

УДК 537.632

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-49-57>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Влияние размерных эффектов и распределения гранул по размерам на оптические и магнитооптические свойства нанокомпозитов

А.Н. Юрасов ^{1, @},
М.М. Яшин ^{1, 2},
И.В. Гладышев ¹,
Д.В. Семенова ¹,
Е.А. Ганьшина ³,
Е.С. Каназакова ¹

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005 Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

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

Резюме. В работе экспериментально и теоретически исследуются спектральные зависимости экваториального эффекта Керра (ЭЭК). Получены результаты для неотожженных и отожженных образцов при соответствующем разбросе размера гранул. Выяснено, что термомагнитный отжиг приводит к росту величины ЭЭК в магнитных наноструктурах, при этом наиболее заметные изменения величины эффекта наблюдались в диапазоне средних и больших концентраций магнитной компоненты в видимой области спектра. Показана целесообразность использования приближения эффективной среды для расчета магнитооптических эффектов в гранулированных системах с учетом распределения по размерам гранул в рамках логнормального распределения. На основании данного подхода объяснены основные особенности оптических и магнитооптических свойств нанокомпозитов на примере $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$. Все расчеты выполнены в приближении Бруггеманна, которое эффективно описывает свойства наноструктур в области средних концентраций. Размерные эффекты ярко проявляются в нанокомпозитах и оказывают существенное влияние на их оптические и магнитооптические свойства, особенно в ИК области спектра, что связано с внутризонными переходами. Учет распределения частиц по размерам позволяет существенно улучшить описание таких перспективных неоднородных наноструктур. Решенная задача очень важна и актуальна как с фундаментальной точки зрения – исследование магнитооптических, оптических и транспортных явлений в нанокомпозитах, так и с точки зрения больших возможностей для применения в современной электронике и нанoeлектронике. Учет размерных эффектов и разброса по размерам частиц позволяет находить новые перспективные функциональные материалы, управлять их свойствами в широком спектральном диапазоне.

Ключевые слова: магнитные нанокомпозиты, экваториальный эффект Керра, методы эффективной среды, размерный эффект, логнормальное распределение

• Поступила: 23.12.2020 • Доработана: 25.03.2021 • Принята к опубликованию: 01.04.2021

Для цитирования: Юрасов А.Н., Яшин М.М., Гладышев И.В., Семенова Д.В., Ганьшина Е.А., Каназакова Е.С. Влияние размерных эффектов и распределения гранул по размерам на оптические и магнитооптические свойства нанокомпозитов. *Российский технологический журнал*. 2021;9(3):49–57. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-49-57>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Influence of size effects and granule distribution by size on optical and magneto-optical properties of nanocomposites

Alexey N. Yurasov ^{1,@},
Maxim M. Yashin ^{1,2},
Igor V. Gladyshev ¹,
Darya V. Semyonova ¹,
Elena A. Gan'shina ³,
Ekaterina S. Kanazakova ¹

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

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

Abstract. In this paper, the spectral dependences of the transverse Kerr effect (TKE) are studied experimentally and theoretically. The results are obtained for deposited and annealed samples with a corresponding variation in the size of the granules. It was found that thermomagnetic annealing leads to an increase in the TKE value in magnetic nanostructures, while the most noticeable changes in the effect value were observed in the range of medium and high concentrations of the magnetic component in the visible region of the spectrum. The expediency of using the effective medium approach for calculating magneto-optical effects in granular systems, taking into account the size distribution of granules within the lognormal distribution of granules, is shown. Based on this approach, the main features of the optical and magneto-optical properties of nanocomposites are explained by the example of $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})\text{X}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-X}$. All calculations are performed in the Bruggemann approximation, which effectively describes the properties of nanostructures in the region of average concentrations. Size effects are clearly manifested in nanocomposites and have a significant impact on the optical and magneto-optical properties of nanocomposites, especially in the IR region of the spectrum, which is associated with intraband transitions. Taking into account the particle size distribution makes it possible to significantly improve the description of such promising inhomogeneous nanostructures. The solved problem is very important and relevant both from the fundamental point of view – the study of magneto-optical, optical and transport phenomena in nanocomposites – and from the point of view of the great possibilities of their application in modern electronics and nanoelectronics. Taking into account the size effects and the particle size dispersion makes it possible to find new promising functional materials and control their properties in a wide spectral range.

