

*В человеке я люблю свет. Толщина свечи меня не волнует.
Пламя скажет мне, хороша ли свеча.*

Антуан де Сент Экзюпери



Архип Куинджи «Закат в степи на берегу моря» (1900)

Секция 10. Магнитооптика и фотомагнетизм

УДК: 537.632

Размерный эффект в магнитооптических спектрах наноструктур**Симдянова М.А.**

Студентка физического факультета МГУ им. Ломоносова

Припеченков И.М.

Аспирант физического факультета МГУ им. Ломоносова

Юрасов А.Н.

д.ф.-м. н., профессор кафедры нанoeлектроники ИПТИП РТУ МИРЭА

Ганьшина Е.А.

д.ф.-м. н., профессор кафедры магнетизма физического факультета МГУ им. Ломоносова

Яшин М.М.

к.ф.-м. н., доцент кафедры нанoeлектроники ИПТИП РТУ МИРЭА

Гладышев И.В.

к.ф.-м. н., доцент кафедры нанoeлектроники ИПТИП РТУ МИРЭА

Грановский А.Б.

д.ф.-м. н., профессор кафедры магнетизма физического факультета МГУ им. Ломоносова

Аннотация. В данной работе в рамках метода эффективной среды исследуется влияние различных микроскопических параметров, квазиклассического и квантового размерного эффекта на магнитооптические спектры экваториального эффекта Керра магнитных нанокomпозитов $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{(1-x)}$, $(\text{Co})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{(1-x)}$, $(\text{Co})_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$, $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{1-x}$ и двухслойных структур NiFe/Ta. При расчетах учтена возможность усиления спин-орбитального взаимодействия в тонком приповерхностном слое, что влияет как на межзонные, так и внутрizonные оптические переходы.

Ключевые слова: наноструктуры, магнитооптика, размерный эффект.

Size-effect in magneto-optical spectra of nanostructures**Simdyanova M.A.**

Student of the Physics Department of Lomonosov Moscow State University

Pripechenkov I.M.

Postgraduate student of the Physics Faculty of Lomonosov Moscow State University

Yurasov A.N.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of the Department of Nanoelectronics at IPTP RTU MIREA

Ganshina E.A.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of the Department of Magnetism, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

Yashin M.M.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Nanoelectronics at the IPTP RTU MIREA

Gladyshev I.V.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Nanoelectronics at IPTP RTU MIREA

Granovsky A.B.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of the Department of Magnetism, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

Annotation. *In this work, within the framework of the effective medium method, we study the influence of various microscopic parameters, semi-classical and quantum size effects on the magneto-optical spectra of the equatorial Kerr effect of magnetic nanocomposites $(CoFeZr)_x(Al_2O_3)_{1-x}$, $(Co)_x(Al_2O_3)_{1-x}$, $(Co)_x(SiO_2)_{1-x}$, $(CoFeB)_x(LiNbO_3)_{1-x}$ and two-layer NiFe/Ta structures. The calculations took into account the possibility of spin-orbit interaction enhancement in a thin near-surface layer, which affects both interband and intraband optical transitions.*

Keywords: *nanostuctures, magneto-optics, size effect.*

Магнитооптическая (МО) спектроскопия, основанная на измерениях спектральных зависимостей экваториального эффекта Керра, также называемого поперечным эффектом Керра (ТКЕ), позволяет бесконтактно и в процессе напыления тонкопленочных образцов получать информацию об их электронной, кристаллической и магнитной микроструктуре [1]. При этом измеряемый параметр ТКЕ, $\delta(\omega)$, а именно относительное изменение интенсивности р-поляризованного света при намагничивании образцов, сложным образом связан с их оптическими и МО свойствами. Поэтому возникает обратная задача восстановления микроскопических параметров по измерениям спектральных зависимостей ТКЕ. В случае магнитных наноструктур, таких как магнитные нанокompозиты или мультислои, эта задача существенно усложняется наличием квазиклассических и квантовых размерных эффектов, и различными возможными типами спин-орбитального взаимодействия (СОВ) на поверхностях раздела слоев или на поверхности наночастиц. Последний фактор наиболее важен, так как МО эффекты определяются действием СОВ, существенно отличающимся в объеме и на поверхности наночастиц. В данной работе в рамках метода эффективной среды исследуется влияние различных микроскопических параметров, квазиклассического и квантового размерного эффекта на ТКЕ спектры нанокompозитов “ферромагнитный металл-диэлектрик” $(CoFeZr)_x(Al_2O_3)_{1-x}$, $(Co)_x(Al_2O_3)_{1-x}$, $(Co)_x(SiO_2)_{1-x}$, $(CoFeB)_x(LiNbO_3)_{1-x}$ с различными объемными концентрациями магнитной компоненты, в том числе вблизи порога перколяции, и двухслойных структур NiFe/Ta. Методика расчета подробно описана в работе [2]. Дополнительно мы учли возможность усиления СОВ в тонком приповерхностном слое толщиной, а, что влияет как на межзонные, так и внутрizonные оптические переходы.

В качестве примера на Рис.1 и Рис.2 показаны рассчитанные спектры нанокompозита $(Co)_{0.35}(SiO_2)_{0.65}$ при разных значениях отношения параметров СОВ в поверхностном слое и в объеме λ_s/λ_b и при разных значениях толщины поверхностного слоя, а с отличающимся от объема параметрами. Как видно из этих рисунков, СОВ в поверхностном слое критическим образом влияет на спектры ТКЕ вплоть до изменения знака.

Разработанная программа позволяет выявить влияние каждого из микроскопических параметра на спектр ТКЕ и определить из сравнения с экспериментом параметры, характеризующие поверхность гранул или слоев, в частности определить значение коэффициента аномального эффекта Холла на поверхности гранул, что недоступно другими методами.

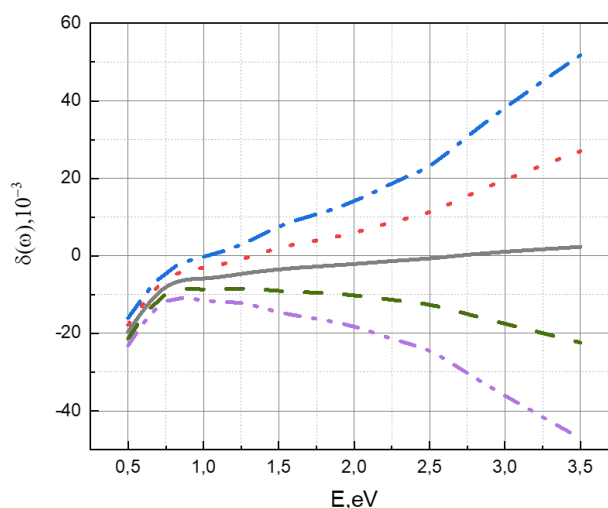


Рис.1. Рассчитанные спектры ТКЕ нанокompозита $(Co)_{0.35}(SiO_2)_{0.65}$ с различными значениями отношения параметров СОВ в поверхностном слое и в объеме λ_s/λ_b : 0 (сплошная линия), 0,5 (пунктир), -0,5 (точки), 1 (точка-точка-пунктир), -1 (точка – пунктир). Параметры: размер гранул $r=2$ нм, форм фактор $L=0.3$, плазменная частота $\omega_p = 8.3 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$.

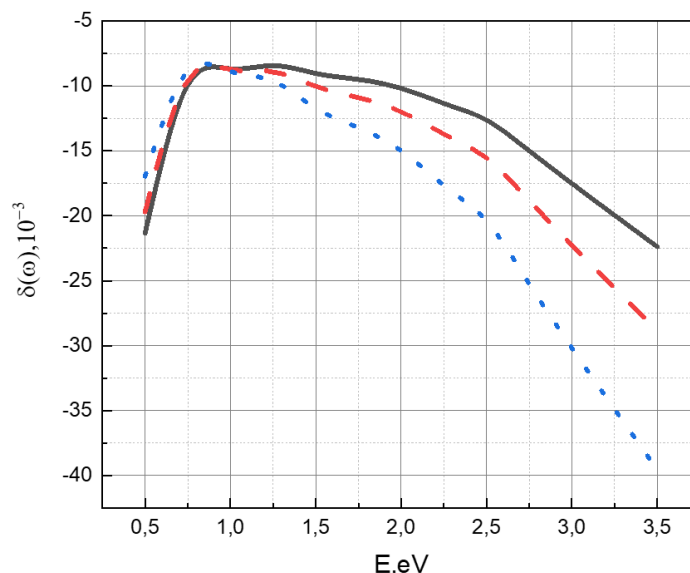


Рис.2. Рассчитанные спектры ТКЕ нанокompозита $(Co)_{0.35}(SiO_2)_{0.65}$ с различными значениями толщины поверхностного слоя a/r : 1/10 (сплошная линия), 1/8 (пунктир), 1/6 (точки). Параметры: размер гранул $r=2$ нм, форм фактор $L=0.3$, плазменная частота $\omega_p = 8.3 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$, $\lambda_s/\lambda_b=1/2$.

В докладе анализируются ограничения метода эффективной среды применительно к описанию ТКЕ, приводятся экспериментальные данные относительно спектральных зависимостей ТКЕ нанокompозитов $(CoFeZr)_x(Al_2O_3)_{1-x}$, $(Co)_x(Al_2O_3)_{1-x}$, $(Co)_x(SiO_2)_{1-x}$, $(CoFeB)_x(LiNbO_3)_{1-x}$ широкого концентрационного состава в диапазоне 0.5-4.0 эВ при 20-300К, и на их основе обсуждается возможное усиление СОВ вблизи поверхности гранул, и как следствие этого усиление ТКЕ.

Список использованных источников

1. Е.А. Ganshina, V.V. Garshin, N.N. Perova, et al, Magneto-Optical Kerr-Spectroscopy of Nanocomposites // ЖЭТФ – 2023 – 164 – pp. 662-672
2. М.А. Simdyanova, А.Н. Yurasov, М.М. Yashin et al.// J. Magn.Magn. Mater. – 2024. – Т. 595. – С. 171550.

УДК 537.632

**Влияние магнитного поля на спектр поверхностной электромагнитной волны
магнитного полупроводника**

Толкачев В.А.

старший преподаватель кафедры радиофизики и электроники ФГБОУ ВО «ЧелГУ»

Бычков И.В.

д.ф.-м. н., профессор кафедры радиофизики и электроники ФГБОУ ВО «ЧелГУ»

Кузьмин Д.А.

д.ф.-м. н., профессор кафедры радиофизики и электроники ФГБОУ ВО «ЧелГУ»

***Аннотация.** В работе исследуется распространение поверхностных электромагнитных волн на поверхности магнитного полупроводника в сильных магнитных полях. Здесь мы приводим условия существования поверхностных электромагнитных волн на границе вакуум – полупроводник. Моделируем зависимость показателя преломления и коэффициентов затухания в зависимости от поля H . Рассчитаны характеристики поверхностной волны для различных полупроводников (в зависимости от величины эффективной массы носителей заряда). Получены частотные зависимости постоянных распространения и локализации поверхностных электромагнитных волн. Выявлено, что чем сильнее приложенное магнитного поле, тем частотный диапазон существования электромагнитных волн смещается в сторону низких частот.*

***Ключевые слова:** поверхностные электромагнитные волны, магнитные полупроводники, сильные магнитные поля*

**The influence of a magnetic field on the spectrum of a surface electromagnetic wave of
a magnetic semiconductor**

Tolkachev V.A.

Senior Lecturer of the Department of Radiophysics and Electronics,
Chelyabinsk State University

Bychkov I.V.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of the Department
of Radiophysics and Electronics, Chelyabinsk State University

Kuzmin D.A.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of the Department
of Radiophysics and Electronics, Chelyabinsk State University

***Annotation.** The paper investigates the propagation of surface electromagnetic waves on the surface of a magnetic semiconductor in strong magnetic fields. Here we present the conditions for the existence of surface electromagnetic waves at the vacuum–semiconductor interface. We model the dependence of the refractive index and attenuation coefficients depending on the field H . The characteristics of the surface wave for various semiconductors are calculated (depending on the*

value of the effective mass of charge carriers). The frequency dependences of the propagation constants and localization of surface electromagnetic waves are obtained. It is revealed that the stronger the applied magnetic field, the frequency range of the existence of electromagnetic waves shifts towards low frequencies.

Keywords: surface electromagnetic waves, magnetic semiconductors, strong magnetic fields

Магнитные полупроводники обладают уникальными магнитными свойствами за счет существования в них электронной, магнитной и дипольной (поляризации) подсистем [1-4]. Многие из этих свойств могут быть использованы и уже применяются на практике: при создании различных систем обработки информации, линий задержки, фильтров, новой элементной базы микро- и нанoeлектроники, в плазмонике и спинтронике. В магнитных полупроводниках возникают квазичастицы нового типа, происходит разделение фаз в основном состоянии, особые свойства проявляют магнитосопротивление и т.д. При создании микроструктур на их основе немаловажную роль играют физические процессы, протекающие на поверхности. К ним относятся и эффекты, связанные с особенностями возбуждения и распространения поверхностных электромагнитных и спиновых волн.

В настоящей работе исследовано распространение поверхностных электромагнитных волн на поверхности магнитного полупроводника в сильных магнитных полях. Были определены условия существования поверхностных электромагнитных волн на границе вакуум – полупроводник, рассчитаны зависимости показателя преломления и коэффициентов затухания в зависимости от величины внешнего магнитного поля H .

Исследуем распространение поверхностной электромагнитной волны в плоскости XZ в структуре вакуум – полупроводник, показанной на рис.1. Внешнее магнитное поле направлено вдоль оси Z, волновой вектор \vec{k} направлен вдоль оси X.

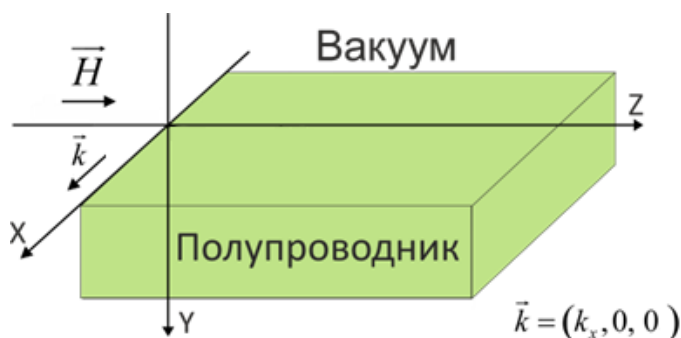


Рис.1 Схематическое представление геометрии поставленной задачи

Структура на рис. 1 состоит из полупроводника с диэлектрической проницаемостью $\hat{\epsilon}$ и магнитной проницаемостью $\hat{\mu}$, помещенного в вакуум с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1=1$ и магнитной проницаемостью $\mu_1 = 1$.

Тензоры диэлектрической и магнитной проницаемостей могут быть выражены следующим образом [5]:

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{\perp} & i\epsilon_a & 0 \\ -i\epsilon_a & \epsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_P \end{pmatrix}, \hat{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_{\perp} & i\mu_a & 0 \\ -i\mu_a & \mu_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_P \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\perp} &= \varepsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2 (\omega + i\nu)}{\omega [(\omega + i\nu)^2 - \omega_c^2]} \right), \varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_0 \frac{\omega_p^2 \omega_c^2}{\omega [(\omega + i\nu)^2 - \omega_c^2]}, \\ \varepsilon_p &= \varepsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\nu)} \right), \mu_{\perp} = 1 + \frac{\omega_M (\omega_H - i\alpha\omega)}{\omega_H^2 - (1 + \alpha^2)\omega^2 - 2i\alpha\omega\omega_H}, \\ \mu_p &= 1 + \frac{-i\alpha\omega_M}{\omega + i\alpha\omega_H}, \mu_{\parallel} = 1 + \frac{-\omega_M \omega}{\omega_H^2 - (1 + \alpha^2)\omega^2 - 2i\alpha\omega\omega_H}. \end{aligned} \quad (2)$$

где, $\omega_H = gH$, $\omega_M = 4\pi gM_0$, g – гиромагнитное отношение, M_0 – намагниченность насыщения, α – параметр затухания, ε_0 – решеточная часть диэлектрической проницаемости, $\omega_p = 4\pi n_s e^2 / m^*$ и $\omega_c = eH / m^* c$ – плазменная и циклотронная частоты, соответственно, e и m^* – заряд и эффективная масса носителей заряда, c – скорость света в вакууме, n_s – плотность носителей, ν – эффективная частота столкновений.

Решая систему уравнений Максвелла и граничных условий, мы получим дисперсионное уравнение для ТЕ- и ТМ- поверхностных волн. В данной работе мы рассматриваем только ТМ- волну, дисперсионное уравнение которой имеет вид:

$$\varepsilon_{\perp} k_0 \left(\sqrt{\varepsilon_{\perp} (\varepsilon_{\perp}^2 k_0^2 \mu_p - k_0^2 \mu_p \varepsilon_a^2 - \varepsilon_{\perp} k^2)} + (\varepsilon_{\perp}^2 - \varepsilon_a^2) \sqrt{k_0^2 - k^2} + ik \varepsilon_a \right) = 0 \quad (3)$$

где $k_0 = \omega/c$.

Для численного моделирования будем использовать параметры типичного магнитного полупроводника: $M_0 = 160$ Гс, $\alpha = 0.05$, $g = 1.75 \cdot 10^7$ Э⁻¹с⁻¹, $\varepsilon_0 = 17.8$, $m^* = 0.1 m_e$, $\omega_p = 10^{12}$ с⁻¹.

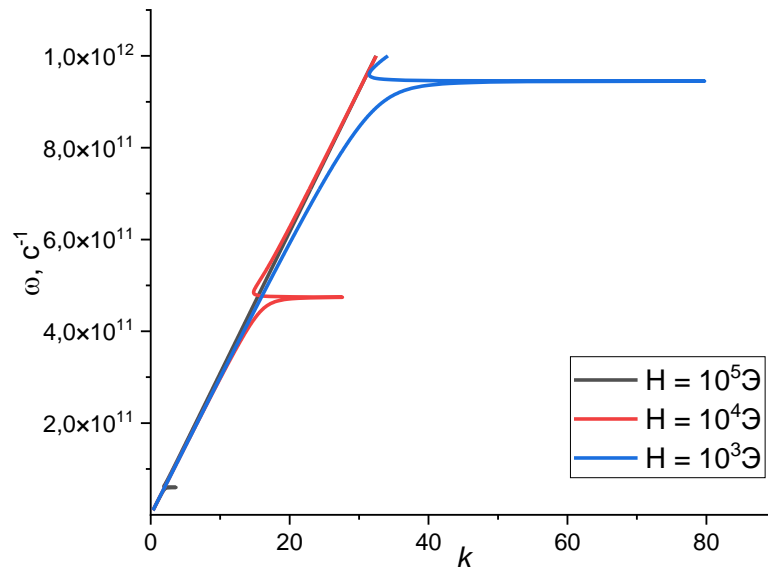


Рис.2 Зависимость частоты от постоянной распространения волны при разных полях.

Дисперсионные зависимости поверхностных волн при различном значении внешнего магнитного поля показаны на рис. 2. Можно видеть, что на некоторой частоте, определяемой величиной внешнего магнитного поля наблюдается резонансное увеличение волнового числа электромагнитной волны, а значит усиление ее локализации вблизи поверхности магнитного полупроводника. Это хорошо видно в частотной зависимости постоянной локализации электромагнитной волны в вакууме (см. рис. 3). При этом внутри магнитного полупроводника

постоянная локализации уменьшается почти до нуля. Это говорит о том, что электромагнитная волна проникает вглубь материала.

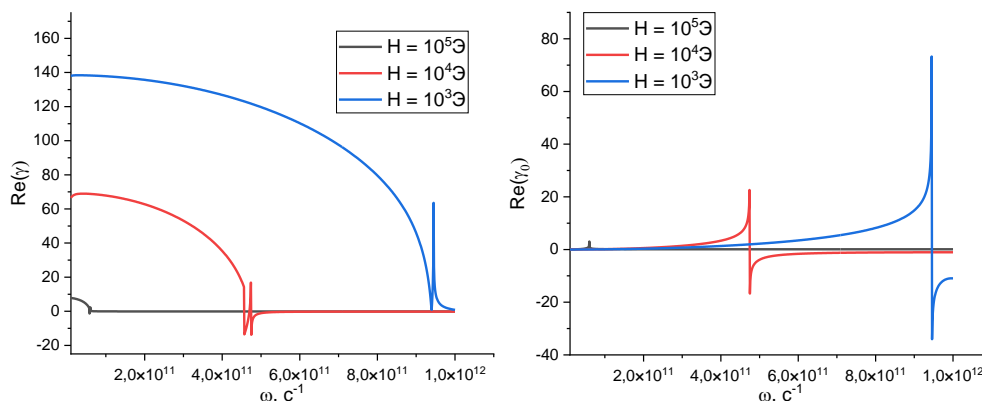


Рис.3 Зависимость постоянной локализации в полупроводнике (γ) и в вакууме (γ_0) от частоты при разных полях.

