

*Действие даже самого крохотного существа приводит к изменениям
во всей Вселенной.*

Никола Тесла



Сальвадор Дали «Мадонна Порт-Льигата» (1949)

Секция 9. Магнитные наноструктуры. Малые магнитные частицы

УДК 537.9

**Особенности магнитотранспорта нанокompозитных пленок
(CoFeB)_x(LiNbO₃)_{100-x} вблизи порога перколяции в условиях проявления
обменных и со-туннельных эффектов**

Николаев С.Н.

к.ф.-м.н., в.н.с., Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Черноглазов К.Ю.

к.ф.-м.н., н.с., Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Ситников А.В.

д.ф.-м.н., профессор, Воронежский государственный технический университет

Талденков А.Н.

к.ф.-м.н., с.н.с., Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Васильев А.Л.

к.ф.-м.н., в.н.с., Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Грановский А.Б.

д.ф.-м.н., профессор, Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова

Рыльков В.В.

д.ф.-м.н., г.н.с., Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

***Аннотация.** В полях до 14 Тл при температурах 4-200 К изучен скейлинг в поведении сопротивления аномального эффекта Холла (АЭХ) $\rho_{\text{АНЭ}}$ от продольного сопротивления ρ в нанокompозитных (НК) пленках $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ в диапазоне содержания металлической фазы $x \approx 35-60$ ат.%. При $x \approx 44-60$ ат.% в температурной зависимости проводимости наблюдается логарифмический закон $\sigma \propto \ln T$, который при $x \approx 35-43$ ат.% переходит в закон $\ln \sigma \propto -(T_0/T)^{1/2}$, характерный для со-туннельных процессов переноса в НК. Обнаружено, что степень n в скейлинговой зависимости $\rho_{\text{АНЭ}} \propto [\rho(x)]^n$ ведет себя немонотонно: в диапазонах $x \approx 35-44$ ат.% и $x \approx 50-60$ ат.% наблюдается явный рост показателя ($n \approx 0.31-0.45$ и $n \approx 0.48-0.73$, соответственно), а в интервале $x \approx 44-50$ ат.% величина n практически не изменяется ($n \approx 0.45-0.48$). Мы полагаем, что области изломов в зависимости $n(x)$ указывают на изменение механизма проводимости НК и определяют порог перколяции (при $x_p \approx 50$ ат.%) и переход металл-диэлектрик ($x_c \approx 44$ ат.%), которые в данных системах не совпадают. Особенности механизма АЭХ ниже x_p связываются с коррелированным изменением вероятности со-туннельных переходов в совокупности из более 3-х центров под действием спин-орбитального взаимодействия.*

***Ключевые слова:** нанокompозиты, порог перколяции, аномальный эффект Холла*

Features of the magnetotransport in $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ nanocomposite films near percolation threshold in conditions of the exchange and cotunneling effects

Nikolaev S.N.

Ph.D., National Research Center “Kurchatov Institute”

Chernoglazov K.Yu.

Ph.D., National Research Center “Kurchatov Institute”

Sitnikov A.V.

Dr.Sc., professor, Voronezh State Technical University

Taldenkov A.N.

Ph.D., National Research Center “Kurchatov Institute”

Vasiliev A.L.

Ph.D., National Research Center “Kurchatov Institute”

Granovsky A.B.

Dr.Sc., professor, Lomonosov Moscow State University

Rylkov V.V.

Dr.Sc., National Research Center “Kurchatov Institute”

Annotation. *In fields up to 14 T at temperatures of 4-200 K, scaling behavior of the anomalous Hall effect (AHE) resistance ρ_{AHE} from the longitudinal resistance ρ in nanocomposite (NC) films $(CoFeB)_x(LiNbO_3)_{100-x}$ in the range of metal content phase $x \approx 35-60$ at.% were studied. At $x \approx 44-60$ at.%, a logarithmic law $\sigma \propto \ln T$ is observed in the temperature dependence of conductivity, which at $x \approx 35-43$ at.% turns into the law $\ln \sigma \propto -(T_0/T)^{1/2}$, characteristic of co-tunnel transport processes in NC. It was found that the degree n in the scaling dependence $\rho_{AHE} \propto [\rho(x)]^n$ behaves non-monotonically: in the ranges $x \approx 35-44$ at.% and $x \approx 50-60$ at.% there is a clear increase in the indicator ($n \approx 0.31-0.45$ and $n \approx 0.48-0.73$, respectively), and in the range $x \approx 44-50$ at.% the value of n practically does not change ($n \approx 0.45-0.48$). We believe that the kink regions in the $n(x)$ dependence indicate a change in the NC conductivity mechanism and determine the percolation threshold (at $x_p \leq 50$ at.%) and the metal-insulator transition ($x_c \geq 44$ at.%), which do not match up in these systems.. The features of the AHE mechanism below x_p are associated with a correlated change in the probability of co-tunnel transitions in the aggregate of more than 3 centers under the influence of spin-orbit interaction.*

Keywords: *nanocomposite, percolation threshold, anomalous Hall effect*

В зависимости от температуры и содержания гранул магнитные наноконпозиты (НК) могут находиться в однодоменном, суперпарамагнитном или неоднородно-магнитном состоянии, сопровождаемом формированием ниже порога перколяции суперферромагнитных (СФМ) областей с межгранульным обменным взаимодействием ФМ-типа [1], которое может значительно усиливаться в НК с высокой диэлектрической проницаемостью матрицы ϵ_d из-за ослабления кулоновской блокады [2]. Такого рода объекты представляют интерес как для физики многочастичных взаимодействий, так и для прикладных приложений, поскольку в СФМ состоянии НК обладают рекордно низкой коэрцитивной силой, что делает их перспективными для создания радиопоглощающих покрытий [1, 2]. Однако, до сих пор отсутствуют комплексные исследования магнетосопротивления (МС) и аномального эффекта

Холла (АЭХ) данных систем, которые могут содержать ценную информацию о магнитном их состоянии и режимах транспорта в условиях проявления СФМ упорядочения.

В работе представлены результаты исследования МС и АЭХ в полях до 14 Тл пленочных НК $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_{3-y})_{100-x}$ ($x = 35-60$ ат.%), синтезированных методом ионно-лучевого распыления составных мишеней на SiO_2/Si подложки, с акцентом на изучение особенностей, возникающих в окрестности перколяционного перехода ($x_p \approx 50$ ат.%). Пленки НК представляли собой ансамбль хаотично расположенных CoFeB гранул размером 2-4 нм в аморфной матрице LiNbO_{3-y} (для стехиометрического $\alpha\text{-LiNbO}_3$ $\varepsilon_d \sim 50$). Для НК с $x \approx 44-60$ ат.% в температурной зависимости проводимости наблюдается логарифмический закон $\sigma \propto \ln T$, смещающийся с понижением x в область высоких температур, который при $x < 44$ ат.% переходит в закон «1/2» $\ln \sigma \propto -(T_0/T)^{1/2}$, характерный для со-туннельных процессов переноса в НК [3]. Ниже перколяционного перехода в диапазоне $T=3-250$ К обнаружена сильно немонотонная температурная зависимость МС НК - МС имеет минимум при 40 К, резко возрастающая при понижении температуры [4] (рис.1а). Такое поведение МС объясняется сосуществованием в НК СФМ областей. При этом увеличение отрицательного МС при $T > 40$ К обусловлено разрушением СФМ упорядочения, а рост МС при $T < 40$ К связан с процессами упругого со-туннелирования через цепочки гранул. В условиях насыщения намагниченности проявляется дополнительный отрицательный вклад, обусловленный, вероятно, эффектами квантовой интерференции [4].

