

УДК 537.632.5

DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-59-68

Особенности моделирования магниторефрактивного эффекта в многослойных металлических наноструктурах

**А.А. Мокрушина,
А.Н. Юрасов[@]**

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

Магниторефрактивный эффект (МРЭ) важен и интересен и с фундаментальной, и с практической точки зрения. Данный эффект заключается в изменении коэффициента отражения или прохождения электромагнитной волны от намагниченных структур, обладающих эффектами магнитосопротивления. Это может быть и гигантское, и туннельное, и колоссальное магнитосопротивление в зависимости от типа структуры. МРЭ наиболее ярко проявляется в ИК-области спектра и может достигать десятки процентов. Он характеризуется однозначной зависимостью от величины магнитосопротивления. В данной статье рассматриваются особенности МРЭ в многослойных металлических наноструктурах, обладающих гигантским магнитосопротивлением. Проведено исследование МРЭ с использованием модели, связывающей данный эффект с магнитосопротивлением, а также в рамках модели с учетом спин-зависящего рассеяния. Последняя модель в более ранних работах позволила хорошо описать качественно, а в отдельных случаях и количественно, ряд экспериментальных данных. Предложенный нами учет частотной зависимости сопротивления позволил улучшить первую модель и получить принципиально новый результат: надежное качественное и количественное описание величины эффекта. В статье отмечена ключевая возможность применения магниторефрактивного эффекта как бесконтактного метода исследования наноструктур, метода неразрушающего контроля любых элементов электроники. Проведено также сравнение с экспериментальными данными, продемонстрировавшее возможность эффективного описания связи МРЭ и магнитосопротивления в рамках двух рассмотренных моделей.

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

Features of Modeling of the Magnetorefractive Effect in Multilayered Metal Nanostructures

Anastasia A. Mokrushina,
Alexey N. Yurasov[@]

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

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

The magnetorefractive effect (MRE) is important and interesting from both fundamental and practical points of view. This effect consists in a change in the reflection coefficient or the passage of an electromagnetic wave from magnetized structures with magnetoresistance effects. It can be giant, tunnel and colossal magnetoresistance depending on the type of structure. MRE is most clearly manifested in the IR region of the spectrum and can reach tens of percent. It is possible to show its unambiguous dependence on the magnitude of the magnetoresistance. This article discusses the features of MRE in multilayer metal nanostructures with giant magnetoresistance. The MRE simulation is carried out using a model that relates this effect to magnetoresistance, as well as in the framework of the model taking into account spin-dependent scattering. The last model in earlier works allowed describing a number of experimental data well qualitatively and in some places quantitatively. In this paper, taking into account the frequency dependence of the resistance allowed us to improve the first model, which allowed us to obtain a good qualitative and quantitative description of the effect value – this is a fundamentally new result. The article highlighted the key opportunity for the application of magnetorefractive effect as a contactless method to study nanostructures, a method of nondestructive testing of all electronic components. A comparison with experimental data is also made. A good description is demonstrated in the framework of the two models considered, which can effectively describe the relationship between MRE and magnetoresistance

Keywords: nanostructures, magnetorefractive effect, magnetoreflexion, magnetotransmission, magnetoresistance, spin-dependent scattering.

Введение

Наноструктуры являются весьма перспективными материалами с заслуживающими внимания магнитными, электрическими, оптическими, магнитооптическими и другими физическими свойствами [1]. Они находят применение, прежде всего, в электронике. Поиск новых вариантов использования данных структур представляет собой актуальную задачу.

