface Sci. 2017. V. 426. P. 1023–1029. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.07.246>

16. Hosseiniar A., Shariaty-Niassar M., Ebrahimi S., Moshref-Javadi M. Synthesis, characterization, and application of partially blocked amine-functionalized magnetic nanoparticles // *Langmuir*. 2017. V. 33. № 51. P. 14728–14737. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b02093>

References:

1. Foster L. Nanotechnology. Science, Innovation and Opportunities. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2008. 352 p., (in Russ.).
2. Kulkarni S., Ramaswamy B., Horton E., Gangapuram S., Nacev A., Depireux D., Shimoji M., Shapiro B. Quantifying the motion of magnetic particles in excised tissue: Effect of particle properties and applied magnetic field. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015; 393:243–252. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.05.069>
3. Gusev A.I. Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies. Moscow: Fizmatlit Publ., 2009. 416 p., (in Russ.).
4. Vyzulin S.A., Gorobinsky A.V., Kalinin E.Yu., Lebedeva E.V., Sitnikov A.V., Syr'ev N.E. Trofimenco 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; 74(10):1380–1382. <https://doi.org/10.3103/S1062873810100151>
5. Niklasson G.A., Granqvist C.G. Optical properties and solar selectivity of coevaporated Co-Al₂O₃ composite films. *J. Appl. Phys.* 1984; 55:3382–3410. <https://doi.org/10.1063/1.333386>
6. Ganshina E., Kumaritova R., Bogoroditsky A., Kuzmichev M., Ohnuma S. J. Magneto-optical spectra of insulating granular system Co-Al-O. *J. Magn. Magn. Mater.* 1999; 203(1-3):241–243. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00275-9](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00275-9)
7. Granovsky A., Kuzmichev M., Clerc J.P. The symmetrized Maxwell-Garnett approximation for magneto-optical spectra of ferromagnetic composites. *J. Magn. Soc. Japan.* 1999; 23:382–386. <https://doi.org/10.3379/jmsjmag.23.382>
8. Sheng P. Theory for the dielectric function of granular composite media. *Phys. Rev. Lett.* 1980; 45:60–63. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.45.60>
9. Granovsky A.B., Kuzmichev M.V., Yurasov A.N. The influence of the semiclassical size effect on the optical and magneto-optical properties of granular alloys. *Vestnik MGU. Fizika. Astronomiya* = Moscow University Physics Bulletin. 2000; 6:67–69., (in Russ.).
10. Landau L., Lifshits E. Theoretical physics. V. 8. Electrodynamics of continuous media. Moscow: Fizmatlit Publ., 2017. 661 p., (in Russ.).
11. Yurasov A.N. About distribution on the granule size in nanocomposites. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2016; 4(1):25–27. (in Russ.). <https://doi.org/10.3236/2500-316X-2016-4-1-25-27>
12. Chaplygin Yu.A. Nanotechnology in electronics. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2016. 480 p., (in Russ.).
13. Buravtsova V., Gan'shina E., Lebedeva E., Syr'ev N., Trofimenco I., Vyzulin S., Shipkova I., Phonghirun S., Kalinin Yu., Sitnikov A. The features of TKE and FMR in nanocomposites- semiconductor multilayers. *Solid State Phenomena*. 2011; 168–169:533–536. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.168-169.533>
14. Sarkar T., Muscas G., Barucca G. Tunable single-phase magnetic behavior in chemically synthesized AFeO₃-MFe₂O₄ (A = Bi or La, M = Co or Ni) nanocomposites. *Nanoscale*. 2018; 10(48):22990–23000. <https://doi.org/10.1039/C8NR06922K>
15. Rashid Z., Soleimani M., Ghahremanzadeh R. Effective surface modification of MnFe₂O₄@SiO₂@PMIDA magnetic nanoparticles for rapid and high-density antibody immobilization. *Appl. Surface Sci.* 2017; 426:1023–1029. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.07.246>
16. Hosseiniar A., Shariaty-Niassar M., Ebrahimi S., Moshref-Javadi M. Synthesis, characterization, and application of partially blocked amine-functionalized magnetic nanoparticles. *Langmuir*. 2017; 33(51):14728–14737. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b02093>

Об авторах:

Яшин Максим Михайлович, ассистент кафедры физики МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1). ResearcherID G-6809-2017, Scopus Author ID 57191628251, <https://orcid.org/0000-0001-8022-935>

Мирзокулов Хотам Бахтиер угли, ассистент кафедры «Телекоммуникационный инжиниринг» Самаркандского филиала Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий (100200, Узбекистан, Ташкент, ул. Амира Темура, д. 108).

About the authors:

Maksim M. Yashin, Assistant of Professor of the Chair of Physics, Bauman Moscow State Technical University (5, Build. 1, 2nd Baumanskaya st., Moscow 1105005, Russia). ResearcherID G-6809-2017, Scopus Author ID 57191628251, <https://orcid.org/0000-0001-8022-935>

Hotam Bakhtiyorugli Mirzokulov, Assistant of Professor of the Chair «Telecommunications Engineering», Samarkand branch of Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi (108, Amir Temur st., Tashkent 100200, Uzbekistan).

Для цитирования: Яшин М.М., Мирзокулов Х.Б. Симметризованное приближение Максвелла–Гарнетта как эффективный метод исследования нанокомпозитов // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 4. С. 92–100. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-92-100>

For citation: Yashin M.M., Mirzokulov H.B. Symmetrized Maxwell–Garnett approximation as an effective method for studying nanocomposites. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019; 7(4):92-100, (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-92-100>

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС 77-74578 от 14 декабря 2018 г.

Дата опубликования 31 июля 2019 г.

МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Москва, пр. Вернадского, 78.

<http://rtj-mirea.ru>