

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

УДК 537.632

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-3-55-64>

EDN SWVVUI



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Моделирование магниторефрактивного эффекта в нанокompозитах $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$ в рамках приближения Бруггемана

М.А. Мухутдинова,
А.Н. Юрасов[@]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[@] Автор для переписки, e-mail: alexey_yurasov@mail.ru

Резюме

Цели. Цель работы – изучить магниторефрактивный эффект (МРЭ) в нанокompозитах, заключающийся в изменении коэффициентов отражения, пропускания и поглощения света образцов с большим магнитосопротивлением (МС) при их намагничивании. Существует ряд материалов, обладающих большой магнитооптической активностью и значительным МС. К таким материалам относятся магнитные нанокompозиты. Они представляют из себя материалы на основе полимерной матрицы, в которую включены неорганические магнитные частицы, волокна или слоистые частицы, с нанометровыми размерами от 1 до 100 нм хотя бы в одном измерении. Главной целью создания таких нанокompозитов является совмещение нескольких компонентов с их особыми свойствами в одном материале. Наличие в таких материалах гигантского, колоссального и туннельного МС, гигантского аномального эффекта Холла представляет практический интерес. Данные материалы применяют для магнитной записи, модуляции света, как приемники теплового излучения, а сам МРЭ является перспективным методом неразрушающего контроля любых наноструктур, например, для измерения МС.

Методы. Для описания оптики и магнитооптики дисперсных сред рассмотрена теория эффективной среды, благодаря которой можно решить задачу определения комплексной диэлектрической проницаемости среды через диэлектрические проницаемости составляющих ее компонент или наоборот. В статье этот подход рассматривался на примере нанокompозита $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$ с концентрацией ферромагнитного металла Co , равной 0.4, вблизи порога перколяции. Для изучения рассмотрен именно этот случай, т.к. вблизи порога перколяции кардинально меняются все свойства нанокompозитов.

Результаты. Используя приближение Бруггемана (effective medium approximation, ЕМА) для описания оптических и магнитооптических свойств нанокompозитов на примере $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$, авторы получили характеристики МРЭ, а именно: изменение МРЭ на отражение и пропускание света при нормальном падении и при угле падения вблизи угла Брюстера (ниже порога перколяции) или главного угла падения для металлов (выше порога перколяции), что усиливает МРЭ. Преимущество ЕМА заключается в возможности исследовать магнитооптические спектры в диапазоне средних объемных концентраций металлической компоненты.

Выводы. Полученные значения хорошо соответствуют известным экспериментальным данным. Важно отметить, что данный подход позволяет исследовать любые наноструктуры.

Ключевые слова: магниторефрактивный эффект, нанокompозиты, магнитосопротивление, тензор диэлектрической проницаемости, приближение Бруггемана

• Поступила: 16.05.2023 • Доработана: 16.10.2023 • Принята к опубликованию: 08.04.2024

Для цитирования: Мухутдинова М.А., Юрасов А.Н. Моделирование магниторефрактивного эффекта в нанокompозитах Co-Al₂O₃ в рамках приближения Бруггемана. *Russ. Technol. J.* 2024;12(3):55–64. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-3-55-64>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Modeling of the magnetorefractive effect in Co-Al₂O₃ nanocomposites in the framework of the Bruggeman approximation

Muza A. Mukhutdinova,
Alexey N. Yurasov[@]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. To investigate the magnetorefractive effect (MRE) in nanocomposites, which consists in changing the reflection, transmittance and light absorption coefficients of samples with large magnetoresistance (MR) upon their magnetization. Materials offering high magneto-optical activity and significant MR include magnetic nanocomposites. These materials are based on a polymer matrix, which includes inorganic magnetic particles, fibers or layered particles, whose nanometer sizes range from 1 to 100 nm in at least one dimension. The main purpose of creating such nanocomposites is to combine the special properties of several components in one material. The presence in such materials of gigantic, colossal and tunneling MR, as well as the giant anomalous Hall effect, is of practical interest. Uses range from magnetic recording, light modulation, and receivers for thermal radiation, while the MRE itself is a promising method for the non-destructive testing of any nanostructures, e.g., measuring MR.

Methods. The use of effective medium theory to describe the optics and magneto-optics of dispersed media provides a means to determine the complex permittivity of a medium through the permittivity of its constituent components or vice versa. The present work considers the example of a Co-Al₂O₃ nanocomposite with a concentration of ferromagnetic metal Co 0.4 near the percolation threshold. This particular case was considered for study, since all the properties of nanocomposites change dramatically near the percolation threshold.

Results. Using the Bruggeman effective medium approximation (EMA) to describe the optical and magneto-optical properties of nanocomposites on the example of Co-Al₂O₃, the characteristics of MRE are obtained, namely, the change in MRE for reflection and transmission of light at normal incidence and at the angle of incidence near the Brewster angle (below the percolation threshold) or the main angle of incidence for metals (above the percolation threshold), which enhances MRE. The advantage of the EMA is the ability to study magneto-optical spectra in the range of average volume concentrations of the metal component.

