

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-2-59-66>



УДК 537.632.5

## Учёт влияния распределения размера гранул в нанокompозитах

А.Н. Юрасов<sup>1,@</sup>

М.М. Яшин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва 105005, Россия

@Автор для переписки, e-mail: alexey\_yurasov@mail.ru

В данной работе обсуждается влияние распределения размера гранул  $r$  в нанокompозитах на физические свойства в рамках квазиклассического размерного эффекта. Обсуждены методы эффективной среды для описания нанокompозитов. Отмечается и обсуждается вклад различных механизмов, влияющих на оптические и магнитооптические свойства подобных структур, особенно в ИК области спектра, где наиболее ярко проявляется квазиклассический размерный эффект. В рамках модели Друде-Лоренца проведено описание вклада размерного эффекта в диагональные и недиагональные компоненты тензора диэлектрической проницаемости эффективной среды, при этом рассматривается характерное для многих наноструктур логнормальное распределение по размерам гранул. На основании данного подхода получены зависимости среднеквадратического отклонения от значения интеграла как функции среднего размера гранул. Исходя из условия нормировки, было аналитически определено численное значение среднеквадратического отклонения значений  $r$  и средний размер частиц. Также в работе обсуждается фундаментальная значимость полученных результатов – возможность применения данного подхода для всех возможных распределений. Найденное значение среднего размера гранул нанокompозита позволяет с лучшей точностью проводить моделирование различных, и в первую очередь, оптических и магнитооптических свойств нанокompозитных структур с помощью известных методов в рамках приближения эффективной среды, что особенно важно для описания перколяционного перехода

в нанокompозитах. Решаемая задача важна и актуальна, так как в подобных магнитных нанокompозитах реализуется множество интересных и важных эффектов, таких как магнитооптический эффект Керра, аномальный эффект Холла, гигантское магнетосопротивление и многие другие. Полученные результаты позволяют лучше описывать материалы, имеющие широкое применение в современной электронике и наноэлектронике.

**Ключевые слова:** магнитные нанокompозиты, модель Друде-Лоренца, среднеквадратическое отклонение, методы эффективной среды, размерный эффект, порог перколяции, логнормальное распределение.

**Для цитирования:** Юрасов А.Н., Яшин М.М. Учёт влияния распределения размера гранул в нанокompозитах. *Российский технологический журнал*. 2020;8(2):59-66. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-2-59-66>

## Accounting for the influence of granule size distribution in nanocomposites

Alexey N. Yurasov<sup>1,@</sup>  
Maksim M. Yashin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia

@Corresponding author, e-mail: alexey\_yurasov@mail.ru

This paper discusses the effect of the distribution of the granules size in nanocomposites on physical properties within the framework of the quasi-classical size effect. Methods of an effective medium for describing nanocomposites are discussed. This paper also notes and discusses the contribution of various mechanisms that affect the optical and magneto-optical properties of such structures, especially in the IR region of the spectrum, where the quasi-classical dimensional effect is most pronounced. The Droude-Lorentz model describes the contribution of the dimensional effect to the diagonal and non-diagonal components of the effective medium's permittivity tensor. The lognormal distribution of the granule size characteristic of many nanostructures is considered. Based on this approach, the dependences of the standard deviation on the value of the integral as a function of the average size of the granules were obtained. Based on the normalization condition, the numerical value of the standard deviation of the  $r$  values and the average particle size were analytically determined. This paper also discusses the fundamental significance of the results obtained – the possibility of applying this approach to all possible distributions. The found value of the average size of nanocomposite granules makes it possible to model various properties of nanocomposite structures, first of all, optical and magneto-optical properties, with the help of known methods within the framework of the effective medium approximation. This is especially important for describing the percolation transition in nanocomposites. The problem being solved is important and relevant, since many interesting and important effects are realized in such

magnetic nanocomposites, such as the magneto-optical Kerr effect, the anomalous Hall effect, the giant magnetoresistance, and many others. The results obtained allow us to better describe materials that are widely used in modern electronics and nanoelectronics.