Заключение и выводы

В работе проведено исследование распространения поверхностных электромагнитных волн на границе раздела сред вакуум - магнитный полупроводник, исследован спектр поверхностных электромагнитных волн в зависимости от величины внешнего магнитного поля и частоты. Из совместного решения уравнений (2) и (3) получены частотные зависимости постоянных распространения поверхностных электромагнитных волн рис.2. Из графиков видно, что чем сильнее приложенное магнитного поле, тем частотный диапазон существования электромагнитных волн смещается в сторону низких частот. Такое же поведение наблюдается для постоянных локализации в полупроводнике и вакууме (рис.3).

Работа выполнена при поддержке РФФ (№ 22-19-00355)

Список использованной литературы:

1. Bhalla P., MacDonald A. H., Culcer D. Resonant photovoltaic effect in doped magnetic semiconductors //Physical Review Letters. – 2020. – Т. 124. – №. 8. – С. 087402.
2. Mallik S. K. et al. Transition metal substituted MoS2/WS2 van der Waals heterostructure for realization of dilute magnetic semiconductors //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. – Т. 560. – С. 169567.
3. Nadeem M. et al. Quantum Anomalous Hall Effect in Magnetic Doped Topological Insulators and Ferromagnetic Spin-Gapless Semiconductors—A Perspective Review //Small. – 2020. – Т. 16. – №. 42. – С. 1904322.
4. Huang C. et al. Built-in electric field control of magnetic coupling in van der Waals semiconductors //Physical Review B. – 2021. – Т. 103. – №. 14. – С. L140410.
5. Басс Ф.Г., Булгаков А.А., Тетервов А.П. Высоочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками. – Наука, Глав. ред. физико-математической лит-ры, 1989. – Т. 33.

УДК 537.632

Датчик переменного магнитного поля на основе магнитоплазмонного кристалла**Беляев В.К.**

к.ф.-м. н., заведующий лабораторией магнитооптических исследований, Научно-Образовательный Центр «Умные Материалы и Биомедицинские Приложения», Балтийский Федеральный Университет им. И. Канта

Мурзин Д.В.

м.н.с. лаборатории магнитооптических исследований, Научно-Образовательный Центр «Умные Материалы и Биомедицинские Приложения», Балтийский Федеральный Университет им. И. Канта

Родионова В.В.

к.ф.-м. н., доцент, директор Научно-Образовательного Центра «Умные Материалы и Биомедицинские Приложения», Балтийский Федеральный Университет им. И. Канта

***Аннотация.** Магнитоплазмонные кристаллы на основе ферромагнитных металлических пленок, в которых экваториальный эффект Керра усиливается за счет возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов, можно использовать в качестве сенсорных элементов постоянных и переменных магнитных полей. Исследованы магнитные, оптические и магнитооптические характеристики магнитоплазмонных кристаллов на основе пермаллоя толщиной от 5 до 20 нм, а также показано, что они подходят для измерения и картирования постоянных и переменных магнитных полей напряженностью порядка 10 мЭ.*

***Ключевые слова:** магнитоплазмонные кристаллы, экваториальный эффект Керра, датчик магнитного поля*

Magnetoplasmonic crystal-based AC magnetic field sensor**Belyaev V.K.**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, head of the laboratory of magneto-optical studies, Research and Educational Center «Smart Materials & Biomedical Applications», Immanuel Kant Baltic Federal University

Murzin D.V.

Junior researcher of the laboratory of magneto-optical studies, Research and Educational Center «Smart Materials & Biomedical Applications», Immanuel Kant Baltic Federal University

Rodionova V.V.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, director of Research and Educational Center «Smart Materials & Biomedical Applications», Immanuel Kant Baltic Federal University

***Annotation.** Magnetoplasmonic crystals based on ferromagnetic metal films providing the transversal Kerr effect enhancement by the excitation of surface plasmon-polaritons, can be used as sensors of DC and AC magnetic fields. Based on the study of the magnetic, optical and magneto-*

optical characteristics of magnetoplasmonic crystals based on permalloy with thickness from 5 to 20 nm, it is shown that such structures are suitable for measuring and mapping DC and AC magnetic fields with a strength of about 10 mOe.

Keywords: *magnetoplasmonic crystals, transverse Kerr effect, magnetic field sensor*

В настоящее время крайне важно уделять приоритетное внимание энергоэффективности и производительности миниатюрных электромагнитных и микромагнитных устройств, что делает дистанционный контроль их магнитного состояния одной из ключевых задач. В частности, определение распределения магнитного поля отдельных электронных компонентов позволяет осуществлять мониторинг их состояния в режиме реального времени и обнаруживать неисправности [1]. Решать подобные задачи можно с помощью коммерческих датчиков на эффекте Холла или магнитосопротивления [2,3], а также более дорогих и чувствительных оптических магнитометров, основанных на уникальных свойствах паров щелочных металлов или азотных вакансиях в алмазах [4,5]. Альтернативным вариантом, объединяющим дешевизну в производстве и возможность удаленного считывания информации оптическими методами, является применение датчиков на основе магнитоплазмонных кристаллов [6].

Данная работа посвящена использованию магнитоплазмонного кристалла для измерения переменных и постоянных магнитных полей. Магнитоплазмонные кристаллы были изготовлены методом магнетронного распыления серебра, пермаллоя и нитрида кремния на одномерные дифракционные решетки. В данной работе проведены исследования интегральных и локальных магнитных свойств, а также спектроскопия коэффициента отражения и экваториального эффекта Керра в видимой области длин волн. Показано, что использование полевой зависимости магнитооптического отклика позволяет оценить амплитуду и/или частоту внешнего переменного магнитного поля с высокой точностью [6].

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ № 13.2251.21.0143.

Список использованной литературы:

1. A. Grosz A., M. J Haji-Sheikh., S.C. Mukhopadhyay. High Sensitivity Magnetometers. // Springer International Publishing, Cham, 2017.
2. M.A. Khan, J. Sun, B. Li, A. Przybysz, J. Kosel. Magnetic sensors-A review and recent technologies. // Eng. Res. Express 2021-3-022005
3. B. Brajon, E. Gasparin, G. Close. A Benchmark of Integrated Magnetometers and Magnetic Gradiometers. // IEEE Access 2023-11-115635–115643.
4. N. Aslam, H. Zhou, H. Park et.al. Quantum sensors for biomedical applications. // Nat Rev Phys 2023-5- p. 157–169
5. A. Fabricant, I. Novikova, G. Bison. How to build a magnetometer with thermal atomic vapor: a tutorial. // New J. Phys. 2023-25-025001
6. V. K. Belyaev, V.V. Rodionova, A.A. Fedyanin et.al. Magnetic field sensor based on magnetoplasmonic crystal. // Sci Rep. 2020-10(1)-7133.

УДК 537.624

Магнитооптическая векторизация плоскостной компоненты поля мультиполей**Богуславский Л.Г.**

Н.с., ИЕНиМ УрФУ

Иванов В.Е.

К.ф. м.н. с.н.с. , ИЕНиМ УрФУ

***Аннотация.** Работа развивает исследование топологической структуры неоднородных магнитных полей различных магнитных систем с применением магнитооптических изображений. Продемонстрирована методика векторизации плоскостной компоненты неоднородного поля диполя, квадруполя и октуполя и расчет индекса Пуанкаре соответствующих векторных полей.*

***Ключевые слова:** магнитооптическая визуализация, неоднородные магнитные поля, векторизация, диполь, квадруполь, октуполь, индекс Пуанкаре.*

Magneto-optical vectorization of the in-plane component of the multipole field**Boguslavskiy L.G.**

Researcher, Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University

Ivanov V.E.

Senior researcher, Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University

***Annotation.** The work develops the study of the topological structure of inhomogeneous magnetic fields of various magnetic systems using magneto-optical images. The method of vectorization of the in-plane component of the inhomogeneous field of the dipole, quadrupole and octupole and the calculation of the Poincaré index of the corresponding vector fields are demonstrated.*

***Keywords:** magneto-optical imaging, inhomogeneous magnetic fields, vectorization, dipole, quadrupole, octupole, Poincaré index*

Интерес к сложной структуре поля вызван конструированием магнитных систем, создающих неоднородные поля для различных применений [1]. В топологически сложных магнитных полях присутствуют особые точки, сепараторы и сепаратрисные поверхности, которые определяют глобальную структуру магнитного поля [2]. Проекция пространственного векторного поля на какую-либо секущую плоскость также отражает структуру поля и содержит особые точки, свойства которых определяются их индексами и теоремой Пуанкаре.

В [3] прямым интегрированием было показано, что индекс Пуанкаре, χ

$$\chi = \begin{cases} 1, & \text{для диполя перпендикулярного плоскости,} & (1) \\ 2, & \text{для диполя параллельного плоскости,} & (2) \\ 3, & \text{для квадруполя,} & (3) \end{cases}$$

Магнитооптические изображения (МОИ) неоднородного поля дают качественную

информацию о его структуре. Векторизация намагниченности в пленках [4] дало импульс векторизации плоскостной компоненты поля с использованием МОИ в продольной и поперечной чувствительности эффекта Керра [5]. В нашей работе мы ищем связь между дипольными характеристиками источников магнитного поля и его топологическими характеристиками, в частности количеством и свойствами особых точек, их индексами Пуанкаре.

Визуализация и векторизация плоскостной компоненты неоднородного поля производили путем регистрации МОИ в аморфных индикаторных пленках в продольной и поперечной чувствительности. Индекс Пуанкаре реконструированных векторных графиков определяли при помощи вновь созданной программы в прикладном пакете Mathcad.

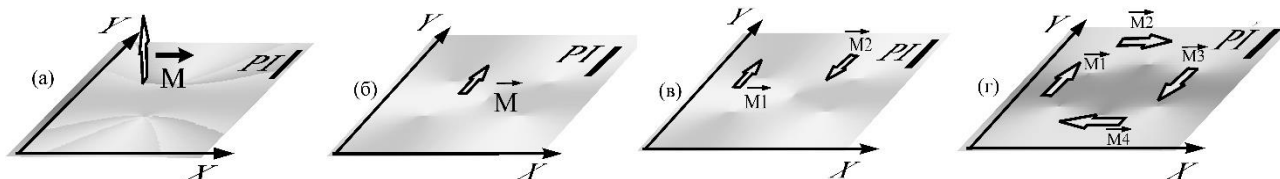


Рис. 1. Ориентация магнитных моментов, создающих неоднородное магнитное поле. (а) Магнитный момент ориентирован перпендикулярно плоскости индикаторной пленки ($\mathbf{M} \parallel \mathbf{n}$) (мультиполь нулевого порядка); (б) $\mathbf{M} \perp \mathbf{n}$ (диполь); (в) $\mathbf{M1} \uparrow \downarrow \mathbf{M2} \perp \mathbf{n}$ (квадруполь); (г) $\mathbf{M1} \uparrow \downarrow \mathbf{M3}$, $\mathbf{M2} \uparrow \downarrow \mathbf{M4}$, $\mathbf{M1} \perp \mathbf{M2}$ (октуполь).

Характерной особенностью МОИ диполя с $\mathbf{M} \parallel \mathbf{n}$ является наличие светлого и темного конусов, вершины которых локализованы в особой точке (рис. 2 а). Векторный график согласно (1) содержит одну особую точку типа «сток» с индексом Пуанкаре $\chi = 1$ (рис. 2 б). Если диполь имеет противоположную ориентацию, то реализуется особая точка типа «исток».

МОИ и векторное поле диполя с $\mathbf{M} \perp \mathbf{n}$ включает две особые точки, одна из которых «исток», другая «сток» (рис. 2 в, г). В этом случае в МОИ при поперечной чувствительности попеременно чередуются светлые и темные конуса (рис. 2 б). Векторный график согласно (2) обладает индексом Пуанкаре $\chi = 2$.

МОИ поля квадруполя ($\mathbf{M1} \uparrow \downarrow \mathbf{M2}$) имеет 6 чередующихся светлых и темных «лучей» (рис. 2 д). Векторный график согласно (3) обладает суммарным индексом Пуанкаре $\chi = 3$.

МОИ поля октуполя ($\mathbf{M1} \uparrow \downarrow \mathbf{M2}$, $\mathbf{M3} \uparrow \downarrow \mathbf{M4}$) имеют 10 чередующихся светлых и темных «лучей». Векторный график обладает суммарным индексом Пуанкаре $\chi = 5$. Это новый экспериментальный факт.

Приложение однородного внешнего поля в плоскости пленки должно приводить к появлению новых особых точек таких, чтобы обнулить результирующий индекс Пуанкаре. Эксперимент показал, что трансформация векторного поля происходит в полном согласии с этим требованием.

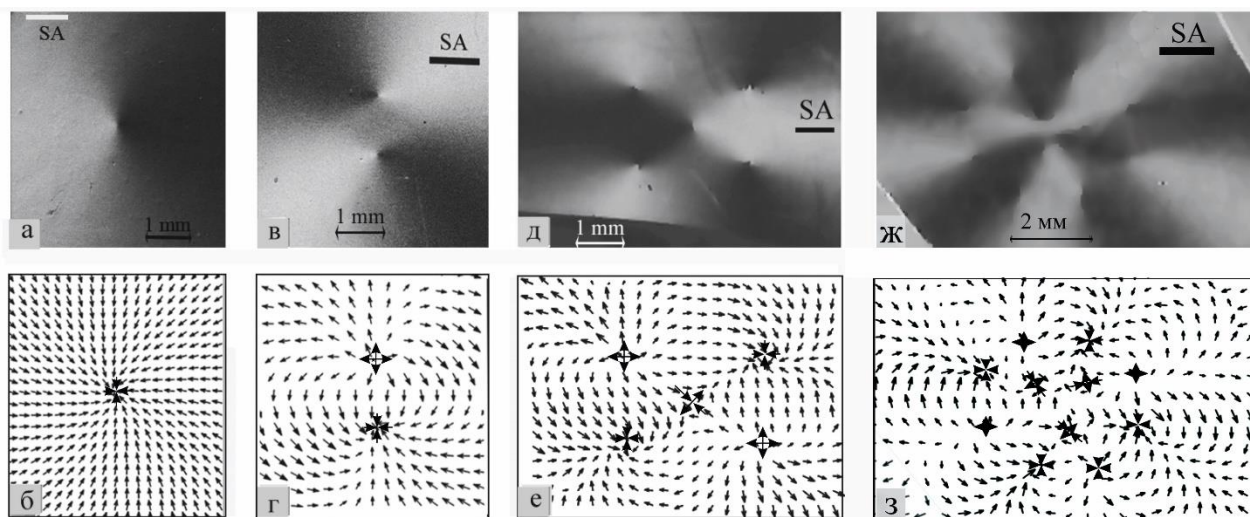


Рис. 2. Магнитооптические изображения поля мультипольных моментов в поперечной чувствительности и соответствующая реконструкция плоскостных векторных полей; а, б) соответствует полю $\mathbf{M} \parallel \mathbf{n}$ (мультиполю нулевого порядка); в, г) $\mathbf{M} \perp \mathbf{n}$ (диполю); д, е) $\mathbf{M}_1 \uparrow \downarrow \mathbf{M}_2 \perp \mathbf{n}$ (квадруполю).

Включение однородного поля приводит ко вхождению в поле зрения одной седлообразной особой точки с индексом $\chi = -1$ для диполя с $\mathbf{M} \parallel \mathbf{n}$. Соответственно для диполя с $\mathbf{M} \perp \mathbf{n}$ наблюдается вхождение двух седлообразных точек с $\chi = -1$, для квадруполя с $(\mathbf{M}_1 \uparrow \downarrow \mathbf{M}_2)$ вхождение трех седлообразных особых точек с индексами $\chi = -1$. Эту ситуацию демонстрирует магнитооптическое изображение поля квадруполя в присутствии однородного поля в плоскости (рис. 3 а). Реконструированный векторный график так же отображает вошедшие в кадр 3 седлообразные особые точки (рис. 3 б).

Конфигурация октуполя в нашем изучении является особой в том смысле, что нет теоретических расчетов индекса Пуанкаре для такой системы. Экспериментальное наблюдение возникновения пяти седлообразных особых точек при включении однородного поля, дает возможность утверждать, что для такой системы $\chi = 5$.

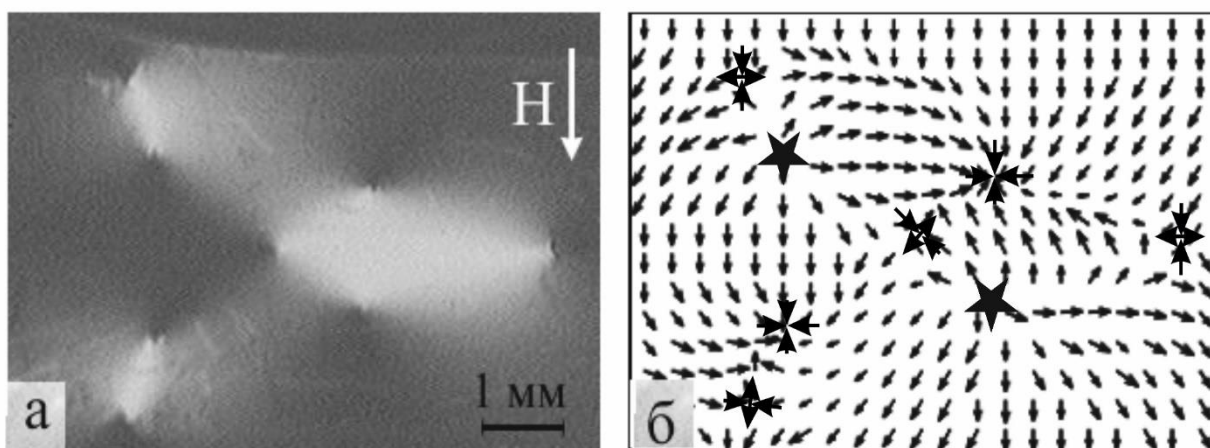


Рис. 3. Магнитооптическое изображение поля квадруполя в поперечной чувствительности при действии однородного плоскостного поля 50 Э (а) и соответствующая реконструкция плоскостного векторного поля (б).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FEUZ-2023-0020).

Список использованных источников:

1. Cao Q., Fan Q., Chen Q., Chunting L., Xiaotao H., Li L. Recent Advances in Manipulation of Micro- and Nano-objects with Magnetic Fields at Small Scales// *Materials Horizons* – 2019. 7. 638
2. Dana Longcope W. Topological Methods for the Analysis of Solar Magnetic Fields // *Living Rev. Solar Phys.* – 2005. 7.
3. Inverarity G.W., Priest Eric R. Magnetic Null Points due to Multiple Sources of Solar Photospheric Flux // *Solar Physics.* – 1999. – 186 (1). – p. 99–121.
4. Rave W., Schäfer R., Hubert A. Quantitative observation of magnetic domains with the magneto-optical Kerr effect// *J. Magn. Magn. Mater.* – 1987. 65 7-14
5. Ivanov V.E, Gorkovenko A.N., Lepalovskij V.N. Vectorization of magneto-optical images of a in plane component of inhomogeneous magnetic fields// *J. Magn. Magn. Mater.* – 2023. 570 170493

УДК 537.632

Спектральные зависимости магнитной модуляции поверхностных плазмон-поляритонов в гиперболических метаповерхностях**Усик М.Н.**

аспирант, кафедра радиофизики и электроники ФГБОУ ВО ЧелГУ

Кузьмин Д.А.

д.ф.-м. н., профессор кафедры радиофизики и электроники ФГБОУ ВО ЧелГУ

Бычков И.В.

д.ф.-м. н., профессор кафедры радиофизики и электроники ФГБОУ ВО ЧелГУ

Шавров В.Г.

д.ф.-м. н., заведующий лабораторией магнитных явлений в микроэлектронике ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

***Аннотация.** Теоретически исследована магнитная модуляция поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) в спектральном диапазоне 660–1500 нм для гиперболических метаповерхностей на основе благородных металлов. Обнаружено, что влияние магнитного поля как на действительную, так и на мнимую часть волнового вектора ППП играет существенную роль в модуляции. На основе экспериментальных данных мы проанализировали спектральную зависимость модуляции для метаповерхностей на основе Au и Ag и пришли к выводу, что сложное взаимодействие эволюции свойств ППП и магнитооптического параметра с длиной волны приводит к ее немонотонности. Исследованы глубина модуляции и расстояние распространения, для различных геометрических параметров метаповерхности, таких как ее период и фактор заполнения.*

***Ключевые слова:** модуляция, поверхностные плазмон-поляритоны, метаповерхности, магнитоплазмоника*

Spectral dependences of magnetic modulation of surface plasmon-polaritons in hyperbolic metasurfaces**Usik M.O.**

postgraduate student, Department of Radiophysics and Electronics, Chelyabinsk State University

Kuzmin D.A.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of the Department of radio-physics and electronics, Chelyabinsk State University

Bychkov I.V.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of the Department of radio-physics and electronics, Chelyabinsk State University

Shavrov V.G.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Magnetic Phenomena in Microelectronics, IRE named after. V.A. Kotelnikov RAS

Annotation. We have theoretically investigated the magnetic modulation of surface plasmon polaritons (SPPs) in the spectral range 660–1500 nm for noble metal - based hyperbolic metasurfaces. We have found that effect of magnetic field on both real and imaginary part of SPPs wavevector play a significant role in the modulation. Based on experimental data, we have analyzed the spectral dependency of the modulation for Au and Ag-based metasurfaces, and we conclude that the complex interplay between the evolution of the SPP properties and the magneto-optical parameter with wavelength leads to its non-monotonic behavior. Modulation depth and propagation distance is also studied for different geometrical parameters of the metasurface, such as its periodicity and filling factor.