Conclusions. The obtained values correspond well to the known experimental data. Moreover, the described approach can be used to study any nanostructures.

Keywords: magnetorefractive effect, nanocomposites, magnetoresistance, dielectric permittivity tensor, Bruggeman approximation

• Submitted: 16.05.2023 • Revised: 16.10.2023 • Accepted: 08.04.2024

For citation: Mukhutdinova M.A., Yurasov A.N. Modeling of the magnetorefractive effect in Co-Al₂O₃ nanocomposites in the framework of the Bruggeman approximation. *Russ. Technol. J.* 2024;12(3):55–64. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-3-55-64>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Магниторефрактивный эффект (МРЭ) заключается в изменении коэффициентов отражения $R\left(\frac{\Delta R}{R}\right)$, пропускания $T\left(\frac{\Delta T}{T}\right)$ и поглощения A света у образцов с большим магнитосопротивлением (МС) при их намагничивании [1].

Нанокompозиты – перспективные многофазные материалы, получаемые при введении наночастиц в матрицу основного материала с геометрическими размерами частиц, лежащими в диапазоне от 1 до 100 нм [1]. Нанокompозиты обладают значительным МС $\frac{\Delta\rho}{\rho}$, где ρ – электрическое сопротивление. Существенные возможности открываются при применении нанокompозитов в области магнитооптики, которая изучает явления, возникающие в магнитном поле, в результате взаимодействия оптического излучения с веществом. Например, нанокompозиты применяют для измерения МС. Также магнитные нанокompозиты, представляющие из себя неоднородные магнетики, в которых ферромагнитные частицы помещены в металлическую или диэлектрическую матрицу, используются для магнитной записи, модуляции света, как приемники теплового излучения [1–7]. В свою очередь магнитооптические методы являются методами неразрушающего контроля любых наноструктур [1, 2].

Целью работы является исследование МРЭ в нанокompозитах вблизи порога перколяции.

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Под влиянием магнитного поля изменяются дисперсионные кривые показателя преломления n и коэффициента поглощения k , приводя к появлению или изменению оптической анизотропии среды. При изменении МС меняется значение коэффициентов отражения и пропускания. Коэффициент отражения (формулы Френеля) при нормальном падении имеет вид:

$$R = \frac{(1-n)^2 + k^2}{(1+n)^2 + k^2}, \quad (1)$$

где n – коэффициент рефракции, k – коэффициент экстинкции нанокompозита [1].

Формула (1) используется для расчета величины $\frac{\Delta R}{R}$ [2]:

$$\frac{\Delta R}{R} = -(1-R) \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot k^2 \times \frac{3n^2 - k^2 - 1}{(n^2 + k^2)((1-n)^2 + k^2)} \cdot 100\%. \quad (2)$$

При угле падения, отличном от нуля, коэффициент отражения для полубесконечной среды рассчитывают по формулам:

$$R = |r_{12}|^2, \quad (3)$$

$$r_{12} = \frac{g_1\eta_2^2 - g_2n_1^2}{g_1\eta_2^2 + g_2n_1^2}, \quad (4)$$

где $g_1 = \sqrt{n_1 - n_1(\sin\varphi_0)^2}$, $g_2 = \sqrt{n_2 - n_2(\sin\varphi_0)^2}$, φ_0 – угол падения света на поверхность нанокompозита, $\eta_2 = n_2 - k_2i$ – комплексный показатель преломления нанокompозита, n_1 – коэффициент преломления среды, из которой падает свет [2].

Для коэффициента пропускания при нормальном падении света имеем [2]:

$$T = |t_{12}|^2, \quad (5)$$

$$t_{12} = \frac{g_1^2\eta_2}{g_1\eta_2^2 + g_2n_1^2}, \quad (6)$$

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot Tk^2 \cdot \left(\frac{2n^2 + n}{n^2 + k^2}\right) \cdot 100\%. \quad (7)$$

В связи с тем, что нанокompозит является сложным материалом, для описания его электрических, оптических и магнитных свойств рассматривается эффективный тензор диэлектрической проницаемости (ТДП):

$$\tilde{\epsilon}^{\text{eff}} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx}^{\text{eff}} & i\gamma^{\text{eff}} & 0 \\ -i\gamma^{\text{eff}} & \epsilon_{xx}^{\text{eff}} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{xx}^{\text{eff}} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где диагональные компоненты $\epsilon_{xx}^{\text{eff}} = (\epsilon_{xx}^{\text{eff}})' - i(\epsilon_{xx}^{\text{eff}})''$ – оптическая составляющая, а недиагональные

компоненты $\gamma^{\text{eff}} = (\gamma^{\text{eff}})' - i(\gamma^{\text{eff}})''$ – магнитооптическая составляющая ТДП [4–8].

