

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 537.632

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-3-122-128>

EDN IJRLMF



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Особенности магниторефрактивного эффекта в нанокompозитах Co–Si

А.Н. Юрасов ¹,
Р. Кулгунина ¹,
М.М. Яшин ^{1, 2, @},
М.А. Симдянова ¹

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

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

• Поступила: 14.11.2024 • Доработана: 03.02.2025 • Принята к опубликованию: 20.03.2025

Резюме

Цели. Целью работы является исследование спектров магниторефрактивного эффекта (МРЭ) в нанокompозитах «кобальт–кремний» (Co–Si) с учетом вклада размерного эффекта, а также сравнение полученных результатов при изменении параметров размерного эффекта. Данное исследование является важным для практического применения бесконтактных методов, т.к. оно направлено на расширение их возможностей и создание новых подходов к неразрушающему контролю и исследованию магнитооптических свойств нанокompозитов, что может значительно повысить эффективность их использования в различных областях, включая спинтронику и оптику.

Методы. Применялось компьютерное моделирование в рамках перспективного метода эффективной среды – приближения Бруггемана, согласно которому исследуемая структура заменяется средой с эффективными свойствами.

Результаты. В рамках моделирования получены спектры МРЭ в диапазоне 0.5–3.5 эВ. При этом моделирование проводилось для МРЭ без учета и с учетом квазиклассического размерного эффекта. Конечным результатом стало моделирование спектральных зависимостей МРЭ на примере нанокompозита Co–Si при различных значениях размера частиц и форм-фактора кобальта. Показано влияние размерных эффектов на вид спектров МРЭ. Достоверность методик хорошо подтверждается сравнением полученных результатов с эмпирическими данными, а ценность полученных результатов обусловлена тем, что все рассчитанные параметры обсуждаемого нанокompозита и форма спектральных зависимостей МРЭ хорошо согласуются с результатами различных экспериментов.

Выводы. В рамках моделирования показано, что учет размеров и форм-фактора гранул оказывает значительное влияние на вид спектров МРЭ, демонстрируя перспективные свойства нанокompозита при определенных размерах частиц. Представленные результаты подчеркивают возможность оптимизации характеристик материала для улучшения чувствительности в магнитных сенсорах и устройствах бесконтактного исследования наноструктур.

Ключевые слова: нанокompозиты, теория эффективной среды, магниторефрактивный эффект, ферромагнетик, размерные эффекты

Для цитирования: Юрасов А.Н., Кулгунина Р., Яшин М.М., Симдянова М.А. Особенности магниторефрактивного эффекта в нанокompозитах Co–Si. *Russian Technological Journal*. 2025;13(3):122–128. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-3-122-128>, <https://www.elibrary.ru/IJRLMF>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Features of the magnetorefractive effect in Co–Si nanocomposites

Alexey N. Yurasov ¹,
Regina Kulgunina ¹,
Maxim M. Yashin ^{1, 2, @},
Marina A. Simdyanova ¹

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia

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

• Submitted: 14.11.2024 • Revised: 03.02.2025 • Accepted: 20.03.2025

Abstract

Objectives. The work set out to study the spectra of the magnetorefractive effect (MRE) in the cobalt–silicon (Co–Si) nanocomposite, taking into account the contribution of the size effect (SE), and to compare the results obtained by varying the parameters of the SE. The presented approaches to investigating the magneto-optical properties of nanocomposites, which are relevant for the practical application of nondestructive testing methods, have the potential to significantly increase the efficiency of their use in various fields, including spintronics and optics.

Methods. Computer modeling approaches based on the Bruggeman approximation are used to model the examined structure as a medium with effective properties.

Results. MRE spectra obtained within the framework of the modeling fell within the range of 0.5–3.5 eV. The modeling was carried out for MRE both with and without taking into account the semiclassical size effect. The resultant modeling of the spectral dependencies of the MRE is based on the example of a Co–Si nanocomposite at different cobalt particle sizes and form factors. The influence of size effects on the form of the MRE spectra is confirmed. The reliability of the methods is confirmed by a comparison of the obtained results with empirical data. The value of the obtained results consists in the good agreement of all the calculated parameters of the discussed nanocomposite and the form of the spectral dependencies of the MRE with the results of various experiments.