**Keywords:** magnetic nanocomposites, the Drude-Lorentz model, standard deviation, effective energy methods, size effect, percolation threshold, and lognormal distribution.

**For citation:** Yurasov A.N., Yashin M.M. Accounting for the influence of granule size distribution in nanocomposites. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(2):59-66 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-2-59-66>

## Введение

В настоящее время весьма актуальным является исследование нанокомпозитов, и в первую очередь магнитных нанокомпозитов, представляющих собой такие неоднородные структуры, в которых ферромагнитные компоненты помещены в слабомагнитную матрицу [1–5]. Для расчёта различных спектральных зависимостей нанокомпозитов удобно использовать теорию эффективной среды [6–8]. На сегодняшний день существует несколько методов описания эффективной среды подобных структур. Данные методы применяются в зависимости от объёмной концентрации  $X$  ферромагнитной компоненты. При малых значениях  $X$  используется приближение Максвелла – Гарнетта, при средних концентрациях – приближение Бруггеманна, а в широком диапазоне концентраций с учётом вероятностного подхода – симметризованное приближение Максвелла – Гарнетта. Важно отметить, что данные методы не работают при перколяционном переходе, когда кардинально меняются физические свойства нанокомпозитов (порогом перколяции называется такая концентрация металлической компоненты  $X$ , при которой происходит переход металл-диэлектрик) [9].

Основным определением методов эффективной среды является следующее: частица, находящаяся в эффективной среде, не может быть обнаружена экспериментально, используя электромагнитное излучение ограниченного диапазона длин волн, т.е. другими словами, поглощение частицы должно быть таким же, как если бы она была заменена эффективной средой с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{eff}$ , характеризующей эту среду в целом.

Стоит отметить важность и актуальность данной работы, так как в подобных магнитных нанокомпозитах возможно множество интересных транспортных явлений, магнитооптических эффектов, таких как магнитооптические эффекты Керра, эффект Холла, магнетосопротивление и др., что позволяет широко использовать подобные структуры, и в первую очередь, в современной электронике и нанoeлектронике [10–12]. В данной работе ставится актуальная задача: изучить влияние распределения размера частиц нанокомпозита на его физические свойства.

## Результаты и их обсуждение

Для полного описания оптических и магнитооптических свойств нанокомпозитных структур необходимо учитывать различные параметры, характеризующие исследуемые наноструктуры. Так, например, как известно из работ [13–16], размеры гранул  $r$  металла (ферромагнетика) зависят от времени свободного пробега электронов в грануле ( $\tau_{part}$ ),

времени в массивном образце ( $\tau_{bulk}$ ) и  $v_f$  – скорости Ферми. Таким образом, зная состав исследуемого нанокompозита, можно оценить характерный размер  $r$ :

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

Чтобы эффект был значительным, из данной формулы, зная характерные величины для ферромагнитных металлов, можно сделать оценку, что  $r$  является величиной порядка нескольких нанометров (2–4 нм), т.е. в этом случае можно говорить о квазиклассическом размерном эффекте. Тогда, принимая во внимание, что частотная зависимость внутризонной проводимости (именно она характерна для ИК диапазона спектра) описывается в рамках модели Друде-Лоренца, можно записать выражение для диагональных компонент тензора эффективной диэлектрической проницаемости (ТДП)  $\varepsilon_{eff}$  с учетом размерного эффекта [15]:

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

где  $\omega$  – частота электромагнитного излучения,  $\omega_p$  – плазменная частота. Данные компоненты описывают оптические свойства среды.