Одним из наиболее интересных и принципиально важных разделов с точки зрения исследования наноструктур является магнитооптика, изучающая взаимодействие света с веществом в магнитном поле [2, 3]. При этом наблюдаются различные магнитооптические эффекты, среди которых следует выделить магниторефрактивный эффект (МРЭ) [4]. МРЭ можно рассматривать как высокочастотный аналог магнитосопротивления (МС), и величина МРЭ – это относительное изменение коэффициентов отражения и прохождения света для структур с гигантским, туннельным или колоссальным магнитосопротив-

лением в магнитном поле [5]. МРЭ относится к бесконтактным методам исследования наноструктур [6], т.е. методам неразрушающего контроля, которые можно использовать и для изучения наноструктур, и для поиска новых материалов, и для построения теоретических моделей магниторефрактивного эффекта в наноструктурах.

В настоящей работе МРЭ рассматривают в металлических мультислойных пленках, обладающих эффектом гигантского магнитосопротивления [6–14].

Расчеты проводили в рамках двух моделей, и полученные результаты сравнивали с экспериментальными данными для структуры glass/Cr (50 Å)/[CoFe (14 Å)/Cu (9.5 Å)]₈/Cr (20 Å), которые были представлены группой исследователей под руководством Ю.П. Сухорукова и А.В. Телегина (Институт физики металлов УрО РАН) [13]. Особенностью описания наблюдаемых эффектов является учет спин-зависящего рассеяния.

Способы описания МРЭ

В отсутствие магнитного поля диэлектрическая проницаемость $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_1(\omega) - i\varepsilon_2(\omega)$ – скалярная величина, действительная и мнимая части которой определяются через индексы (коэффициенты) рефракции n и экстинкции k :

$$\operatorname{Re} \varepsilon(\omega) = \varepsilon_1(\omega) = n^2 - k^2, \quad \operatorname{Im} \varepsilon(\omega) = \varepsilon_2(\omega) = 2nk. \quad (1)$$

Оптическая проводимость металла определяется как:

$$\sigma(\omega) = \frac{\omega nk}{2\pi} = \frac{\omega \operatorname{Im} \varepsilon(\omega)}{4\pi}. \quad (2)$$

В многослойных металлических наноструктурах зависимость диэлектрической проницаемости $\varepsilon(\omega, H)$ от проводимости $\sigma(\omega, H)$, в магнитном поле H можно рассмотреть в виде:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_r(\omega) - i \frac{4\pi\sigma(\omega)}{\omega}. \quad (3)$$

Здесь $\varepsilon_r(\omega)$ – диэлектрическая проницаемость, учитывающая вклад токов смещения.

Согласно работе [5], МРЭ может быть описан, как изменение коэффициентов отражения и пропускания электромагнитных волн для образцов с магниторезистивным эффектом при их намагничивании. Благодаря влиянию намагниченности на магнитосопротивление $\Delta\rho/\rho_0$ структуры, учитывается ее вклад в оптическую проводимость образца и, соответственно, в МРЭ:

$$\Delta\sigma = \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_H} = \frac{\Delta\rho}{\rho_0^2 [1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0}]}. \quad (4)$$

где $\Delta\sigma$ – магнитопроводимость структуры;

$$\Delta\rho = \rho_H - \rho_0.$$

Нижний индекс H определяет значения величин во внешнем магнитном поле, а 0 – без него. При расчетах важно учитывать, что сопротивление имеет частотную зависимость и полученные в данной работе результаты учитывают этот факт.

Рассмотрим следующую модель: в магнитном поле коэффициент рефракции n и коэффициент экстинкции k – это $n_H = n + \Delta n$ и $k_H = k + \Delta k$ соответственно. Используя (1) и (2), окончательно получаем [14]:

$$\Delta n = \frac{2\pi\Delta\sigma}{\omega} \left(\frac{n+k}{n^2+k^2} \right), \quad (5)$$

$$\Delta k = \frac{2\pi\Delta\sigma}{\omega} \left(\frac{n-k}{n^2+k^2} \right). \quad (6)$$

Таким образом, главный вклад в изменение коэффициентов прямо пропорционален магнитопроводимости структуры.

Для расчета МРЭ в многослойной структуре используют формулы Френеля, в нашем случае в эффективной трехслойной среде [15]. Данные формулы справедливы для любых многослойных систем.