Наиболее интересен случай, когда нанокompозит находится вблизи порога перколяции, в этой области происходит значительное усиление магнитооптических эффектов. В связи с этим все расчеты проводились, когда объемная концентрация $X = 0.4$, что соответствует близости к порогу перколяции.

Воспользуемся приближением эффективной среды Бруггемана (effective medium approximation, ЕМА) при $0.3 < X < 0.7$, которое хорошо работает для описания нанокompозитов при средней концентрации магнитной (металлической) компоненты [7–10].

Чтобы найти ε^{eff} и γ^{eff} , используем следующие уравнения:

$$\begin{aligned}
 & X \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon^{\text{EMA}})}{\varepsilon^{\text{EMA}} + (\varepsilon_1 - \varepsilon^{\text{EMA}})L_{xx}} + \\
 & + (1 - X) \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon^{\text{EMA}})}{\varepsilon^{\text{EMA}} + (\varepsilon_0 - \varepsilon^{\text{EMA}})L_{xx}} = 0, \\
 & X \frac{(\gamma^{\text{EMA}} - \gamma)}{[\varepsilon^{\text{EMA}} + (\varepsilon_1 - \varepsilon^{\text{EMA}})L_{xx}]^2} + \\
 & + (1 - X) \frac{\gamma^{\text{EMA}}}{[\varepsilon^{\text{EMA}} + (\varepsilon_0 - \varepsilon^{\text{EMA}})L_{xx}]^2} = 0,
 \end{aligned} \tag{9}$$

где $\varepsilon^{\text{EMA}} = \varepsilon^{\text{eff}}$, $\gamma^{\text{EMA}} = \gamma^{\text{eff}}$, $L_{xx} = \frac{1-L}{2} = \frac{1-\frac{1}{3}}{2} = \frac{1}{3}$ –

форм-фактор частиц ($L = \frac{1}{3}$ для сферических частиц), $\varepsilon_0 = \varepsilon'_0 - i\varepsilon''_0$ – диэлектрическая проницаемость неметаллической (неферромагнитной) составляющей, $\varepsilon_1 = \varepsilon'_1 - i\varepsilon''_1$ – диэлектрическая проницаемость для ферромагнитной компоненты (диагональная часть соответствующего ТДП), $\gamma = \gamma' - i\gamma''$ – недиагональная компонента ТДП ферромагнитной составляющей [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В настоящей работе рассчитываются абсолютные значения МРЭ на отражении $\frac{\Delta R}{R}$ и пропускании $\frac{\Delta T}{T}$ при углах падения $\varphi_1 = 0^\circ$ и $\varphi_2 = 70^\circ$, а также эффективный ТДП при различных длинах волн инфракрасного (ИК) диапазона (от 0.8 до 10 мкм), падающих на поверхность нанокompозит Co-Al₂O₃. Выбор угла $\varphi_2 = 70^\circ$ обусловлен близостью его к углу Брюстера, если нанокompозит находится в состоянии ниже порога перколяции, или близостью к главному углу падения для металлов, если нанокompозит находится в состоянии выше порога перколяции, что обуславливает усиление оптических эффектов.

Результаты расчетов приведены в табл. 1–6. Здесь E – энергия падающей электромагнитной волны.

Таблица 1. Абсолютные значения коэффициентов отражения $\frac{\Delta R}{R}$ при нормальном падении света $\frac{\Delta \rho}{\rho} = 1\%$

E , эВ	λ , мкм	$n_1(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$n_2(\text{Co})$	$k_2(\text{Co})$	$\frac{\Delta R}{R}$, %		
					$\varphi_1 = 0^\circ$		
					$\frac{\Delta \rho}{\rho} = 1\%$	$\frac{\Delta \rho}{\rho} = 5\%$	$\frac{\Delta \rho}{\rho} = 10\%$
1.550	0.8	1.76	1.90	4.95	0.117	0.583	1.167
1.240	1	1.76	2.20	5.50	0.099	0.495	0.989
0.620	2	1.74	5.15	7.00	-0.069	-0.344	-0.687
0.413	3	1.71	4.90	8.45	0.0006	0.003	0.006
0.310	4	1.68	4.70	11.00	0.043	0.214	0.429
0.248	5	1.62	4.70	14.70	0.045	0.225	0.450
0.207	6	1.56	5.00	17.50	0.039	0.195	0.389
0.177	7	1.46	5.40	20.90	0.033	0.163	0.325
0.155	8	1.32	5.80	24.00	0.028	0.140	0.280
0.138	9	1.15	6.56	27.20	0.025	0.123	0.247
0.124	10	0.85	7.10	29.50	0.023	0.114	0.228