Аналогичным образом, для недиагональных компонент ТДП, описывающих магнитооптические свойства среды, можно учесть размерный эффект как:

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

где  $\sigma_{xy}^{bulk} = 4\pi M_s R_{bulk} / \rho_{bulk}^2$ ;  $\sigma_{xy}^{gr} = 4\pi M_s R_{gr} / \rho_{gr}^2$ ,  $M_s$  – намагниченность насыщения;  $R_{gr}$  – коэффициент аномального эффекта Холла (АЭХ),  $\tau_{gr}$  – время свободного пробега в грануле,  $\rho_{bulk}$  – удельное сопротивление массивного образца,  $\rho_{gr}$  – удельное сопротивление гранулы. Размер частиц оказывает влияние как на коэффициент аномального эффекта Холла, так и на удельное сопротивление. Последнее дается выражением  $\rho_{gr} = \rho_{bulk}(1+l/r)$ , и влияние размерного эффекта на коэффициент аномального эффекта Холла гранул можно записать в виде:

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

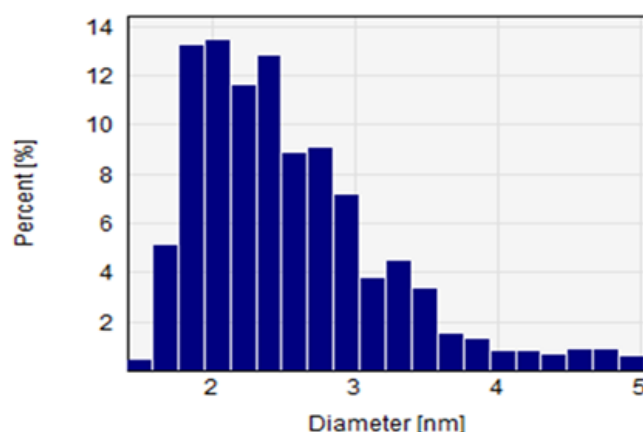
где  $R_s$  – значение коэффициента аномального эффекта Холла материала поверхности гранул.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что, зная значения объёмной концентрации  $X$  ферромагнитной компоненты и состав нанокompозита, имеется возможность моделировать различные свойства подобных структур. Однако, как видно из формул (1)–(4), данные приближения не учитывают возможное распределение гранул по размерам. По имеющимся многочисленным экспериментальным

данным, например [17], известно, что для многих структур характерное распределение по размерам частиц является логнормальным распределением (рис. 1):

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}r} e^{-\frac{(\ln r - \bar{r})^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратического отклонения,  $\bar{r}$  – параметр распределения, соответствующий среднему размеру гранул.



**Рис. 1.** Характерная зависимость распределения размера частиц нанокompозита (Diameter) от их процентного соотношения (Percent) для нанокompозита  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  [17].

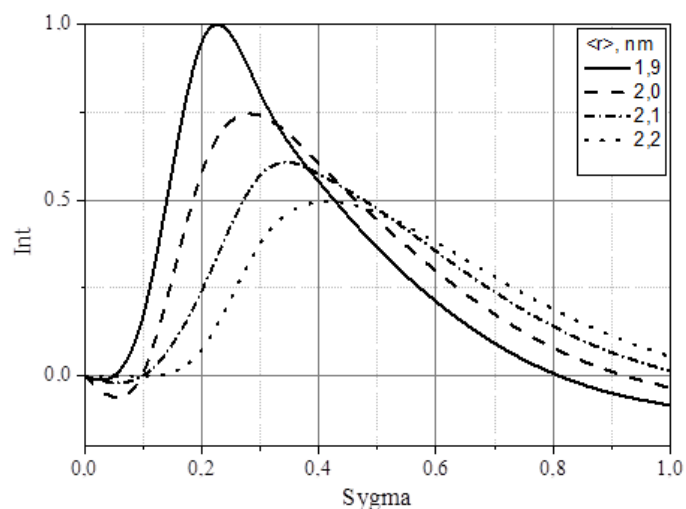
Важно отметить, что данный подход является универсальным для любых нанокompозитов и других наноструктур, а рис. 1 является иллюстративным – для примера рассматривается нанокompозит  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ . Дальнейший учёт распределения (5) сводится к следующему определённому интегралу:

$$\int_a^b f(r)dr = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_a^b \frac{e^{-\frac{(\ln r - \bar{r})^2}{2\sigma^2}}}{r} dr = \frac{\bar{r} - \ln r}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(\bar{r} - \ln r)^2}{2\sigma^2}} \Big|_a^b. \quad (6)$$