Keywords: magnetic nanocomposites, transverse Kerr effect, effective medium approach, size effect, lognormal distribution

• Submitted: 23.12.2020 • Revised: 25.03.2021 • Accepted: 01.04.2021

For citation: Yurasov A.N., Yashin M.M., Gladyshev I.V., Semyonova D.V., Gan'shina E.A., Kanazakova E.S. Influence of size effects and granule distribution by size on optical and magneto-optical properties of nanocomposites. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(3):49–57 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-49-57>

Financial disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Композитные материалы, состоящие из наноразмерных магнитных частиц, помещенных в диэлектрическую матрицу, представляют значительный интерес как для фундаментальной физики, так и для широкого спектра применений от нанотехнологий до космоса и медицины. Большое внимание, уделяемое в последнее время нанокompозитам, обусловлено следующими обнаруженными в этих материалах эффектами: туннельное магнитосопротивление, гигантский аномальный эффект Холла (АЭХ), сильный оптический и магнитооптический отклик [1–3]. Нанокompозитные материалы также обладают ярко выраженными нелинейными электрическими, оптическими и магнитооптическими свойствами [3]. Данные свойства существенным образом зависят от структуры сплава и микроструктуры, особенно от содержания металлических частиц, их размеров, расположения и т.п. Актуальность предлагаемого исследования обусловлена важностью изучения магнитооптических эффектов, дающих возможность исследовать структуру совершенно различных магнитных материалов, и, в дальнейшем, позволяющих искать новые материалы с выбранными параметрами, что может иметь широкое применение в электронике и особенно при решении современных задач нанoeлектроники. Также важно отметить, что в настоящее время опубликовано достаточное количество работ [см., например, 1, 2–5 и ссылки в этих работах], посвященных размерным эффектам, но в них не учитывалось влияния распределения по размерам гранул в нанокompозитах на оптические и магнитооптические спектры. Решение этой задачи – одна из основных целей данной работы.

ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Изучаемые образцы – пленки ферромагнитного сплава $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ и оксида алюминия на кремниевых подложках – были получены методом ионно-лучевого напыления. Рост нанокompозита $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ осуществлялся в среде аргона. Электронно-микроскопические структурные исследования полученных пленок показали, что композит $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ в плоскости подложки

представляет собой металлические гранулы, хаотически распределенные в диэлектрической матрице [1].

В эксперименте измерялся экваториальный эффект Керра (ЭЭК, на графиках ТКЕ) для нанокompозитов с различными атомными концентрациями магнитной компоненты (рис. 1 и 2) (подробности даны в [2]) в зависимости от энергии E падающей электромагнитной волны.

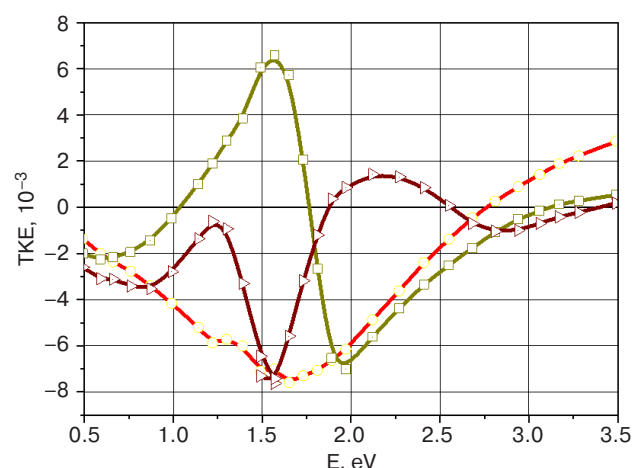


Рис. 1. Экспериментальные спектры ЭЭК $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ (неотожженный); атомные концентрации: 0.228 – круги, 0.462 – квадраты, 0.616 – треугольники

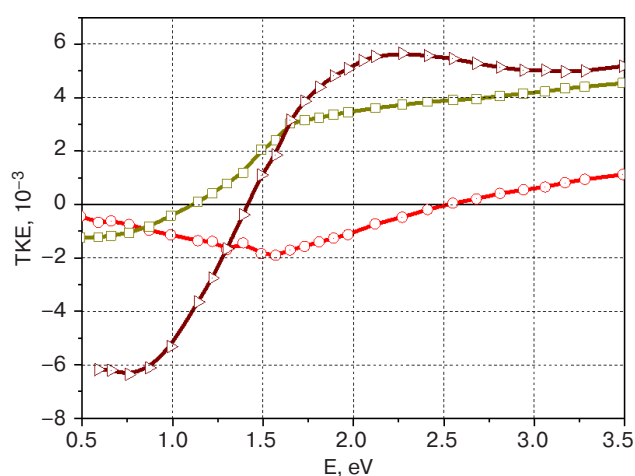


Рис. 2. Экспериментальные спектры ЭЭК $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ (отожженный); атомные концентрации: 0.234 – круги, 0.469 – квадраты, 0.621 – треугольники

Полученные экспериментальные спектры отличаются и от спектра металлического сплава $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ и от систем $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_X(\text{SiO}_2)_{1-X}$ и $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_X(\text{SiO}_2)_{1-X}$, исследованных ранее в работе [3], как по величине, так и по виду, особенно в ближней ИК области. Очевидно, что изменения внутренней микроструктуры сплава отражаются также и в спектральных зависимостях. На рис. 1 и 2 отличия спектров связаны с изменением магнитной структуры пленок после термомагнитной обработки [4]. Для отожженных образцов заметно усиление магнитооптического отклика для всего диапазона концентраций. Отметим, что для области с малыми концентрациями (0.228 и 0.234) влияние термомагнитного отжига не так существенно, как для области с большими концентрациями магнитной компоненты. Усиление эффекта, особенно в видимой области спектра, для малых концентраций отожженных образцов относительно неотожженных, в первую очередь, может быть вызвано ростом размера гранул.