Таблица 2. Абсолютные значения коэффициентов отражения $\frac{\Delta R}{R}$ при падении света под углом 70°

E, эВ	λ , мкм	$n_1(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$n_2(\text{Co})$	$k_2(\text{Co})$	$\frac{\Delta R}{R}$, %		
					$\varphi_2 = 70^\circ$		
					$\frac{\Delta \rho}{\rho} = 1\%$	$\frac{\Delta \rho}{\rho} = 5\%$	$\frac{\Delta \rho}{\rho} = 10\%$
1.550	0.8	1.76	1.90	4.95	-0.277	-1.383	-2.767
1.240	1	1.76	2.20	5.50	-0.281	-1.406	-2.811
0.620	2	1.74	5.15	7.00	-0.351	-1.756	-3.512
0.413	3	1.71	4.90	8.45	-0.300	-1.500	-3.001
0.310	4	1.68	4.70	11.00	-0.226	-1.131	-2.262
0.248	5	1.62	4.70	14.70	-0.154	-0.771	-1.541
0.207	6	1.56	5.00	17.50	-0.122	-0.612	-1.224
0.177	7	1.46	5.40	20.90	-0.095	-0.473	-0.947
0.155	8	1.32	5.80	24.00	-0.076	-0.379	-0.758
0.138	9	1.15	6.56	27.20	-0.064	-0.322	-0.645
0.124	10	0.85	7.10	29.50	-0.059	-0.294	-0.588

Таблица 3. Абсолютные значения коэффициентов пропускания $\frac{\Delta T}{T}$ при нормальном падении света

E, эВ	λ , мкм	$n_1(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$n_2(\text{Co})$	$k_2(\text{Co})$	$\frac{\Delta T}{T}$, %		
					$\varphi_1 = 0^\circ$		
					$\frac{\Delta \rho}{\rho} = 1\%$	$\frac{\Delta \rho}{\rho} = 5\%$	$\frac{\Delta \rho}{\rho} = 10\%$
1.550	0.8	1.76	1.90	4.95	1.378	6.888	13.777
1.240	1	1.76	2.20	5.50	1.513	7.567	15.134
0.620	2	1.74	5.15	7.00	1.763	8.817	17.635
0.413	3	1.71	4.90	8.45	2.023	10.114	20.228
0.310	4	1.68	4.70	11.00	2.211	11.053	22.107
0.248	5	1.62	4.70	14.70	2.243	11.213	22.427
0.207	6	1.56	5.00	17.50	2.269	11.347	22.694
0.177	7	1.46	5.40	20.90	2.298	11.491	22.982
0.155	8	1.32	5.80	24.00	2.331	11.653	23.306
0.138	9	1.15	6.56	27.20	2.442	12.208	24.416
0.124	10	0.85	7.10	29.50	2.518	12.591	25.182

Таблица 4. Абсолютное значение коэффициентов пропускания $\frac{\Delta T}{T}$ при падении света под углом 70°

E, эВ	λ , мкм	$n_{1(Al_2O_3)}$	$n_{2(Co)}$	$k_{2(Co)}$	$\frac{\Delta T}{T}$, %		
					$\varphi_2 = 70^\circ$		
					$\frac{\Delta \rho}{\rho} = 1\%$	$\frac{\Delta \rho}{\rho} = 5\%$	$\frac{\Delta \rho}{\rho} = 10\%$
1.550	0.8	1.76	1.90	4.95	-0.026	-0.128	-0.255
1.240	1	1.76	2.20	5.50	-0.023	-0.114	-0.228
0.620	2	1.74	5.15	7.00	-0.013	-0.064	-0.129
0.413	3	1.71	4.90	8.45	-0.012	-0.058	-0.117
0.310	4	1.68	4.70	11.00	-0.009	-0.047	-0.093
0.248	5	1.62	4.70	14.70	-0.007	-0.033	-0.065
0.207	6	1.56	5.00	17.50	-0.005	-0.025	-0.050
0.177	7	1.46	5.40	20.90	-0.004	-0.019	-0.038
0.155	8	1.32	5.80	24.00	-0.003	-0.015	-0.030
0.138	9	1.15	6.56	27.20	-0.002	-0.012	-0.024
0.124	10	0.85	7.10	29.50	-0.002	-0.010	-0.021

Таблица 5. Спектральные значения ϵ^{EMA} при различных величинах λ , рассчитанные с помощью коэффициентов n и k