Conclusions. The confirmation that both the size and form factor of granules have a significant impact on the appearance of the MRE spectra raises the prospect of developing promising nanocomposite properties at particular particle sizes. The presented results highlight the possibility of optimizing the material characteristics to improve sensitivity in magnetic sensors and noncontact devices for studying nanostructures.

Keywords: nanocomposites, effective medium theory, magnetorefractive effect, ferromagnetic, size effects

For citation: Yurasov A.N., Kulgunina R., Yashin M.M., Simdyanova M.A. Features of the magnetorefractive effect in Co–Si nanocomposites. *Russian Technological Journal*. 2025;13(3):122–128. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-3-122-128>, <https://www.elibrary.ru/IJRLMF>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение магниторефрактивного эффекта (МРЭ) в нанокompозитах «кобальт–кремний» (Co–Si) представляет собой важную задачу в контексте разработки современных магнитных и оптических устройств. Понимание вклада размерных эффектов в данное явление является ключевым для раскрытия магнитных и оптических свойств наноматериалов, что расширяет возможности для использования бесконтактных методов исследования [1–3].

С уменьшением размеров зерен в нанокompозитах существенно изменяются их физико-химические свойства, что может привести к значительному усилению МРЭ. Нанокompозиты на основе кобальта и кремния представляют особый интерес благодаря своей способности демонстрировать уникальные магнитооптические характеристики. Моделирование МРЭ с учетом размерного эффекта позволяет глубже понять механизмы, управляющие взаимодействием света и магнитного поля в таких системах [4, 5].

В связи с этим изучение свойств перспективных наноструктур сегодня является актуальной задачей с учетом возможного значительного усиления важных с практической точки зрения эффектов, таких как магнитосопротивление, квантовые эффекты Холла, МРЭ и многие другие [6]. Интересным примером наноструктуры служит нанокompозит Co–Si, а моделирование наблюдаемых оптических и магнитооптических эффектов позволяет бесконтактным способом оценивать различные характерные параметры исследуемых образцов [7, 8].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА

В рамках данного исследования для анализа МРЭ в композитных материалах, содержащих наночастицы кобальта в кремниевой матрице, была разработана математическая модель, основанная на теории эффективной среды. Основная цель расчетов заключалась в исследовании влияния размерного эффекта и форм-фактора частиц на спектры МРЭ.

Магниторефрактивный эффект описывает влияние магнитного поля на комплексный показатель преломления нанокompозита, что выражается через изменение диэлектрической проницаемости ε под

воздействием магнитного поля [9]. В данном исследовании было выбрано приближение эффективной среды с использованием модели Бруггемана (ЕМА¹) для расчета эффективной диэлектрической проницаемости ε^{EMA} , на примере нанокompозита Co–Si. Объемная доля металлических частиц (Co) в данной структуре составляет $X = 0.5$.

Расчеты проводились для частиц диаметром от 2 до 8 нм с различными значениями форм-фактора L , что позволило изучить, как варьирование размеров и формы частиц влияет на спектры МРЭ.

Магниторефрактивный эффект рассчитывался как изменение коэффициента отражения R нанокompозита [10]:

$$\frac{\Delta R}{R} = -(1 - R) \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} k^2 \left[\frac{3n^2 - k^2 - 1}{(n^2 + k^2)((1 - n)^2 + k^2)} \right] \right), \quad (1)$$

где $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ – магнитосопротивление; k, n – коэффициенты экстинкции и рефракции соответственно.

Ключевыми параметрами модели являются диагональные и недиагональные комплексные компоненты тензора диэлектрической проницаемости (ТДП):

$$\gamma = \gamma_1 - i\gamma_2, \quad \varepsilon = \varepsilon_{01} - i\varepsilon_{02}, \quad (2)$$

где ε_{01} и γ_1 – действительные части диагональных и недиагональных компонент ТДП, а ε_{02} и γ_2 – мнимые части компонент ТДП, соответственно.