Подставив, исходя из рис. 1, известные нам пределы интегрирования от 1.5 до 5, по формуле Ньютона-Лейбница получается решение:

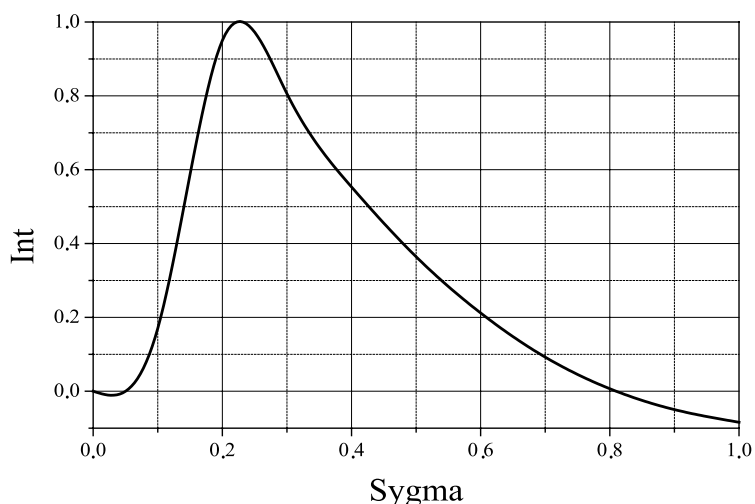
$$\int_{1.5}^5 f(r)dr = \frac{\bar{r} - \ln 5}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(\bar{r} - \ln 5)^2}{2\sigma^2}} - \frac{\bar{r} - \ln 1.5}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(\bar{r} - \ln 1.5)^2}{2\sigma^2}}. \quad (7)$$

Таким образом, расчёт данного интеграла сводится к нахождению среднеквадратического отклонения  $\sigma$  в зависимости от размера гранул, при этом, как известно, интеграл от плотности вероятности должна равняться единице, исходя из условия нормировки. Учитывая (7), был построен график зависимости (рис. 2) значения интеграла  $\int_{1.5}^5 f(r)dr$  от  $\sigma$  при различных значениях  $r$ .



**Рис. 2.** Зависимость значения интеграла (Int) от среднеквадратического отклонения (Sigma) при различных средних значениях гранул.

Затем, исходя из рис. 2, было найдено значение среднеквадратического отклонения при котором плотность вероятности данного распределения равна 1:  $\sigma = 0.21$ , при среднем размере гранул - 1.9 нм (рис. 3). Данное значение хорошо согласуется с экспериментальными данными [17].



**Рис. 3.** Зависимость значения интеграла (Int) от среднеквадратического отклонения (Sigma) при среднем значении гранул 1.9 нм.

Таким образом, исходя из формул (5)–(7), были получены параметры исследуемых образцов, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными: средний размер гранул – 1.9 нм и значение  $\sigma = 0.21$ . В связи с этим, стоит отметить, что полученные результаты важны для вычислений по формулам (1)–(4) различных оптических и магнитооптических свойств нанокompозитов в рамках методов эффективной среды.

### Заключение

Среднеквадратическое отклонение является важной величиной, которая показывает рассеивание значений случайной величины относительно её математического ожидания,



что важно при описании размерных эффектов в наноструктурах. Рассмотренный подход справедлив для любых наноструктур. В связи с этим, результаты данной работы представляют важный интерес для дальнейшего исследования различных свойств наноструктур и нахождения перспективных материалов с заданными свойствами, что представляет, как фундаментальный, так и практический интерес в широкой области применения, в первую очередь, для материалов современной электроники.

### Благодарность:

Работа выполнена при поддержке гранта Университетский по теме «НИЧ-Гетероструктура».