Формула для коэффициента отражения R :

$$R = |r_{jkl}^p|^2, r_{jkl}^p = \frac{r_{jk}^p + F_k^2 r_{kl}^p}{1 + F_k^2 r_{jk}^p r_{kl}^p}, r_{jk}^p = \frac{g_j n_k^2 - g_k n_j^2}{g_j n_k^2 + g_k n_j^2}, g_{jkl} = \sqrt{n_{jkl}^2 - n_1^2 \sin^2 \phi}, \quad (7)$$

$$F_k = \exp(-2\pi i \lambda^{-1} g_k d_k),$$

где ϕ – угол падения света из первого слоя;

j, k, l – порядковые номера слоев;

d_k – толщина соответствующего слоя;

λ – длина световой волны в вакууме;

i – мнимая единица;

r – парциальный коэффициент отражения в отдельном слое,

F_k – фазовый множитель, ответственный за интерференцию и затухание излучения в k -слое структуры с толщиной d .

Аналогично, можно рассчитать и пропускание света T многослойной системы [15]. Например, для трехслойной системы (воздух-наноструктура-воздух) её можно наглядно представить в виде:

$$T = |t_{123}|^2, t_{123} = \frac{t_{12} F_2 t_{23}}{1 + F_2^2 r_{12} r_{23}}. \quad (8)$$

Здесь и далее рассматривается нормальное падение света, в этом случае эффект МРЭ значительный по величине, а поляризационные компоненты естественного света равны:

$$r_{jkl}^p = -r_{jkl}^s = r_{jkl} \quad \text{и} \quad t_{jkl}^p = t_{jkl}^s = t_{jkl}. \quad (9)$$

МРЭ рассчитывается, как изменение коэффициента отражения R образца при его намагничивании:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R(M=0) - R(M)}{R(M=0)}, \quad (10)$$

где M – намагниченность образца в магнитном поле.

Аналогично рассчитывается эффект на прохождении. Таким образом по формулам (1)–(10) можно смоделировать МРЭ в любой многослойной структуре. Важно отметить, что МРЭ может иметь как положительный, так и отрицательный знак. Также в рамках вышеизложенной модели можно оценивать величину магнитосопротивления, если измерить оптические параметры и смоделировать частотную зависимость сопротивления, что имеет большое значение при сравнении с экспериментальными данными.

Второй вариант моделирования основан на следующем: учитывается спин-зависящее рассеяние электронов, являющееся основным механизмом магнитосопротивления в многослойных наноструктурах. Для учета спин-зависящего рассеяния использовалось известное выражение для диэлектрической проницаемости в пределе самоусреднения [16]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{st} + \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2 \frac{i\omega\tau}{1 - i\omega\tau} \left(1 + \frac{m^2 \beta^2}{(1 - i\omega\tau)^2 - m^2 \beta^2} \right) \quad (11)$$

где m – относительная величина намагниченности системы M/M_s ,

β – параметр спиновой асимметрии,

τ – время релаксации.

Затем полученный результат подставляем в формулы Френеля и (10).

Таким образом, МРЭ в металлических наноструктурах рассматривается в рамках двух различных моделей, описанные выше. Результаты представлены в следующем разделе.

Расчет МРЭ спектров и сравнение с экспериментом

Рассчитаны спектры МРЭ на пропускание света для многослойной металлической структуры $\text{glass/Cr (50 \AA)/[CoFe (14 \AA)/Cu (9.5 \AA)]_8/\text{Cr (20 \AA)}$ при комнатной температуре и нормальном падении света на образец. Это необходимо для сравнения с экспериментальными данными, полученными при тех же условиях и геометрии.