Эти параметры зависят от квазиклассических размерных эффектов, которые учитываются в данной работе как вклад формы и размера частиц, что отражается на спектральной зависимости МРЭ.

Размерный эффект учитывается через добавочные члены в диагональных и недиагональных компонентах ТДП на основе модели Друде – Лоренца. Диэлектрическая проницаемость и коэффициент поглощения частиц рассчитываются с учетом времени свободного пробега τ и концентрации частиц. Оптимальной при описании спектральных зависимостей наноструктур и нанокompозитов, в частности, является теория эффективной среды [11]. Эффективная среда описывается с помощью

¹ Effective medium approximations – приближение эффективной среды.

формулы Бруггемана, где учитывается вклад магнитной компоненты материала, объемной концентрации кобальта и формы наночастиц:

$$X \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon^{\text{EMA}}}{\varepsilon^{\text{EMA}} + L(\varepsilon_1 - \varepsilon^{\text{EMA}})} + (1 - X) \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon^{\text{EMA}}}{\varepsilon^{\text{EMA}} + L(\varepsilon_0 - \varepsilon^{\text{EMA}})} = 0, \quad (3)$$

где ε_0 и ε_1 – диэлектрические проницаемости компоненты среды, L – форм-фактор частиц среды.

Размерные эффекты учитываются варьированием форм-факторов частиц L и добавками в диагональные и недиагональные компоненты ТДП ферромагнитной компоненты нанокompозита, что связано с рассеянием электронов на поверхностях гранул. Окончательно с учетом вклада в ТДП размерных эффектов комплексные компоненты ТДП ε_{mod} и γ_{mod} согласно модели Друде – Лоренца представляются в виде [11, 12]:

$$\varepsilon_{\text{mod}} = \varepsilon_{\text{Co}} + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{bulk}})} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{gr}})}, \quad (4)$$

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

где ε_{Co} и γ_{Co} – диагональные и недиагональные компоненты ТДП ферромагнетика, в данном случае кобальта; ω_p – плазменная частота; ω – частота электромагнитной волны; $\sigma_{xy}^{\text{bulk}} = 4\pi M_s R_{\text{bulk}}/\rho_{\text{bulk}}^2$; $\sigma_{xy}^{\text{gr}} = 4\pi M_s R_{\text{gr}}/\rho_{\text{gr}}^2$; M_s – намагниченность насыщения ферромагнетика; R_{bulk} и R_{gr} – коэффициент аномального эффекта Холла массивного образца и гранулы соответственно; ρ_{bulk} и ρ_{gr} – удельное сопротивление массивного образца и гранулы соответственно; τ_{bulk} , τ_{gr} – время свободного пробега электронов в массивном образце и грануле соответственно.

Размерный эффект проявляется как в параметре аномального эффекта Холла, так и в удельном сопротивлении:

$$R_{\text{gr}} = R_{\text{bulk}} + 0.2R \frac{l}{r_0} \left(1 + \frac{l}{r_0} \right), \quad (5)$$

$$\rho_{\text{gr}} = \rho_{\text{bulk}} \left(1 + \frac{l}{r_0} \right), \quad (6)$$

где R – значение параметра аномального эффекта Холла материала поверхности гранул, r_0 – размер частиц нанокompозита и l – длина свободного пробега электрона.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В рамках перспективного метода эффективной среды – приближения Бруггемана по формулам (1)–(3) получены значения параметра МРЭ ($\Delta R/R$) без учета размерного эффекта, а затем проведен анализ влияния квазиклассического размерного эффекта на спектры при различной форме частиц L (форм-фактор) и диаметре частиц кобальта d . В качестве образца был выбран нанокompозит с объемной долей кобальта $X = 0.5$. Выбор определялся близостью к порогу перколяции, что может существенно менять и усиливать физические эффекты.

Как видно из рис. 1, наибольшее изменение МРЭ наблюдаются в ближней инфракрасной (ИК) области спектра, что связано с внутризонными переходами, при учете размерного эффекта и диаметре частиц $d = 2$ нм. На рис. 2 видно, что только начиная с размера гранул 4 нм вклад размерного эффекта становится заметным.