Keywords: modulation, surface plasmon polaritons, metasurfaces, magnetoplasmonics

С тех пор, как начались исследования в области активной магнитоплазмоники в гибридных структурах металл-ферромагнетик, было продемонстрировано множество плазмонно-усиленных магнитооптических эффектов. Включение магнитоактивных материалов в плазмонные структуры приводит к различным магнитоплазмонным эффектам. Одним из эффектов является изменение волнового числа поверхностных плазмон-поляритонов (ППП), которое зависит от направления намагниченности, т.е. $k_{spp}(\pm B) = k_{spp}^0 \pm \Delta k_{spp}(B)$. Ранее в гибридных многослойных структурах металл-ферромагнетик было показано, что малая модуляция, накапливаясь на большом расстоянии распространения, может приводить к заметным значениям глубины модуляции магнитоплазмонного сигнала $2|\Delta k_{spp}(B)|d \sim 0.02$ для расстояния распространения ППП $d = 22$ мкм.

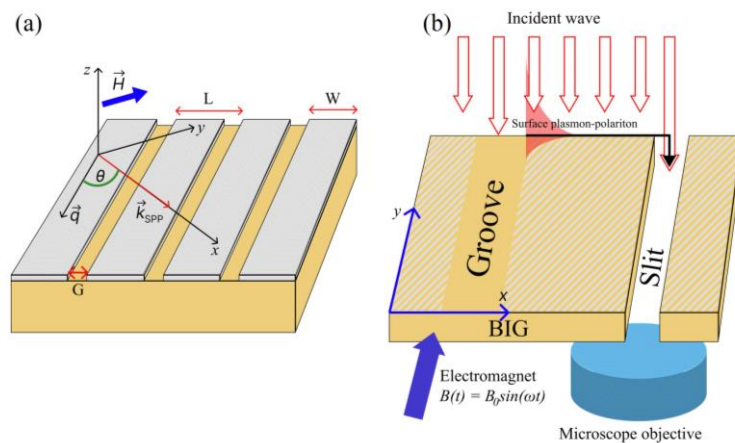


Рис. 1. Схема метаповерхности (a) Модуляцию можно наблюдать экспериментально с помощью метода, основанного на активной магнитоплазмонной микроинтерферометрии (b).

В настоящей работе мы исследовали спектральные зависимости магнитной модуляции ППП, распространяющихся в простейшей реализации гиперболической плазмонной метаповерхности (ГПМ), состоящей из массива металлических (золотых) полос, отделенных друг от друга воздушной прослойкой. Такая метаповерхность находится на подложке из магнитного диэлектрика (например, BIG). Схема структуры изображена на рисунке 1.

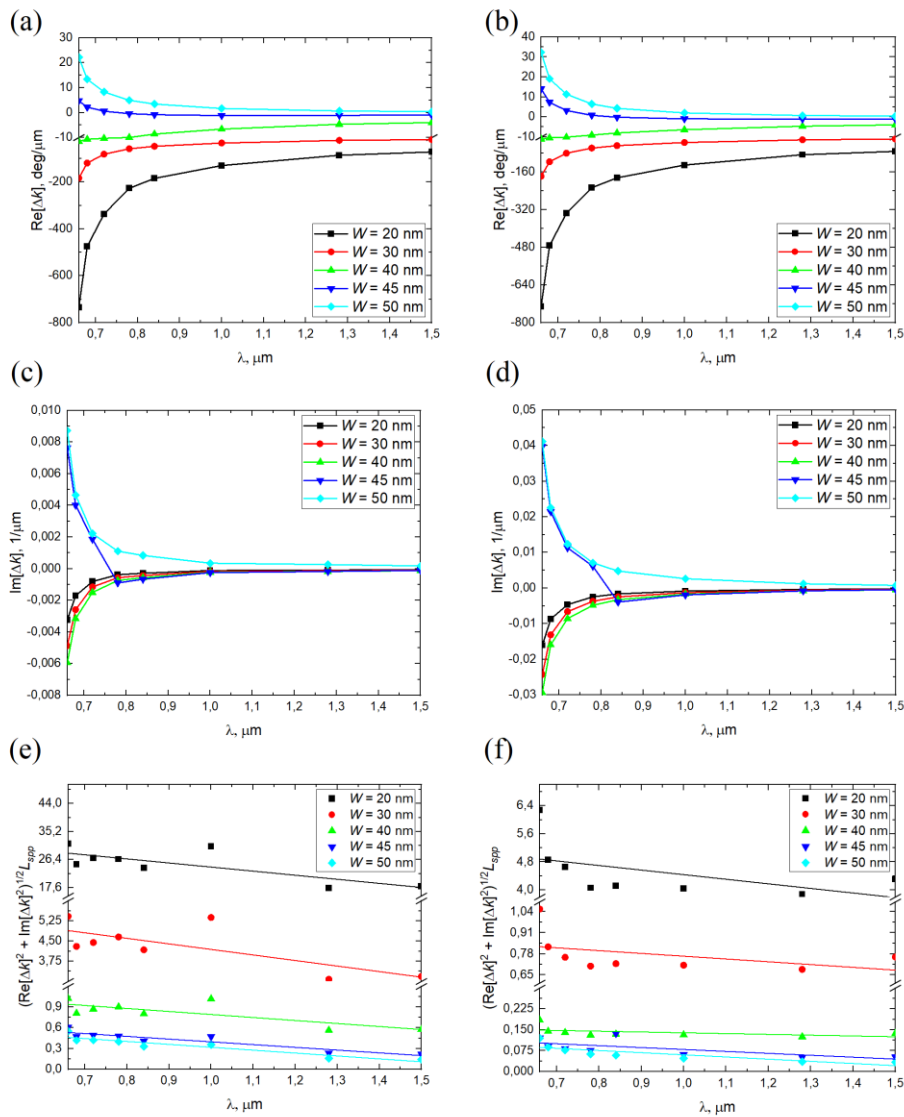


Рис. 2. Спектральные зависимости изменения волнового числа ППП $\text{Re}[\Delta k]$ (a, b), обратной длины распространения $\text{Im}[\Delta k]$ (c, d) и FoM (e, f) при распространении ППП вдоль металлических полос для метаповерхностей на основе Ag (a, c, d) и Au (b, d, f) с различной шириной полос W .

Чтобы оценить оптимальные экспериментальные условия для максимизации производительности магнитоплазмонных модуляторов, адекватным параметром представляется величина $\text{FoM} = (\text{Re}[\Delta k]^2 + \text{Im}[\Delta k]^2)^{1/2} \times L_{spp}$, где L_{spp} — длина затухания ППП (при которой интенсивность ППП затухает в e раз). Известно, что в случае гиперболической магнитоплазмоники максимальная FoM может наблюдаться при распространении ППП вдоль металлических полос. На рис. 2 показаны спектральные зависимости изменения волнового числа ППП ($\text{Re}[\Delta k]$), обратной длины распространения ($\text{Im}[\Delta k]$) и FoM для $\theta = 0$ град.

Можно видеть, что как для метаповерхностей Au, так и для Ag уменьшение ширины металлических полос приводит к критическому изменению как $\text{Re}[\Delta k]$, так и $\text{Im}[\Delta k]$, особенно на коротких волнах $\lambda < 800$ нм, но лидирующее влияние на FoM оказывает $\text{Re}[\Delta k]$. Можно также заключить, что для метаповерхности из серебра FoM может быть примерно в шесть раз больше, чем для метаповерхности из золота. Этот эффект обусловлен главным образом разницей в длине распространения ППП для метаповерхностей на основе золота и серебра.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 22-19-00355.

УДК 537.632

Спектральная зависимость эффекта Фарадея в борате железа, обусловленного компонентой намагниченности перпендикулярной базисной плоскости**Зубов В.Е.**

д.ф.-м. н., г.н.с. кафедры магнетизма, МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет

Кудаков А.Д.

к.ф.-м. н., в.н.с. кафедры магнетизма, МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет

Булатов Д.А.

студент, кафедры магнетизма, МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет

Стругацкий М.Б.

д.ф.-м.н., профессор, Физико-технический институт Крымского федерального университета

Ягупов С.В.

зав. лабораторией роста кристаллов, Физико-технический институт Крымского федерального университета

***Аннотация.** Слабый ферромагнетик борат железа ($FeBO_3$) привлекает внимание исследователей как модельный объект. Дзялошинским показано, что появление небольшой спонтанной намагниченности (m_D) в базисной плоскости ромбоэдрических антиферромагнетиков является естественным следствием симметрии этих кристаллов. В работе проведены исследования спектральной зависимости эффекта Фарадея, обусловленного компонентой m_z в борате железа, в видимой области спектра в диапазоне длин волн 450 нм – 620 нм.*

***Ключевые слова:** борат железа, компонента намагниченности m_z , ось третьего порядка C_3*

Spectral dependence of the faraday effect in iron borate due to the magnetization component perpendicular to the basal plane**Zubov V.E.**

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of the Department of Magnetism, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics

Kudakov A.D.

Candidate of physical and mathematical Sciences, Professor of the Department of Magnetism, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics

Bulatov D.A.

Student, Department of Magnetism, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics

Strugatsky M.B.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor, Institute of Physics and Technology of the Crimean Federal University

Yagupov S.V.

Head of the Crystal Growth Laboratory, Institute of Physics and Technology of the Crimean Federal University

***Annotation.** The weak ferromagnetic iron borate ($FeBO_3$) attracts the attention of researchers as a model object. It is shown by Dzyaloshinsky that the appearance of a small spontaneous magnetization (m_D) in the basic plane of rhombohedral antiferromagnets is a natural consequence of the symmetry of these crystals. The spectral dependence of the Faraday effect caused by the m_z component in iron borate in the visible region of the spectrum in the wavelength range 450 nm – 620 nm has been studied.*

***Keywords:** iron borate, magnetization component m_z , third-order axis C_3*

Дзялошинским показано, что появление небольшой спонтанной намагниченности (m_D) в базисной плоскости ромбоэдрических антиферромагнетиков является естественным следствием симметрии этих кристаллов. Намагниченность m_D возникает при учете в разложении по компонентам намагниченности подрешеток термодинамического потенциала антиферромагнетика членов до второго порядка, включительно. Отношение величины m_D к сумме величин намагниченностей подрешеток антиферромагнетика пропорционально квадрату отношения скорости электронов в кристалле к скорости света $(v/c)^2$. При учете в термодинамическом потенциале членов четвертого порядка по компонентам намагниченности подрешеток теория предсказывает наличие очень малой спонтанной намагниченности (m_z) вдоль оси третьего порядка C_3 кристалла. Отношение m_z к m_D пропорционально $(v/c)^2$. Существование компоненты m_z было обнаружено в гематите ($\alpha-Fe_2O_3$), борате железа ($FeBO_3$), а также в $CoCO_3$. В частности, в борате железа величина m_z оказалась в две с половиной тысячи раз меньше, чем m_D [1]. Угловая зависимость m_z при повороте m_D вокруг оси C_3 описывается выражением $m_z = m_{z0} \cdot \cos 3\varphi$, где φ – угол в базисной плоскости между направлением m_D и линией пересечения базисной плоскости с зеркальной плоскостью симметрии.

Магнитооптический эффект Фарадея, обусловленный компонентой m_z , был нами обнаружен при освещении образцов бората железа белым светом [2]. В настоящем докладе приводятся результаты исследования спектральной зависимости ЭФ, обусловленного компонентой m_z в борате железа, в видимой области спектра в диапазоне длин волн 450 нм – 620 нм. ЭФ в исследованном диапазоне длин волн монотонно в несколько раз спадает с увеличением длины волны. Величина ЭФ, обусловленного m_z , примерно на три порядка меньше эффекта Фарадея, обусловленного компонентой m_D .

Список использованной литературы:

1. P.J. Flanders. Observation of a c-Axis Moment in $\alpha-Fe_2O_3$ // J. Appl. Phys. –1972– v. 43, p. 2430–2435
2. В.Е. Зубов, А.Д. Кудakov, Д.А. Булатов, М.Б. Стругацкий, С.В. Ягупов. Эффект Фарадея в $FeBO_3$, обусловленный компонентой намагниченности параллельной оси C_3 // Письма в ЖЭТФ, –2022– т.116 – вып. 5-6 –стр. 387-391

УДК 537.632

Магнитооптические свойства многослойных магнитных структур на основе пермаллоя**Ганьшина Е.А.**

д.ф.-м. н., профессор, ведущий научный сотрудник кафедры магнетизма физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Гладышев И.В.

к.ф.-м. н., доцент кафедры нанoeлектроники ИПТИП РТУ МИРЭА

Симдянова М.А.

Магистрант кафедры магнетизма физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, лаборант кафедры нанoeлектроники ИПТИП РТУ МИРЭА

Припеченков И.М.

Аспирант кафедры магнетизма физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Юрасов А.Н.

д.ф.-м. н., профессор кафедры нанoeлектроники ИПТИП РТУ МИРЭА

Яшин М.М.

к.ф.-м. н., доцент кафедры нанoeлектроники ИПТИП РТУ МИРЭА

Грановский А.Б.

д.ф.-м. н., профессор кафедры магнетизма физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

***Аннотация.** В данной работе на примере двухслойных пленок “тантал-пермаллой” исследуются возможные эффекты усиления магнитооптического отклика и изменения магнитооптического спектра в многослойных магнитных структурах. Нанесение тонкой парамагнитной или диамагнитной пленки на пермаллой может изменить оптические и магнитооптические параметры пермаллоя за счет перераспределения атомов вблизи поверхности раздела слоев, либо за счет механических деформаций. С другой стороны, в силу эффекта магнитной близости возможно возникновение спиновой поляризации в немагнитном слое. Приводятся результаты компьютерного моделирования экваториального эффекта Керра для однослойной пленки пермаллоя при вариации ее оптических и магнитооптических параметров, двухслойной системы “тантал-пермаллой”, а также сопоставление результатов расчета с экспериментом.*

***Ключевые слова:** оптические и магнитооптические эффекты, экваториальный эффект Керра, магнитооптические пленки, пермаллой, многослойные структуры.*

Magneto-optical properties of multilayer magnetic structures based on permalloy**Ganshina E.A.**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Magnetism, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

Gladyshev I.V.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Nanoelectronics, IPTIP of MIREA – Russian Technological University

Simdyanova M.A.

Undergraduate student of the Department of Magnetism of the Faculty of Physics of Lomonosov Moscow State University, laboratory assistant of the Department of Nanoelectronics of the IPTIP RTU MIREA

Pripechenkov I.M.

Ph.D. student of the Department of Magnetism of the Faculty of Physics of Lomonosov Moscow State University

Yurasov A. N.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of the Department of nanoelectronics, IPTIP of MIREA – Russian Technological University

Yashin M.M.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Nanoelectronics, IPTIP of MIREA – Russian Technological University

Granovsky A.B.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Magnetism, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

Annotation. *In this work, using the example of two-layer tantalum-permalloy films, we study the possible effects of enhancing the magneto-optical response and changing the magneto-optical spectrum in multilayer magnetic structures. The sputtering of a thin paramagnetic or diamagnetic film on permalloy can change the optical and magneto-optical parameters of permalloy due to the redistribution of atoms near the interface between the layers, or due to mechanical deformations. On the other hand, due to the effect of magnetic proximity, spin polarization may occur in a non-magnetic layer. The results of computer simulation of the equatorial Kerr effect for a single-layer permalloy film with variations in its optical and magneto-optical parameters and a two-layer tantalum-permalloy system are presented, as well as a comparison of the calculation results with experiment.*

Keywords: *optical and magneto-optical effects, transverse Kerr effect, magneto-optical films, permalloy, multilayer structures.*

Магнитооптическая спектроскопия является перспективным методом исследования широкого класса наноструктур [1-3]. В данной работе рассматриваются магнитооптические свойства металлических мультислоев на основе пермаллоя. Пермаллой – это двухкомпонентный сплав, свойства которого зависят от соотношения концентраций железа и никеля. Компьютерное моделирование показывает, что изменение значений диэлектрической проницаемости ϵ и/или магнитооптического коэффициента Q ($\gamma = \epsilon Q$) в пределах 10% может в несколько раз менять величину экваториального магнитооптического эффекта Керра (ЭЭК) (рис. 1).

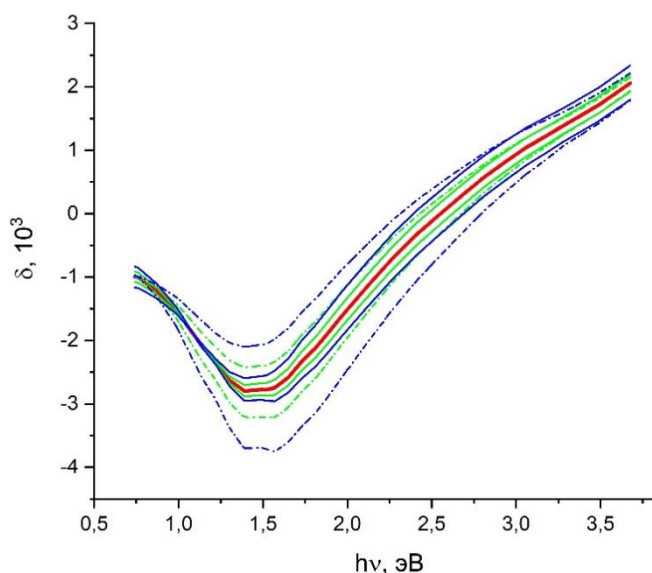


Рис. 1. Изменение сигнала экваториального эффекта Керра (ЭЭК) при варьировании значений ϵ и γ пермаллоя в пределах 10% (моделирование).

(Пленка пермаллоя 80% Ni – 20% толщиной 20 нм, угол падения света 73° , ϵ из работы [1]. Центральная красная кривая при значении γ , определенном из многоугловых измерений ЭЭК. Остальные кривые получены при изменении действительной или мнимой компонент ϵ или γ на +/- 10%)

Подобные отличия для пленок одинаковой толщины, но изготовленных в разных технологических циклах, наблюдаются и в экспериментах. Так, на рис. 2 приведены спектральные зависимости ТКЕ для пленок пермаллоя (80% Ni – 20% Fe), толщиной 20 нм на подложках 1 – кремний, 2 – стекло. Для расчетных зависимостей значения диэлектрической проницаемости пермаллоя брались из [1], а магнитооптический эффект рассчитывался по результатам многоугловых измерений для конкретных образцов. Отметим, что общий ход зависимости сохраняется. То есть изменение параметров пермаллоя в двухслойной системе может изменить величину эффекта, но не его спектральную зависимость.

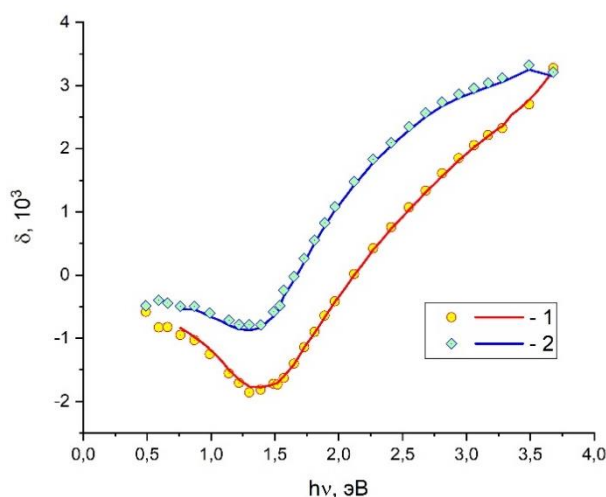


Рис. 2. Спектральные зависимости ЭЭК для пленок пермаллоя, изготовленных в различных партиях (значки – эксперимент, сплошные линии – расчет).

При напылении на пленку пермаллоя тонкой пленки из немагнитного металла естественно ожидать с ростом ее толщины снижения сигнала ЭЭК. Это подтверждают и численные расчеты, основывающиеся на выражениях, полученных в [2]. В качестве

напыленного на пермаллой металла был взят тантал (Ta). Результаты расчетов ЭЭК для толщин Ta от 0,5 до 10 нм приведены на рисунке 3. Там же значками показаны экспериментальные результаты измерения ЭЭК для пленки пермаллоя и покрытой пленкой тантала толщиной 10 нм. Важно отметить, что рассчитанные спектральные зависимости и характер влияния пленки Ta на величину сигнала ЭЭК сохраняются. Однако, как видно из рис. 3, для структуры с толщиной Ta в 10 нм в эксперименте наблюдается сигнал на порядок превышающий расчетный и, более того, противоположного знака в видимой области спектра. Впервые на эту особенность было указано В. Скидановым [4] при измерениях ЭЭК на белом свете. Подобного рода сильное превышение сигнала пленки с нанесенным слоем тантала на пермаллой, по сравнению с пленкой пермаллоя, наблюдалось в эксперименте и при других толщинах пленки тантала. Данный факт не объясняется простыми интерференционными эффектами, которые были учтены при расчетах.