В первом способе описания учитывались особенности металлических наноструктур через спин-зависящее рассеяние (11). Расчет проводился по формулам Френеля (8)–(10). Для расчета МРЭ была использована величина магнитосопротивления 5%, которая соответствовала экспериментальной. На рис. 1 представлены полученные результаты. Видно, что изменение времени релаксации существенным образом меняют величину, форму и знак МРЭ. Здесь же, на рис. 1 дано сравнение результатов моделирования и эксперимента.

Очевидно, что для пунктирной, красной и зеленой кривых в области длины волны со значением порядка 2.5 мкм наблюдается минимум. Красная линия и пунктирная после прохождения минимума выходят на качественное согласие с экспериментом. Из всех рассчитанных кривых именно они лучше всего описывают эксперимент. Отметим, что описание эксперимента в рамках данной модели не дает количественного согласия, а только порядок величины, что обусловлено необходимостью учета разных времен релаксации и различными квантовыми эффектами в тонких металлических пленках. Важно подчеркнуть, что

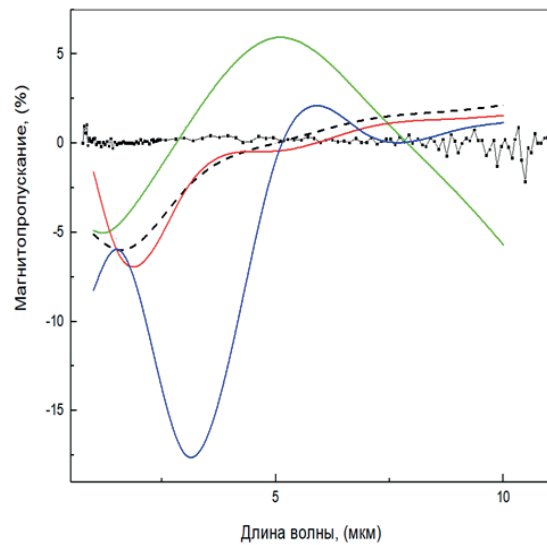


Рис. 1. Спектры МРЭ на пропускании света ($\Delta T/T$) для:
эксперимент – черная линия (квадраты);
расчетные данные с учетом спин-зависящего рассеяния
(при $\tau = 8 \times 10^{-16}$ с, $\beta = 0.75$);
при $\tau = 7 \times 10^{-16}$ с, $\beta = 0.75$ – красная линия;
при $\tau = 6 \times 10^{-16}$ с, $\beta = 0.75$ – синяя линия;
при $\tau = 4 \times 10^{-16}$ с, $\beta = 0.75$ – зеленая линия.

модель очень чувствительна к величине времени релаксации (рис. 1), и даже изменение его в пределах одного порядка приводит к существенному изменению спектров МРЭ.

Согласно второму методу, расчеты МРЭ проводили по формулам Френеля (8)–(10) с учетом изменения коэффициента рефракции n и коэффициента экстинкции k при включении магнитного поля (3). Расчетные данные также получены при нормальном падении света, при комнатной температуре для разных $\Delta\sigma$ (2) с учетом моделирования частотной зависимости сопротивления. Сравнение эксперимента с расчетными данными приведено на рис. 2.

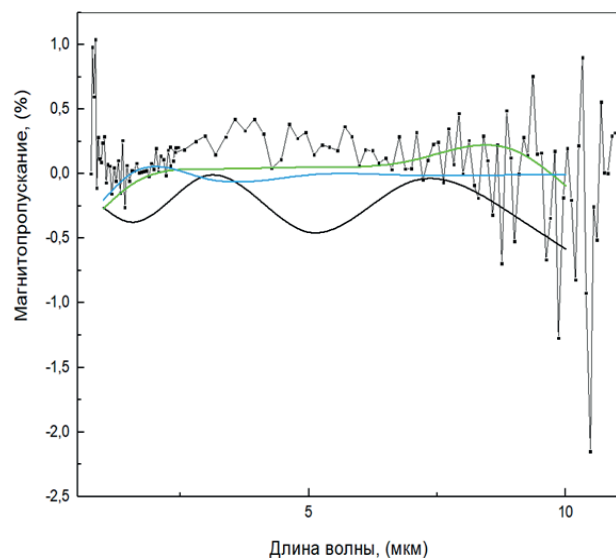


Рис. 2. Спектры МРЭ на пропускании света ($\Delta T/T$): эксперимент – черная линия (квадраты);
расчетные данные: для $\Delta\sigma = 10^{-13}$ – сплошная линия; для $\Delta\sigma = 10^{-12}$ – зеленая линия;
для $\Delta\sigma = 10^{-11}$ – голубая линия.