Обнаружено, что степень n в скейлинговой зависимости сопротивления АЭХ, $\rho_{\text{АНЕ}} \propto \rho^n = (1/\sigma)^n$, ведет себя немонотонно: в диапазонах $x \approx 35-44$ ат.% и $x \approx 50-60$ ат.% наблюдается явный рост показателя ($n \approx 0.31-0.45$ и $n \approx 0.48-0.73$, соответственно), а в интервале $x \approx 44-50$ ат.% величина n практически не изменяется ($n \approx 0.45-0.48$) (рис. 1б). При этом в концентрационном поведении $\sigma(x)$ область перехода от слабой к экспоненциальной зависимости $\sigma(x)$ довольно сильно размыта и не содержит ярких особенностей в диапазоне $x \approx 44-60$ ат.% (рис. 1в). Мы полагаем, что локальные области изломов в зависимости $n(x)$ указывают на изменение механизма проводимости НК и определяют порог перколяции ($x_p \approx 50$ ат.%) и переход металл-диэлектрик ($x_c \approx 44$ ат.%), которые в данных системах не совпадают. Т.е., определяемый механизмом АЭХ показатель степени n , гораздо сильнее отражает транспортные особенности НК при изменении его состава, чем вид температурной зависимости сопротивления. Особенности механизма АЭХ ниже порога перколяции связываются с коррелированным изменением вероятности со-туннельных переходов в совокупности из более 3-х центров под действием спин-орбитального взаимодействия [5].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-19-00171.

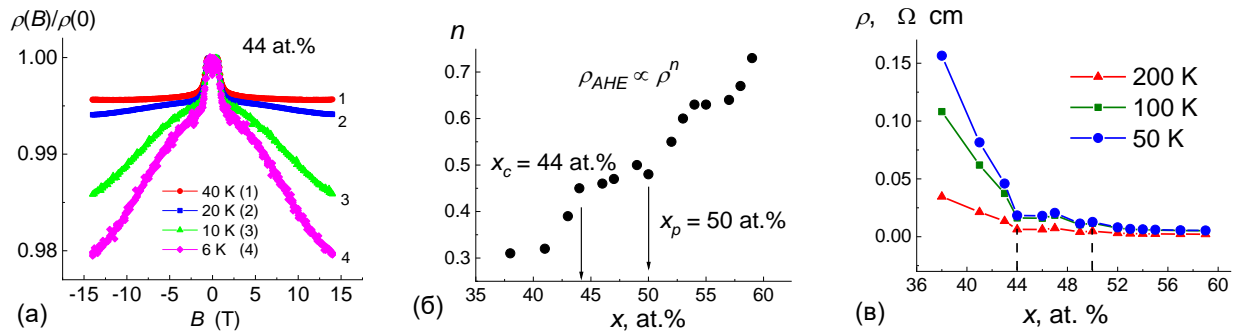


Рис. 1 – (а) магнитопольевые зависимости сопротивления при различных температурах, (б) концентрационная зависимость показателя скейлинга, (в) концентрационные зависимости сопротивления при различных температурах

Список использованных источников:

1. Bedanta S., Kleemann W. Supermagnetism // J. Phys. D. – 2009. – V.42. – P. 013001.
2. Udalov O.G., Beloborodov I.S. Competition of the Coulomb and hopping-based exchange interactions in granular magnets // Phys. Rev. B. – 2017. – V.95. – P. 045427.
3. Feigel'man M.V., Ioselevich A.S. Variable range cotunneling and conductivity of granular metal // JETP Lett. – 2005. – V.81. - P. 227.
4. Николаев С.Н. и др. Особенности скейлинга аномального эффекта Холла в нанокompозитных пленках $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$ ниже порога перколяции: Проявление со-туннельной холловской проводимости? // Письма в ЖЭТФ. – 2023. - Т.118. - С. 519.
5. Николаев С.Н. и др. Аномальное поведение туннельного магнетосопротивления в нанокompозитных пленочных структурах $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}/\text{Si}$ ниже порога перколяции: Проявления со-туннельных и обменных эффектов // Письма в ЖЭТФ. – 2023. – Т. 118. – С. 46.

УДК 537.636

**Положительное продольное магнитосопротивление наноструктур
Ta/Dy/Ta и Ta/FeMn/Ta****Наумова Л.И.**

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

Заворницын Р.С.

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

Миляев М.А.

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

Максимова И.К.

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

Проглядо В.В.

н.с., Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН

Устинов В.В.академик РАН, профессор, научный руководитель института, Институт физики металлов им.
М.Н. Михеева УрО РАН

Аннотация. Положительное продольное магнитосопротивление обнаружено в наноструктурах Ta/Dy/Ta и Ta/FeMn/Ta. Величина магнитосопротивления и характер температурной зависимости магнитосопротивления связаны со спиновой аккумуляцией и сочетанием прохождения и отражения спинового тока в интерфейсе магнитный металл/металл с сильным спин-орбитальным взаимодействием.

Ключевые слова: магнитосопротивление, спиновый эффект Холла, спиновый ток, спиновая аккумуляция, β -тантал

Positive longitudinal magnetoresistance of Ta/Dy/Ta and Ta/FeMn/Ta nanostructures**Naumova L.I.**Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, M.N. Mikheev Institute of
Metal Physics of the UB RAS**Zavornitsyn R.S.**Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Junior Researcher, M.N. Mikheev Institute of
Metal Physics of the UB RAS**Milyaev M.A.**Doctor of physical and mathematical Sciences, Head of laboratory, Senior Researcher, M.N.
Mikheev Institute of Metal Physics of the UB RAS**Maksimova I.K.**

Junior Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the UB RAS

Proglyado V.V.

Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the UB RAS

Ustinov V.V.

Academician of the RAS, Professor, Scientific director of the institute, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the UB RAS

Annotation. *Positive longitudinal magnetoresistance was found in Ta/Dy/Ta and Ta/FeMn/Ta nanostructures. The value of magnetoresistance and the nature of the temperature dependence of magnetoresistance are associated with spin accumulation and a combination of the passage and reflection of spin current at the interface between magnetic metal/metal with strong spin-orbit interaction.*

Keywords: *magnetoresistance, spin Hall effect, spin current, spin accumulation, β -tantalum*

Продольное положительное магнитосопротивление тонких пленок металлов с сильным спин-орбитальным взаимодействием было теоретически предсказано Дьяконовым [1]. Этот вид магнитосопротивления был назван магнитосопротивлением Ханле, по аналогии с эффектом магнитооптики, и обнаружен экспериментально в работах [2 и 3]. Магнитосопротивление Ханле появляется из-за сочетания прямого и обратного эффектов Холла. Электрический ток в тонкой пленке сопровождается к аккумуляцией электронов с противоположными спинами вблизи границ пленки. Это приводит к спиновому току вдоль нормали к поверхности пленки. Обратный спиновый эффект Холла, в свою очередь, индуцирует дополнительный зарядовый ток, сонаправленный исходному электрическому току. Сопротивление вблизи границ пленки уменьшается. Приложенное вдоль электрического тока магнитное поле подавляет спиновую аккумуляцию, что приводит к возрастанию электросопротивления.

Если слой металла с сильным спин-орбитальным взаимодействием находится в составе наноструктуры, то аккумуляция спинов на границах слоя может приводить к изменению магнитного состояния наноструктуры. Использование спиновых токов для управления магнитными моментами слоев наноструктуры открывает перспективу создания новых экономичных элементов микроэлектроники. В наноструктурах близость слоев металла с сильным спин-орбитальным взаимодействием и других магнитных материалов существенно влияет на аккумуляцию спинов. В интерфейсе магнитный металл/металл с сильным спин-орбитальным взаимодействием спиновый ток взаимодействует с магнитным моментом **M** соседнего магнетика. Прохождение спинового тока в слой магнетика или отражение обратно в слой металла с сильным спин-орбитальным взаимодействием происходит, соответственно при ортогональной или коллинеарной взаимной ориентации **M** и вектора спиновой поляризации **S**.

В настоящей работе проведено исследование продольного магнитосопротивления наноструктур Ta/Dy/Ta и Ta/FeMn/Ta, содержащих материалы с разным видом магнитного упорядочения и слои β -Ta, который обладает большой величиной спинового угла Холла. Интерпретация результатов проведена на качественном уровне, с учетом условий спиновой аккумуляции на границах слоев тантала.

Содержащие слои β -Ta наноструктуры Ta(4нм)/Dy(2нм)/Ta(4нм), Ta(4нм)/Fe₅₀Mn₅₀(2нм)/Ta(4нм) и пленки β -Ta(4нм) изготовлены методом магнетронного напыления на подложках из стекла. Микрообъекты в виде мостов Холла сформированы при

помощи фотолитографии.