E, эВ	λ , мкм	$n_{1(Al_2O_3)}$	$n_{2(Co)}$	$k_{2(Co)}$	ϵ_1	ϵ_0	ϵ^{eff}
0.539	2.30	1.73	5.15	7.27	-26.330 - 74.881i	2.993	5.018 - 13.031i
0.729	1.70	1.74	4.6	6.70	-23.730 - 61.640i	3.028	4.666 - 11.622i
1.000	1.24	1.75	3.2	6.10	-26.970 - 39.040i	3.063	2.975 - 9.599i
1.253	0.99	1.76	2.94	5.50	-21.606 - 32.340i	3.098	3.033 - 8.558i
1.494	0.83	1.76	2.53	4.95	-18.102 - 25.047i	3.098	2.762 - 7.487i
1.797	0.69	1.76	2.31	4.45	-14.466 - 20.559i	3.098	2.712 - 6.634i
2.000	0.62	1.77	2.19	4.11	-12.096 - 18.002i	3.133	2.729 - 6.108i
2.296	0.54	1.77	2.05	3.81	-10.314 - 15.621i	3.133	2.661 - 5.606i
2.480	0.50	1.77	1.88	3.55	-9.068 - 13.348i	3.133	2.524 - 5.158i
2.696	0.46	1.78	1.78	3.30	-7.722 - 11.748i	3.168	2.498 - 4.782i
3.024	0.41	1.78	1.61	3.05	-6.710 - 9.821i	3.168	2.343 - 4.361i
3.263	0.38	1.79	1.53	2.82	-5.612 - 8.629i	3.204	2.325 - 4.025i

Таблица 6. Спектральные значения ϵ^{EMA} и γ^{EMA} при различных величинах λ с табличными значениями ϵ и γ

E, эВ	λ , мкм	X = 0.4			ϵ^{eff}	γ^{eff}
		ϵ_1	ϵ_0	γ		
0.539	2.30	2.993	-23.835 - 57.178i	1.529 - 3.008i	4.381 - 11.119i	0.179 + 0.017i
0.729	1.70	3.028	-18.091 - 44.063i	0.748 - 2.051i	4.213 - 9.450i	0.134 + 0.004i
1.000	1.24	3.063	-13.307 - 31.657i	0.203 - 1.241i	3.857 - 7.761i	0.098 + 0.008i
1.253	0.99	3.098	-11.358 - 24.914i	-0.009 - 0.895i	3.520 - 6.829i	0.083 - 0.007i
1.494	0.83	3.098	-9.474 - 17.882i	-0.135 - 0.530i	3.018 - 5.762i	0.060 - 0.017i
1.797	0.69	3.098	-8.295 - 14.346i	-0.160 - 0.380i	2.739 - 5.160i	0.051 - 0.024i
2.000	0.62	3.133	-7.613 - 12.339i	-0.162 - 0.299i	2.580 - 4.823i	0.045 - 0.028i
2.296	0.54	3.133	-6.507 - 9.779i	-0.144 - 0.199i	2.349 - 4.301i	0.033 - 0.028i
2.480	0.50	3.133	-5.945 - 8.626i	-0.130 - 0.159i	2.240 - 4.042i	0.029 - 0.029i
2.696	0.46	3.168	-5.217 - 7.378i	-0.111 - 0.118i	2.144 - 3.745i	0.023 - 0.029i
3.024	0.41	3.168	-4.407 - 6.281i	-0.088 - 0.084i	2.059 - 3.415i	0.018 - 0.026i
3.263	0.38	3.204	-3.504 - 5.468i	-0.066 - 0.059i	2.058 - 3.103i	0.013 - 0.023i

Анализируя величины в таблицах, можно сделать вывод, что рассчитанные значения эффективного ТДП хорошо совпадают с литературными данными, например, приведенными в [4].

На основе выполненных расчетов построены графики зависимости МРЭ на отражении и пропускании при нормальном падении света и угле падения 70° (рис. 1–4).

Анализируя эти графики, можно сделать главный вывод: спектральные зависимости $\frac{\Delta R}{R}$ и $\frac{\Delta T}{T}$ в ИК-диапазоне линейно коррелируют со значениями МС $\frac{\Delta \rho}{\rho}$, причем зависимость прямо пропорциональная. Чем больше значение МС, тем сильнее изменяются величины $\frac{\Delta R}{R}$ и $\frac{\Delta T}{T}$.