На рис. 3 произведен учет квазиклассического размерного эффекта для различных форм-факторов частиц. Наибольшее усиление эффекта соответствует $L = 0.2$. Полученные результаты по порядку величины хорошо согласуются с известными экспериментальными данными для нанокompозитов (например, [3, 4]) и дают общую тенденцию: при уменьшении размера гранул и форм-фактора можно наблюдать усиление МРЭ.

Полученные результаты открывают широкую область возможностей перспективного применения нанокompозитов в современной электронике [13–15], которые основаны на различных оптических, магнитооптических, гальваномагнитных и других эффектах, наблюдаемых в обсуждаемых наноструктурах.

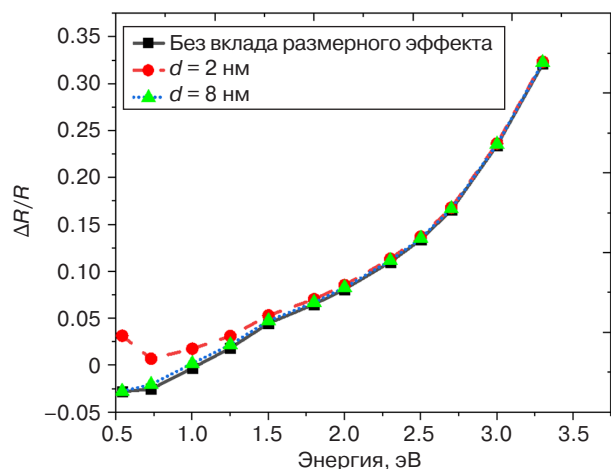


Рис. 1. Зависимость МРЭ от энергии падающей электромагнитной волны без учета вклада размерного эффекта (сплошная) и с вкладом размерного эффекта с размерами частиц Co $d = 2$ нм (точки) и $d = 8$ нм (пунктир)

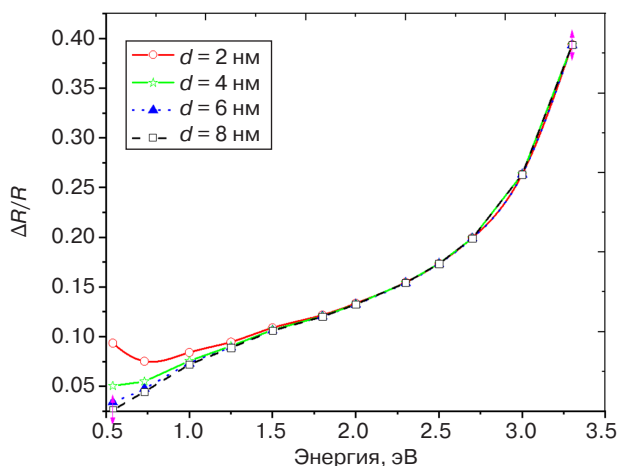


Рис. 2. Зависимость МРЭ с учетом вклада размерного эффекта от энергии падающей электромагнитной волны для нанокompозита Co–Si при разном диаметре частиц $d = 2, 4, 6$ и 8 нм

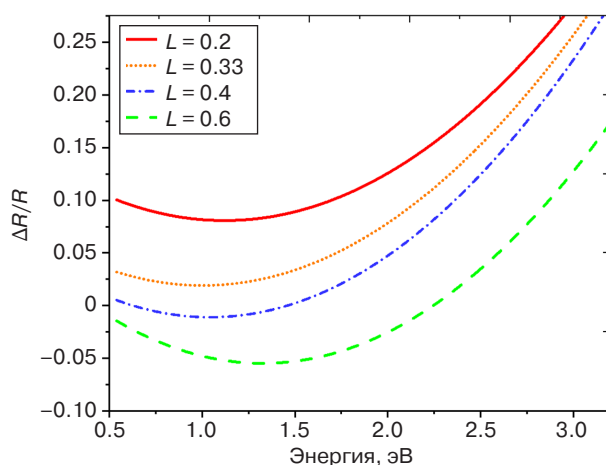


Рис. 3. Зависимость МРЭ с учетом вклада размерного эффекта от энергии падающей электромагнитной волны для нанокompозита Co–Si при $L = 0.2, 0.33, 0.4$ и 0.6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы получены модельные спектры МРЭ на примере нанокompозитов Co–Si с учетом вклада размерного эффекта.