Исследования микроструктуры слоев диспрозия методом рентгеновской дифрактометрии (рисунок 1) показали, что при толщине слоя $t_{Dy}=30$ нм в диспрозии формируется гексагональная плотно упакованная (ГПУ) структура с двухкомпонентной текстурой $\langle 10-10 \rangle$ и $\langle 0002 \rangle$, при которой оси магнитного геликоида, соответственно, лежат в плоскости пленки и ортогональны ей. При $t_{Dy}=10$ нм на дифрактограмме имеются лишь два слабых пика. Один из них принадлежит плоскостям (0002) ГПУ, а второй - плоскостям (111) гранецентрированной кубической (ГЦК) решетки. Формирование ГЦК структуры в тонких слоях диспрозия ранее наблюдали ранее [4].

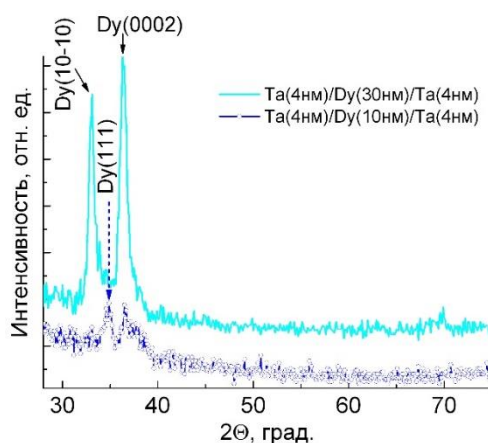


Рис.1. Рентгеновские дифрактограммы наноструктур $Ta(4nm)/Dy(t_{Dy})/Ta(4nm)$ с толщинами $t_{Dy}=30$ и 10 нм.

Для пленки Ta и наноструктур Ta/Dy/Ta и Ta/FeMn/Ta были измерены зависимости электросопротивления от поля, приложенного в плоскости пленки параллельно току. Величину магнитосопротивления Ханле оценивали как $MR_{Hanle} = (R(H) - R(0))/R(0)$ где $R(H)$ и $R(0)$ – сопротивление образцов в поле H и в поле $H = 0$, соответственно. В исследуемом интервале полей от -20 до 20 кЭ ни одна из зависимостей $MR_{Hanle}(H)$ не достигла насыщения, поэтому величину максимального магнитосопротивления оценивали для $H = 20$ кЭ. Полученные магниторезистивные кривые и температурные зависимости максимального MR_{Hanle} показаны на рисунке 2.

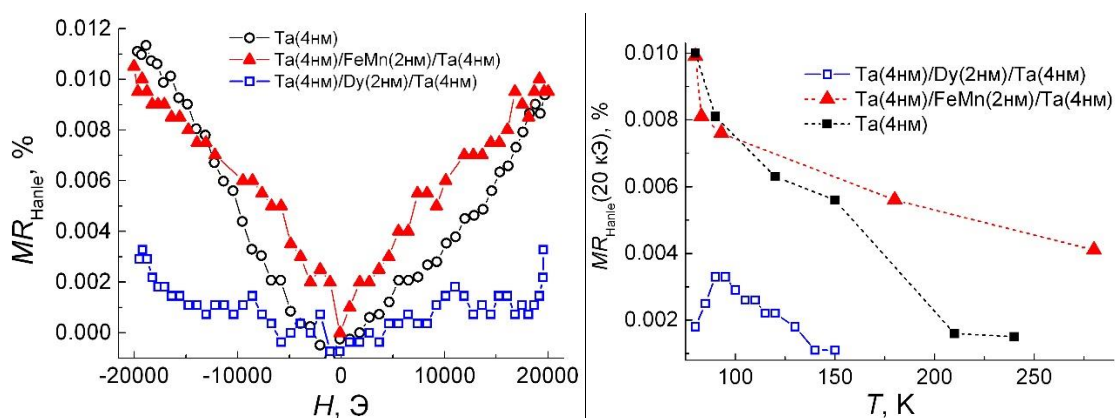


Рис. 2. Зависимости $MR_{Hanle}(H)$ (слева) и температурные зависимости $MR_{Hanle}(20kЭ)$ (справа) для пленки β -Ta(4nm) и наноструктур $Ta(4nm)/Dy(2nm)/Ta(4nm)$ и $Ta(4nm)/FeMn(2nm)/Ta(4nm)$.

Магнитосопротивление тонких пленок β -Ta было экспериментально и теоретически

исследовано в работе [5]. В частности, было показано, что величина продольного магнитосопротивления существенно зависит от условий спиновой аккумуляции на границах пленки. В наноструктурах Ta/FeMn/Ta, и Ta/Dy/Ta имеется по два слоя тантала, у которых одна из поверхностей соседствует с антиферромагнитным сплавом FeMn или с редкоземельным металлом Dy. Слой Dy толщины 2 нм в исследуемом интервале температур находится в парамагнитном состоянии. Условия отражения/прохождения спинового тока и, соответственно, спиновой аккумуляции на границах слоев β -Ta в Ta/FeMn/Ta, и Ta/Dy/Ta различны. Если рассматривать слои β -Ta(4нм) в наноструктурах как два параллельных проводника, без учета эффектов на границе с другим магнетиком, то их магнитосопротивление такое же, как у одного свободного слоя β -Ta толщиной 4нм.

Величина магнитосопротивления для наноструктуры Ta/FeMn/Ta при $T = 80 - 100$ К близка к магнитосопротивлению пленки β -Ta, а при повышении температуры становится больше, чем MR_{Hanle} отдельной пленки β -Ta. Мосты Холла литографически изготовлены так, что при прохождении тока вектор спиновой поляризации \mathbf{S} на границе слоя тантала коллинеарен вектору антиферромагнетизма в слое FeMn. Реализуется ориентация $\mathbf{S} \parallel \mathbf{M}$, в интерфейсах Ta/FeMn отражение спинового тока обратно в слой β -Ta преобладает над прохождением, что способствует спиновой аккумуляции на границах тантала. Магнитосопротивление наноструктуры Ta/Dy/Ta при всех температурах значительно ниже, чем для Ta/Dy/Ta. Угол отклонения вектора \mathbf{S} от локальных магнитных моментов в Dy варьируется в широком диапазоне. Соответственно, большая часть спинового тока проходит через интерфейс Ta/Dy, что уменьшает спиновую аккумуляцию на границах β -Ta и магнитосопротивление Ханле. При $T < 90$ К понижение температуры сопровождается не возрастанием, а уменьшением величины магнитосопротивления. Вероятно, при этих температурах в слое диспрозия начинает формироваться геликоидальное магнитное упорядочение. Магнитное поле величиной более чем ≈ 11 кЭ деформирует геликоид. Уменьшается угол рассеяния локальных магнитных моментов в диспрозии, а средний угол отклонения их от \mathbf{S} возрастает. Это приводит к уменьшению аккумуляции спинов на границах слоя β -Ta и магнитосопротивления Ханле в наноструктуре Ta/Dy/Ta.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Спин», № 122021000036-3)

Список использованных источников:

1. Dyakonov M. I. Magnetoresistance due to Edge Spin Accumulation // Phys. Rev. Lett. – 2007. V.99. –P.126601.
2. Vélez S., Golovach V.N., Bedoya-Pinto A., Isasa M. et al, Hanle Magnetoresistance in Thin Metal Films with Strong Spin-Orbit Coupling // Phys. Rev. Lett. – 2016. – V.116. – P.016603.
3. Wu H., Zhang X., Wan C. H., Tao B. S., Huang L., Kong W. J., and Han X. F. Hanle magnetoresistance: The role of edge spin accumulation and interfacial spin current // Phys. Rev. B. – 2016. – V.94. – P. 174407.
4. Scheunert G., Hendren W. R., Lapicki A. A., Jesudoss P., Hardeman R, Gubbins M. and Bowman R. M. Improved magnetization in sputtered dysprosium thin films // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2013. – V.46. – P. 152001.
5. Устинов В.В., Наумова Л.И., Заборницын Р.С., и др., Размерные эффекты в магнитосопротивлении нанослоев тантала со спин-орбитальным взаимодействием // ЖЭТФ–2024. – V.65. – №1 – С. 114–127.

УДК 537.636

Магнитосопротивление наноструктур Ta/CoFe/Ta, обусловленное спиновым эффектом холла**Заворницын Р.С.**

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

Наумова Л.И.

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

Миляев М.А.

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

Максимова И.К.