### Литература:

1. Gracheva I.E., Olchowik G., Gareev K.G. et al. Investigations of nanocomposite magnetic materials based on the oxides of iron, nickel, cobalt and silicon dioxide. *J. Phys. Chem. Sol.* 2013;74(5):656-663. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2012.12.021>
2. Ганьшина Е.А., Вашук М.В., Виноградов А.Н., Грановский А.Б., Гушин В.С., Щербак П.Н., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Ким Ч.О., Ким Ч.Г. Эволюция оптических и магнитооптических свойств в нанокompозитах аморфный металл – диэлектрик. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2004;125(5):1172–1183.
3. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. Физика низкоразмерных систем: учебное пособие. СПб.: Наука, 2001. 160 с. ISBN 5-02-024966-1
4. Nalwa H.S. Handbook of thin film materials: Nanomaterials and magnetic thin films. Academic Press, 2002. V. 5. 633 p. ISBN 978-0-12-512908-4.
5. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2009. 416 с. ISBN 978-5-9221-0582-8
6. 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>
7. Ландау Л., Лифшиц Е. Курс теоретической физики. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука. 2017. 661 с.
8. Granovsky A., Kuzmichev M., Clerc J.P. The symmetrised Maxwell-Garnett approximation for magneto-optical spectra of ferromagnetic composites. *J. Magn. Soc. Japan*. 1999;23:382-386. <https://doi.org/10.3379/jmsjmag.23.382>
9. Gan'shina E., Garshin V., Perova N., Zykov G., Aleshnikov A., Kalinin Yu., Sitnikov A. Magneto-optical properties of nanocomposites ferromagnetic-carbon. *J. Magn. Magn. Mat.* 2019;470:135-138. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.11.038>
10. 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, серия физическая*. 2010;74(10):1441-1443.
11. Алешников А.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Федосов А.Г. Магнитные свойства многослойных структур на основе нанокompозитов  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ . *Перспективные материалы*. 2012;5:68–75.
12. 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 multilayers. *Solid State Phenomena*. 2011;168–169:533-536. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.168-169.533>
13. 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>
14. 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;44(9):1537-1540.
15. Yashin M.M., Yurasov A.N., Ganshina E.A., Garshin V.V. Simulation of the spectra of the transverse Kerr effect of magnetic nanocomposites  $\text{CoFeZr}-\text{Al}_2\text{O}_3$ . *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия естественные науки*. 2019;86(5):63-72. <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2019-5-63-72>
16. Fadeev E., Blinov M., Garshin V., Tarasova O., Ganshina E., Prudnikova M., Prudnikov V., Lahderanta E., Ryl'kov V., and Granovsky A. Magnetic properties of  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  nanocomposites near the percolation threshold. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2019;83(7):835-837. <https://doi.org/10.3103/S1062873819070153>
17. 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/FTT.2019.02.47115.211>