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

При описании спектральных зависимостей наноструктур хорошо работает теория эффективной среды. Разработке данных методов посвящено значительное количество работ (см, например, [5–10]). Отметим сразу, что во всех экспериментальных исследованиях приведена атомная концентрация X_a , а для расчетов удобно перейти к объемной концентрации X металлической (ферромагнитной) компоненты. Таблица 1 для перевода приведена ниже.

Таблица 1. Соответствие атомной и объемной концентрации нанокompозита $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_X(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-X}$

Неотожженные образцы		Отожженные образцы	
X_a	X	X_a	X
0.185	0.0624	0.177	0.0594
0.234	0.0823	0.228	0.0798
0.287	0.1056	0.28	0.1024
0.343	0.1328	0.336	0.1293
0.385	0.1552	0.378	0.1513
0.399	0.1630	0.392	0.1591
0.413	0.1711	0.406	0.1671
0.469	0.2058	0.462	0.2013
0.524	0.2442	0.504	0.2297
0.562	0.2735	0.556	0.2687
0.621	0.3247	0.616	0.3201

Наиболее интересен случай средних концентраций вблизи перколяционного перехода, поэтому можно описывать оптические и магнитооптические

свойства нанокompозитов в приближении Бруггеманна [1, 5]. Нанокompозит заменяется средой с эффективными свойствами.

Рассмотрим вклад размерных эффектов в спектры нанокompозитов. Учитывая [1], отметим, что размеры металлических гранул r связаны с временем свободного пробега электронов в грануле (τ_{part}) и в массивном образце (τ_{bulk}) (v_f – скорость Ферми). Оценим величину r :

$$r = \frac{v_f \tau_{\text{bulk}} \tau_{\text{part}}}{\tau_{\text{bulk}} - \tau_{\text{part}}}. \quad (1)$$

Эффект будет заметным, если величина r имеет порядок, равный нескольким нанометрам. В этом случае можно рассматривать квазиклассический размерный эффект и для диагональных компонент тензора диэлектрической проницаемости (ТДП) металлической компоненты (оптические свойства) с учетом размерного эффекта запишем [10]:

$$\epsilon_{\text{mod}} = \epsilon + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{bulk}})} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{part}})}, \quad (2)$$

где ϵ – диагональная компонента тензора ТДП металлической компоненты без учета размерного эффекта; ω – частота электромагнитного излучения; ω_p – плазменная частота, а недиагональная компонента ТДП металлической компоненты с учетом размерного эффекта (магнитооптические свойства) будет иметь вид:

$$\gamma_{\text{mod}} = \gamma + \frac{4\pi\sigma_{xy}^{\text{bulk}}(0)/\tau_{\text{bulk}}^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{bulk}})^2} - \frac{4\pi\sigma_{xy}^{\text{gr}}(0)/\tau_{\text{part}}^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{part}})^2}, \quad (3)$$

где γ – недиагональная компонента тензора ТДП металлической компоненты металла без учета размерного эффекта; $\sigma_{xy}^{\text{bulk}} = 4\pi M_s R_{\text{bulk}} / \rho_{\text{bulk}}^{\text{gr}}$, $\sigma_{xy}^{\text{gr}} = 4\pi M_s R_{\text{gr}} / \rho_{\text{gr}}^2$ – проводимость массивного образца и гранулы соответственно; M_s – намагниченность насыщения; R_{gr} – коэффициент аномального эффекта Холла (АЭХ); R_{bulk} – коэффициент аномального эффекта Холла массивного образца металла; ρ_{gr} – удельное сопротивление гранулы, $\rho_{\text{gr}} = \rho_{\text{bulk}}(1 + l/r)$ и:

$$R_{\text{gr}} = R_{\text{bulk}} + 0.2R_s \frac{l}{r} \left(1 + \frac{l}{r}\right), \quad (4)$$

где l – длина свободного пробега электронов в металле; R_s – вклад рассеяния электронов в АЭХ.