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

Проглядо В.В.

н.с., Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН

Устинов В.В.

академик РАН, профессор, научный руководитель института, Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН

***Аннотация.** Для приготовленных методом магнетронного напыления на подложках из стекла пленок β -Ta(4нм) и наноструктур Ta(4нм)/Co₉₀Fe₁₀(2нм)/Ta(4нм) получены полевые зависимости электросопротивления при температуре 83К. Обнаружено положительное продольное магнитосопротивление для пленок β -Ta(4нм), обусловленное подавлением спиновой аккумуляции внешним магнитным полем в пленке металла с сильным спин-орбитальным взаимодействием. Обнаружено положительное продольное магнитосопротивление для наноструктур Ta(4нм)/Co₉₀Fe₁₀(2нм)/Ta(4нм), обусловленное двумя механизмами – подавлением спиновой аккумуляции в нанослоях β -Ta(4нм) и отражением/поглощением спинового тока на интерфейсах между ферромагнетиком Co₉₀Fe₁₀(2нм) и немагнитным металлом β -Ta(4нм) при перемагничивании магнитного момента слоя Co₉₀Fe₁₀(2нм).*

***Ключевые слова:** магнитосопротивление, спиновый эффект Холла, спиновый ток, спиновая аккумуляция, β -тантал*

Magnetoresistance of Ta/CoFe/Ta nanostructures due to the spin Hall effect**Zavornitsyn R.S.**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Junior Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the UB RAS

Naumova L.I.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the UB RAS

Milyaev M.A.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Head of laboratory, Senior Researcher, M.N.
Mikheev Institute of Metal Physics of the UB RAS

Maksimova I.K.

Junior Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the UB RAS

Proglyado V.V.

Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the UB RAS

Ustinov V.V.

Academician of the RAS, Professor, Scientific director of the institute, M.N. Mikheev Institute of
Metal Physics of the UB RAS

Annotation. For β -Ta(4nm) films and Ta(4nm)/Co₉₀Fe₁₀(2nm)/Ta(4nm) nanostructures prepared by magnetron sputtering on glass substrates, the field dependences of electrical resistivity at 83K were obtained. Positive longitudinal magnetoresistance for β -Ta(4nm) films was found to be due to the suppression of spin accumulation by an external magnetic field in a metal film with strong spin-orbit interaction. Positive longitudinal magnetoresistance for Ta(4nm)/Co₉₀Fe₁₀(2nm)/Ta(4nm) nanostructures was found, due to two mechanisms - suppression of spin accumulation in β -Ta(4nm) nanolayers and reflection/absorption of spin current at the interfaces between ferromagnetic Co₉₀Fe₁₀(2nm) and nonmagnetic metal β -Ta(4nm) when the magnetic moment of Co₉₀Fe₁₀(2nm) layer is remagnetised.

Keywords: magnetoresistance, spin Hall effect, spin current, spin accumulation, β -tantalum

Для создания устройств микроэлектроники, обладающих низким энергопотреблением, актуальным является изучение взаимосвязи спиновых и зарядовых токов в нормальных металлах, а также возможности управления магнитным состоянием наноструктур с помощью спинового тока [1].

Одним из возможных механизмов генерации спинового тока является спиновый эффект Холла [2] (Spin Hall Effect – SHE), который наиболее выражен в металлах с сильным спин-орбитальным взаимодействием (Ta, Pt, W). При протекании зарядового тока в тонких пленках таких металлов в перпендикулярном направлении возникает чисто спиновый ток [3, 4], что приводит к спиновой аккумуляции электронов с противоположными спинами на границах слоя немагнитного металла. В случае обратного спинового эффекта Холла (Inverse Spin Hall Effect – ISHE) протекание спинового тока приводит к возникновению поперечного зарядового тока [3, 4].

Спиновая аккумуляция может быть подавлена внешним магнитным полем, что приводит к увеличению электросопротивления пленки металла с сильным спин-орбитальным взаимодействием. Данный тип магнитосопротивления назван магнитосопротивлением Ханле [5] (Hanle Magnetoresistance – HMR) по аналогии с эффектом магнитооптики. Другой тип магнитосопротивления (Spin Hall Magnetoresistance – SMR), обусловленный спиновым эффектом Холла, наблюдается в наноструктурах, которые содержат соседствующие слои ферромагнитного металла и металла с сильным спин-орбитальным взаимодействием [6]. SMR проявляет себя в виде резкого изменения электросопротивления наноструктуры в области малых полей при перемагничивании ферромагнитного слоя и связан с процессами поглощения/отражения спинового тока на интерфейсе ферромагнетик/немагнитный металл.

В данной работе проведено экспериментальное исследование магнитотранспортных свойств тонкой пленки β -Ta и наноструктуры, содержащей соседствующие слои немагнитного металла β -Ta и ферромагнитного сплава Co₉₀Fe₁₀.

Пленки β -Ta(4 нм) и Ta(4 нм)/CoFe(2 нм)/Ta(4 нм) получены методом магнетронного напыления на подложках из стекла. С помощью фотолитографии из них сформированы

микрообъекты в виде мостов Холла (ширина микрополосы $w \sim 200$ мкм, расстояние между потенциальными контактами $l \sim 2200$ мкм). Полевые зависимости электросопротивления для пленок Ta и Ta/CoFe/Ta измерены при коллинеарной конфигурации приложенного магнитного поля и направления электрического тока в интервале полей ± 20 кОе при $T = 83$ К (рисунок 1). Магнитосопротивление (MR) определялось как $(R(H_{\max}) - R(H))/R(H_{\max}) \times 100\%$, где $R(H_{\max})$ и $R(H)$ – сопротивление образцов в поле 20 кОе и в поле H , соответственно.

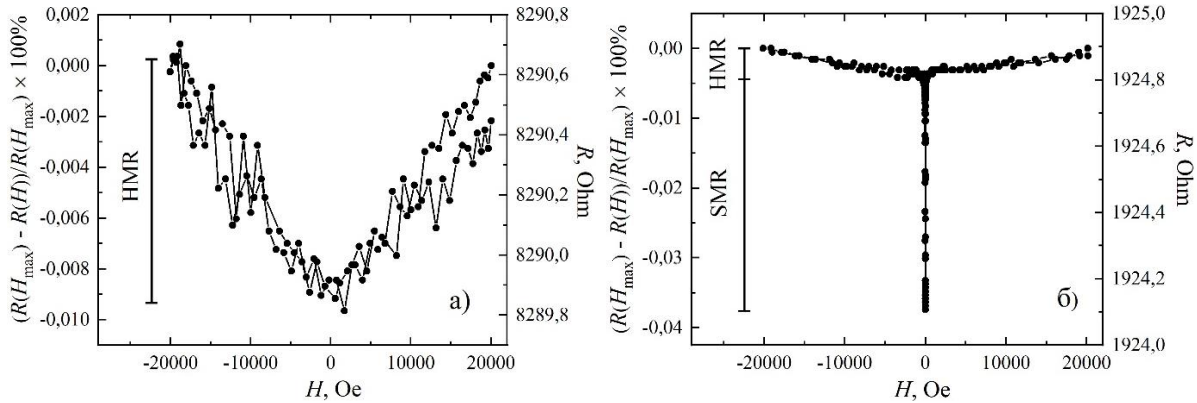


Рис. 1. Зависимости $MR(H)$ и $R(H)$ для пленки β -Ta(4нм) (а) и наноструктуры Ta(4нм)/CoFe(2нм)/Ta(4нм) (б) при $T = 83$ К в интервале полей ± 20 кОе. Схематически обозначены вклады HMR и SMR в магнитосопротивление образцов.

На $R(H)$ зависимостях заметен слабый рост электросопротивления исследованных образцов ($MR \sim 10^{-3} \%$) при увеличении $|H|$ от 0 до 20 кЭ. Данное явление связано с подавлением спиновой аккумуляции электронов во внешнем магнитном поле и может быть интерпретировано как магнитосопротивление Ханле (HMR). Подобный характер изменения сопротивления во внешнем магнитном поле наблюдался ранее для тонких пленок Pt и β -Ta [5].