Как видно из рис. 2, данный подход позволяет более адекватно описать эксперимент в отличие от первого способа. Наилучшее согласие наблюдается для зеленой кривой (рис. 2). Если сравнивать эти результаты с описанными ранее [16, 18], то именно учет частотной зависимости сопротивления позволяет вполне корректно описать экспериментальные результаты, полученные на качественном уровне для новых образцов металлических наноструктур glass/Cr (50 Å)/[CoFe (14 Å)/Cu (9.5 Å)]₈/Cr (20 Å) без использования спин-зависящего рассеяния, что является новым и важным результатом.

Заключение

В настоящей работе выполнено моделирование магниторефрактивного эффекта МРЭ в рамках двух подходов: первый – учитывает особенности металлических наноструктур через спин-зависящее рассеяние, второй – учитывает магнитосопротивление (магнитопроводимость) в явном виде, что позволяет при известных оптических параметрах и частотной зависимости сопротивления оценивать величину магнитосопротивления и сравнивать её с экспериментальной (в нашем случае эта величина составляла 5%). Моделирование проводили для металлической многослойной наноструктуры glass/Cr (50 Å)/[CoFe (14 Å)/Cu (9.5 Å)]₈/Cr (20 Å) в ИК-области спектра. Показано значительное влияние времени релаксации и изменения магнитопроводимости на МРЭ в первой и второй моделях, соответственно. Данные подходы позволяют качественно описывать МРЭ в металлических наноструктурах. Описание МРЭ может быть улучшено, если учесть наличие разных времен релаксации электронов и наличие различных квантовых эффектов. Основное достижение данной работы, по сравнению с предыдущими, заключается в усовершенствовании метода нахождения МРЭ для новых образцов металлических наноструктур через магнитосопротивление с учетом моделирования спектральной зависимости сопротивления, что, безусловно, важно для ИК-области спектра.

Литература:

1. Гороховский А.В. Композитные наноматериалы. Саратов: Изд-во СГТУ, 2008. 68 с.
2. 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. Volume 6. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013. 301 p.
3. Ткачева В. Р. Нанокompозиты – будущее машиностроения // Техника. Технологии. Инженерия. 2016. № 1. С. 37–40.
4. Jacquet J.C., Valet T. In: Magnetic ultrathin films, multilayers and surfaces. MRS Symp. Proc. 384. 1995. P. 477.
5. Грановский А.Б., Ганышина Е.А., Юрасов А.Н. [и др.] Магниторефрактивный эффект в наноструктурах, манганитах и магнитофотонных кристаллах // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 9. С. 1152–1159.
6. Юрасов А.Н. Магниторефрактивный эффект, как бесконтактный метод исследования функциональных материалов // Материаловедение. 2014. № 6. С. 32–38.
7. Uran S., Grimsditch M., Fullerton E.E., Bader S.D. Infrared spectra of giant magnetoresistance Fe/Cr/Fe trilayers // Phys. Rev. B. 1998. V. 57. № 5. 1998. P. 2705-4. DOI: 10.1103/PhysRevB.57.2705