Показана важность учета вклада форм-фактора частиц, а также квазиклассического размерного эффекта в спектральные зависимости МРЭ. Все полученные результаты согласуются по порядку величины с известными данными для похожих наноструктур.

Важно отметить, что полученные результаты могут быть использованы для расширения возможностей бесконтактных методов исследования и разработки высокочувствительных датчиков и систем памяти на основе широкого спектра наноструктур, например, на нанокompозите Co–Si.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке программы «Акселератор РТУ МИРЭА».

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the “RTU MIREA Accelerator” program.

Вклад авторов

А.Н. Юрасов – моделирование, обсуждение результатов, написание статьи, редактирование статьи.

Р. Кулгунина – обработка литературных источников, компьютерное моделирование, обсуждение результатов, написание статьи.

М.М. Яшин – разработка модели, компьютерное моделирование, обсуждение результатов, написание статьи.

М.А. Симдянова – обработка литературных источников, компьютерное моделирование, обсуждение результатов, написание статьи.

Authors' contributions

A.N. Yurasov – computer simulation, discussion of results, writing and editing the text of the article.

R. Kulgunina – literature review, computer simulation, discussion of results, writing the text of the article.

M.M. Yashin – model development, computer simulation, discussion of results, writing the text of the article.

M.A. Simdyanova – literature review, computer simulation, discussion of results, writing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Shkurdoda Yu.O., Dekhtyaruk L.V., Basov A.G., Chornous A.M., Shabelnyk Yu.M., Kharchenko A.P., Shabelnyk T.M. The giant magnetoresistance effect in Co/Cu/Co three-layer films. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;477:88–91. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.01.040>
- Jacquet J.C., Valet T. A New Magneto-optical Effect Discovered on Magnetic Multilayers: The Magnetorefractive Effect. In: *Magnetic Ultrathin Films, Multilayers and Surfaces: MRS Symposium Proc.* 1995. V. 384. P. 477–490. <https://doi.org/10.1557/PROC-384-477>
- Granovsky A., Sukhorukov Yu., Gan'shina E., Telegin A. Magnetorefractive effect in magnetoresistive materials. In: *Magnetophotonics: From Theory to Applications*. Berlin Heidelberg: Springer; 2013. P. 107–133. http://doi.org/10.1007/978-3-642-35509-7_5