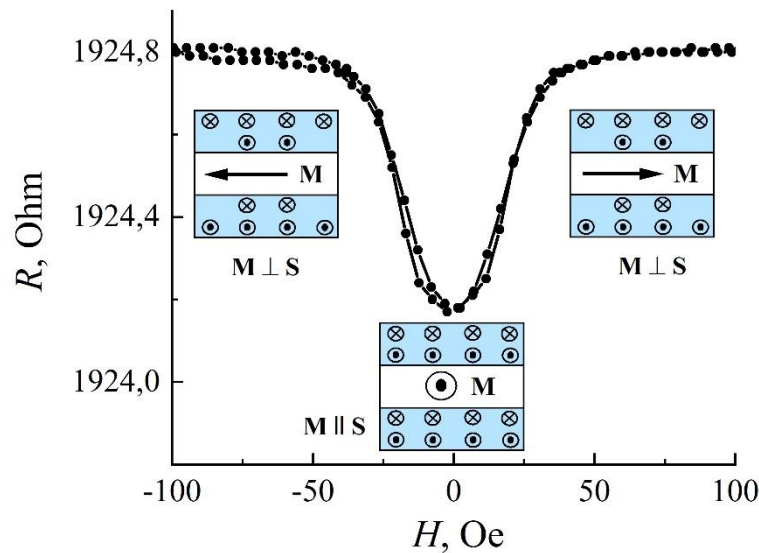


Рис. 2. Зависимость $R(H)$ для наноструктуры Ta(4нм)/CoFe(2нм)/Ta(4нм) в интервале полей ± 100 Ое при $T = 83$ К. Вставка: схематичное изображение наноструктуры Ta/CoFe/Ta, магнитного момента M ферромагнитного слоя CoFe и спиновой поляризации S аккумулярованных электронов в Ta.

На рисунке 1 (б) обращает на себя внимание резкое уменьшение электросопротивления ($MR \sim 10^{-2} \%$) структуры Ta(4 нм)/CoFe(2 нм)/Ta(4 нм) в области малых полей, что связано с изменением условий для спиновой аккумуляции в слоях β -Ta в силу их соседства с ферромагнитным слоем CoFe. На рисунке 2 приведена полевая зависимость электросопротивления структуры Ta(4 нм)/CoFe(2 нм)/Ta(4 нм) (б) в интервале полей ± 100

Ое.

Подобный характер изменения электросопротивления обусловлен процессом перемагничивания магнитного момента \mathbf{M} ферромагнитного слоя CoFe. Протекающий в плоскости образца зарядовый ток за счет SHE вызывает в перпендикулярном направлении чисто спиновый ток. Это приводит к тому, что на границах нанослоев Ta осуществляется спиновая аккумуляция электронов со спиновой поляризацией \mathbf{S} , параллельной плоскости пленки. При этом, на интерфейсах Ta/CoFe и CoFe/Ta происходит межфазное спиновое смешивание и часть спинового тока поглощается слоем ферромагнетика CoFe. Величина поглощенного спинового тока максимальна в случае ортогональной ориентации намагниченности ферромагнетика \mathbf{M} и спиновой поляризации аккумулярованных электронов \mathbf{S} ($\mathbf{M} \perp \mathbf{S}$). Такая конфигурация ($\mathbf{M} \perp \mathbf{S}$) реализуется в полях $|\mathbf{H}| > 50$ Ое. По мере уменьшения $|\mathbf{H}|$ до $H \approx 0$ конфигурация \mathbf{M} и \mathbf{S} меняется с ортогональной на коллинеарную ($\mathbf{M} \parallel \mathbf{S}$). В этом случае величина поглощенного спинового тока минимальна, что за счет ISHE способствует уменьшению электросопротивления слоев Ta.

Таким образом, можно заключить, что магнитосопротивление наноструктуры Ta(4нм)/CoFe(2нм)/Ta(4нм) обусловлено двумя механизмами – подавлением спиновой аккумуляции в нанослоях β -Ta(4нм) (HMR) и отражением/поглощением спинового тока на интерфейсах между ферромагнетиком CoFe(2нм) и немагнитным металлом β -Ta(4нм) при перемагничивании магнитного момента слоя CoFe(2нм) (SMR).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ № 24-12-20022).

Список использованных источников:

1. Ando K. Generation and manipulation of current-induced spin-orbit torques // Proc. Jpn. Acad. Ser. B. – 2021. – V.97. – №9. – P.499–519.
2. Дьяконов М.И., Перель В.И. О возможности ориентации электронных спинов током // Письма в ЖЭТФ. – 1971. – Т.13. – С.657–660.
3. Niimi Y., Otani Y. Reciprocal spin Hall effects in conductors with strong spin-orbit coupling: a review // Rep. Prog. Phys. – 2015. – V.78 – P.124501.
4. Sinova J., Valenzuela S.O., Wunderlich J., Back C.H., Jungwirth T. Spin Hall effects // Rev. Mod. Phys. – 2015. – V.87. – P.1213 – 1259.
5. Vélez S., Golovach V.N., Bedoya-Pinto A., Isasa M., Sagasta E., Abadia M., Rogero C., Hueso L.E., Bergeret F.S., Casanova F. Hanle Magnetoresistance in Thin Metal Films with Strong Spin-Orbit Coupling // Phys. Rev. Lett. – 2016. – V.116. – P.016603.
6. Kim J., Sheng P., Takahashi S., Mitani S., Hayashi M. Spin Hall Magnetoresistance in Metallic Bilayers // Phys. Rev. Lett. – 2016. – V.116. – P.097201.

УДК 538.9

Спиновое магнетосопротивление гетероструктуры иридат стронция/манганит

Константиян К.И.

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Ульев Г.Д.

инженер ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москаль И.Е.

младший научный сотрудник, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Овсянников Г.А.

д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

***Аннотация.** Представлены результаты исследования угловых зависимостей продольного и поперечного спинового магнетосопротивления тонкопленочной гетероструктуры иридат стронция/манганит ($\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$), позволяющие оценить величину спинового угла Холла. Обсуждается вклад анизотропного магнетосопротивления от пленки $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, измерения которой были проведены отдельно.*

***Ключевые слова:** спиновое магнетосопротивление, спиновый угол Холла, гетероструктура, иридат стронция, манганит, спин-орбитальное взаимодействие*

Spin magnetoresistance of strontium iridate/manganite heterostructure

Constantinian K.Y.

PhD, Senior Researcher, Kotelnikov IRE RAS

Ulev G.D.

Engineer, Kotelnikov IRE RAS

Moskal I.E.

Junior Researcher, Kotelnikov IRE RAS

Ovsyannikov G.A.

Dr. of Science, Chief Researcher, Kotelnikov IRE RAS

***Annotation.** We present experimental results on angular dependences of longitudinal and transverse spin magnetoresistance of thin-film strontium iridate/manganite heterostructure ($\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$). For estimation of spin-Hall angle the contribution of anisotropic magnetoresistance from $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ film has been measured separately.*

***Keywords:** spin magnetoresistance, spin-Hall angle, heterostructure, strontium iridate, manganite, spin-orbit interaction*

Генерация спинового тока I_S за счет спинового эффекта Холла при пропускании зарядовый тока I_Q через металлическую пленку N_{SO} со спин-орбитальным взаимодействием и обратный процесс – преобразование I_Q в I_S в F/ N_{SO} структурах (F- ферромагнетик) за счет обратного спинового эффекта Холла характеризуется спиновым углом Холла θ_{SH} . Параметр θ_{SH} можно оценить из угловых зависимостей спинового магнетосопротивления F/ N_{SO} структуры [1], при этом важную роль играет граница раздела N_{SO} материала с ферромагнетиком. В оксидных материалах с близкими кристаллографическими параметрами удается получить эпитаксиальные F и N_{SO} , что сказывается на качестве границы раздела F/ N_{SO} [2-3]. В данном сообщении приводятся данные по экспериментальному исследованию тонкопленочной гетероструктуры $SrIrO_3/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ с *in situ* нанесенными пленками иридата стронция $SrIrO_3$, удельное сопротивление которого $\rho_{SIO} \sim 3 \cdot 10^{-4}$ Ом см, энергия спин-орбитального взаимодействия $E_{SO} \sim 0.5$ эВ и манганита $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$. Геометрия гетероструктуры после литографии позволяла проводить измерения как продольного, так и поперечного магнетосопротивления в конфигурации планарного эффекта Холла, схематично показанной на Рис. 1.