## References:

1. Gracheva I.E., G. Olchowik K.G. Gareev et al. Investigations of nanocomposite magnetic materials based on the oxides of iron, nickel, cobalt and silicon dioxide. *J. Phys. Chem. Sol.* 2013;74(5):656-663. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2012.12.021>
2. Ganshina E.A., Vashuk M.V., Vinogradov A.N., Granovsky A.B., Gushchin V.S., Shcherbak P.N., Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V., Kim Ch.O., Kim Ch.G. Evolution of optical and magneto-optical properties of amorphous metal-insulator nanocomposites. *Zhurnal eksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki = J. Exp. Theor. phys.* 2004;98(5):1027-1036. <https://doi.org/10.1134/1.1767571>
3. Shik A.Ya., Bakueva L.G., Musikhin S.F., Rykov S.A. *Fizika nizkorazmernykh sistem: uchebnoe posobie* (Physics of low-dimensional systems). Sankt Peterburg: Nauka; 2001. 160 p. (in Russ.) 5-02-024966-1
4. Nalwa H.S. Handbook of thin film materials: Nanomaterials and magnetic thin films. Academic Press; 2002. V. 5. 633 p. ISBN 978-0-12-512908-4.
5. Gusev A.I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* (Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies). Moscow: Fizmatlit; 2009. 416 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9221-0582-8
6. Yurasov A.N., Yashin M.M. Theory of the effective medium as a tool for analyzing the optical properties of nanocomposites. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russ. Technol. J.* 2018;6(2):56-66 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-56-66>
7. Landau L., Lifshits E. *Kurs teoreticheskoy fiziki* (Course of theoretical physics). Vol. 8. *Elektrodinamika sploshnykh sred* (Electrodynamics of continuous media). Moscow: Nauka; 2017. 661 p. (in Russ.).
8. Granovsky A., Kuzmichev M., Clerc J.P. The symmetrised Maxwell-Garnett approximation for magneto-optical spectra of ferromagnetic composites. *J. Magn. Soc. Japan.* 1999;23:382-386. <https://doi.org/10.3379/jmsjmag.23.382>
9. Gan'shina E., Garshin V., Perova N., Zykov G., Aleshnikov A., Kalinin Yu., Sitnikov A. Magneto-optical properties of nanocomposites ferromagnetic-carbon. *J. Magn. Magn. Mat.* 2019;470:135-138. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.11.038>
10. Vyzulin S.A., Gorobinskii A.V., Kalinin Yu.E., Lebedeva E.V., Sitnikov A.V., Syr'ev N.E., Trofimenko I.T., Chekrygina Yu.I., Shipkova I.G. Ferromagnetic Resonance, Magnetic Properties, and Resistivity of  $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}/\text{Si}$ . *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2010;74(10):1380-1383. <https://doi.org/10.3103/S1062873810100151>
11. Aleshnikov A.A., Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V., Fedosov A.G. Magnetic properties of multilayer structures based on nanocomposites  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ . *Perspektivy materialy.* 2012;5:68-75 (in Russ.).
12. 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 multilayers. *Solid State Phenomena.* 2011;168-169:533-536. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.168-169.533>
13. Yashin M.M., Myrzakulov H.B. Symmetrichnoi approximation of Maxwell-Garnett as an effective method for the study of nanocomposites. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russ. Technol. J.* 2019;7(4):92-100 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-92-100>
14. Khanikaev A., Granovsky A., Clerc J. P. Effect of distribution of the granules size and gravity between the granules on the percolation threshold in granular alloys. *Fizika tverdogo tela = Phys. Sol. State.* 2002;44(9):1537-1540 (in Russ.). <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2019-5-63-72>
15. Yashin M.M., Yurasov A.N., Ganshina E.A., Garshin V.V. Simulation of the spectra of the transverse Kerr effect of magnetic nanocomposites  $\text{CoFeZr}-\text{Al}_2\text{O}_3$ . *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.Je. Baumana. Seriya estestvennye nauki = Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences,* 2019;86(5):63-72. <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2019-5-63-72>
16. Fadeev E., Blinov M., Garshin V., Tarasova O., Ganshina E., Prudnikova M., Prudnikov V., Lahderanta E., Ryl'kov V., and Granovsky A. Magnetic properties of  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  nanocomposites near the percolation threshold. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2019;83(7):835-837. <https://doi.org/10.3103/S1062873819070153>
17. Domashevskaya E.P., Ivkov S.A., Sitnikov A.V., Stogney O.V., Kozakov A.T., Nikolsky A.V. Influence of the relative content of the metal component in the dielectric matrix on the formation and dimensions of cobalt nanocrystallites in  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  film composites. *Phys. Sol. State.* 2019;61(2):71-79. <https://doi.org/10.21883/FTT.2019.02.47115.211>

## Об авторах:

**Юрасов Алексей Николаевич**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры нанoeлектроники, заместитель директора Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID: 6602974416.

**Яшин Максим Михайлович**, ассистент кафедры «Физика» МГТУ им Н. Э. Баумана (105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5). Scopus Author ID: 57191628251.

## About the authors:

**Alexey N. Yurasov**, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Deputy Head of the Department of Nanoelectronics, Deputy Director of the Physico-Technological Institute, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID: 6602974416.

**Maksim M. Yashin**, assistant of the Department "Physics", Bauman Moscow State Technical University (5, 2-nd Bauman st., Moscow 105005, Russia). Scopus Author ID: 57191628251.