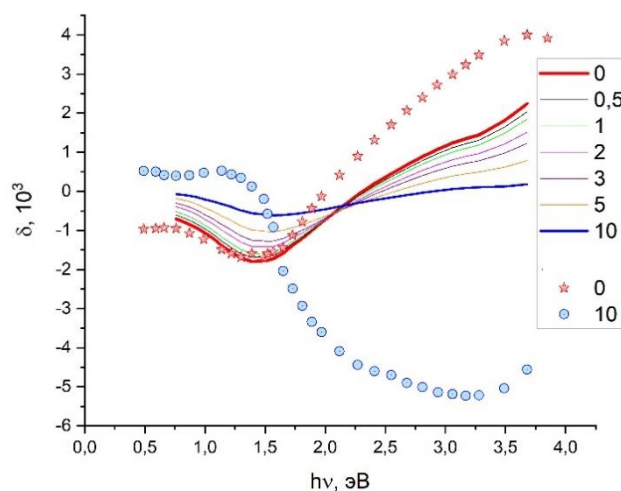


Рис. 3. Спектральная зависимость сигнала ЭЭК для пленки пермаллоя, покрытой слоем Ta различной толщины (нм). Сплошные линии – расчет, значки – эксперимент.

Такое необычное поведение, на наш взгляд, может быть связано с эффектом магнитной близости в результате спиновой поляризации 3d состояний Ta. Наблюдаемый эффект требует дальнейших исследований.

Список использованной литературы:

1. K. K. Tikuišis, L. Beran, P. Cejpek, K. Uhlířová, J. Hamrle, M. Vaňatka, M. Urbánek, M. Veis. Optical and magneto-optical properties of permalloy thin films in 0.7-6.4 eV photon energy range, Mater. Des. 114, 31-39 (2017).
2. Маевский В.М. Теория магнетооптических эффектов в многослойных системах с произвольной ориентацией намагниченности. ФММ. 1985; 50 (2): 213-219.
3. Ганьшина Е.А., Гаршин В.В., Перова Н.Н., Припеченков И.М., Юрасов А.Н., Яшин М.М., Рыльков В.В., Грановский А.Б. Магнетооптическая керр-спектроскопия нанокompозитов. ЖЭТФ. 2023; 164 (4): 662–672.
4. Skidanov V. A. Proximity induced long-range transformation of transverse magneto-optical Kerr effect in bilayers of magnetic and normal transition metals. EASTMAG conference – 2022.

УДК 537.623, 537.632

Магнитные и магнитооптические свойства феррожидкостей на основе наночастиц ферритов CoNi**Кувандиков О.К.**

д.ф.-м. н., профессор кафедры общей физики СамГУ

Перов Н.С.

д.ф.-м. н., профессор кафедры магнетизма МГУ

Макарова Л.А.

к.ф.-м. н., ассистент кафедры магнетизма МГУ

Имамназаров Д.Х.

к.ф.-м. н., доцент кафедры общей физики СамГУ

Киргизов С.Э.

аспирант кафедры общей физики СамГУ

Аннотация. Проведены исследования магнитных и магнитооптических свойств (фарадеевское вращение) магнитных жидкостей на основе наночастиц ферритов $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ ($x=1, 0.75, 0.5, 0.25, 0$). Обнаружено, что величина фарадеевского вращения в различных жидкостях с увеличением напряженности магнитного поля коррелирует с величиной намагниченности самой жидкости. При этом наблюдается немонотонность при замещении кобальта никелем в наночастицах феррита.

Ключевые слова: магнитная жидкость, наночастицы ферритов, намагниченность, Фарадеевское вращение.

Magnetic and magneto-optic properties of Co-Ni ferrofluids**Kuvandikov O.K.**Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of the Department of physics
Samarkand state University**Perov N.S.**Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of the Department of Magnetism
Moscow State University**Makarova L.A.**

PhD, assistant professor of the Department of Magnetism, Moscow state University

Imamnazarov D.H.Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of
physics, Samarkand state University**Kirgizov S.E.**

PhD student, Department of physics, Samarkand state University

Annotation. *Magnetic and magneto-optical properties (Faraday rotation) of magnetic liquids based on $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite nanoparticles ($x=1, 0.75, 0.5, 0.25, 0$) have been investigated. It was found that the magnitude of Faraday rotation in different liquids with increasing magnetic field strength correlates with the magnitude of magnetization of the liquid itself. A non-monotonicity is observed for cobalt substitution by nickel in ferrite nanoparticles.*

Keywords: *magnetic fluid, ferrite nanoparticle, magnetization, Faraday rotation.*

Магнитная жидкость (МЖ) представляет собой коллоидную суспензию, состоящую из ферро- или ферримагнитных частиц, стабилизированных в жидкости - носителе [1]. Физические свойства МЖ на основе 3d-металлических наночастиц активно изучаются в связи с возможностями их практического применения в медицине [2], технике и других областях. Магнитные наночастицы, их тип, размер и форма определяют магнитные свойства феррожидкостей. Магнитные жидкости интересны не только с точки зрения развития широкого спектра приложений, но и с фундаментальной точки зрения [3]. Представляют интерес магнитные жидкости на основе неметаллических частиц, в частности ферритов. Нами были проведены исследования свойств магнитных жидкостей на основе наночастиц ферритов $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x=1, 0.75, 0.5, 0.25, 0$). Зависимости намагниченности от магнитного поля измерялись при комнатной температуре методом вибрационного магнитометра. Для измерений жидкость помещалась в стеклянный капилляр, концы которого закрывались парафиновыми пробками. Длина капилляра достигала 8-10 мм, внутренний диаметр 0.5 мм. Результаты измерений представлены на рис. 1.

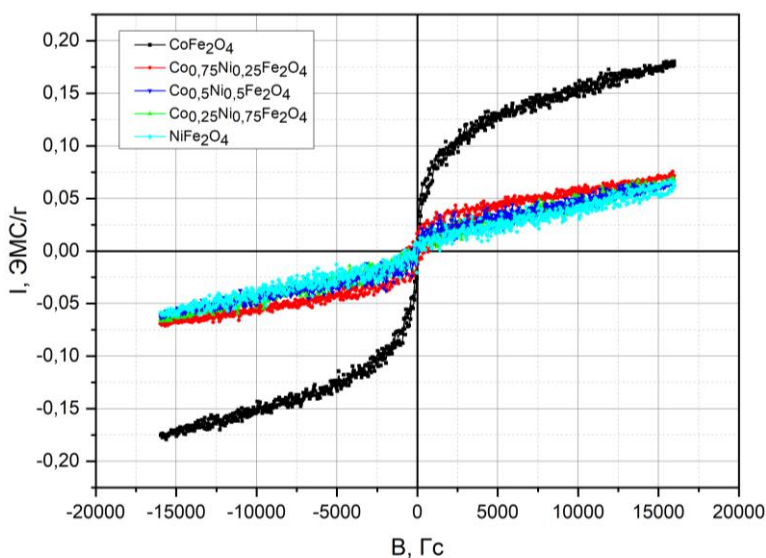


Рис.1. Петли гистерезиса магнитных жидкостей на основе наночастиц феррита $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x=1, 0.75, 0.5, 0.25, 0$).

Магнитооптический эффект Фарадея в магнитных жидкостях имеет важное значение для ряда практических приложений и изучается с большим интересом [4,5]. Для интерпретации результатов измерений Фарадеевского вращения в МЖ применяется следующая общеизвестная формула:

$$\theta(B) = C \frac{M(B)}{M_s} + VBL \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что Фарадеевское вращение в МЖ определяется двумя вкладками. Первое слагаемое представляет собой величину, зависящую от намагниченности $M(B)$ магнитных частиц, где C – константа, которая зависит структуры наночастиц, M_s – величина намагниченности насыщения. Второе слагаемое представляет собой величину, зависящую от коэффициента Верде V , внешнего магнитного поля B и толщины слоя магнитной жидкости L в направлении луча [6].

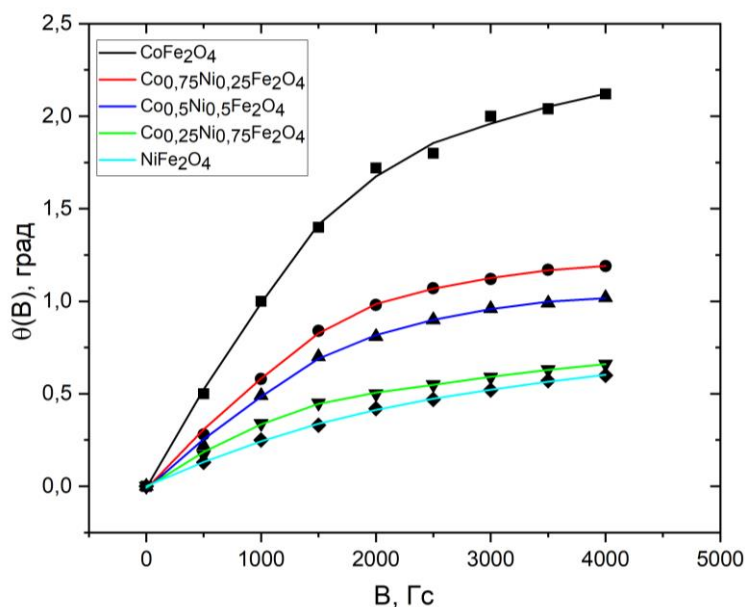


Рис.2. Угол Фарадеевского вращения в магнитных жидкостях на основе частиц $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ ($x=1, 0.75, 0.5, 0.25, 0$).

На рис. 2 показаны полевые зависимости Фарадеевского вращения для МЖ на основе $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ ($x=1, 0.75, 0.5, 0.25, 0$) в интервале магнитных полей от 0 до 4000 Гс. Отклонения от линейного поведения зависимостей на графиках (см. Рис. 2.) в области значений внешнего магнитного поля 1500-2000 Гс свидетельствуют о том, что в этих полях происходит уменьшение первого слагаемого уравнения (1), которое зависит от намагниченности. В более сильных полях Фарадеевское вращение меняется в основном за счет второго члена уравнения (1), и он сильно зависит от длины цепочек магнитных наночастиц. Под действием магнитного поля цепочки частиц вытягиваются вдоль направления поля и направления распространения луча поляризованного света, что приводит к увеличению Фарадеевского вращения.

На начальном участке рис. 1. и рис.2. полевых зависимостей Фарадеевского вращения и криво намагниченностей линейно зависит от приложенного поля, причем этот линейные участки имеют большой интервал для МЖ на основе $CoFe_2O_4$. Это связано с тем, что намагниченность феррожидкости на основе Co больше, чем у феррожидкости на основе Ni . По той же причине и магнитооптический сигнал для МЖ на основе $CoFe_2O_4$ значительно больше, чем для других исследованных МЖ при эквивалентной концентрации ферромагнитных частиц. Увеличение содержания кобальта в ферритовых частицах приводит практически к монотонному увеличению намагниченности и магнитооптического эффекта Фарадея в магнитных жидкостях.

Список использованной литературы:

1. Rosensweig, R.E., Ferrohydrodynamics, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1985.
2. Sharifi I., Shokrollahi H., and Amiri S.// Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2012. – Vol. 324, Issue 6. – p. 903-915.
3. Stan C., Cristescu C.P., Balasoiu M., Perov N., Duginov V.N., Mamedov T.N., Fetisov L. // U.P.B. Sci. Bull., Series A, – 2011. – Vol. 73, Issue 3. – p. 117-124.
4. Girich A.A., Polevoy S.Y., Tarapov S.I., Merzlikin A.M., Granovsky A.B., Belozorov D.P.//Solid State Phenomena. – 2012. - Vol. 190. – p. 365-368.
5. Babukutty B., Deepalekshmi P., Nair S., Thomas S. //Results in Materials. – 2023. – Vol. 17, № 1. Art. No 100382.
6. Кувандиков О.К., Киргизов С.Э. //Известия РАН. Серия физическая. – 2024. – Том 88. № 7. (в печати).

УДК 537.635

Фотоиндуцированная магнитная анизотропия и ферромагнитный резонанс в эпитаксиальных пленках граната железа**Полулях С.Н.**

д.ф.-м.н., профессор, Физико-технический институт КФУ

Авдеенко Д.В.

магистрант, Физико-технический институт КФУ

Семук Е.Ю.

м.н.с., Физико-технический институт КФУ

Холин А.А.

аспирант, Физико-технический институт КФУ

Ветошко П.М.

к.ф.-м.н., в.н.с., Физико-технический институт КФУ

Бержанский В.Н.

д.ф.-м.н., профессор, Физико-технический институт КФУ

Белотелов В.И.

д.ф.-м.н., профессор РАН, Физико-технический институт КФУ

Аннотация. В работе приводятся результаты экспериментального исследования фотоиндуцированной магнитной анизотропии в эпитаксиальных пленках катион-замещенных гранатов железа. Показано, что фотоиндуцированное подавление вклада кубической анизотропии зависит от направления света в кристалле. Продемонстрирована фотоиндуцированная модификация спектров ферромагнитного резонанса при линейном и нелинейном возбуждении. Рассмотрены эффекты, связанные с пространственно неоднородным освещением образца.

Ключевые слова: магнитные пленки, гранаты железа, магнитная анизотропия, ферромагнитный резонанс, фотомагнитные эффекты

Photoinduced magnetic anisotropy and ferromagnetic resonance in epitaxial films of iron garnet**Polulyakh S.N.**

Dr. Sc., professor, Institute of Physics and Technology CFU

Avdeenko D.V.

master's student, Institute of Physics and Technology CFU

Semuk E.Yu.

researcher, Institute of Physics and Technology CFU

Kholin A.A.

postgraduate, Institute of Physics and Technology CFU

Vetoshko P.M.

Ph.D., researcher, Institute of Physics and Technology CFU

Berzhansky V.N.

Dr. Sc., professor, Institute of Physics and Technology CFU

Belotelov V.I.

Dr. Sc., professor, Moscow State University

Annotation. *The results of experimental studies of photoinduced magnetic anisotropy in epitaxial films of cation-substituted iron garnets are presented. It is shown that photoinduced suppression of the contribution of cubic anisotropy depends on the direction of light wavevector in the crystal. Photoinduced modifications of ferromagnetic resonance spectra under linear and nonlinear excitation are demonstrated. The effects associated with spatially inhomogeneous illumination of the sample are considered.*

Keywords: *magnetic films, iron garnets, magnetic anisotropy, ferromagnetic resonance, photomagnetic phenomena*

В гранатах железа, содержащих примеси Si, Co, Ca, Ni или Pb экспериментально наблюдается изменение магнитной анизотропии в результате действия оптического излучения. Имеет место как зависящий, так и не зависящий от направления поляризации света эффект фотоиндуцированной магнитной анизотропии, который регистрируется по модификации спектров ферромагнитного резонанса (ФМР), изменению доменной структуры или магнитной восприимчивости. Изменение магнитной анизотропии обусловлено модификацией валентного состояния ионов и, как следствие, перераспределением по кристаллическим позициям ионов с различной спин-орбитальной связью.

Регистрацию фотоиндуцированной модификации магнитной анизотропии в эпитаксиальных пленках висмут замещенного феррита граната иттрия в работе [1] предложено проводить с использованием магнитооптического эффекта Фарадея. В случае пленок с анизотропией типа легкая плоскость кристаллическая кубическая анизотропия приводит к выходу намагниченности из плоскости образца. Зависимость нормальной компоненты намагниченности M_{\perp} от направления внешнего магнитного поля в плоскости пленки (111) регистрируется по эффекту Фарадея с помощью измерительного лазера (мощность 0.5 мВт, длина волны 635 нм). Дополнительное освещение пленки с помощью лазера накачки (максимальная мощность 40 мВт, длина волны 635 нм) приводит к уменьшению выхода намагниченности из плоскости пленки. Установление равновесного значения M_{\perp} хорошо описывается экспоненциальным законом

$$M_{\perp}(t) = M_0 - M_l(1 - \exp(-t/\tau)). \quad (1)$$

Фотоиндуцированный вклад M_l и скорость релаксации τ^{-1} растут при увеличении мощности оптической накачки и зависят от направления волнового вектора световой волны в кристалле. При комнатной температуре время релаксации τ лежит в пределах десятков секунд. При фиксированном направлении световой волны накачки M_l и τ^{-1} слабо зависят от направления поляризации света. Изменения M_l и τ^{-1} вследствие изменения направления поляризации составляют не более 10% от изменения этих величин при изменении направления света в кристалле.

При выключении оптической накачки намагниченность возвращается к первоначальному значению по экспоненциальному закону с временем релаксации $\tau = 22 \pm 1$ с независимо от исходного направления волнового вектора световой волны. Экспериментально наблюдаемые времена релаксации (десятки секунд) свидетельствуют о вкладе эффектов фотоиндуцированной магнитной анизотропии, в отличие от оптомагнитных эффектов (Фарадея и Коттона-Мутона), для которых характерна более быстрая временная шкала.

В работе [2] сообщается о фотоиндуцированной модификации спектров ФМР в эпитаксиальных пленках висмут-замещенного феррита граната иттрия при комнатной температуре. Эксперименты проводились в слабых, близких к переходу в полидоменное состояние, магнитных полях, ориентированных в плоскости пленки (111), а излучение лазера накачки прикладывалось вдоль нормали к плоскости пленки.

Использование частотной развертки для регистрации ФМР спектров позволило обнаружить моды упругих колебаний по толщине эпитаксиальной структуры пленка-подложка. Возбуждение упругих колебаний осуществляется за счет магнитоупругой связи в ферромагнитной пленке. Оказалось, что оптическая накачка приводит не только к подавлению кубической анизотропии, но и к уменьшению величины модуляции ФМР спектров модами упругих колебаний. Наблюдаемые явления обусловлены изменением распределения ионов с различной величиной спин-орбитальной связи по кристаллическим позициям структуры граната.

Эффекты фотоиндуцированной модификации спектров ФМР наблюдались в работе [2] при направлении внешнего магнитного поля в плоскости образца. Оказалось, что и при направлении внешнего магнитного поля перпендикулярно плоскости пленки оптическая накачка также приводит к модификации ФМР спектров (рис. 1).

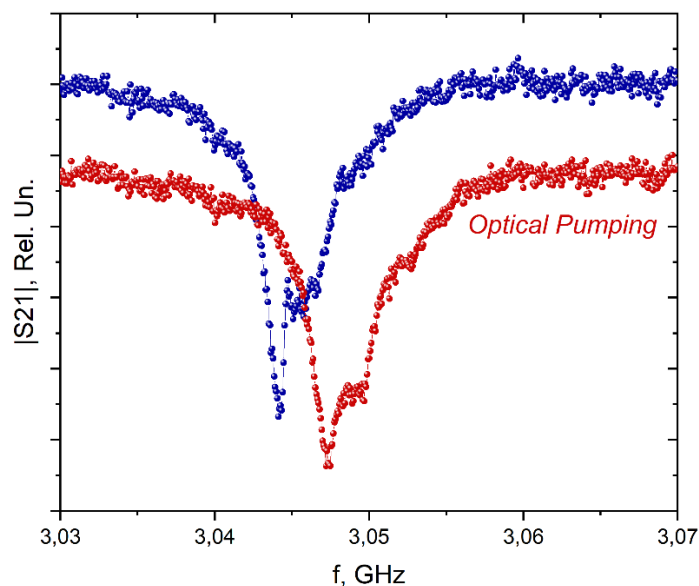


Рис. 1. Влияние оптической накачки на частотную зависимость коэффициента пропускания S_{21} полосковой линии с образцом пленки железо-иттриевого граната при мощности накачки -8 dBm

В работе [2] регистрация ФМР спектров осуществлялась в линейном (по величине переменного магнитного поля) режиме. Для эпитаксиальных пленок железоиттриевого феррита граната с узкой, порядка 5 МГц, шириной линии ФМР увеличение мощности

возбуждения приводит к регистрации нелинейных спектров ФМР при направлении внешнего поля перпендикулярно плоскости пленки. При освещении образца с помощью лазера накачки вдоль нормали к плоскости пленки экспериментально наблюдается смещение спектра в высокочастотную область. Наблюдаемая модификация спектров ФМР обусловлена фотоиндуцированной магнитной анизотропией.

Рассмотренная выше фотоиндуцированная модификация линейных и нелинейных спектров ФМР наблюдалась при освещении большей части образца. Фактически, область светового пятна представляла собой окружность, вписанную в образец с формой, близкой к квадратной. Представляется интересным рассмотреть модификацию спектров ФМР при размере светового пятна, малом, по сравнению с размерами образца.

Эксперименты при неоднородном освещении проводились на образце эпитаксиальной пленки катион-замещенного граната железа толщиной 7 мкм и размером 10 x 11 мм. Диаметр светового пятна на поверхности пленки составлял примерно 1 мм. С помощью векторного анализатора цепей измерялась частотная зависимость коэффициента S_{21} полосковой линии с образцом эпитаксиальной пленки катион-замещенного граната железа. Постоянное магнитное поле прикладывалось в плоскости пленки, а засветка проводилась в разных участках образца. Оказалось, что зарегистрированный частотный спектр модифицируется при включении оптической накачки, а характер модификации зависит от положения светового пятна на поверхности образца.

Для анализа полученных результатов использована искусственная нейронная сеть, реализованная на языке программирования Python с использованием библиотек Keras. Для обучения сети использовались размеченные данные. Один экземпляр данных представлял собой массив значений модуля S_{21} в заданном частотном интервале и координаты светового пятна на плоскости пленки. Обученная сеть с достаточно хорошей точностью выдавала координаты светового пятна по частотному спектру $|S_{21}|$.