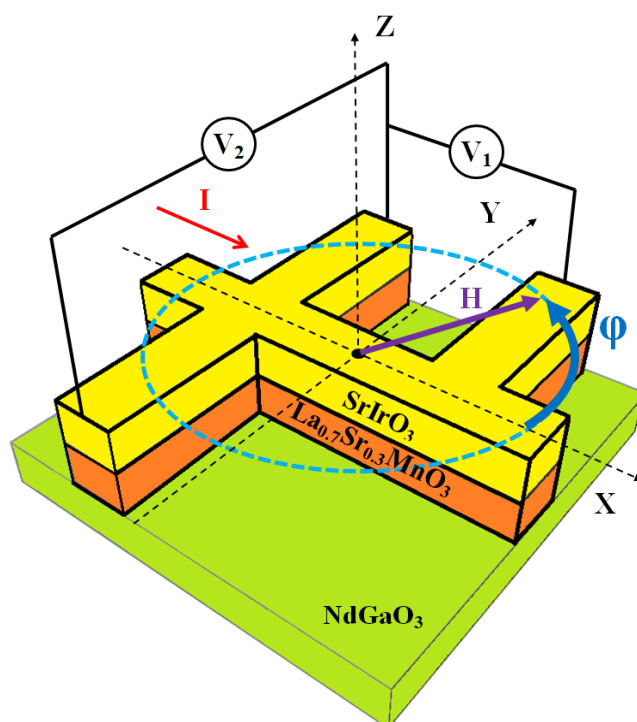


Рис.1. Схематичное изображение гетероструктуры $SrIrO_3/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ на подложке $(110)NdGaO_3$ с толщинами $d_{SIO}=10$ нм, $d_{LSMO}=30$ нм и 4-точечная схема измерения магнетосопротивления. Ток I задавался в пленку $SrIrO_3$ вдоль оси X , угол φ между магнитным полем H (темно-фиолетовая стрелка) и током I (красная стрелка) изменялся в плоскости X - Y . Выводы снятия напряжения обозначены V_1 и V_2 – для продольного $R_L=V_1/I$ и поперечного магнетосопротивления $R_T=V_2/I$, соответственно. Ширина гетероструктуры 100 мкм, расстояние между выводами напряжения V_1 1.5 мм.

Измерения магнетосопротивления проводились вращением подложки в плоскости X - Y , изменяя угол φ между направлением задания тока I и внешним магнитным полем H . Напряжения измерялись малошумящим фазочувствительным частотно-избирательным усилителем на частоте $F=1.072$ кГц, поле H задавалось катушками Гельмгольца. Для определения θ_{SH} через зависящие от угла φ параметры R_L и R_T использовались выражения (1) - (3) теории [1]:

$$\left(\frac{\Delta R_L}{R_0}\right) = -\theta_{SH}^2 \frac{2\lambda_{SIO}}{d_{SIO}} + \frac{1}{2} r_1 (1 + \cos 2\varphi) \quad (1)$$

$$r_1 = \theta_{SH}^2 \frac{\lambda_{SIO}}{d_{SIO}} \operatorname{Re} \frac{2\lambda_{SIO}\rho_{SIO}(\operatorname{Re}G^{\uparrow\downarrow} + i\operatorname{Im}G^{\uparrow\downarrow})}{1 + 2\lambda_{SIO}\rho_{SIO}(\operatorname{Re}G^{\uparrow\downarrow} + i\operatorname{Im}G^{\uparrow\downarrow})} \quad (2)$$

$$\left(\frac{\Delta R_T}{R_0}\right) = \frac{r_1}{2} \sin 2\varphi \quad (3),$$

где λ_{SIO} – длина спиновой диффузии в SrIrO_3 (N_{S0} материала) d_{SIO} – толщина пленки, $G^{\uparrow\downarrow}$ – спиновая проводимость (spin mixing conductance).

Температурные зависимости сопротивления $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ пленки и $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ гетероструктуры при измерениях продольного (омического при $H=0$) $R_L=V_L/I$ и поперечного (планарного холловского, $H=0$) $R_T=V_T/I$ показали, что оба сопротивления R_L и R_T уменьшаются с понижением температуры, что типично для манганитных структур.

Для определения θ_{SH} снимались серии нормированных угловых зависимостей $\Delta R_T/R_0^T$ и $\Delta R_L/R_0^L$ (индекс Т – поперечное, L – продольное) от угла φ между магнитным полем H и током $I=0.5$ мА. В продольном случае угловая зависимость $R_L=R_S+R_A\cos 2\varphi$, определяется анизотропным сопротивлением R_A , при этом обычно омическое сопротивление $R_S \gg R_A$. В поперечном случае $R_T=R_{PH}\sin 2\varphi+R_{AH}\cos\theta$, где амплитуда R_{PH} соответствует вкладу от планарного эффекта Холла, а второй член вызван отклонением намагниченности пленки от плоскости на угол θ и возникновением аномального холловского сопротивления. Для гетероструктуры $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ на рис. 2а представлена в полярных координатах угловая зависимость продольного магнетосопротивления $\Delta R_{LS}(\varphi)=R_{LS}(H)-R_{LS}(0)$ нормированного на $R_{LS}(0)$ при $H=0$. Видно, что для $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ гетероструктуры $\max \Delta R_{LS}/R_L(0)=1.7 \cdot 10^{-4}$, из которого получаем $\theta_{SH}=0.04$ при $\lambda_{SIO}=1.5$ нм и толщине пленки $d_{SIO}=10$ нм. Следует заметить, что данная оценка θ_{SH} получена без учета шунтирующего влияния сопротивления R_A от $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ пленки.

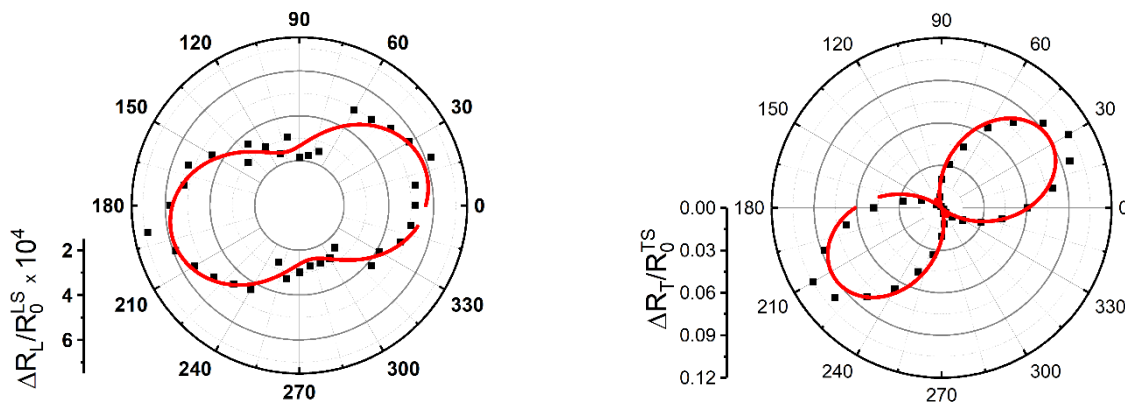


Рис.2. Зависимости в полярных координатах (а) продольного $\Delta R_{LS}/R_0=1.7 \cdot 10^{-4}$, угол $\varphi_{0L}=74.1^\circ$ и (б) поперечного магнетосопротивлений $\Delta R_{TS}/R_0=0.049$, угол $\varphi_{0T}=129.1^\circ$.

Из угловой зависимости поперечного магнетосопротивления $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ гетероструктуры, с учетом $R_{AH}=1.8^\circ\text{Ом}$ при $H=0$, из максимума амплитудного значения спинового магнетосопротивления гетероструктуры $2\Delta R_{TS}(\varphi)/R_0=0.05$ получаем $\theta_{SH}=0.3$.