4. Kelley C.S., Naughton J., Benson E., Bradley R.C., Lazarov V.K., Thompson S.M., Matthew J.A. Investigating the magnetic field-dependent conductivity in magnetite thin films by modelling the magnetorefractive effect. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2014;26(3):036002. <http://doi.org/10.1088/0953-8984/26/3/036002>
5. Кринчик Г.С., Артемьев В.А. Магнитооптические свойства Ni, Co, и Fe в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1967;53(6):1901–1912.
6. Юрасов А.Н., Сайфулина Д.А., Бахвалова Т.Н. Магниторефрактивный эффект в металлических наноструктурах Co/Pt. *Russian Technological Journal*. 2024;12(2):57–66. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-57-66>
7. Ganshina E., Granovsky A., Gushin V., Kuzmichov M., Podrugina P., Kravetz A., Shipil E. Optical and magneto-optical spectra of magnetic granular alloys. *Physica A: Statistical Mechanics Application*. 1997;241(1–2):45–51. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(97\)00057-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(97)00057-5)
8. Domashevskaya E.P., Ivkov S.A., Sitnikov A.V., et al. Influence of the relative content of the metal component in the dielectric matrix on the formation and size 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>
9. Reig C., Cardoso de Freitas S., Mukhopadhyay S.C. *Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors. From Basis to State-of-the-Art Applications. In Series: Smart Sensors, Measurement and Instrumentation*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013. V. 6. 301 p. ISBN 978-3-642-37172-1
10. Юрасов А.Н. Магниторефрактивный эффект как бесконтактный метод исследования функциональных материалов. *Материаловедение*. 2014;6:32–37.
11. Юрасов А.Н., Яшин М.М. Методы эффективной среды как оптимальные методы моделирования физических свойств наноструктур. *Russian Technological Journal*. 2020;8(5):68–77. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-68-77>
12. Johnson P.B., Christy R.W. Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Pd. *Phys. Rev. B*. 1974;9:5056–5070. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.9.5056>
13. Головань Л.А., Тимошенко В.Ю., Кашкаров П.К. Оптические свойства нанокompозитов на основе пористых систем. *УФН*. 2007;177(6):619–638. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200706b.0619>
14. Вахрушев А.В., Федотов А.Ю., Северюхина О.Ю., Сидоренко А.С. Исследование влияния структуры кобальта на магнитные свойства нанопленок. *Chemical Physics and Mesoscopy*. 2022;24(4):436–453. <https://doi.org/10.15350/17270529.2022.4.36>
15. Demirel F.E., Lavrijsen R., Koopmans B. An investigation of the interface and bulk contributions to the magneto-optic activity in Co/Pt multi-layered thin films. *J. Appl. Phys.* 2021;129(16):163904. <https://doi.org/10.1063/5.0047093>

REFERENCES

1. Shkurdoda Yu.O., Dekhtyaruk L.V., Basov A.G., Chornous A.M., Shabelnyk Yu.M., Kharchenko A.P., Shabelnyk T.M. The giant magnetoresistance effect in Co/Cu/Co three-layer films. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;477:88–91. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.01.040>
2. Jacquet J.C., Valet T. A New Magneto-optical Effect Discovered on Magnetic Multilayers: The Magnetorefractive Effect. In: *Magnetic Ultrathin Films, Multilayers and Surfaces: MRS Symposium Proc.* 1995. V. 384. P. 477–490. <https://doi.org/10.1557/PROC-384-477>
3. Granovsky A., Sukhorukov Yu., Gan'shina E., Telegin A. Magnetorefractive effect in magnetoresistive materials. In: *Magnetophotonics: From Theory to Applications*. Berlin Heidelberg: Springer; 2013. P. 107–133. http://doi.org/10.1007/978-3-642-35509-7_5
4. Kelley C.S., Naughton J., Benson E., Bradley R.C., Lazarov V.K., Thompson S.M., Matthew J.A. Investigating the magnetic field-dependent conductivity in magnetite thin films by modelling the magnetorefractive effect. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2014;26(3):036002. <http://doi.org/10.1088/0953-8984/26/3/036002>
5. Krinchik G.S., Artem'ev V.A. Magneto-optical properties of Ni, Co and Fe in the ultraviolet visible and infrared parts of the spectrum. *Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP)*. 1968;26(6):1080–1085. [Original Russian Text: Krinchik G.S., Artem'ev V.A. Magneto-optical properties of Ni, Co and Fe in the ultraviolet visible and infrared parts of the spectrum. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*. 1967;53(6):1901–1912 (in Russ.).]
6. Yurasov A.N., Sayfulina D.A., Bakhvalova T.N. Magnetorefractive effect in metallic Co/Pt nanostructures. *Russian Technological Journal*. 2024;12(2):57–66. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-57-66>
7. Ganshina E., Granovsky A., Gushin V., Kuzmichov M., Podrugina P., Kravetz A., Shipil E. Optical and magneto-optical spectra of magnetic granular alloys. *Physica A: Statistical Mechanics Application*. 1997;241(1–2):45–51. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(97\)00057-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(97)00057-5)
8. Domashevskaya E.P., Ivkov S.A., Sitnikov A.V., et al. Influence of the relative content of the metal component in the dielectric matrix on the formation and size 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>
9. Reig C., Cardoso de Freitas S., Mukhopadhyay S.C. *Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors. From Basis to State-of-the-Art Applications. In Series: Smart Sensors, Measurement and Instrumentation*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013. V. 6. 301 p. ISBN 978-3-642-37172-1
10. Yurasov A.N. Magnetorefractive effect as a contactless method for investigation of functional materials. *Materialovedenie = Material Science*. 2014;6:32–37 (in Russ.).