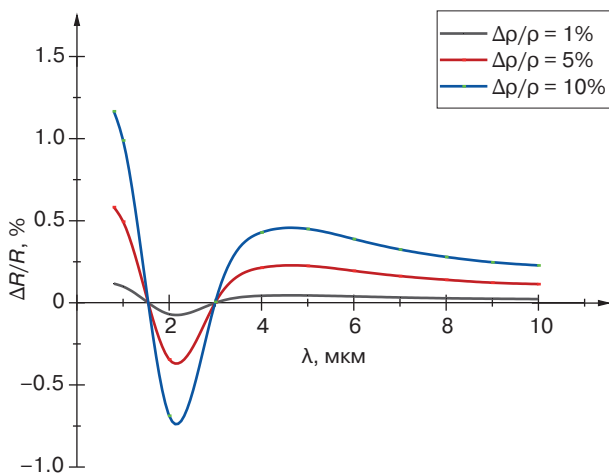


Рис. 1. Спектральная зависимость МРЭ на отражении при нормальном падении света

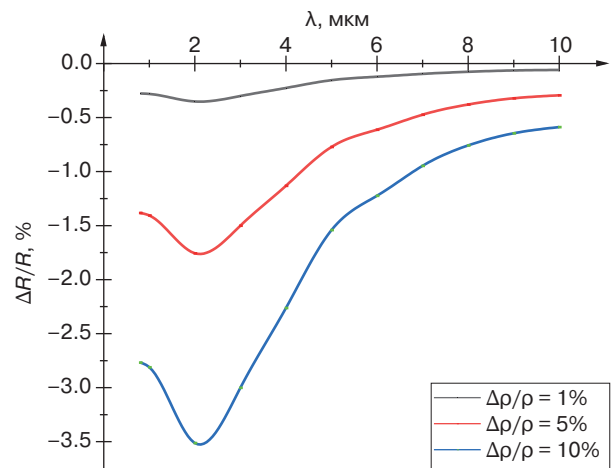


Рис. 2. Спектральная зависимость МРЭ на отражении при $\phi_2 = 70^\circ$

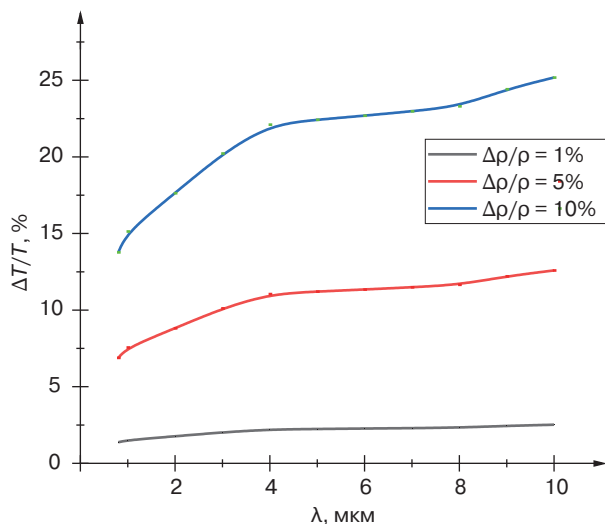


Рис. 3. Спектральная зависимость МРЭ на пропускании при нормальном падении света

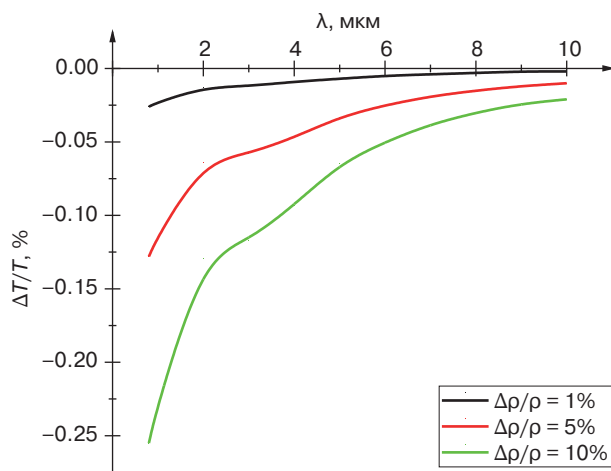


Рис. 4. Спектральная зависимость МРЭ на пропускании при φ₂ = 70°

Из рис. 1 видно, что в ближней ИК-области спектра МРЭ на отражении сильно меняется, что связано с межзонными переходами, которые значительно влияют на оптические характеристики материала в ИК-диапазоне. На рис. 2 можно видеть большую абсолютную величину параметра $\frac{\Delta R}{R}$. Этот факт можно объяснить тем, что в данной области, помимо межзонных переходов, существенную роль играют внутризонные переходы, и угол падения близок к углу Брюстера (главному углу падения для металлов) [3]. На рис. 3 наблюдается плавное увеличение МРЭ на пропускании $\frac{\Delta T}{T}$, а на рис. 4 видно, что

с увеличением длины волны (т.е. с уменьшением E) значения МРЭ на пропускании $\frac{\Delta T}{T}$ сначала резко возрастают, а далее плавно меняются. Изменяя длину волны λ и действительную часть коэффициента преломления n , при данной толщине пленки d нанокompозита можно получить условия интерференции, при которых величина МРЭ существенно возрастает [11–15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено теоретическое исследование оптических и магнитооптических спектров нанокompозитов на примере Co-Al₂O₃ в рамках теории МРЭ. Расчет спектров проводился с помощью формул (2)–(7). Спектры эффективного ТДП рассчитывались в приближении Бруггемана, т.к. именно этот метод позволяет хорошо описать свойства нанокompозита при средних объемных концентрациях металлической компоненты ($X = 0.4$). Важно отметить, что МРЭ – перспективный инструмент изучения материалов, в первую очередь, как бесконтактный метод измерения МС – неразрушающий метод контроля любых наноструктур, а приведенные в данной статье подходы справедливы для исследования широкого класса наноструктур.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание для университетов № ФГФЗ-2023-0005).