На рис.3 представлены температурные нормированные зависимости $\Delta R_T(T)$ для гетероструктуры и для манганитной пленки. Заметим, что на гетероструктуре $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, исследованной также в режиме спиновой накачки на частоте ферромагнитного резонанса $f=2.4^\circ\text{ГГц}$, амплитуда зарядового тока I_Q , пропорционального спиновому току I_S через параметр θ_{SH} , монотонно возрастала примерно в 1,5 раза с понижением температуры от комнатной до $T=250^\circ\text{К}$. Из приведенных на рисунке температурных зависимостей изменения нормированного поперечного магнетосопротивления гетероструктуры $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ видно, что в случае гетероструктуры изменение поперечного магнетосопротивления $\Delta R_T/R_0$ примерно в 5 раз превышает значение, полученное для пленки $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$.

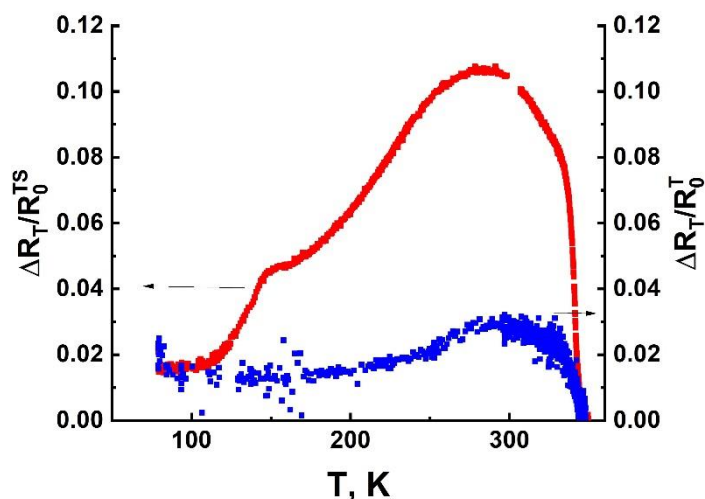


Рис.3. Температурные зависимости изменения нормированного поперечного магнетосопротивления гетероструктуры $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и пленки $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$. $\Delta R_T = R_T(H=100^\circ\text{Э}) - R_T(H=0)$, $R = R_T(0)$.

Список использованных источников:

1. Chen Y.T., Takahashi S., Nakayama H., Althammer M., Goennenwein S.T., Saitoh E., Bauer G E. Theory of spin Hall magnetoresistance (SMR) and related phenomena // J. of Physics: Condensed Matter. – 2016. – V. 28. - 103004-1-15.
2. Ovsyannikov G.A., Constantinian K.Y., Shmakov V.A., et al. Spin mixing conductance and spin magnetoresistance of the iridate/manganite interface // Phys. Rev.B – 2023, 107(14):144419-1-12.
3. Huang X., Sayed S., Mittelstaedt J., et al. Novel Spin–Orbit Torque Generation at Room Temperature in an All-Oxide Epitaxial $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3/\text{SrIrO}_3$ System // Advanced Materials. – 2021 – 33 – 2008269-1-7.

УДК 537.633

Функциональные наноструктуры для сверхпроводниковой спинтроники**Сидоренко А.С.**

д.ф.-м. н., г.н.с. центра перспективных методов мезафизики и нанотехнологий МФТИ

***Аннотация.** Снижение энергопотребления становится важнейшей задачей при разработке новых суперкомпьютеров. Компьютер с не фон-Неймановской архитектурой, искусственная нейронная сеть (ИНС), основанная на сверхпроводящих элементах, кажется наиболее перспективным решением. При создании сверхпроводящей ИНС возникла проблема разработки двух основных элементов — нелинейного (нейрон) и линейного связующего элемента (синапс). Некоторые решения этой сложной междисциплинарной проблемы представлены в данной работе.*

Ключевые слова: наноструктуры, спинтроника, искусственная нейронная сеть

Functional nanostructures for superconducting spintronics**Sidorenko A.S.**Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of the
Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

***Annotation.** Reduction of power consumption is becoming a crucial task in the development of novel supercomputers. Computer with non-von Neumann architecture - Artificial Neural Network (ANN), based on superconducting elements seems to be the most promising solution. Design of a superconducting ANN rose the problem of development two basic elements - a nonlinear (neuron) and a linear connecting element (synapse). Some solutions of this complex and interdisciplinary problem are presented in this article.*

Keywords: nanostructures, spintronics, artificial neural network

Необходимость энергоэффективности и радикального снижения уровня энергопотребления становится решающим параметром, ограничивающим разработку новых суперкомпьютеров. Перспективным решением является разработка не-фон Неймановских компьютеров с мозгоподобной архитектурой – искусственных нейронных сетей (ИНС) со сверхпроводящими базовыми элементами. ИНС нуждается в разработке двух основных базовых элементов: нелинейного переключателя, подобного нейрону и линейных соединительных элементов, подобных синапсу [1]. Представлены результаты проектирования и исследования джозефсоновских контактов для формирования искусственных нейронов на основе сверхпроводящих спиновых клапанов и сверхпроводящих синапсов на основе слоистых гибридных наноструктур сверхпроводник-ферромагнетик.

Результаты теоретического и экспериментального исследования эффекта близости в слоистых наноструктурах сверхпроводниках/ферромагнетиках (S/F) с Co-ферромагнитными слоями различной толщины и коэрцитивными полями, а также Nb-сверхпроводящими слоями постоянной толщины, равной длине когерентности ниобия представлены и обсуждены.

В сверхрешетках Nb/Co наблюдается изменение сверхпроводящего параметра порядка в тонких пленках ниобия за счет переключения с параллельного на антипараллельное расположение намагниченности соседних ферромагнитных слоев. Такие сверхрешетки могут быть использованы в качестве подходящих базовых элементов сверхпроводниковой спинтроники для инженерии ИНС [2]. Создание ИНС с использованием этих двух базовых элементов — искусственных нейронов и искусственных синапсов — позволяет построить компьютер с энергопотреблением, на несколько порядков меньшим по сравнению с традиционным компьютером, построенным на полупроводниковых базовых элементах.

Исследование выполнено при поддержке проекта РФФ № 22-79-10018 “Управляемая кинетическая индуктивность на основе сверхпроводниковых гибридных структур с магнитными материалами”.

Список использованной литературы:

1. Sidorenko A.S., Hahn H. and Krasnov V. Frontiers of nanoelectronics: intrinsic Josephson effect and prospects of superconducting spintronics. //Beilstein J. Nanotechnol – 2023 – 14, 79–82
2. A. Sidorenko (Editor), Functional Nanostructures and Metamaterials for Superconducting Spintronics// Springer – 2018 – 279 pages. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-90481-8>

УДК 314.748

**Наблюдение однонаправленной анизотропии в двухслойке
 $\text{SrMnO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$**

Шайхулов Т.А.

м.н.с., Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Матвеев А.А.

Инженер, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет)

Демидов В.В.

д. ф-м.н., в.н.с., Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Сизов В.Е.

к. ф-м. н., с.н.с., Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Темиряева М.П.

к. ф-м. н., в.н.с., Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Темиряев А.Г.

к. ф-м. н., в.н.с., Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Волков Д.А.

Инженер, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет),
Национальный исследовательский университет "МЭИ"

Сафин А.Р.

д. ф-м.н., с.н.с, Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет),
Национальный исследовательский университет "МЭИ"

Маркелова М.Н.

н.с., к.х.н., Химический факультет, Московский государственный университет

Амеличев В.А.

Технический директор, к.х.н., С-Инновации

Федоров А.С.

м. н. с., Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет)

Калябин Д.В.

Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Никитов С.А.

директор, д. ф-м. наук, академик, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет)

Аннотация. Методом магнетронного распыления выращена серия гетероструктур $\text{SrMnO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (SMO/LSMO) с разными толщинами антиферромагнитного слоя SrMnO_3 . Представлены результаты рентгеноструктурного исследования, измерений эффекта Холла в широком диапазоне температур, измерений угловой зависимости ферромагнитного резонанса и изучения доменной структуры во внешнем магнитном поле с помощью магнитно-силовой микроскопии.

Ключевые слова: ферромагнитный резонанс, антиферромагнетик, ферромагнетик, домены, эффект Холла

Observation of unidirectional anisotropy in the $\text{SrMnO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ two-layer

Shaikhulov T. A.

junior researcher., Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics

Matveev A.A.

Engineer, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Moscow Institute of Physics and Technology

Demidov V.V.

Dr. of Physics and Mathematics., Leading Researcher., Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics

Sizov V. E.

Ph.D. in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Fryazino Branch

Temiryazeva M.P.