Формулы приближения эффективной среды Бруггемана, из которых находятся диагональные и недиагональные компоненты тензора диэлектрической проницаемости эффективной среды $\epsilon = \epsilon^{\text{EMA}}$, $\gamma = \gamma^{\text{EMA}}$, имеют вид [1, 4]:

$$X \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon^{\text{EMA}})}{\varepsilon^{\text{EMA}} + (\varepsilon_1 - \varepsilon^{\text{EMA}})L} + (1-X) \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon^{\text{EMA}})}{\varepsilon^{\text{EMA}} + (\varepsilon_0 - \varepsilon^{\text{EMA}})L} = 0, \quad (6)$$

$$X \frac{(\gamma^{\text{EMA}} - \gamma)}{[\varepsilon^{\text{EMA}} + (\varepsilon_1 - \varepsilon^{\text{EMA}})L]^2} + (1-X) \frac{\gamma^{\text{EMA}}}{[\varepsilon^{\text{EMA}} + (\varepsilon_0 - \varepsilon^{\text{EMA}})L]^2} = 0. \quad (7)$$

В формулах (6), (7) L – форм-фактор частиц среды (мера эллиптичности) и с учетом размерного эффекта $\varepsilon_1 = \varepsilon_{\text{mod}}$; $\gamma = \gamma_{\text{mod}}$.

Важной задачей является учет распределения гранул по размерам, что не рассматривалось раньше. Очень часто (см., например, [12]) в нанокompозитах распределение по размерам частиц является логнормальным:

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma r} e^{-\frac{(\ln r - \bar{r})^2}{2\sigma^2}}, \quad (8)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение логнормального распределения; $\bar{r} = \ln(\langle r \rangle) - (\sigma^2 / 2)$, где $\langle r \rangle$ – математическое ожидание, соответствующее оптимальному среднему размеру гранул.

Распределение частиц по размерам в наших расчетах аппроксимировалось логнормальным распределением с параметрами $\langle r \rangle = 1.9$ нм, $\sigma = 0.21$.

Важно отметить, что в формулах Бруггеманна (6), (7) можно учесть усреднение диагональных компонент ТДП металлической компоненты с функцией распределения $\int_0^\infty f(r) \varepsilon_{\text{mod}} dr = \varepsilon_1$ и можно увидеть, что необходимо учесть распределение по размерам только для 3-го слагаемого в формуле (2):

$$\begin{aligned} & \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} f(r) \varepsilon_{\text{part}} dr = \\ &= \frac{w_p^2}{w} \left[w \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{f(r) dr}{w^2 + \left(\frac{1}{\tau_{\text{bulk}}} + \frac{v_f}{r} \right)^2} - \right. \\ & \left. - i \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{\left(\frac{1}{\tau_{\text{bulk}}} + \frac{v_f}{r} \right) f(r) dr}{w^2 + \left(\frac{1}{\tau_{\text{bulk}}} + \frac{v_f}{r} \right)^2} \right]. \end{aligned}$$

Аналогично учитываем усреднение недиагональных компонент ТДП металлической компоненты с функцией распределения $\gamma = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \gamma(r) f(r) dr$.

Подставим полученные результаты в формулу для нахождения ЭЭК на p -компоненте:

$$\delta_P = (A\gamma_1 + B\gamma_2) \frac{2 \sin 2\varphi}{A^2 + B^2}, \quad (8)$$

где $A = \varepsilon_2(2\varepsilon_1 \cos^2 \varphi - 1)$; $B = \cos^2 \varphi(\varepsilon_2^2 - \varepsilon_1^2 + 1) + \varepsilon_1 - 1$; φ – угол падения света (в нашем случае -70°); $\varepsilon^{\text{EMA}} = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2$; $\gamma^{\text{EMA}} = \gamma_1 - i\gamma_2$.

Данный подход является универсальным для любых наноструктур и позволяет моделировать оптические и магнитооптические спектры в рамках теории эффективной среды.

В ходе моделирования проанализируем изменение величины ЭЭК с учетом влияния распределения частиц по размерам при варьируемых значениях форм-фактора частиц L и коэффициента АЭХ R_s/R_{bulk} . Для подробного изучения спектральных зависимостей был выбран неотожженный образец со значением объемной концентрации $X = 0.3247$ и отоженный образец со значением объемной концентрации $X = 0.3201$.

На рис. 3 представлены теоретические спектры исследуемого неотожженного образца, рассчитанные по формуле (8), при различных значениях фактора формы L частиц с учетом размерного эффекта. Заметим, что изменение параметра L не приводит к значительному изменению формы спектра, а также его абсолютного значения.