ACKNOWLEDGMENTS

The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (State task for universities No. FGFZ-2023-0005).

Вклад авторов

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

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

Authors' contributions

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрасов А.Н. Магниторефрактивный эффект в наноструктурах. *Приборы*. 2022. № 4(262). С. 22–25.
2. Юрасов А.Н. *Магнитооптические эффекты и магниторефрактивный эффект в нанокompозитах*. М.: МИРЭА; 2016. 55 с.
3. 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.
4. Niklasson G.A., Granqvist C.G. Optical properties and solar selectivity of coevaporated CoAl₂O₃ composite films. *J. Appl. Phys.* 1984;55(9):3382–3410. <https://doi.org/10.1063/1.333386>
5. Быков И.В., Ганьшина Е.А., Грановский А.Б., Гушин В.С. Магниторефрактивный эффект в гранулированных пленках с туннельным магнитосопротивлением. *Физика твердого тела*. 2000;42(3):487–491.
6. Гушин В.С., Ганьшина Е.А., Козлов А.А., Быков И.В. Магниторефрактивный эффект в нанокompозитах. *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2005;1:45–58.
7. Yurasov A., Yashin M., Ganshina E., Granovsky A., Garshin V., Semenova D., Mirzokulov K. Simulation of magneto-optical properties of nanocomposites (CoFeZr)_x(Al₂O₃)_(1-x). *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;1389(1):012113. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1389/1/012113>
8. Апресян Л.А., Власова Т.В., Красовский В.И., Крыштоб В.И., Расмагин С.И. Приближения эффективной среды для описания многокомпонентных композитов. *Журнал технической физики (ЖТФ)*. 2020;90(7):1175–1183. <https://doi.org/10.21883/JTF.2020.07.49453.446-18>
9. Фадеев Е.А., Блинов М.И., Гаршин В.В., Тарасова О.С., Ганьшина Е.А., Прудникова М.В., Прудников В.Н., Ляхдеранта Э., Рыльков В.В., Грановский А.Б. Магнитные свойства нанокompозитов (Co₄₀Fe₄₀B₂₀)_x(SiO₂)_(100-x) вблизи порога перколяции. *Известия РАН. Серия физическая*. 2019;83(7):917–920. <https://doi.org/10.1134/S0367676519070159>
10. Ганьшина Е.А., Припеченков И.М., Перова Н.Н., Каназакова Е.С., Николаев С.Н., Ситников А.С., Грановский А.Б., Рыльков В.В. Магнитооптическая спектроскопия нанокompозитов (CoFeB)_x(LiNbO₃)_(100-x) до порога перколяции: от суперпарамагнетизма и суперферромагнетизма до ферромагнетизма. *Физика металлов и металлургия*. 2023;124(2):134–140.
11. 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.
12. 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. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019;477:88–91. <https://www.doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.01.040>
13. Dekhtyaruk L.V., Kharchenko A.P., Klymenko Yu.O., Shkurdoda Yu.O., Shabelnyk Yu.M., Bezdidko O.V., Chornous A.M. Negative and Positive Effect of Giant Magnetoresistance in The Magnetically Ordered Sandwich. *2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*. Sumy, Ukraine. 2020. P. 01NMM13-1-01NMM13-3. <https://www.doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309694>
14. 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. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/26/3/036002>
15. Yurasov A., Yashin M., Ganshina E., et al. Simulation of magneto-optical properties of nanocomposites (CoFeZr)_x(Al₂O₃)_{1-x}. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;1389:012113. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1389/1/012113>

REFERENCES

1. Yurasov A.N. Magnetorefractive effect in nanostructures. *Pribory = Instruments*. 2022;4(262):22–25 (in Russ.).
2. Yurasov A.N. *Магнитооптические эффекты и магниторефрактивный эффект в нанокompозитах (Magneto-Optical Effects and Magnetorefractive Effect in Nanocomposites)*. Moscow: MIREA; 2016. 55 p. (in Russ.).
3. 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.).]
4. Niklasson G.A., Granqvist C.G. Optical properties and solar selectivity of coevaporated CoAl₂O₃ composite films. *J. Appl. Phys.* 1984;55(9):3382–3410. <https://doi.org/10.1063/1.333386>
5. Bykov I.V., Gan'shina E.A., Granovskii A.B., et al. Magnetorefractive effect in granular films with tunneling magnetoresistance. *Phys. Solid State*. 2000;42(3):498–502. <https://doi.org/10.1134/1.1131238> [Original Russian Text: Bykov I.V., Gan'shina E.A., Granovskii A.B., Gushchin B.C. Magnetorefractive effect in granular films with tunneling magnetoresistance. *Fizika tverdogo tela*. 2000;42(3):487–491 (in Russ.).]
6. Gushchin B.C., Gan'shina E.A., Kozlov A.A., Bykov I.V. Magnetorefractive effect in nanocomposites. *Moscow University Physics Bulletin*. 2005;60(1):57–75. [Original Russian Text: Gushchin B.C., Gan'shina E.A., Kozlov A.A., Bykov I.V. Magnetorefractive effect in nanocomposites. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya*. 2005;1:45–58 (in Russ.).]