Таким образом, эффекты фотоиндуцированной магнитной анизотропии приводят к модификации спектров ФМР при неоднородном освещении образца, а характер модификации спектров зависит от положения светового пятна на поверхности образца.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 23-62-10024.

Список использованных источников:

1. Polulyakh S.N., Avdeenko D.V., Berzhansky V.N. et al. Light-modified cubic anisotropy in (111) epitaxial films of impure iron garnet // Book of Abstracts of International Conference "Functional Materials" (ICFM-2023). – 2023. – P. 29-30.
2. Полулях С.Н., Семук Е.Ю., Звездин А.К. и др. Индуцированная светом модификация спектров ФМР пленки висмут-замещенного феррита-граната иттрия // Письма в ЖЭТФ. – 2022. – Т. 115, В. 4. – С. 224-229.

УДК 537.632

**Эффекты Фарадея и Керра в сверхтонких пленках Bi-замещенного
железоиттриевого граната**

Телегин А.В.

к.ф.-м.н., зав. лабораторией, Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН

Лобов И.Д.

д.ф.-м.н., с.н.с., Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН

Носов А.П.

д.ф.-м.н., заместитель директора, Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН

Сухоруков Ю.П.

д.ф.-м.н., г.н.с., Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН

***Аннотация.** Работа посвящена изучению особенностей магнитооптических эффектов Фарадея и Керра в синтезированных пленках Bi-замещенного железоиттриевого граната толщиной менее 50 нм. Определены величины релаксационного слоя в интерфейсе пленка-подложка и показана его роль в формировании эффектов Фарадея и Керра в наноразмерных пленках. Показано, что при исключении вклада от подложки спектральные и полевые зависимости магнитооптических эффектов в пленках толщиной выше критической соответствуют данным для объёмных материалов.*

***Ключевые слова:** эффект Фарадея, полярный эффект Керра, железоиттриевый гранат, критическая толщина, интерфейс пленка-подложка*

Faraday and Kerr effects in ultrathin Bi-substituted yttrium-iron garnet films

Telegin A.V.

Ph.D., head of the laboratory, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, UB of RAS

Lobov I.D.

Professor, senior scientist, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, UB of RAS

Nosov A.P.

Professor, deputy director, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, UB of RAS

Sukhorukov Yu.P.

Professor, leading scientist, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics UB of RAS

***Annotation.** The work is dedicated to the study of the features of the magneto-optical Faraday and Kerr effects in nanosized films of Bi-substituted yttrium-iron-garnet. The values of the relaxation layer in the film-substrate interface are determined and its role in the formation of the Faraday and Kerr effects in nanoscale films is shown. It is demonstrated that, with the exclusion of the contribution from the substrate, the spectral and field dependences of magneto-optical effects in films with a thickness above the critical one correspond to the data for bulk materials.*

***Keywords:** Faraday effect, polar Kerr effect, iron yttrium garnet, critical thickness, film-substrate interface*

Изучение магнитооптических эффектов Фарадея (ЭФ) и Керра (ЭК) в сверхтонких ферритмагнитных пленках железоиттриевого граната (менее 100 нм) стимулируется актуальными задачами техники, связанными с увеличением магнитооптической (МО) добротности, структурного и магнитного совершенства ключевых компонентов планарных устройств СВЧ- и оптоэлектроники [1]. Известно, что в нанометровом масштабе МО свойства магнетиков могут существенно отличаться от таковых для объемных материалов. Особую роль в наноразмерных пленках играет критическая толщина интерфейсного слоя, в котором формируется высокая плотность дислокаций и дефектов из-за несоответствия параметров кристаллических решеток пленки и подложки [2-4]. В результате образуется магнито-мертвый слой [5,6], который существенно влияет на МО характеристики пленочных структур.

В настоящей работе методом магнетронного осаждения на переменном токе были получены наноразмерные пленки Vi -допированного железоиттриевого граната (ViYIG) толщиной $d=5; 11; 23; 30$ и 51 нм на подложках гадолиний-галлиевого граната $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GGG). Толщина полированных подложек составляла $d=0.5$ мм, шероховатость ~ 0.5 нм. После осаждения пленки подвергались дополнительной термообработке на воздухе при $T=1073$ К в течение 3 ч. Толщина пленок определялась с помощью оптического профилометра ZYGO . Анализ данных энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показал, что пленки имеют состав близкий к $\text{Vi}_{0.7}\text{Y}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. Шероховатость поверхности пленок по данным атомно-силовом микроскопии составила ~ 0.7 нм на плоскости 5×5 μm . Для анализа МО свойств тонких пленок использовался эффект Фарадея, дающий информацию об объемных магнитных свойствах структур ViYIG/GGG , а также полярный эффект Керра, дающий информацию о магнитных свойствах поверхности образцов. Эффекты изучались в спектральной области $1.3 \text{ eV} < E < 4.5 \text{ eV}$ в магнитных полях до 1 Т.

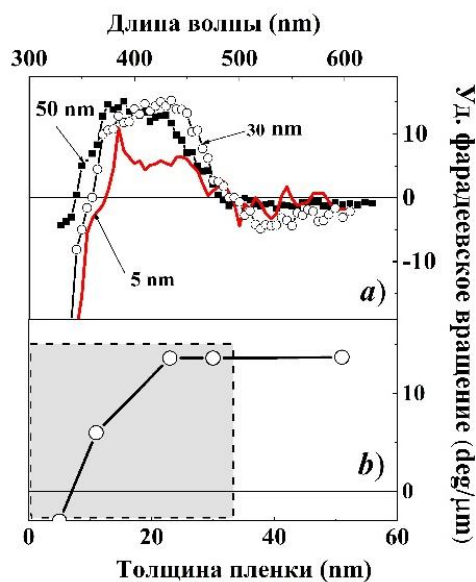


Рис. 1. – спектры удельного Фарадеевского вращения для пленок ViYIG толщиной $d=50$ нм, 30 нм и 5 нм в поле $0,7$ Тесла (а); зависимость величины вращения от толщины пленки на длине волны 400 нм (пунктиром выделена область релаксационного слоя) (b)

Было получено, что все исследуемые пленочные структуры обладают высоким магнитооптическим качеством. Амплитуда, спектральные, а также полевые зависимости магнитооптических эффектов в пленках ViYIG соответствуют литературным данным для

толстых пленок и кристаллов BiYIG (Рис. 1а). Фарадеевское вращение в пленках BiYIG положительного знака и достигает в максимуме $\sim 14 \text{ deg}/\mu\text{m}$ в поле 0.7 Т. Спектры эффекта Керра пленок имеют вид характерный для толстых пленок, и вращение за вычетом вклада подложки составляет $\sim 5 \text{ min}$ при $E \sim 3.5 \text{ eV}$ в поле 0.4 Т. Показано сильное уменьшение МО эффектов с уменьшением толщины пленок.

Оценка критических толщин магнито-мёртвого слоя в интерфейсе пленочных структур BiYIG/ GGG дает порядка 30 nm. При этой толщине происходит полное устранение дислокаций, образованных на поверхности раздела пленка/подложка – прямоугольная область на Рис. 1б. Высокая плотность дислокаций в интерфейсе, а также взаимопроникновение (диффузия) ионов Fe, Ga, Y и Gd, образующая структуры переменного состава приводит к разрушению (разупорядочению) магнитных подрешёток BiYIG, появлению магнито-мёртвого и магнито-пассивного слоев и, следовательно, сильному уменьшению МО эффектов, вплоть до обнуления, в пленках толщиной меньше критической (Рис. 1б).

Для подложек GGG определена постоянная Верде при разных длинах волн, ее полевая зависимость, и отмечены особенности спектров эффектов Фарадея и Керра тонкопленочных структур BiYIG/GGG, обусловленные вкладом подложки GGG с полированной и неполированной обратной стороной. Получено, что величины эффектов Фарадея и Керра для массивных диэлектрических подложек больше или сопоставимы с МО эффектами в наноразмерных пленках BiYIG, что вносит определенные известные парадигмы в конструкцию планарных оптоэлектронных устройств.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ тема «Спин» №122021000036–3.

Список использованных источников:

1. Modern magnetooptics and magneto-optical materials / Edit by J.M.D. Coey, D.R. Tilley, IOP Publishing: Bristol, Philadelphia, USA, 1997. – 381 p.
2. J.H. Van der Merwe. Lattice mismatch and bond strength at the interface between oriented films and substrates. In book M.H. Francomber, H. Sato: Single-Crystal Films. Pergamon Press, Oxford, London, 1964. –172 с.
3. Сухоруков Ю.П., Лошкарева Н.Н., Ганьшина Е.А. и др. Влияние изовалентного легирования пленок манганитов $(\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x)_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ ($0 < x < 1$) на оптические, магнитооптические и транспортные свойства вблизи перехода металл-изолятор // Физика твёрдого тела. – 2004. – Т. 46. – С. 1203.
4. Sukhorukov Yu.P., Nosov A.P., Loshkareva N.N. et al. The influence of magnetic and electronic inhomogeneities on magnetotransmission and magnetoresistance of $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ films // Journal of Applied Physics. – 2005. – V. 97. – P. 103710.
5. Suturin S.M., Korovin A.M., Bursian V.E. et al. Role of gallium diffusion in the formation of a magnetically dead layer at the $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ epitaxial interface // Physical Review Materials. – 2018. – № 2. – P. 104404.
6. Berzhansky V., Mikhailova T., Shaposhnikov A. et al. Magneto-optics of nanoscale Bi:YIG films // Applied Optics. – 2013. – V.52. – № 26. – P. 6599.

УДК 537.662; 004.312.22

О возможности использования ароматических жидкостей для волоконно-оптических линий связи

Эгамов Ш.В.

к.ф.-м.н., старший преподаватель кафедры телекоммуникационный инжиниринг Самаркандского филиала Ташкентского университета информационных технологий

Хидиров А.М.

старший преподаватель кафедры телекоммуникационный инжиниринг Самаркандского филиала Ташкентского университета информационных технологий

Мирзокулов Х.Б.

PhD, доцент кафедры телекоммуникационный инжиниринг Самаркандского филиала Ташкентского университета информационных технологий

Рахимов Б.Н.

д.т.н., профессор кафедры системы телерадиовещания Ташкентского университета информационных технологий

***Аннотация.** Получены экспериментальные результаты спектров фарадеевского вращения в диапазоне 1,8-3,65 эВ для H₂O, CCl₄, диметиланилина, бензола, нитробензола, о-толуидина, о-анизида, м-хлоранилина и о-хлоранилина. Полуэмпирические квантово-механические расчеты самосогласованного поля (SCF) с использованием метода MNDO/D для органических молекул были выбраны для оценки электронных спектров в видимом диапазоне для интерпретации экспериментальных результатов. Показано, что магнитооптический отклик образцов меняется не только в зависимости от геометрии, распределения пи-электронов в ароматических жидкостях, но и существенно зависит от их химического состава. Рассмотрены перспективы использования магнитооптических волноводов в качестве логических элементов устройств с возможностью их работы on-line в ВОЛС.*

***Ключевые слова:** эффект Фарадея, жидкостные магнитооптические волноводные логические вентили*

On the possibility of using aromatic liquids for fiber-optic communication lines

Egamov Sh.V.

PhD, Senior Lecturer of the Department of Telecommunication Engineering of Samarkand branch of Tashkent University of Information Technologies

Khidirov A.M.

Senior Lecturer of the Department of Telecommunication Engineering of Samarkand branch of Tashkent University of Information Technologies

Mirzokulov Kh.B.

PhD, Associate Professor of the Department of Telecommunication Engineering of Samarkand branch of Tashkent University of Information Technologies

Rakhimov B.N.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of TV and Radio Broadcasting of Tashkent University of Information Technologies

Annotation. *Experimental results of Faraday rotation spectra in the range of 1.8-3.65 eV were obtained for H₂O, CCl₄, dimethylaniline, benzene, nitrobenzene, o-toluidine, o-anisidine, m-chloroaniline and o-chloroaniline. Semi-empirical quantum mechanical self-consistent field (SCF) calculations using the MNDO/D method for organic molecules were chosen to evaluate electronic spectra in the visible range for interpretation of experimental results. It is shown that the magneto-optical response of samples varies not only depending on geometry. distribution of pi electrons in aromatic liquids, but also significantly depends on their chemical composition. The prospects for using magneto-optical waveguides as logical elements of devices with the possibility of their operation on-line in fiber-optic lines are considered*

Keywords: *Faraday effect, liquid magneto-optical waveguide logic gates.*

В настоящее время в прикладных целях все активнее стали применяться органические материалы, как в твердой, так и в жидкой фазе. С целью определения магнитооптических параметров органических углеводородов были проведены экспериментальные исследования ароматических углеводородов в видимой области спектра. Бензол и его производные являются основой многих синтезируемых полимеров, применяющихся в современных устройствах и весьма привлекательны для исследований.

Опыты с ЯМР с молекулами бензола показывают, что делокализованные электроны молекул бензола под воздействием магнитного создают индуцированный кольцевой ток π -электронов.

Собственно, именно такое поведение электронов бензольного кольца и его моно- и ди-замещенных производных приводит к достаточно большой магнитооптической добротности органических материалов, поэтому данные образцы были выбраны для более детального исследования авторами работ [1]

Выбранный для исследований органических жидкостей магнитооптический эффект Фарадея происходит при взаимодействии плоско-поляризованной световой волны с веществом в присутствии магнитного поля. Свет после прохождения образца в общем случае становится эллиптически поляризованным с главными осями, повернутыми на некоторый угол относительно плоскости поляризации падающего пучка. При воздействии относительно слабого внешнего поля H фарадеевское вращение можно считать эффектом первого порядка по H .

Образцы ароматических жидкостей с бензольными кольцами: бензол, нитробензол, орто-толуидин, орто-анизидин, а также мета- и орто-хлоранилин были очищены путем перегонки и помещены в трубки Вуда. Спектральные магнитооптические свойства образцов были изучены с помощью монохроматора МДР12. Блок схема установки приведена на рис. 1

Исследования магнитооптических спектров проводились на специально выбранной серии образцов с целью определения влияния химического состава и геометрии молекул на величину эффекта Фарадея в видимой области. Как и следовало ожидать, состав атомов в моно- и ди-замещенных производных бензола оказывает достаточно заметное влияние как на оптические, так и на магнитооптические свойства исследованных жидкостей (рис.3).

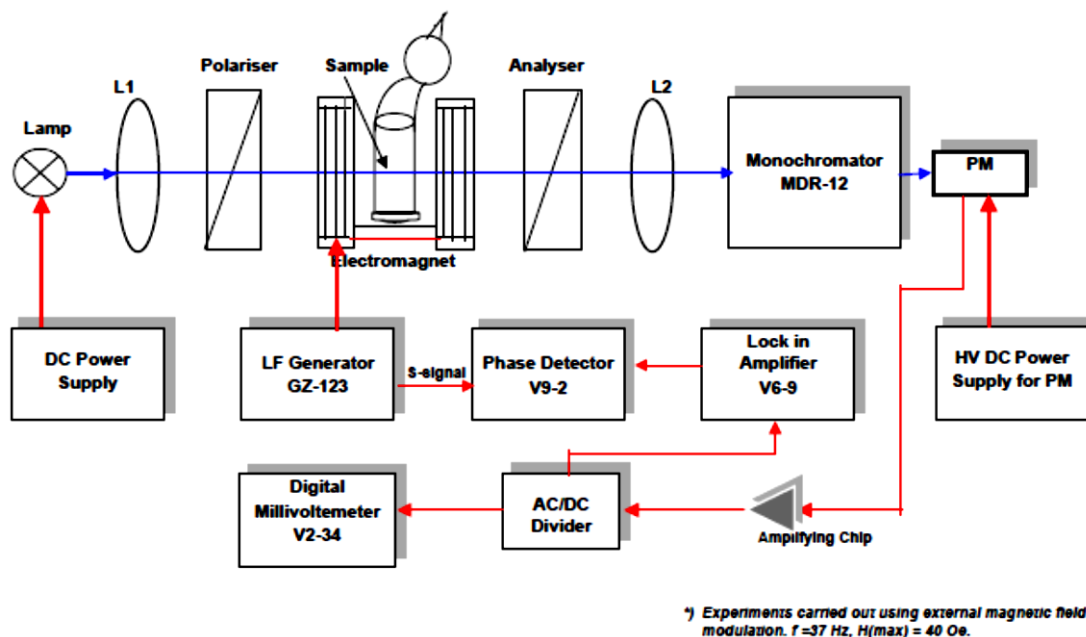


Рис.1 Блок-схема магнитооптической установки для исследования магнитооптических спектров ароматических жидкостей.

Представляло интерес выяснить, как влияет структурная изомерия, обусловленная различным положением ди- замещающих групп бензольного скелета на их магнитооптические свойства. Для этого были выбраны образцы хлоранилина в орто- и мета- состояниях. Полученные результаты для данных образцов представлены на рис. 2.

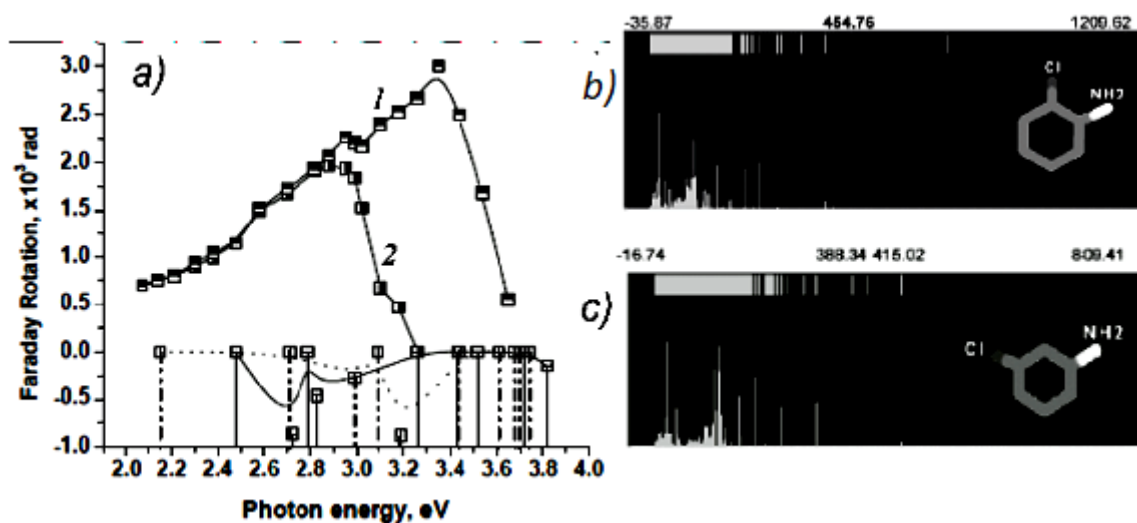


Рис.2 Магнитооптические спектры фарадеевского вращения для о-хлоранилина (2а, кривая 1) и м-хлоранилина (2а, кривая 2) и их расчетные энергетические спектры 2b и 2c (без учета влияния магнитного поля).

Анализ полученных данных показывает, что на энергетические спектры исследованных молекул оказывает сильное влияние не только химический состав, но и само расположение замещающих групп относительно друг друга. Еще более заметно это влияние на магнитооптические свойства изомеров.

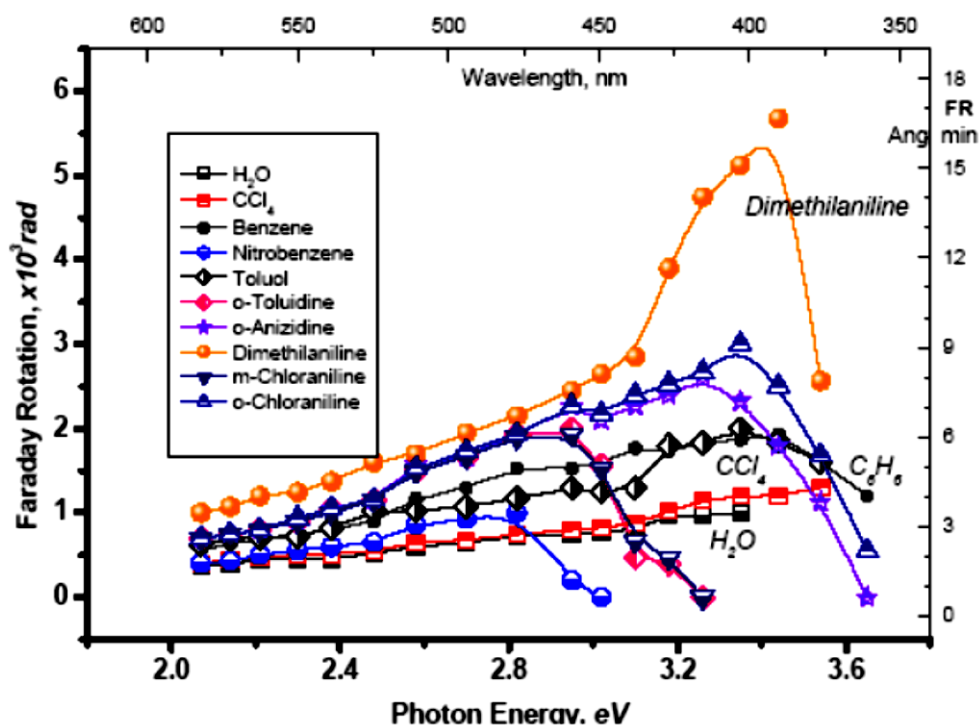


Рис.3 Эффект Фарадея в некоторых жидкостях

По результатам исследования магнитооптических спектров приведенным на рис.3 можно сделать вывод, что магнитооптическая добротность органических жидкостей вполне достаточна для их использования в прикладных целях.