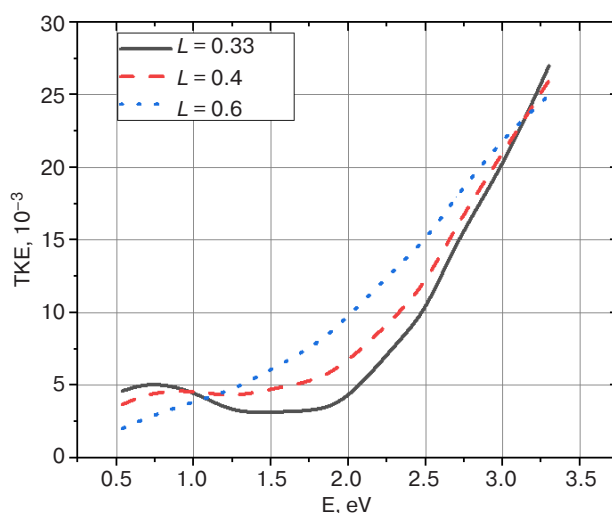


Рис. 3. Теоретические спектры ЭЭК для неотожженного нанокompозита $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ с $X = 0.3247$ при различных значениях форм-фактора L

На рис. 4 представлены теоретические спектры исследуемого отоженного образца, рассчитанные

по формуле (8), при различных значениях коэффициента АЭХ R_s/R_{bulk} с учетом размерного эффекта. При уменьшении значений коэффициента АЭХ заметен аномальный вид кривых, а при увеличении значений спектры по форме становятся стандартными для магнитооптического отклика нанокompозитов.

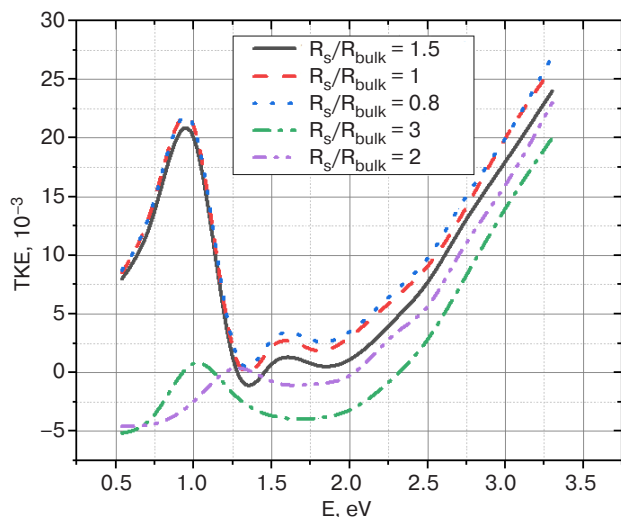


Рис. 4. Теоретические спектры ЭЭК для отожженного нанокompозита $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_X(Al_2O_3)_{1-X}$ с $X = 0.3201$ при различных значениях коэффициента АЭХ R_s/R_{bulk}

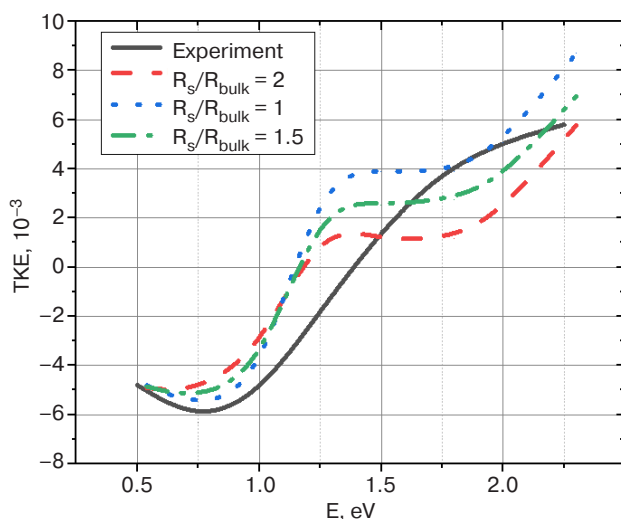


Рис. 5. Спектры ЭЭК для неотожженного нанокompозита $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_X(Al_2O_3)_{1-X}$ с $X = 0.3247$ (сплошная линия – экспериментальная зависимость; штриховая, пунктирная и штрих-пунктирная линии – теоретические спектры для различных значений коэффициента АЭХ R_s/R_{bulk})

Сравнивая расчетные спектры нанокompозитов с экспериментальными для неотожженного образца ($X = 0.3247$) на рисунке рис. 5 и отожженного образца ($X = 0.3201$) на рис. 6, можно видеть, что значение параметра размерного эффекта R_s/R_{bulk} лежит в диапазоне от 1.5 до 3 (в зависимости от микроструктуры нанокompозита), при этом частицы сферические ($L = 0.33$), что хорошо согласуется с экспериментом.