7. Yurasov A., Yashin M., Ganshina E., Granovsky A., Garshin V., Semenova D., Mirzokulov K. Simulation of magneto-optical properties of nanocomposites (CoFeZr)_x(Al₂O₃)_(1-x). *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;1389(1):012113. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1389/1/012113>
8. Apresyan L.A., Vlasova T.V., Krasovskii V.I., et al. Effective Medium Approximations for the Description of Multicomponent Composites. *Tech. Phys.* 2020;65(7):1130–1138. <https://doi.org/10.1134/S106378422007004X>
[Original Russian Text: Apresyan L.A., Vlasova T.V., Krasovskii V.I., Kryshchob V.I., Rasmagin S.I. Effective Medium Approximations for the Description of Multicomponent Composites. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki.* 2020;90(7):1175–1183 (in Russ.). <https://doi.org/10.21883/JTF.2020.07.49453.446-18>]
9. Fadeev E.A., Blinov M.I., Garshin V.V. et al. Magnetic Properties of (Co₄₀Fe₄₀B₂₀)_x(SiO₂)_(100-x) Nanocomposites near the Percolation Threshold. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2019;83(7):835–837. <https://doi.org/10.3103/S1062873819070153>
[Original Russian Text: Fadeev E.A., Blinov M.I., Garshin V.V., Tarasova O.S., Gan'shina E.A., Prudnikova M.V., Prudnikov V.N., Lyakhderanta E., Ryl'kov V.V., Granovskii A.B. Properties of (Co₄₀Fe₄₀B₂₀)_x(SiO₂)_(100-x) Nanocomposites near the Percolation Threshold. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya.* 2019;83(7):917–920 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0367676519070159>]
10. Gan'shina E.A., Pripechenkov I.M., Perova N.N., et al. Magneto-Optical Spectroscopy of Nanocomposites (CoFeB)_x(LiNbO₃)_(100-x) with Concentrations up to the Percolation Threshold: From Superparamagnetism and Superferromagnetism to Ferromagnetism. *Phys. Metals Metallogr.* 2023;124(2):126–132. <https://doi.org/10.1134/s0031918x22601949>
[Original Russian Text: Gan'shina E.A., Pripechenkov I.M., Perova N.N., Kanazakova E.S., Nikolaev S.N., Sitnikov A.S., Granovskii A.B., Ryl'kov V.V. Magneto-optical spectroscopy of nanocomposites (CoFeB)_x(LiNbO₃)_(100-x) with concentrations up to the percolation threshold: from superparamagnetism and superferromagnetism to ferromagnetism. *Fizika metallov i metallovedenie.* 2023;124(2):134–140 (in Russ.).]
11. 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.
12. 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. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 2019;477:88–91. <https://www.doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.01.040>
13. Dekhtyaruk L.V., Kharchenko A.P., Klymenko Yu.O., Shkurdoda Yu.O., Shabelnyk Yu.M., Bezdidko O.V., Chornous A.M. Negative and Positive Effect of Giant Magnetoresistance in The Magnetically Ordered Sandwich. *2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP).* Sumy, Ukraine. 2020. P. 01NMM13-1-01NMM13-3. <https://www.doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309694>
14. 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. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/26/3/036002>
15. Yurasov A., Yashin M., Ganshina E., et al. Simulation of magneto-optical properties of nanocomposites (CoFeZr)_x(Al₂O₃)_{1-x}. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;1389:012113. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1389/1/012113>

Об авторах

Мухутдинова Муза Александровна, студент, Институт перспективных технологий и индустриально-го программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: mukhutdinova-03@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0001-5013-5208>

Юрасов Алексей Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры наноэлектроники, 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 Authors ID 6602974416, SPIN-код РИНЦ 4259-8885, <https://orcid.org/0000-0002-9104-3529>

About the authors

Muza A. Mukhutdinova, Student, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: mukhutdinova-03@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0001-5013-5208>

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 Authors ID 6602974416, RSCI SPIN-code 4259-8885, <https://orcid.org/0000-0002-9104-3529>