Целью данной статьи является, скорее, формулирование магнитооптических задач, связанных с применением ароматических жидкостей в современных областях связи и хранения данных, а не подробное объяснение всего их поведения. Наиболее реалистичными устройствами являются магнитооптические волокна и выбор использования магнитооптики для управляемых вентилях ИЛИ и НЕ. для обработки данных [2]. Здесь мы лишь вкратце изложим некоторые идеи таких приложений.

Давайте проведем некоторые элементарные расчеты для соленоидного магнита, используя волокно длиной 1 сантиметр и диаметром 100 микрон с наружным диаметром и сердцевиной, заполненной подходящей ароматической жидкостью, в качестве образца для магнитооптического прибора. Если подать ток около $0,1A$ на проволочную катушку диаметром $0,2$ мм (с магнитооптическим волокном, имеющим вышеуказанные параметры), то эффект Фарадея может быть отрегулирован отрегулирован в диапазоне 30° - 45° (угловых) в зависимости от природы образца. Это означает, что мы можем без особых проблем использовать в целях связи такие органические материалы, как магнитооптические модуляторы и изоляторы.

Список использованных источников:

1. Egamov S. Experimental study of the magneto optical Faraday rotation spectra in some aromatic liquids. // Frontiers in optics. OSA Technical Digest (CD). Optical Society of America – 2006 – Paper FWR6. ISBN 52-818-71_557
2. Ш.В. Эгамов, А.М. Хидиров, Х.А. Жуманов. Волноводные логические вентиля для магнитооптических кубитов//Письма в ЖТФ – 2020, – т. 46 – вып. 19 – с. 7-10. DOI:10.21883/PJTF19.5003518058

УДК 314.748

Транспортные и магнитные свойства $Ba_xSr_{2-x}FeCoO_6$ **Мамедов Д.В.**

Научный сотрудник, КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН

Макарченко А.С.

Младший научный сотрудник, КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН

Еремина Р.М.

Ведущий научный сотрудник, КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН

Фазлижанов И.И.

Старший научный сотрудник, КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН

Маити Т.

Профессор, Институт Технологии Индии, Канпур

Аннотация. Проведены измерения спектров магнитного резонанса керамики $Ba_xSr_{2-x}FeCoO_6$ ($x = 0, 0.1, 0.3, 0.5$) в широком температурном диапазоне выше 300 К. Для температур выше температур магнитного упорядочения, составляющих для образцов с $x = 0.1, 0.3$ и 0.5 , соответственно 466, 519 и 472 К, в $Ba_xSr_{2-x}FeCoO_6$ наблюдается изменение формы линий спектра магнитного резонанса, появляется интенсивная линия, связанная с наличием ионов кобальта и железа, связанных сильным обменным взаимодействием. Построены температурные зависимости коэффициента Зеебека и удельной проводимости. Определена энергия активации малого полярона, ответственного за прыжковую проводимость
Ключевые слова: двойные перовскиты, ЭПР, эффект Зеебека, электросопротивление.

Transport and magnetic properties $Ba_xSr_{2-x}FeCoO_6$ **Mamedov D.V.**

Researcher, KPTI FRC KazSC RAS

Makarchenko A.S.

Junior Researcher, KPTI FRC KazSC RAS

Eremina R.M.

Leading Researcher, KPTI FRC KazSC RAS

Fazlizhanov I.I.

Senior Researcher, KPTI FRC KazSC RAS

Maiti T.

Professor, Indian Institute Technology

Annotation. The random distribution of magnetic ions, mixed valence, strong electronic correlations and unusual ordering of charges, leading to unusual features of magnetic ordering, arouse scientific interest in Ludwigite samples. The results of measurements of the EPR spectra, thermal EMF and temperature dependence of electrical resistance are presented. Magnetic resonance spectra of $Ba_xSr_{2-x}FeCoO_6$ ceramics ($x = 0, 0.1, 0.3, 0.5$) were measured in a wide temperature range above 300 K. A change in the lineshape of the magnetic resonance spectrum is observed at temperatures

above 466, 519 and 472 K (TC ordering) for samples with $x = 0.1, 0.3$ and 0.5 , respectively. An intense ESR-line appears which is due to the presence of cobalt and iron ions bounded by a strong exchange interaction. Temperature dependencies of Seebeck coefficient and specific conductivity were measured for all samples studied. The activation energy of the small polaron responsible for jump conductivity was determined from temperature dependence of the specific conductivity.

Keywords: double perovskite, EPR, Seebeck effect, electrical resistance.

Введение

Преобразователи тепловой энергии в электрическую, основанные на эффекте Зеебека, уже долгое время рассматриваются как многообещающий вид устройств выработки электроэнергии, обладающих высокой эффективностью. Такие устройства не содержат движущихся частей и способны аккумулировать и преобразовывать в электроэнергию тепло, выделяемое любыми окружающими их источниками. Производительность устройства ТЕ обычно оценивается показателем качества, обозначаемым ZT , который определяется внутренними свойствами материала, и выражаемым следующим уравнением:

$$ZT = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} T = \frac{S^2 \sigma}{\kappa_e + \kappa_l} T, \quad (1)$$

где S – коэффициент Зеебека, σ – электропроводность, κ – теплопроводность, а T – температура. Теплопроводность зависит от двух параметров, а именно от электрической теплопроводности (κ_e) и теплопроводности решетки (κ_l). Хороший ТЕ материал с высоким значением ZT требует высокого коэффициента Зеебека.

Двойные перовскиты являются лучшей альтернативой по сравнению с халькогенидами для высокотемпературных применений благодаря их низкой стоимости и более высокой стойкости к окислению при лучшей термической стабильности.

Двойные перовскиты $A_2B''B'O_6$ очень легко поддаются модификации состава, благодаря чему, используя различные типы катионов в позициях B'' и B' , можно менять их электрические, магнитные и термические свойства. Кроме того, эти материалы имеют сложную кристаллическую структуру, способную включать в состав множество катионов, которые могут выступать в качестве центров рассеяния фононов, необходимых для низкой теплопроводности решетки. Также двойные перовскиты изучаются благодаря наличию высокого магнитосопротивления и мультиферроических свойств.

Целью данной работы является изучение магнитных и термоэлектрических свойств соединений $Ba_{2-x}Sr_xFeCoO_6$ методом электронного парамагнитного резонанса, измерение термоэлектрических параметров, определение температур фазового перехода.

Экспериментальные результаты

Спектры электронного спинового резонанса измерялись на спектрометре Varian_E-12 на частоте 9.4 ГГц с азотным продувом и температурным контроллером в диапазоне температур от 25 до 600 К (см. рисунок 1-2). Как видно из рисунка, в образцах начиналась наблюдаться интенсивная линия ЭПР выше температуры 466К, 519К, 472К для образцов с $x=0.1, 0.3$ и 0.5 , соответственно. Мы связываем данные температуры с фазовым переходом в керамике из упорядоченного состояния в парамагнитное. Наличие дополнительных линий, интенсивность которых много меньше, связываем с беспорядком в образце и наличием неупорядоченных областей, которых особенно много в образце с $x=0$, для которого вторая линия появляется при температуре 472 К.

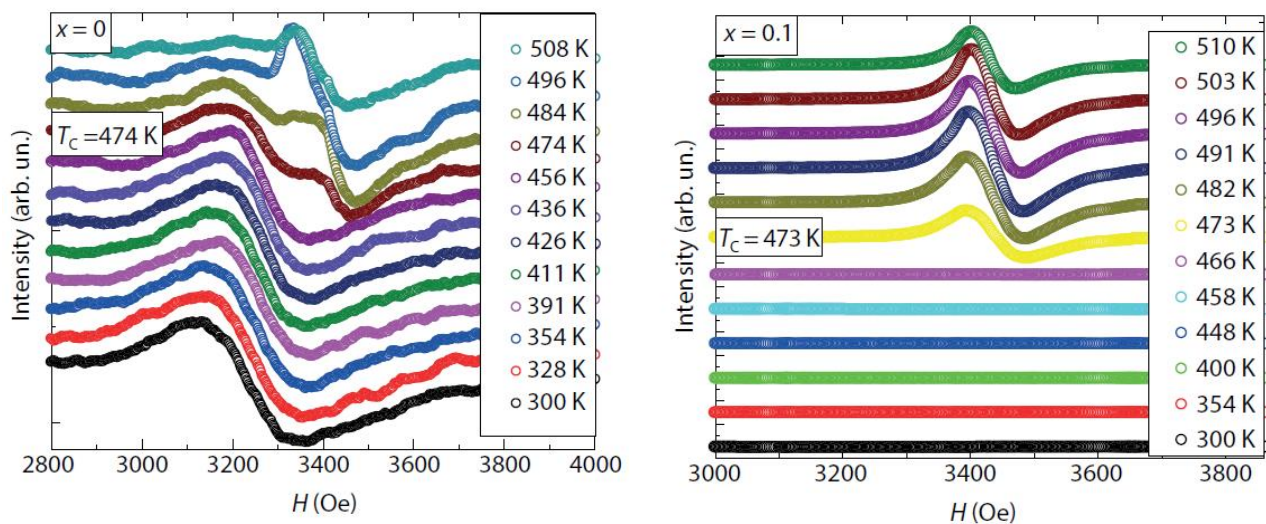


Рисунок 1. Вид спектров ЭПР в образцах $Ba_xSr_{2-x}FeCoO_6$, где $x = 0.0; 0.1$

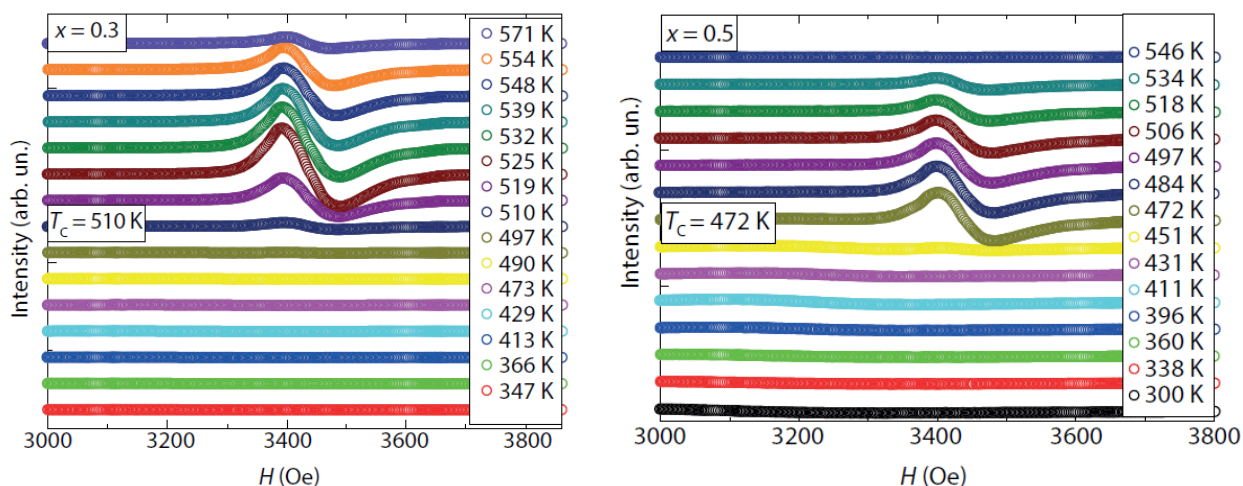


Рисунок 2. Вид спектров ЭПР в образцах $Ba_xSr_{2-x}FeCoO_6$, где $x = 0.3; 0.5$

Также была измерена зависимость коэффициента Зеебека от температуры в диапазоне 275-600К. Измерения производились при помощи зажима между подогреваемыми платиновыми электродами, разница температур между горячим и холодным спаем везде составляет 50К. Температура на рисунке 3 является температурой холодного спае.

Дополнительно был измерен температурный коэффициент электросопротивления в области температур от 300 до 560К.

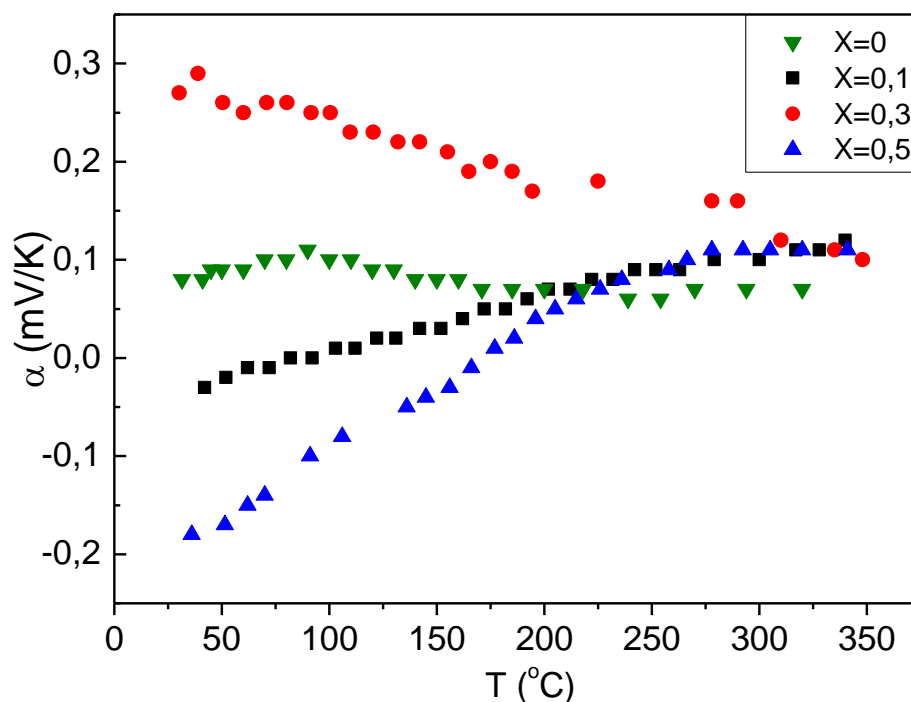


Рисунок 3. Зависимость коэффициента Зеебека от температуры серии образцов $Ba_xSr_{2-x}FeCoO_6$, где $x = 0,0; 0,1; 0,3; 0,5$.

Заключение.

В настоящей работе проведены исследования высокотемпературных свойств керамики двойных перовскитов $Ba_xSr_{2-x}FeCoO_6$ ($x=0, 0,1, 0,3, 0,5$), синтезированной методом твердофазного синтеза. Проведены температурные зависимости спектров ЭПР, коэффициента Зеебека, удельного сопротивления в температурном диапазоне от 300К до 600К. Некоторые из этих оксидов двойных перовскитов продемонстрировали изменение коэффициента Зеебека, вызванное температурным переключением типа проводимости p–n, которое может быть использовано для разработки новых многофункциональных устройств. Из анализа температурной зависимости удельной проводимости проведена оценка энергии активации носителей заряда с помощью модели прыжковой проводимости малого полярона.

Работа выполнена в рамках гранта РФФ 22-42-02014.

УДК 537.632

**Магнитный круговой дихроизм и поглощение кристалла $\text{Na}_{0.4}\text{Ho}_{0.6}\text{F}_{2.2}$
в области $f-f$ переходов**

Соколов В.В.

к.ф.м.н., н.с., Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН

Малаховский А.В.

д.ф.-м.н., с.н.с., Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН

Каримов Д.Н.

к.ф.м.н., в.н.с., Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН

***Аннотация.** Работа посвящена изучению спектров поглощения и магнитного кругового дихроизма (МКД) кристалла $\text{Na}_{0.4}\text{Ho}_{0.6}\text{F}_{2.2}$. С помощью спектров поглощения и МКД определены и проанализированы температурные зависимости парамагнитной магнитооптической активности $f-f$ переходов в гольмии.*

***Ключевые слова:** ионы Ho^{3+} , $f-f$ переходы, магнитный круговой дихроизм.*

**Magnetic circular dichroism and absorption of $\text{Na}_{0.4}\text{Ho}_{0.6}\text{F}_{2.2}$ crystal
in the region of $f-f$ transitions**

Sokolov V.V.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS

Malakhovskii A.V.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS

Karimov D.N.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Federal Scientific Research Centre «Crystallography and Photonics» of Russian Academy of Sciences

***Annotation.** The work is devoted to study of absorption and magnetic circular dichroism (MCD) spectra of $\text{Na}_{0.4}\text{Ho}_{0.6}\text{F}_{2.2}$ crystal. Temperature dependencies of paramagnetic magneto-optical activity of $f-f$ transitions in holmium were determined and analyzed using absorption spectra and MCD.*

***Keywords:** Ho^{3+} ions, $f-f$ transitions, magnetic circular dichroism.*

В данной работе измерены спектры оптического поглощения и магнитного кругового дихроизма (МКД) кристалла $\text{Na}_{0.4}\text{Ho}_{0.6}\text{F}_{2.2}$ в области $f-f$ переходов $^5I_8 \rightarrow ^5F_3, ^5F_2, ^3K_8$ и 5G_5 в ионе гольмия в интервале температур 3.6 – 90 К (пример при 5 К представлен на рис.1).

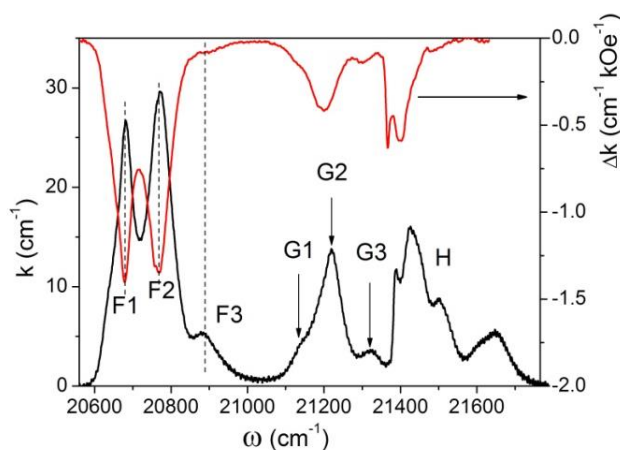


Рис.1. Спектры поглощения (k) и МКД (Δk) кристалла $\text{Na}_{0.4}\text{Ho}_{0.6}\text{F}_{2.2}$ при 5 К в области переходов ${}^5I_8 \rightarrow {}^5F_3$, 5F_2 3K_8 (полосы F, G и H).

Таблица 1. Правила отбора для электродипольных переходов в симметрии C_{4v} .

	A_1	A_2	B_1	B_2	E
A_1	π	0	0	0	σ
A_2	0	π	0	0	σ
B_1	0	0	π	0	σ
B_2	0	0	0	π	σ
E	σ	σ	σ	σ	π

При переходе от свободного атома к октаэдру и далее к симметрии C_{4v} возбужденные состояния иона Ho^{3+} преобразуются следующим образом [1]:

$$\text{F-band: } {}^5F_3 (J=3) \rightarrow T_1 + T_2 + A_2 \rightarrow A_2 + B_1 + B_2 + 2E. \quad (1)$$

$$\text{G-band: } {}^5F_2 (J=2) \rightarrow E + T_2 \rightarrow A_1 + B_1 + B_2 + E. \quad (2)$$

$$\text{H-band: } {}^3K_8 (J=8) \rightarrow A_1 + 2E + 2T_1 + 2T_2 \rightarrow A_1 + 4B_1 + 4B_2 + 4E. \quad (3)$$

$$\text{J-band: } {}^5G_5 (J=5) \rightarrow E + 2T_1 + T_2 \rightarrow A_1 + 2A_2 + B_1 + B_2 + 3E. \quad (4)$$

Согласно правилам отбора табл. 1 и разложений (1, 2 и 4), при низких температурах полосы F и G должны содержать три, а полоса J — пять σ -поляризованных линий при переходах из E-состояния в синглеты, и эти линии должны проявляться в МКД. Эти линии действительно проявляются в полосах F, G и J (рис. 1). π -поляризованные линии не наблюдаются, хотя они могли бы присутствовать в спектрах из-за случайной ориентации кластеров гольмия. В полосе H аналогичного расщепления согласно (3) для переходов в синглеты не наблюдается. По-видимому, это следствие пространственной неоднородности кристалла.

При рассмотрении спектров МКД обнаружено, что при низких температурах спектр МКД имеет парамагнитный вид и практически совпадает со спектром поглощения (рис. 1), а при более высоких температурах начинает преобладать диамагнитный спектр. При 90 К (и выше) МКД переходов F1 и F2 из основного состояния сохраняет парамагнитную форму. Отсутствие диамагнитной составляющей в спектре МКД переходов F1 и F2 из основного

состояния можно объяснить пространственной интеграцией спектра МКД из-за пространственной неоднородности кристалла.