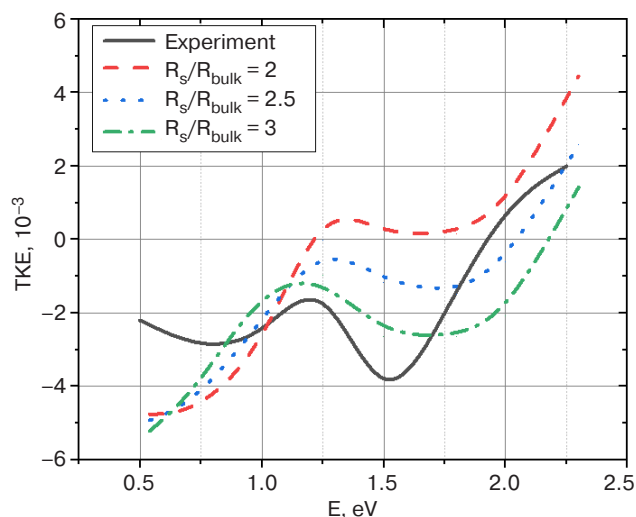


Рис. 6. Спектры ЭЭК для отожженного нанокompозита $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_X(Al_2O_3)_{1-X}$ с $X = 0.3201$ (сплошная линия – экспериментальная зависимость; штриховая, пунктирная и штрих-пунктирная линии – теоретические спектры для различных значений коэффициента АЭХ R_s/R_{bulk})

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведено теоретическое и экспериментальное исследование нанокompозитов. Основным результатом работы можно считать учет распределения по размерам гранул в рамках логнормального распределения как в оптических, так и в магнитооптических спектрах нанокompозитов, что позволило улучшить описание экспериментальных спектров на примере нанокompозита $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_X(Al_2O_3)_{1-X}$. В рамках теории эффективной среды с учетом распределения по размерам гранул подобраны оптимальные параметры, такие как форм-фактор $L = 0.33$ и соответствующий сферическим частицам размер гранул $r = 1.9$ нм, а также отношение коэффициента АЭХ $R_s/R_{bulk} = 3$, которые позволяют хорошо по порядку величины описать экспериментальные спектры. Важно отметить, что используемый подход можно применять для любых наноструктур.

В ходе моделирования при описании спектров ЭЭК мы учли усреднение компонент ТДП металлической компоненты с функцией распределения, что позволило достаточно хорошо описать экспериментальные данные. Решенная задача очень важна и актуальна как с фундаментальной – исследование магнитооптических, оптических и транспортных явлений в нанокompозитах, так и с точки зрения возможных применений в современной электронике и нанoeлектронике. Учет размерных эффектов и разброса по размерам частиц позволяет находить новые перспективные функциональные материалы, управлять их свойствами в широком спектральном диапазоне и использовать их в самых разных сферах человеческой деятельности [13–15].

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы «НИЧ-Гетеро-структура».

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Niklasson G.A., Granqvist C.G. Optical properties and solar selectivity of coevaporated Co-Al₂O₃ composite films. *J. Appl. Phys.* 1984;55(9):3382–3410. <https://doi.org/10.1063/1.333386>
2. Гусев А.И. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*. М.: Физматлит; 2009. 416 с. ISBN 978-5-9221-0582-8
3. Ганьшина Е.А., Вашук М.В., Виноградов А.Н. и др. Эволюция оптических и магнитооптических свойств нанокompозитов аморфный метал-диэлектрик. *ЖЭТФ*. 2004;125(5):1172–1182.
4. Юрасов А.Н., Семенова Д.В. Особенности экваториального эффекта Керра в отожженных и неотожженных нанокompозитах (CoFeZr)_x(Al₂O₃)_(1-x). В сб.: «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике»: сб. докладов конференции. М.: РТУ МИРЭА; 2019. Т. 1. С. 51–58.
5. Юрасов А.Н., Яшин М.М. Теория эффективной среды как инструмент анализа оптических свойств нанокompозитов. *Российский технологический журнал*. 2018;6(2):56–66. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-56-66>
6. Ландау Л., Лифшиц Е. *Теоретическая физика*. Т. 8. *Электродинамика сплошных сред*. М.: Физматлит; 2017. 661 с. ISBN 978-5-9221-1702-9
7. Granovsky A., Kuzmichev M., Clerc J.P. The symmetrised Maxwell-Garnett approximation for magneto-optical spectra of ferromagnetic composites. *J. Magn. Soc. Japan*. 1999;23(1–2):382–386. <https://doi.org/10.3379/jmsjmag.23.382>
8. Яшин М.М., Мирзокулов Х.Б. Симметризованное приближение Максвелла – Гарнетта как эффективный метод исследования нанокompозитов. *Российский технологический журнал*. 2019;7(4):92–100. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-92-100>
9. Ханикаев А., Грановский А., Клерк Ж.П. Влияние распределения гранул по размерам и притяжения между гранулами на порог перколяции в гранулированных сплавах. *Физика твердого тела*. 2002;44(9):1537–1540.
10. Yashin M.M., Yurasov A.N., Ganshina E.A., et al. Simulation of the spectra of the transverse Kerr effect of magnetic nanocomposites CoFeZr–Al₂O₃. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*. 2019;5(86):63–72. <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2019-5-63-72>
11. Фадеев Е., Блинов М., Гаршин В., Тарасова О., Ганьшина Е., Прудникова М., Прудников В., Lahderanta E., Рыльков В., Грановский А. Магнитные свойства нанокompозитов (Co₄₀Fe₄₀B₂₀)_x(SiO₂)_{100-x} вблизи порога перколяции. *Изв. АН СССР. Серия физич.* 2019;83(7):917–920. <https://doi.org/10.1134/S0367676519070159>