8. Kravets V.G., Bozec D., Matthew J.A.D., Thompson S.M., Menard H., Horn A.B., Kravets A.F. Correlation between the magnetorefractive effect, giant magnetoresistance, and optical properties of Co-Ag granular magnetic films // *Phys. Rev. B*. 2002. V. 65. № 5. P. 054 415-9. DOI: 10.1103/PhysRevB.65.054415
9. Грановский А., Гушин В., Быков И., Козлов А., Kobayashi N., Ohnuma S., Masumoto T., Inoue M. Гигантский магниторефрактивный эффект в магнитных гранулированных сплавах CoFe–MgF // *Физика твердого тела*. 2003. Т. 45. № 5. С. 867–869.
10. Granovsky A.B., Sukhorukov Yu.P., Gan'shina E.A., Telegin A.V. Magnetorefractive Effect in Magnetoresistive Materials. In: *Springer Series in Materials Science. Magnetophotonics. From Theory to Applications*. V. 178 / ed. by M. Inoue, M. Levy, A.V. Baryshev. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. P. 107–134.
11. Telegin A.V., Sukhorukov Yu.P., Loshkareva N.N., Mostovshchikova E.V., Bebenin N.G., Gan'shina E.A., Granovsky A.B. Giant magnetotransmission and magnetoreflexion in ferromagnetic materials // *J. Magn. Magn. Mater.* 2015. V. 383. P. 104–109. DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.11.080
12. Lobov I.D., Kirilova M.M., Makhnev A.A., Romashev L.N., Ustinov V. V. Parameters of Fe/Cr interfacial electron scattering from infrared magnetoreflexion // *Phys. Rev. B*. 2010. V. 81. P. 134436-6. DOI: 10.1103/PhysRevB.81.134436
13. Банникова Н.С., Миляев М.А., Наумова Л.И., Проглядо В.В., Криницина Т.П., Каменский И.Ю., Устинов В.В. Гигантское магнитосопротивление сверхрешеток CoFe/Cu(Ni₈₀Fe₂₀)₆₀Cr₄₀ // *Физика металлов и материаловедение*. 2015. Т. 116. № 10. P. 1040.
14. Юрасов А.Н., Телегин А.В., Банникова Н.С., Миляев М.А., Сухоруков Ю.П. Особенности магниторефрактивного эффекта в многослойной металлической наноструктуре [CoFe/Cu]*n* // *Физика твердого тела*. 2018. V. 60. № 2. P. 276–282. DOI: 10.21883/FTT.2018.02.45381.201
15. Маевский В.М. Теория магнетооптических эффектов в многослойных системах с произвольной ориентацией намагниченности // *Физика металлов и материаловедение*. 1985. Т. 5. № 2. С. 213–219.
16. Юрасов А.Н., Телегин А.В., Сухоруков Ю.П. Модель магниторефрактивного эффекта в манганитах в рамках теории эффективной среды // *Физика твердого тела*. 2016. Т. 58. № 4. С. 656–659.

References:

1. Gorokhovskiy A.V. *Composite Nanomaterials*. Saratov: SGTU Publ. (Saratov State Technical University Publ.), 2008. 68 p. (in Russ.)
2. 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*. Volume 6. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013. 301 p.
3. Tkacheva V.R. Nanocomposites – the future of mechanical engineering. *Tekhnika. Tekhnologii. Inzheneriya* (Equipment. Technology. Engineering). 2016; (1):37-40. (in Russ.)
4. Jacquet J.C., Valet T. In: *Magnetic ultrathin films, multilayers and surfaces*. MRS Symp. Proc. 384. 1995. P. 477.
5. Granovsky A.B., Ganshina E.A., Yurasov A.N. [et al.] Magnetorefractive effect in

nanostructures, manganites, and magnetophotonic crystals. *Radiotekhnika i elektronika* (Radio Engineering and Electronics). 2007; 52(9):1152-1159. (in Russ.)

6. Yurasov A.N. Magnetorefractive effect as a contactless method for the study of functional materials. *Materialovedenie* (Materials Science). 2014; (6):32-38. (in Russ.)