Интегральная по полосе поглощения парамагнитная магнитооптическая активность (МОА) описывается уравнением:

$$c = \frac{\langle \Delta k(\omega) \rangle_0}{\langle k(\omega) \rangle_0} = C \frac{\mu_B H}{k_B (T - \theta)} \quad (5)$$

Нулевые моменты полос поглощения и МКД и соответствующий параметр «с», представленные в (5), были получены в функции от температуры. Постоянная Кюри-Вейсса кристалла $\text{Na}_{0.4}\text{Ho}_{0.6}\text{F}_{2.2}$ $\theta = -11$ К была определена из магнитных измерений [2]. Затем по уравнению (5) находили параметр «С» полос поглощения в функции от температуры (рис. 2). Безразмерный параметр «С» МОА в (3) не должен зависеть от температуры, если МОА перехода следует (5).

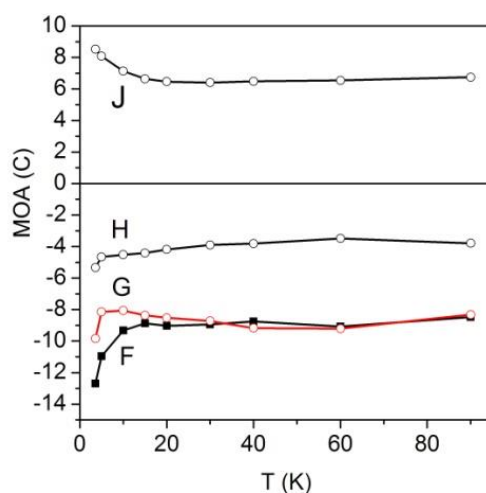


Рис.2. Интегральная магнитооптическая активность полос поглощения кристалла $\text{Na}_{0.4}\text{Ho}_{0.6}\text{F}_{2.2}$

На Рис. 2 наблюдается аномальное поведение МОА полос поглощения при температурах ниже 10 К: они увеличиваются по абсолютной величине с понижением температуры. При этом интенсивность полос поглощения уменьшается с понижением температуры. Это возможно, если наблюдаемые переходы происходят не с самого нижнего уровня, а переходы с самого нижнего уровня являются слабыми. В то же время, чтобы результирующая МОА росла, МОА переходов с нижнего уровня должна быть больше, чем у основных наблюдаемых переходов. Было определено, что этому условию удовлетворяет квазидублет $M_J = \pm 8$.

Список использованной литературы:

1. El'yashevitch M.A., Spectra of rare earths, Moscow, GIT-TL, 1953 (in Russian).
2. Bohigas X., Lluma J., Tejada J., Krivandina E. A., and Sobolev B. P., Magnetic Susceptibility of Sodium Rare-Earth Fluorites $\text{Na}_{0.5-x}\text{R}_{0.5+x}\text{F}_{2+2x}$ ($R = \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Er}, \text{Tm}, \text{Yb}$) and Some Ordered Phases // Crystallography Reports. –2001. – №46. – С. 483–487.

УДК 537.622

Влияние отжига на магнитные свойства нанокристаллических пленок $Fe_{72.4}Ti_{5.4}B_{19.2}O_{3.0}$ **Перова Н.Н.**

инженер, Физический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова

Ганьшина Е.А.

д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Физический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова

Харин Е.В.

к.т.н., старший научный сотрудник, ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН

Гридин Д.М.

аспирант, Физический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова

Теджетов В.А.

к.ф.-м.н, научный сотрудник, ИМЕТ им. А.А. Байкова

Шефтель Е.Н.

д.т.н., главный научный сотрудник, ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН

Грановский А.Б.

д.ф.-м.н., профессор, Физический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова

***Аннотация.** Приводятся результаты исследования магнитных свойств нанокристаллических пленок $Fe_{72.4}Ti_{5.4}B_{19.2}O_{3.0}$, подвергнутых отжигу в вакууме при 200, 300 и 400^oС. Пленки толщиной 0.52 мкм получены магнетронным осаждением на стеклянные подложки. Измерены петли гистерезиса на вибрационном магнитометре, полевые и спектральные зависимости экваториального эффекта Керра (ЭЭК), визуализированы процессы перемагничивания на магнитооптическом Керровском магнитометре. Получено, что в результате отжига изменяется микроструктура пленки, происходит перераспределения Ti между фазовыми составляющими и протекает процесс кристаллизации аморфной фазы, что проявляется в двухступенчатом процессе перемагничивания за счет образования двух магнитных фаз и в модификации спектров ЭЭК.*

***Ключевые слова:** магнитно-мягкие плёнки, петля гистерезиса, экваториальный эффект Керра, магнитооптический Керр магнитометр*

Influence of annealing on magnetic properties of nanocrystalline films $Fe_{72.4}Ti_{5.4}B_{19.2}O_{3.0}$ **Perova N.N.**

Engineer, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

Ganshina E.A.

Dr.Sc., leading researcher, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

Harin E.V.

Ph.D., senior researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Material Science, RAS

Gridin D.M.

Ph.D student, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

Tejetov V.A.

Ph.D., research associate, Baikov Institute of Metallurgy and Material Science, RAS

Sheftel E.N.

Dr.Sc., professor, chief researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Material Science, RAS

Granovsky A.B.

Dr.Sc., professor, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

Annotation. *The results of a study of the magnetic properties of nanocrystalline $Fe_{72.4}Ti_{5.4}B_{19.2}O_{3.0}$ films subjected to annealing in vacuum at 200, 300 and 400°C are presented. Films 0.52 μm thick were obtained by magnetron deposition on to glass substrates. Hysteresis loops were measured with a vibration sample magnetometer, field and spectral dependences of the transversal Kerr effect (TKE) were measured, and magnetization reversal processes were visualized with a magneto-optical Kerr magnetometer. It was obtained that as a result of annealing, the microstructure of the film changes, redistribution of Ti between phase components and crystallization of amorphous phase occurs which manifests itself in a two-stage process of magnetization reversal due to the formation of two magnetic phases and in modification of the TKE spectra.*

Keywords: *soft magnetic films, hysteresis loop, transversal Kerr effect, magneto-optical Kerr magnetometer*

Плѐнки сплавов на основе Fe с нанокристаллической и дисперсно-упрочнѐнной структурой, получаемые магнетронным осаждением с последующим отжигом, способны обладать высокой намагниченностью насыщения, низкой коэрцитивной силой, высокой магнитной проницаемостью вплоть до ГГц частот, и стабильностью [1, 2], что делает их конкурентными лучшим аморфным нанокристаллическим магнитно-мягкими материалам, получаемым, главным образом, в виде лент закалкой расплава [3]. Структуру и свойства плѐнок на основе Fe оптимизируют путем варьирования условий и режимов напыления и последующего отжига. Магнитные свойства плѐночных сплавов критически зависят от химического и фазового состава материала, от его структуры (размер зерна, микродеформация в зерне, структура межфазовой границы и др.) и микромагнитной структуры (объёмной и поверхностной). В данной работе в качестве модельной системы выбраны полученные методом магнетронного осаждения плѐнки состава $Fe_{72.4}Ti_{5.4}B_{19.2}O_{3.0}$, для которых выполнены магнитостатические измерения, а также, используя комплекс магнитооптических методик, исследованы объёмные и приповерхностные магнитные свойства, позволившие не только выявить их различие, но и визуализировать процесс перемагничивания.

Образцы в виде плѐнок, толщиной 0.52 мкм, на стеклянных подложках получены магнетронным осаждением в МИСиС по методике, подробно описанной в [2]. Для сравнения была также получена плѐнка нанокристаллического Fe. Образцы отжигались при температуре 200, 300 и 400°C в течение 1 ч в вакууме $2 \cdot 10^{-4}$ Па. Структурная аттестация образцов до и после отжига выполнена в ИМЕТ им. Байкова. Измерение петель гистерезиса выполнено на вибрационном магнитометре LakeShore 7407. Использовались три магнитооптические методики в геометрии экваториального и меридионального эффектов Керра (ЭЭК/МЭК); 1) измерение полевых зависимостей при разных длинах волн (ЭЭК); 2) измерение спектральных зависимостей ЭЭК в диапазоне 0.5-3.5 эВ; 3) измерение петель гистерезиса и визуализация перемагничивания на магнитооптическом Керр магнитометре Evicomagnetics GmbH,

Германия(МЭК). Все измерения выполнены при комнатной температуре.

На рис. 1 представлены объемные петли гистерезиса, полученные на вибрационном магнитометре, а на рис. 2 петли гистерезиса приповерхностной области (толщиной порядка 20 нм), на которой формируется магнитооптический сигнал. В результате отжига изменяется как объемная, так и приповерхностная форма петли гистерезиса, появляется излом в слабых полях, что говорит о двухступенчатом процессе перемагничивания, то есть возникает дополнительная магнитная фаза. Процесс возникновения этой дополнительной фракции начинается с поверхности, так как “перетяжка” петли гистерезиса более выражена в магнитооптических петлях. По-видимому, наблюдаемые изменения формы поверхностной петли гистерезиса в отожжённых плёнках связаны с процессом частичной кристаллизации при отжиге аморфной фазы, образовавшейся при осаждении плёнок, и перераспределением Ti и В между фазовыми составляющими.

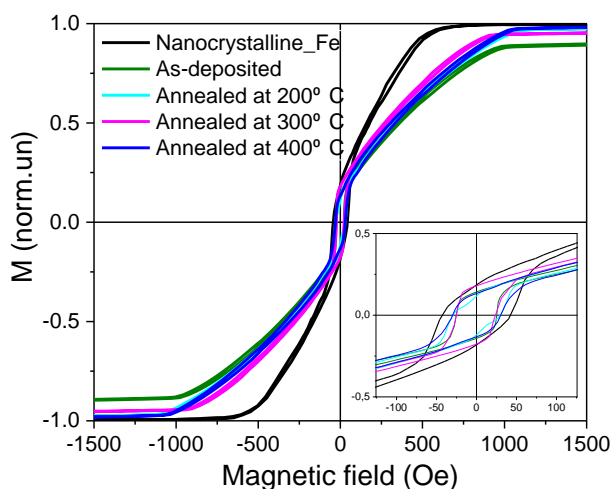


Рис. 1. Объемные петли гистерезиса для нанокристаллического Fe, образца в исходном состоянии и образцов после отжига.

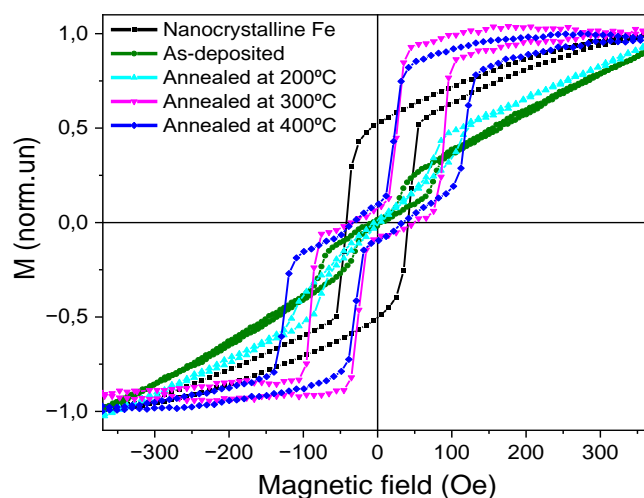


Рис. 2. Приповерхностные петли гистерезиса для нанокристаллического Fe, образца в исходном состоянии и образцов после отжига.

Подтверждением этому могут служить спектральные зависимости ЭЭК (рис.3). При повышении температуры отжига спектр ЭЭК изменяется и характерный для нанокристаллического железа пик при 2.0 эВ становится все более выраженным.

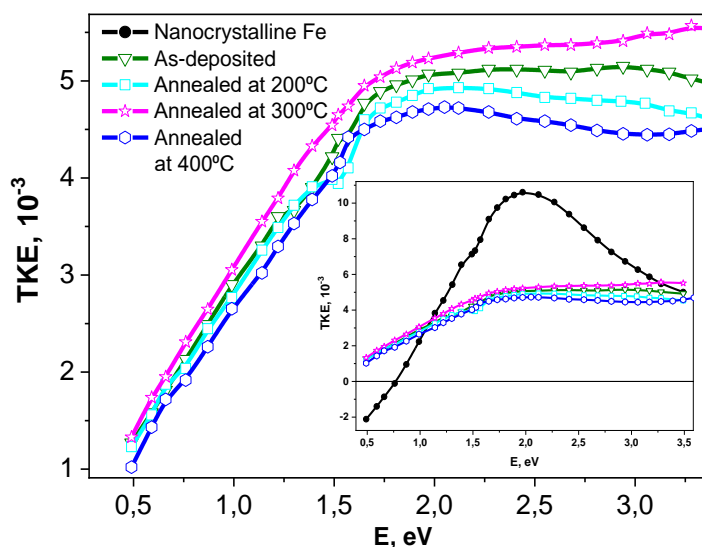


Рис. 3. Спектральные зависимости ЭЭК. На вставке сравнение нанокристаллических пленок $Fe_{72.4}Ti_{5.4}B_{19.2}O_{3.0}$ со спектром нанокристаллической пленки Fe.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-23-00434, <https://rscf.ru/project/23-23-00434/>.

Список использованных источников:

1. Sheftel E.N., Harin E.V., Tedzetov V.A. et al. FeTiB film materials: Dependence of the magnetic properties and magnetic structure on the phase and structural states // J. Magn. Magn. Mat. – 2022. – Vol. 561. – P. 169700.
2. Sheftel E.N., Harin E.V., Bobrovskii S.Yu. et al. FeTiB nanocrystalline films: Static and dynamic magnetic properties in accordance with phase composition and magnetic structure // J. Alloys and Compounds. – 2023. – Vol. 968. – P. 171981.
3. Jifeng Zhou, Junhua You, and Keqiang Qiu, Advances in Fe-based amorphous/nanocrystalline alloys // J. Appl. Phys. – 2022. – Vol. 132. – P. 040702.

УДК 537.622

Изучение динамики доменных границ аморфных лент NiCoSiFeB с помощью меридионального эффекта Керра**Самченко С.В.**

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Перова Н.Н.

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Шапаева Т.Б.

к.ф.-м.н., Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Перов Н.С.

д. ф.-м. н., профессор, Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

***Аннотация.** Работа посвящена изучению магнитных свойств аморфной ленты NiCoSiFeB. Динамика доменных границ в низкочастотных магнитных полях малых амплитуд исследована с помощью меридионального эффекта Керра. Получены значения подвижности доменных границ аморфной ленты NiCoSiFeB при различных частотах.*

***Ключевые слова:** меридиональный магнитооптический эффект Керра, динамика доменных границ, аморфные ленты.*

Studying the dynamics of domain boundaries of amorphous ribbons NiCoSiFeB using the longitudinal Kerr effect**Samchenko S.V.**

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

Perova N.N.

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

Shapaeva T.B.

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

Perov N.S.

Dr. Sc., professor, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

***Annotation.** The work is devoted to the study of the magnetic properties of the amorphous ribbon NiCoSiFeB. The dynamics of domain boundaries in low-frequency magnetic fields of small amplitudes has been studied using the longitudinal Kerr effect. The values of the mobility of the domain boundaries of the amorphous ribbon NiCoSiFeB at different frequencies are obtained.*

***Keywords:** longitudinal magneto-optical Kerr effect, dynamics of domain boundaries, amorphous tapes.*

Аморфные магнитные материалы находят широкое практическое применение в различных областях науки и техники. Их физические свойства зависят от структурного состояния, метода изготовления и обработки, геометрических параметров образцов. Физические свойства аморфных материалов изучаются различными методами, в том числе магнитооптическими [1–2]. Магнитооптические эффекты позволяют изучать распределение намагниченности внутри и на поверхности образца. Именно благодаря использованию магнитооптических эффектов динамику доменной структуры можно наблюдать в реальном времени. Экспериментальные исследования динамики доменных границ при

перемагничивании проводятся различными методами, в том числе с помощью эффекта Керра [3].

Одним из важных результатов исследования динамики доменных границ (ДГ) является измерение подвижности. Подвижность ДГ – это тангенс угла наклона начального линейного участка зависимости скорости движения границы от величины внешнего магнитного поля [4]. Подвижности ДГ – важная характеристика материала, которая определяет возможности его практического применения. Поскольку состав материала, условия изготовления и обработки влияют на подвижность ДГ, исследования их подвижности расширяют возможности характеристики образцов, позволяя выделять факторы улучшающие динамические свойства материала. В настоящей работе апробирован метод измерения подвижности доменных границ с помощью меридионального эффекта Керра.

В работе была исследована серия из 4 аморфных лент разного размера на основе никеля и кобальта. Магнитные свойства изучаемых лент были исследованы на магнитометре с вибрирующим образцом при комнатной температуре в двух геометриях: плоскость образца ориентировалась по полю и перпендикулярно полю. На основании проведенных исследований установлено, что рассматриваемые образцы характеризуются низким значением коэрцитивной силы и достаточно высоким значением намагниченности насыщения (рис. 1).

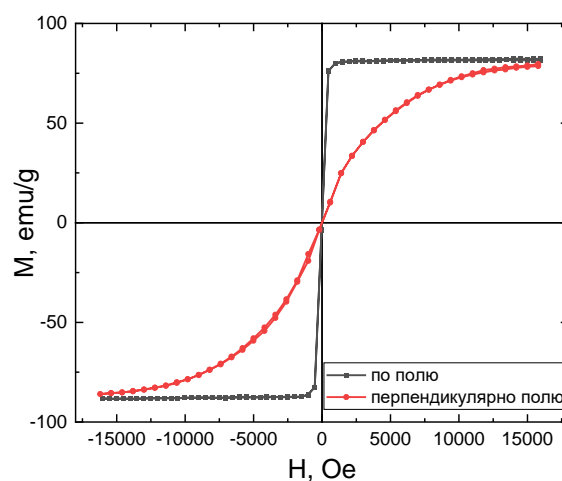


Рис. 1. Магнитополевая зависимость намагниченности для аморфной ленты NiCoSiFeB, измеренная при комнатной температуре.

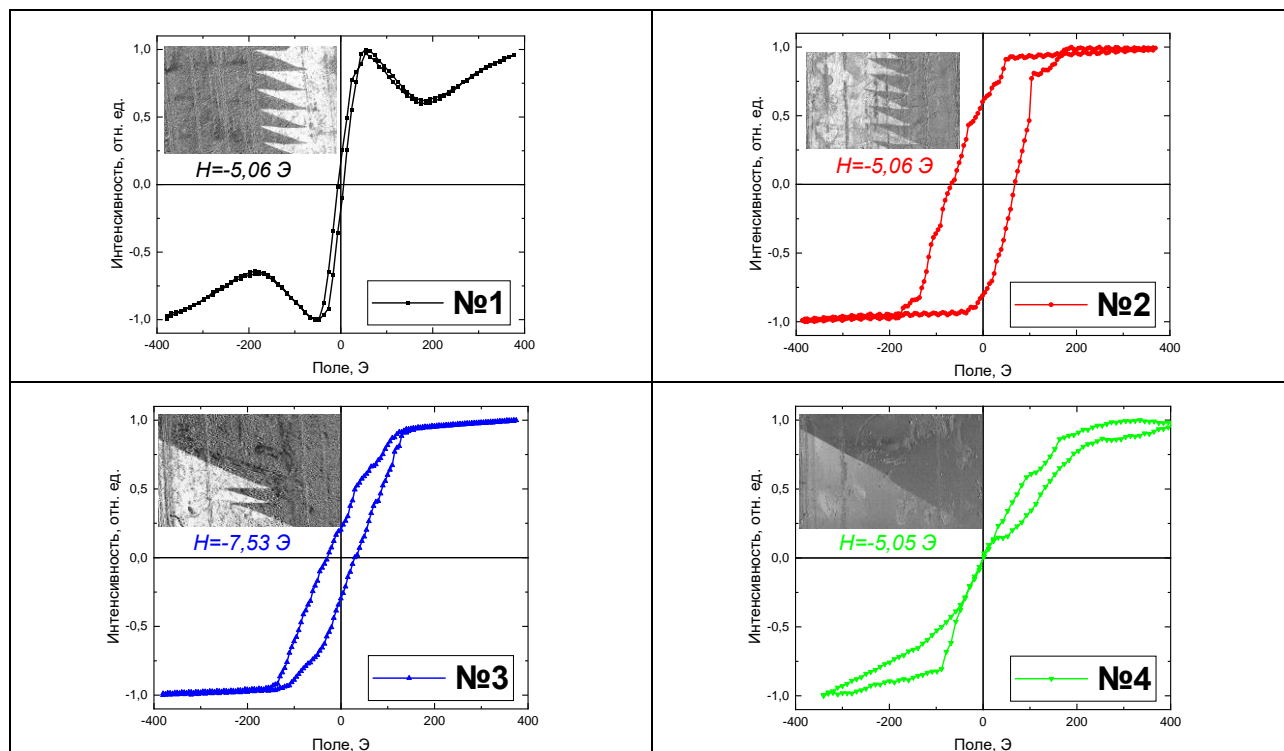
Для определения величины коэрцитивной силы аморфных лент на следующем этапе исследований проводилось изучение магнитооптических свойств образцов на магнитооптическом Керр-микроскопе в геометрии меридионального эффекта Керра при комнатной температуре. Для изучения влияния анизотропии на доменную структуру были выбраны 4 образца разной длины с постоянными значениями толщины и ширины (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики рассматриваемой серии образцов.