REFERENCES

1. Niklasson G.A., Granqvist C.G. Optical properties and solar selectivity of coevaporated Co-Al₂O₃ composite films. *J. Appl. Phys.* 1984;55(9):3382–3410. <https://doi.org/10.1063/1.333386>
2. Gusev A.I. *Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies*. Moscow: Fizmatlit; 2009. 416 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9221-0582-8
3. Gan'shina E.A., Vashuk M.V., Vinogradov A.N., et al. Evolution of optical and magneto-optical properties of amorphous metal-dielectric nanocomposites. *J. Exp. Theor. Phys.* 2004;98(5):1027–1036. <https://doi.org/10.1134/1.1767571> [Gan'shina E.A., Vashuk M.V., Vinogradov A.N. i dr. Evolyutsiya opticheskikh i magnitoopticheskikh svoystv nanokompозitov amorfny metal-dielektrik. *ZhETF* = *J. Exp. Theor. Phys.* 2004;125(5):1172–1182 (in Russ.).]
4. Yurasov A.N., Semenova D.V. Features of the equatorial Kerr effect in annealed and non-annealed nanocomposites (CoFeZr)_x(Al₂O₃)_(1-x). In: *Konferentsiya «Informatika i tekhnologii. Innovatsionnye tekhnologii v promyshlennosti i informatike» (Proc. of reports of the conference «Informatics and Technologies. Innovative technologies in industry and Informatics»)*. Moscow: RTU MIREA; 2019. V. 1, p. 51–58 (in Russ.).
5. Yurasov A.N., Yashin M.M. The effective medium theory as a tool for analyzing the optical properties of nanocomposites. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018;6(2):56–66 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-56-66>
6. Landau L., Lifshits E. *Teoreticheskaya fizika*. T. 8. *Elektrodinamika sploshnykh sred (Theoretical Physics*. V. 8. *Electrodynamics of continuous media*). Moscow: Fizmatlit; 2017. 661 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9221-1702-9
7. Granovsky A., Kuzmichev M., Clerc J.P. The symmetrised Maxwell-Garnett approximation for magneto-optical spectra of ferromagnetic composites. *J. Magn. Soc. Japan*. 1999;23(1–2):382–386. <https://doi.org/10.3379/jmsjmag.23.382>
8. 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>
9. Khanikaev A.B., Granovskii A.B., Clerc J.P. Influence of the size distribution granules and their attractive interaction on the percolation threshold in granulated alloys. *Phys. Solid State*. 2002;44(9):1611–1613. [Khanikaev A., Granovskii A., Klerk Zh.P. Vliyanie raspredeleniya granul po razmeram i prityazheniya mezhdu granulami na porog perkolyatsii v granulirovannykh splavakh. *Fizika tverdogo tela* = *Phys. Solid State*. 2002;44(9):1537–1540 (in Russ.).]