11. Yurasov A.N., Yashin M.M. Methods of effective media as optimal methods for modeling the physical properties of nanostructures. *Russian Technological Journal*. 2020;8(5):68–77 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-68-77>
12. Johnson P.B., Christy R.W. Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Pd. *Phys. Rev. B*. 1974;9: 5056–5070. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.9.5056>
13. Golovan L.A., Timoshenko V.Yu., Kashkarov P.K. Optical properties of porous-system-based nanocomposites. *Phys. Usp.* 2007;50(6):595–612. <https://doi.org/10.1070/PU2007v050n06ABEH006257>
[Original Russian Text: Golovan L.A., Timoshenko V.Yu., Kashkarov P.K. Optical properties of porous-system-based nanocomposites. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2007;177(6):619–638 (in Russ.). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200706b.0619>]
14. Vakhrushev A.V., Fedotov A.Yu., Severyukhina O.Yu., Sidorenko A.S. Study of the influence of the cobalt structure on the magnetic properties of nanofilms. *Chemical Physics and Mesoscopy*. 2022;24(4):436–453 (in Russ.). <https://doi.org/10.15350/17270529.2022.4.36>
15. Demirer F.E., Lavrijsen R., Koopmans B. An investigation of the interface and bulk contributions to the magneto-optic activity in Co/Pt multi-layered thin films. *J. Appl. Phys.* 2021;129(16):163904. <https://doi.org/10.1063/5.0047093>

Об авторах

Юрасов Алексей Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, кафедра нанoeлектроники, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, 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, SPIN-код РИНЦ 4259-8885, <https://orcid.org/0000-0002-9104-3529>

Кулгунина Регина, бакалавр, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: yummy2002@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0004-1864-9155>

Яшин Максим Михайлович, к.ф.-м.н., доцент, кафедра нанoeлектроники, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); доцент, кафедра физики, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ 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 57210607470, SPIN-код РИНЦ 2438-6135, <https://orcid.org/0000-0001-8022-9355>

Симдянова Марина Александровна, ассистент, кафедра нанoeлектроники, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: marina.simdyanova3103@mail.ru. Scopus Author ID 58532241200, SPIN-код РИНЦ 1447-1140, <https://orcid.org/0009-0009-8418-6896>

About the Authors

Alexey N. Yurasov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: alexey_yurasov@mail.ru. ResearcherID M-3113-2016, Scopus Author ID 6602974416, RSCI SPIN-code 4259-8885, <https://orcid.org/0000-0002-9104-3529>

Regina Kulgunina, Student, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: yummy2002@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0004-1864-9155>

Maxim M. Yashin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Associate Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (5, 2-ya Baumanskaya ul., Moscow, 105005 Russia). E-mail: ihkamax@mail.ru. ResearcherID G-6809-2017, Scopus Author ID 57210607470, RSCI SPIN-code 2438-6135, <https://orcid.org/0000-0001-8022-9355>

Marina A. Simdyanova, Assistant, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: marina.simdyanova3103@mail.ru. Scopus Author ID 58532241200, RSCI SPIN-code 1447-1140, <https://orcid.org/0009-0009-8418-6896>

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».

119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Подписано в печать 29.05.2025 г.

Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.

Уч.-изд. листов 16.00.

Тираж 50 экз. Заказ № 2760.

Подписку на печатную версию
Russian Technological Journal можно оформить
через ООО «Агентство «Книга-Сервис», www.akc.ru.
Подписной индекс: 79641.

Printed in MIREA – Russian Technological University.
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russian
Federation.

Signed to print May 29, 2025.

Format 60 × 90/8. Digital print.

C.p.l. 16.00.

50 copies. Order No. 2760.

Subscription to the *Russian Technological
Journal* printed version can be made through
the *Kniga-Servis* Agency, www.akc.ru.
Subscription index: 79641.