Образец	№1	№2	№3	№4
Длина, мм	5,19	2,85	1,25	0,59
Ширина, мм	0,91	0,90	0,91	0,92
Толщина, мм	0,04	0,04	0,04	0,04
Масса, г	0,00113	0,00066	0,00027	0,00012

Отметим, что образец №4 был отрезан так, что его длина меньше, чем ширина. Для проведения измерений была выбрана геометрия, при которой ось прокатки образцов была перпендикулярна магнитному полю. В табл. 2 представлены петли гистерезиса, полученные при измерении меридионального эффекта Керра.

Таблица 2. Меридиональный эффект Керра в рассматриваемых образцах.



Установлено, что данные образцы обладают ярко выраженной доменной структурой, причем равновесная доменная структура (в отсутствие магнитного поля) сохраняется. При уменьшении размеров образца до некоторой величины размеры доменов увеличиваются. Дополнительные пики на петле гистерезиса, наблюдаемые при измерении меридионального эффекта Керра в образце №1, объясняются вкладом эффекта Фарадея. Изменение размеров образца влияет на процесс перемагничивания.

Помимо этого, в образце №1 была исследована подвижность доменных границ. Измерения были проведены в геометрии меридионального эффекта Керра в переменном поле с амплитудой от 4 до 10 Э и частотой 0.1, 0.5 и 1 Гц. Сначала для разных амплитуд переменного магнитного поля при фиксированной частоте были получены зависимости смещения доменной границы от времени (рис. 2а, б). Для получения среднего значения амплитуды смещения доменной границы были исследованы смещения 4 точек, которые на графиках обозначены различными цветами (т. 1 – т. 4). Точки были выбраны на различных участках ДГ. Из рисунка видно, что для разных частот возбуждающего поля разные участки ДГ движутся синхронно с полем. Далее были определены скорости движения доменной границы и построены зависимости скорости ДГ от амплитуды переменного поля (рис. 2в). Все зависимости линейны, подвижность ДГ возрастает с ростом частоты. Точность определения скорости движения ДГ не превышала 8 %, точность определения подвижности не превышала 6 %. Результаты измерений представлены в табл. 3.

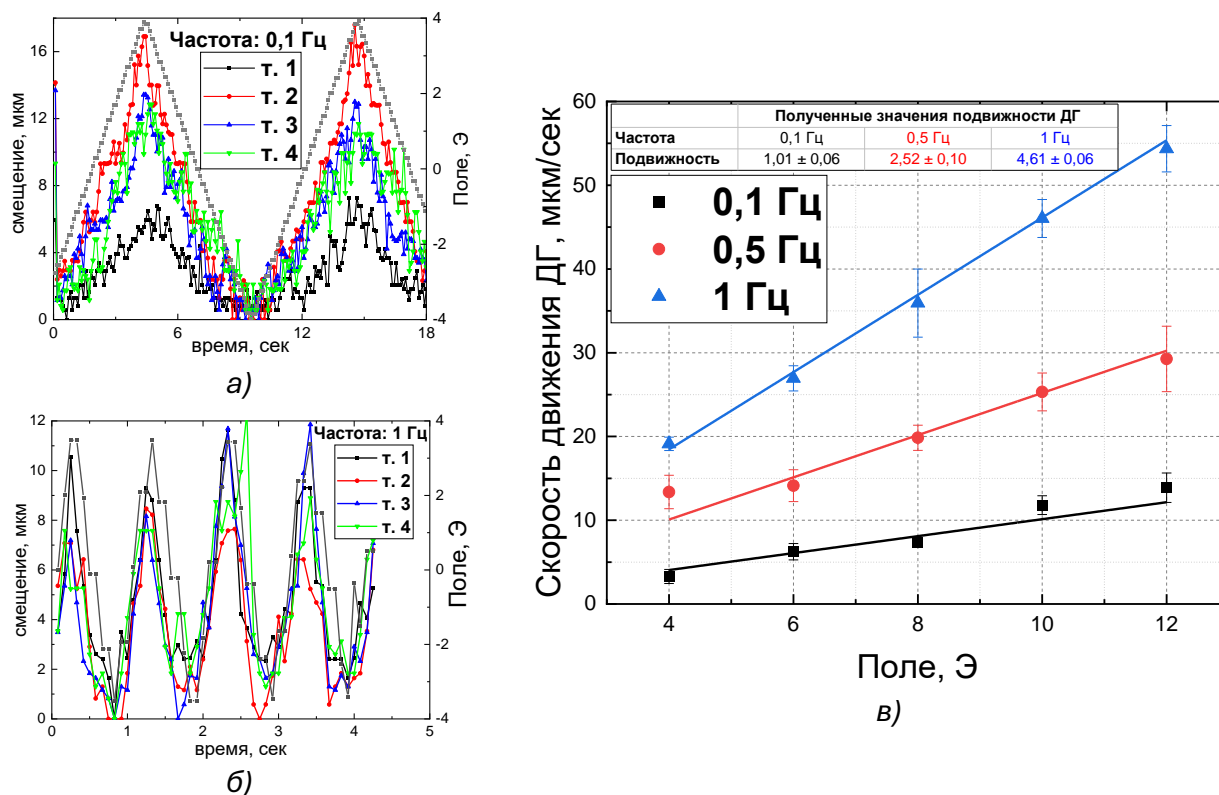


Рис. 2. Динамика доменных границ в процессе перемагничивания. Зависимости смещения доменных границ от времени при амплитуде поля 4 Э при частотах 0.1 Гц (а) и 1 Гц (б). Зависимости скорости движения доменных границ от амплитуды внешнего магнитного поля, частота поля 0.1, 0.5 и 1 Гц (в).

Таблица 3. Подвижность доменных границ аморфной ленты при различных частотах.

Частота, Гц	0.1	0.5	1
Подвижность, мкм/(с*Э)	1.01±0.06	2.52±0.10	4.61±0.06

Используемый метод измерения скорости движения доменных границ и определения подвижности хорошо подходит для исследования процессов перемагничивания при низких частотах в малых магнитных полях, что особенно важно для материалов с малой коэрцитивной силой. Описанный метод позволяет изучать динамические характеристики образцов разных составов при различных внешних условиях.

Список использованных источников:

1. Mazaleyrat F. *Soft Magnetic Materials and Applications*. – Springer Nature Switzerland AG, 2021. – P. 1435–1487.
2. Egbu J. *Magnetic Anisotropy and Stress-Dependent Epoxy Wetting in FeNi-Based Metal Amorphous Nanocomposites*. – IEEE Transactions on Magnetics, 2023. – Vol. 59, No. 11, P. 1–9.
3. Шашков И.В., Кабанов Ю.П., Горнаков В.С. Кинетика перемагничивания и ползучесть доменных границ в структуре Co/Pt/Co – Перспективные материалы и технологии, 2023. – С. 140–146.
4. Шапаева Т.Б., Курбатова Ю.Н. Подвижность доменной границы феррита-граната в присутствии плоскостного магнитного поля – Краткие сообщения по физике, 2021. – № 8, с. 17–23.

УДК 537.632

**Влияние отжига под нагрузкой на магнитооптические свойства
 $Fe_{68.5}Cr_5Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ лент**

Харламова А.М.

к.ф.-м.н., ст.н.с. кафедры магнетизма физического факультета МГУ

Кожевникова П.Я.

магистрант кафедры магнетизма физического факультета МГУ

Каминская Т.П.

к.т.н., доцент, н.с. кафедры общей физики физического факультета МГУ

Larrañaga A.

б.и.н., доцент центра перспективных исследований Университета страны Басков

Курляндская Г.В.

д.ф.-м.н., профессор-исследователь института естественных наук и математики УрФУ

Шалыгина Е.Е.

д.ф.-м.н., профессор кафедры магнетизма физического факультета МГУ

***Аннотация.** Сплавы класса файнмет привлекают внимание как для фундаментальных исследований, так и для технологических приложений. В данной работе представлены результаты влияния нагрузки во время отжига на магнитооптические свойства $Fe_{68.5}Cr_5Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ лент. Ленты получены путем быстрой закалки из расплава и отожжены при температуре $520^\circ C$ в течение 2 часов без нагрузки и под нагрузкой 150 МПа. Приповерхностные петли гистерезиса и одновременная визуализация изменения доменной структуры в процессе перемагничивания образцов были изучены с помощью магнитооптического Керр-магнитометра с помощью меридионального эффекта Керра при комнатной температуре. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что отжиг под нагрузкой влияет на магнитополовое поведение образцов.*

***Ключевые слова:** доменная структура, магнитооптика, отжиг под нагрузкой, файнмет ленты*

**Influence of annealing under load on magneto-optical properties
of $Fe_{68.5}Cr_5Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ ribbons**

Kharlamova A.A.

Candidate of physical and mathematical Sciences, Senior Researcher of the Department of magnetism, Faculty of Physics of MSU

Kozhevnikova P.Y.

Undergraduate student of the Department of magnetism, Faculty of Physics of MSU

Kaminskaya T.P.

Candidate of Technical Sciences, Docent, Researcher of the Department of General Physics, Faculty of Physics of MSU

Larrañaga A.

Bachelor of Engineering, Associate Lecturer at SGIKER, The Basque Country University
UPV/EHU

Kurlyandskaya G.V.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Research Professor of the Institute of Natural
Sciences and Mathematics, Ural Federal University

Shalygina E.E.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of the Department of magnetism, Faculty
of Physics of MSU

Annotation. *Finemet class alloys attract attention for both basic research and technological applications. In this work the results of the influence of load annealing on the magneto-optical properties of $Fe_{68.5}Cr_5Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ ribbons are presented. The ribbons were obtained by rapid quenching from the melt and then annealed at a temperature of 520 °C for 2 hours without load and under the load of 150 MPa. The surface hysteresis loops and simultaneous visualization of the changes of domain structure were measured using a magneto-optical Kerr magnetometer by means of the meridional Kerr effect at room temperature. The obtained experimental data indicate the effect of load annealing on the magnetic field behavior of the samples.*

Key words: *annealing under load, domain structure, finemet ribbons, magneto-optics*

В последние три десятилетия наноструктурированные мягкие ферромагнитные сплавы на основе железа привлекают огромное внимание как для фундаментальных исследований, так и для технологических приложений из-за их необычных структурных, электрических, магнитных, оптических свойств и коррозионной стойкости [1]. В частности, были исследованы структура и магнитные свойства так называемого класса фанмет (FM) сплавов (сплав на основе Fe–Si–Nb–B–Cu). Данный сплав, получаемый в виде лент путем быстрой закалки из расплава, приобретает превосходные магнитомягкие свойства, что позволяет широко его применять в электро- и радиопромышленности, электронной технике и приборостроении [2]. Сравнительно недавно были созданы новые сплавы путем добавления Cr и восстановления Fe в сплавы с классическим фанмет составом, что привело к повышению температуры кристаллизации и повышению коррозионной стойкости сплавов [1]. Аморфные ленты обычно отжигают при температурах выше температуры первичной кристаллизации, составляющей примерно 510 °C, для получения оптимальной структуры и свойств. Было показано, что наведенная анизотропия является специальным инструментом для настройки магнитных откликов, позволяющим настраивать магнитную проницаемость с помощью отжига под напряжением [1]. Цель данной работы – исследование влияния отжига под нагрузкой на магнитооптические свойства $Fe_{68.5}Cr_5Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ лент.

Изучаемые в данной работе ленты $Fe_{68.5}Cr_5Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ были получены путём быстрой закалки из расплава. Ленты были отожжены при температуре 520 °C в течение 2 часов без нагрузки (FM1, FM2) и под нагрузкой 150 МПа (FM3, FM4). Толщина каждой ленты составляла 20 мкм. Исследуемые образцы были отрезаны от исходных лент и имели практически прямоугольную форму. Длина образцов не превышала 4 мм, что было обусловлено техническими данными экспериментальной установки. В каждой серии были изготовлены по две ленты разной ширины 0.88 мм (FM1 и FM4) и 0.60 мм (FM2 и FM3). Микроструктура изучаемых лент была исследована изготовителями образцов методом рентгеновской дифракции с использованием $CuK\alpha$ излучения. Морфология поверхности образцов была изучена методом атомно-силовой (АСМ) микроскопии с использованием сканирующего зондового микроскопа. Измерение петель гистерезиса и одновременная

визуализация доменной структуры (ДС) в процессе перемагничивания образца (регистрировались изменения компоненты намагниченности, M , под действием приложенного магнитного поля) были выполнены с помощью магнитооптического Керр-магнитометра при комнатной температуре. Наблюдение ДС осуществлялось с помощью меридионального эффекта Керра, пропорционального компоненте намагниченности, параллельной плоскости падения света.

Данные рентгеноструктурного анализа показали, что образцы имеют нанокристаллическую структуру с размером кристаллитов, рассчитанным по методу Шеррера, около 15 нм. Данные АСМ показали, что нагрузка во время отжига приводит к уменьшению шероховатости поверхности. Для образцов, отожжённых без нагрузки, средняя шероховатость поверхности образцов, R_a , составляет порядка 20 нм, а отклонение профиля поверхности от среднего значения, ΔZ , порядка 100 нм. Для образцов, отожжённых под нагрузкой, $R_a \approx 10$ нм, а $\Delta Z \approx 20$ нм. Типичные приповерхностные петли гистерезиса лент, измеренные при углах θ (θ - угол между осью ленты и направлением распространения поля), равных 0° и 90° , а также видоизменения доменной структуры представлены на рис. 1, 2:

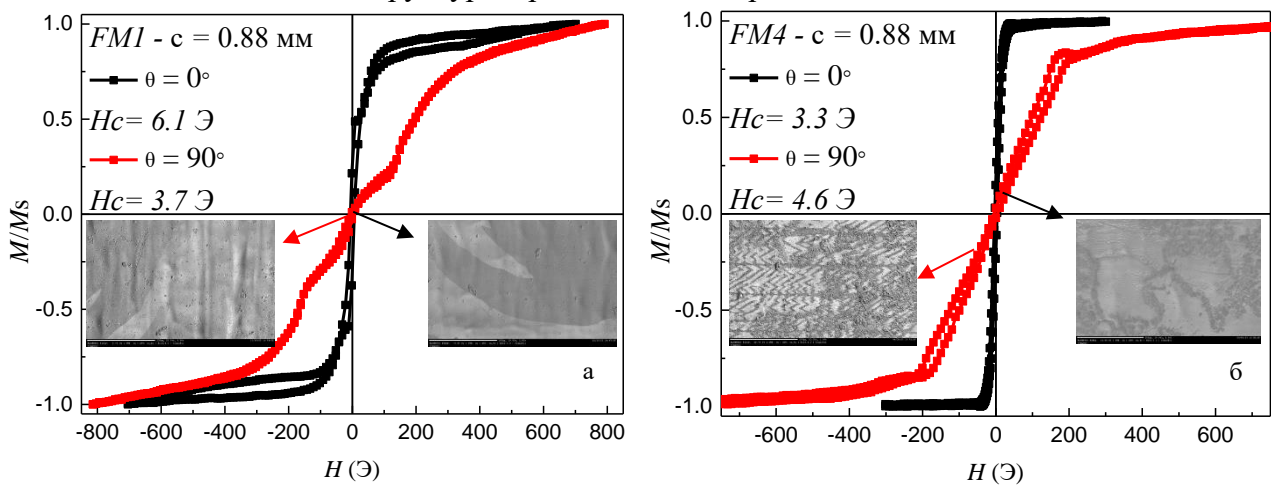


Рис. 1. Приповерхностные петли гистерезиса и видоизменения ДС, измеренные при H , приложенном в плоскости лент шириной $c=0.88$ мм, отожжённых без нагрузки (FM1) и под нагрузкой (FM4)

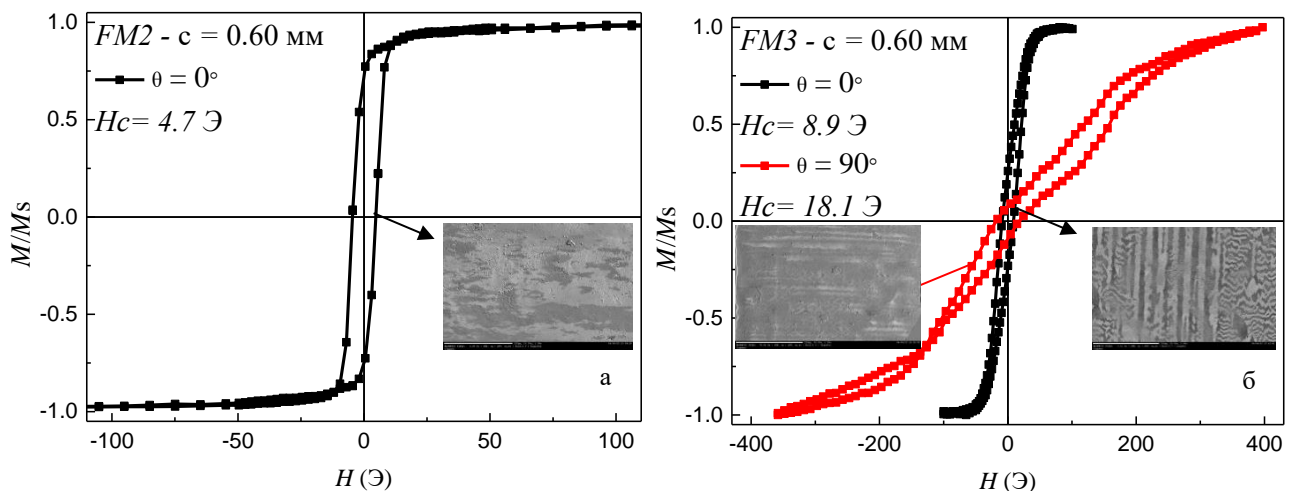


Рис. 2. Приповерхностные петли гистерезиса и видоизменения ДС, измеренные при H , приложенном в плоскости лент шириной $c=0.60$ мм, отожжённых без нагрузки (FM2) и под нагрузкой (FM3)

Данные рис. 1, 2 свидетельствуют о том, что магнитополевое поведение образцов зависит от θ для обеих серий: при $\theta = 0^\circ$ наблюдаются прямоугольные петли гистерезиса, что характерно для оси лёгкого намагничивания, а при $\theta = 90^\circ$ наблюдаются более сложные

наклонные петли, что характерно для оси трудного намагничивания. Кроме того, данные рис. 1, 2 показывают, что отжиг под нагрузкой влияет на магнитополовое поведение образцов: форма петель гистерезиса для образцов, отожжённых под нагрузкой (рис. 1(б), рис. 2(б)), отличается от формы петель образцов, отожжённых без нагрузки (рис. 1(а), рис. 2(а)). Приповерхностные петли гистерезиса имеют более сложную форму, по сравнению с объёмными петлями, полученными ранее при изучении данных лент. Перемагничивание лент при $\theta=90^\circ$ происходит в два этапа. По данным рисунков 2(б) и 1 (б) видно, что при $\theta=0^\circ$ с уменьшением ширины ленты, отожжённой под нагрузкой, увеличиваются значения коэрцитивной силы, H_C , в 2.7 раза. В то же время при уменьшении ширины ленты, отожжённой без нагрузки (рис. 2 (а)), наблюдается уменьшение значений H_C в 1.3 раза. Сравнение полученных экспериментальных данных показало, что приповерхностные значения H_C на порядок больше, чем ранее полученные объёмные значения. Этот факт может быть объяснен наличием микроструктурных и химических неоднородностей в приповерхностных слоях образцов, что является характерным для материалов, приготовленных описанным методом закалки из расплава. Полученные видоизменения ДС показывают, что для образцов, отожжённых без нагрузки (рис. 1(а), рис. 2(а)) наблюдаются широкие домены с доменными стенками 180° , что является типичным для мягких ферромагнитных материалов с одноосной магнитной анизотропией [3]. Для образцов, отожжённых под нагрузкой (рис. 1(б), рис. 2(б)) наблюдается зигзагообразная доменная структура, причем для ленты FM3 наблюдается одновременно полосовая и зигзагообразная доменная структура. Наблюдаемые структуры доменов согласуются с характеристиками петель гистерезиса, представленных на рис. 1, 2. В целом, полученные данные могут быть использованы для получения сплавов с заранее заданными свойствами.

Список использованных источников:

1. Kurlyandskaya G.V., Lukshina V.A., Larrañaga A., Orue I., Zaharova A.A., Shishkin D.A. Induced magnetic anisotropy features in FeCrSiBNbCu nanocrystalline alloy: Role of stress distribution proven by direct X-ray measurements// Journal of Alloys and Compounds – 2013. – 566. – p. 31–36.
2. Ершов Н.В., Лукшина В.А., Федоров В.И., Дмитриева Н.В., Черненко Ю.П., Потапов А.П. Влияние термомагнитной и термомеханической обработки на магнитные свойства и структуру магнитомягкого нанокристаллического сплава $Fe_{81}Si_6Nb_3B_9Cu_1$ // ФТТ. – 2013. – №55(3). – т. 55. – с. 460-470.
3. Kurlyandskaya G.V., Lezama L., Pasynkova A.A., Volchkov S.O., Lukshina V.A., Larrañaga A., Dmitrieva N.V., Timofeeva A.V., Orue I. Amorphous FeCoCrSiB Ribbons with Tailored Anisotropy for the Development of Magnetic Elements for High Frequency Applications// Materials – 2022. – 15(12). – p. 4160.