12. Домашевская Э.П., Ивков С.А., Ситников А.В., Стогней О.В., Козаков А.Т., Никольский А.В. Влияние относительного содержания металлической компоненты в диэлектрической матрице на образование и размеры нанокристаллов кобальта в пленочных композитах $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$. *Физика твердого тела*. 2019;61(2):211–219. <https://doi.org/10.21883/FIT.2019.02.47115.211>
13. Lima E., Tanaka T., Toyoda I. A novel low phase noise push-push oscillator employing dual-feedback sub-oscillators. *Progress In Electromagnetics Research M*. 2018;75:141–148. <http://dx.doi.org/10.2528/PIERM18080701>
14. Ткачева В.Р. Наноккомпозиты – будущее машиностроения. *Техника. Технологии. Инженерия*. 2016;1:37–40.
15. Медведева Н.В., Ипатова О.М., Иванов Ю.Д., Дрожжин А.И., Арчаков А.И. Нанобиотехнология и наномедицина. *Биомедицинская химия*. 2006;52(6):529–546.
10. Yashin M.M., Yurasov A.N., Ganshina E.A., et al. Simulation of the spectra of the transverse Kerr effect of magnetic nanocomposites $\text{CoFeZr-Al}_2\text{O}_3$. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*. 2019;5(86):63–72. <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2019-5-63-72>
11. Fadeev E., Blinov M., Garshin V., Tarasova O., Ganshina E., Prudnikova M., Prudnikov V., Lahderanta E., Rylkov V., Granovskii A. Magnetic properties of $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ nanocomposites near the percolation threshold. *Bull. RAS: Physics*. 2019;83(7):835–837. <https://doi.org/10.3103/S1062873819070153>
[Fadeev E., Blinov M., Garshin V., Tarasova O., Ganshina E., Prudnikova M., Prudnikov V., Lahderanta E., Ryl'kov V., Granovskii A. Magnitnye svoistva nanokompozitov $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ vblizi poroga perkolyatsii. *Izv. AN SSSR. Seriya fizich. = Bull. RAS: Physics*. 2019;83(7):917–920 (in Russ.).]
12. Domashevskaya E. P., Ivkov S. A., Sitnikov A. V., Stognei O. V., Kozakov A. T., Nikolskii A. V. The Influence of relative content of a metal component in a dielectric matrix on the formation and dimensions of cobalt nanocrystals in $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ film composites. *Phys. Solid State*. 2019;61(2):71–79. <https://doi.org/10.1134/S1063783419020112>
[Domashevskaya E.P., Ivkov S.A., Sitnikov A.V., Stognei O.V., Kozakov A.T., Nikol'skii A.V. Vliyanie otноситel'nogo soderzhaniya metallicheskoj komponenty v dielektricheskoj matritse na obrazovanie i razmery nanokristallov kobal'ta v plenochnykh kompozitakh $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$. *Fizika tverdogo tela = Phys. Solid State*. 2019;61(2):211–219 (in Russ.).]
13. Lima E., Tanaka T., Toyoda I. A novel low phase noise push-push oscillator employing dual-feedback sub-oscillators. *Progress In Electromagnetics Research M*. 2018;75:141–148. <http://dx.doi.org/10.2528/PIERM18080701>
14. Tkacheva V.R. Nanocomposites – the future of machine building. *Tekhnika. Tekhnologii. Inzheneriya = Technique. Technologies. Engineering*. 2016;(1):37–40 (in Russ.).
15. Medvedeva N.V., Ipatova O.M., Ivanov Yu.D., Drozhzhin A.I., Archakov A.I. Nanobiotechnology and nanomedicine. *Biochem. Moscow Suppl. Ser. B: Biomed. Chem*. 2007;1:114–124. <https://doi.org/10.1134/S1990750807020023>
[Medvedeva N.V., Ipatova O.M., Ivanov Yu.D., Drozhzhin A.I., Archakov A.I. Nanobiotekhnologiya i nanomeditsina. *Biomeditsinskaya khimiya = Biochem. Moscow Suppl. Ser. B: Biomed. Chem*. 2006;52(6):529–546 (in Russ.).]

Об авторах

Юрасов Алексей Николаевич, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры наноэлектроники, заместитель директора Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: alexey_yurasov@mail.ru. ResearcherID: M-3113-2016, Scopus Author ID: 6602974416.

Яшин Максим Михайлович, старший преподаватель кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); ассистент кафедры «Физика» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5). E-mail: ihkamax@mail.ru. ResearcherID: G-6809-2017, Scopus Author ID: 57191628251, 57210607470, <https://orcid.org/0000-0001-8022-9355>

Гладышев Игорь Васильевич, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: i_gladyshev@mirea.ru. ResearcherID: N-1535-2016, Scopus Author ID: 6701612553, <https://orcid.org/0000-0002-7627-4978>

Семенова Дарья Владимировна, магистр кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: semenovadar.ya@mail.ru. Scopus Author ID: 57212546857.

Ганьшина Елена Александровна, д.ф.-м.н., профессор кафедры магнетизма физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, ГСП-1). E-mail: eagan@mail.ru. ResearcherID: Y-9188-2018, Scopus Author ID: 55664489100, <https://orcid.org/0000-0002-6709-158X>

Каназаква Екатерина Сергеевна, бакалавр кафедры наноэлектроники, Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454 Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kanazakova@mail.ru.

About the authors

Alexey N. Yurasov, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Department of Nanoelectronics, Deputy Director of the Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: alexey_yurasov@mail.ru. ResearcherID: M-3113-2016, Scopus Author ID: 6602974416.

Maxim M. Yashin, Senior teacher, Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Assistant Lecturer, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (5, str. 1, 2-ya Baumanskaya ul., Moscow, 105005 Russia). E-mail: ihkamax@mail.ru. ResearcherID: G-6809-2017, Scopus Author ID: 57191628251, 57210607470, <https://orcid.org/0000-0001-8022-9355>

Igor V. Gladyshev, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: i_gladyshev@mirea.ru. ResearcherID: N-1535-2016, Scopus Author ID: 6701612553, <https://orcid.org/0000-0002-7627-4978>

Darya V. Semyonova, Student, Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: semenovadar.ya@mail.ru. Scopus Author ID: 57212546857.

Elena A. Gan'shina, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Department of Magnetism, Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University (GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991 Russia). E-mail: eagan@mail.ru. ResearcherID: Y-9188-2018, Scopus Author ID: 55664489100, <https://orcid.org/0000-0002-6709-158X>

Ekaterina S. Kanazakova, Student, Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kanazakova@mail.ru.