7. Uran S., Grimsditch M., Fullerton E.E., Bader S.D. Infrared spectra of giant magnetoresistance Fe/Cr/Fe trilayers. *Phys. Rev. B*. 1998; 57(5):2705-4. DOI: 10.1103/PhysRevB.57.2705

8. Kravets V.G., Bozec D., Matthew J.A.D., Thompson S.M., Menard H., Horn A.B., Kravets A.F. Correlation between the magnetorefractive effect, giant magnetoresistance, and optical properties of Co-Ag granular magnetic films. *Phys. Rev. B*. 2002; 65(5):054415-9. DOI: 10.1103/PhysRevB.65.054415

9. Granovskiy A., Gushhin V., Bykov I., Kozlov A., Kobayashi N., Ohnuma S., Masumoto T., Inoue M. Giant magnetorefractive effect in magnetic granular CoFe-MgF alloys. *Semiconductors/Physics of the Solid State*. 2003; 45(5):911-913.

10. Granovsky A.B., Sukhorukov Yu.P., Gan'shina E.A., Telegin A.V. Magnetorefractive Effect in Magnetoresistive Materials. In: Springer Series in Materials Science. Magnetophotonics. From Theory to Applications. V. 178 / ed. by M. Inoue, M. Levy, A.V. Baryshev. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. P. 107–134.

11. Telegin A.V., Sukhorukov Yu.P., Loshkareva N.N., Mostovshchikova E.V., Bebenin N.G., Gan'shina E.A., Granovsky A.B. Giant magnetotransmission and magnetoreflexion in ferromagnetic materials. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015; 383:104-109. DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.11.080

12. Lobov I.D., Kirilova M.M., Makhnev A.A., Romashev L.N., Ustinov V.V. Parameters of Fe/Cr interfacial electron scattering from infrared magnetoreflexion. *Phys. Rev. B*. 2010; 81: 134436-6. DOI: 10.1103/PhysRevB.81.134436

13. Bannikova N.S., Milyaev M.A., Naumova L.I., Proglyado V.V., Krinitsina T.P., Kamenskii I.Y., Ustinov V.V. Giant magnetoresistance of CoFe/Cu superlattices with the $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ buffer layer. *The Physics of Metals and Metallography*. 2015; 116(10):987-992.

14. Yurasov A.N., Telegin A.V., Bannikova N.S., Milyaev M.A., Sukhorukov Yu.P., Features of the magnetorefractive effect in a multilayer metal nanostructure $[\text{CoFe/Cu}]_n$. *Fizika tverdogo tela (Semiconductors/Physics of the Solid State)*. 2018; 60(2):276-282. (in Russ.)

15. Mayevsky V.M. PMM. 59. 1985. P.213. (in Russ.). Маевский В.М. Theory of magneto-optical effects in multilayer systems with an arbitrary orientation of magnetization. *Fizika metallov i materialovedeniye (The Physics of Metals and Metallography)*. 1985; 5(2):213-219. (in Russ.)

16. Yurasov A.N., Telegin A.V., Sukhorukov Yu.P. Model of the magnetorefractive effect in manganites within the effective medium theory. *Physics of the Solid State*. 2016; 58(4):674-677.

Об авторах:

Мокрушина Анастасия Алексеевна, магистрант первого курса кафедры нанoeлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

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

About the authors:

Anastasia A. Mokrushina, Master Student of the Chair of Nanoelectronics, Physics and Technology Institute, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Alexey N. Yurasov, D.Sc. (Physics and Mathematics), Docent, Professor of the Chair of Nanoelectronics, Physics and Technology Institute, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Для цитирования: Мокрушина А.А., Юрасов А.Н. Особенности моделирования магниторефрактивного эффекта в многослойных металлических наноструктурах // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 3. С. 59–68. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-59-68

For citation: Mokrushina A.A., Yurasov A.N. Features of modeling of the magnetorefractive effect in multilayered metal nanostructures. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(3):59-68. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-59-68