Ph.D. in Physics and Mathematics., Leading Researcher., Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Fryazino Branch

Temiryazev A.G.

Ph.D. in Physics and Mathematics., Leading Researcher., Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Fryazino Branch

Volkov D.A.

Engineer, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Moscow Institute of Physics and Technology, National Research University MPEI

Safin A. R.

Dr. of Physics and Mathematics., Senior Researcher, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Moscow Institute of Physics and Technology, National Research University MPEI

Markelova M.N.

Researcher., Ph.D. in Chemistry., Department of Chemistry, Moscow State University

Amelichev V.A.

Technical Director, Ph.D. in Chemistry., S-Innovations

Fedorov A.S.

junior researcher., Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Moscow Institute of Physics and Technology

Kalyabin D.V.

Ph.D. in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics

Nikitov S.A.

Director, Dr. of Physics and Mathematics, academician, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Moscow Institute of Physics and Technology

Annotation. *A series of SrMnO₃/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ (SMO/LSMO) heterostructures with different thicknesses of the SrMnO₃ antiferromagnetic layer were grown using magnetron sputtering. The results of X-ray diffraction studies, measurements of the Hall effect in a wide temperature range, measurements of the angular dependence of ferromagnetic resonance, and studies of the domain structure in an external magnetic field using magnetic force microscopy are presented.*

Keywords: *ferromagnetic resonance, antiferromagnet, ferromagnet, domains, Hall effect*

Эпитаксиальные гетероструктуры манганитов смешанной валентности открывают возможности для создания устройств, основанных на магнитных явлениях и конкурирующих интерфейсных взаимодействиях. Одним из межфазных свойств является возникновение дополнительной однонаправленной анизотропии. Ее возникновение объясняется обменным взаимодействием между ферромагнитными (ФМ) и антиферромагнитными (АФМ) спинами на границе раздела.

Границы двухслойных структур антиферромагнетик АФМ/ФМ вызывают интерес в связи с развитием АФМ-спинтроники. Помимо фундаментального интереса, эти структуры уже нашли применения в устройствах спинтроники, таких как магнитные запоминающие устройства с произвольным доступом и датчики магнитного поля на основе гигантского магнитосопротивления, благодаря эффекту закрепления спинов на границе (ФМ)/(АФМ)[1]. Обменное смещение или однонаправленная анизотропия возникает в гетероструктурах магнитных материалов, где поведение жесткого намагничивания антиферромагнитной тонкой пленки вызывает сдвиг кривой мягкого намагничивания ферромагнитной пленки. Обычно обменное смещение характеризуется смещением центра макроскопической петли магнитного гистерезиса M -(H)(намагниченность образца от магнитного поля) от начала координат, вдоль оси магнитного поля, величина которого называется полем обменного смещения H_E [2].

Наличие обменного взаимодействия на границе ФМ/АФМ позволяет разрабатывать улучшенные магнитные материалы с новыми свойствами. Благодаря межфазной связи уникальные электрические, магнитные и транспортные свойства АФМ могут быть объединены для управления ФМ-слоем. Например, соседний слой АФМ увеличивает магнитотвердость ФМ за счет обменного смещения [3] или усиливает перенос спинового тока от ФМ [4].

Гетероструктуры SrMnO₃/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ были изучены методом ферромагнитного резонанса; для определения величины однонаправленной анизотропии, возникающей при напылении антиферромагнитного слоя SrMnO₃ на ферромагнитный слой La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ мы использовали спектрометр Bruker ER 200, работающий в X-диапазоне ($\omega/2\pi = 9,6$ ГГц).

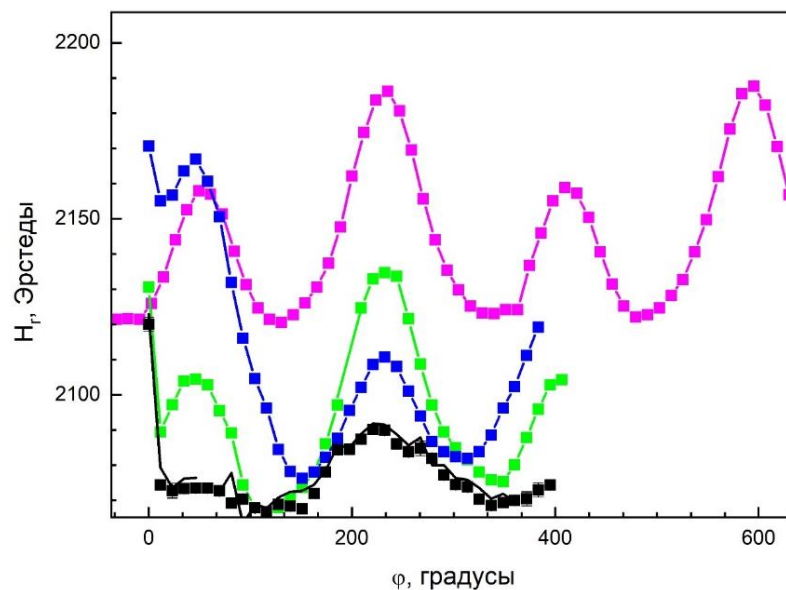


Рис. 1. Угловые зависимости резонансного поля. Розовые квадраты – $SMO(2 \text{ нм})/LSMO(44 \text{ нм})$, синие квадраты – $SMO(15 \text{ нм})/LSMO(44 \text{ нм})$, зеленые квадраты – $SMO(10 \text{ нм})/LSMO(44 \text{ нм})$, Розовые квадраты – $SMO(2 \text{ нм})/LSMO(44 \text{ нм})$, черные квадраты $SMO(20 \text{ нм})/LSMO(44 \text{ нм})$. Сплошные линии – расчётная аппроксимация.

Рисунок 1 подтверждает антиферромагнитное состояние $SrMnO_3$ при комнатной температуре. В гетероструктуре AFM/FM вместо одноосной анизотропии (две эквивалентные легкие конфигурации в противоположных направлениях) намагниченность в системах AFM/FM имеет только одно легкое направление, часто называемое однонаправленной анизотропией. Наличие однонаправленной анизотропии приводит к изменению угловой зависимости резонансного поля от магнитного поля (величина резонансного поля не повторяется при повороте образца на 180 градусов) [3].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-79-00016

Список использованных источников:

1. Wolf S. A., Awschalom D. D., Buhrman R. A., Daughton J. M., von Molnár S., Roukes M. L., Chtchelkanova A. Y., Treger D. M. Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future // Science. –2001. –№ 294. – С. 1488-1495.
2. Binek C. Ising-Type Antiferromagnets: Model Systems in Statistical Physics and in the Magnetism of Exchange Bias: Springer, 2003. – 23 с.
3. Nogués J., Schuller I. K. Exchange bias // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. –1999. –№192. –С. 203-232.
4. Wang H., Du C., Hammel P. C., Yang F. Antiferromagnonic Spin Transport from $Y_3Fe_5O_{12}$ into NiO // Physical Review Letters. – 2014. – №113. – С. 097202.

УДК 537.31

Магнитосопротивление точечных магнитных туннельных контактов с учётом градиентов электрохимических потенциалов

Усеинов Н.Х.

д.ф.-м.н., доцент, Институт физики КФУ

Аннотация. В работе исследуются свойства проводимости точечных магнитных туннельных наноконтактов с учётом градиентов электрохимических потенциалов на интерфейсе, ферромагнитный металл/диэлектрик. Получено выражение спин-поляризованного тока и выполнен расчёт туннельного магнитосопротивления для произвольных соотношений между размерами наноконтакта и средними длинами свободного пробега электронов проводимости в условиях приложенного напряжения.

Ключевые слова: магнитная гетероструктура, точечный магнитный туннельный контакт, электрохимический потенциал, спин-поляризованный ток, туннельное магнитосопротивление

Magnetoresistance of point magnetic tunnel junctions taken into account the gradients of electrochemical potential

Useinov N.Kh.

Dr.Sc., associate professor, Institute of Physics KFU – Kazan Federal University

Annotation. This work examines the conductivity properties of point contacts of magnetic tunnel junctions taking into account the gradients of electrochemical potentials at the ferromagnetic metal/dielectric interface. An expression for the spin-polarized current is obtained and the tunnel magnetoresistance is calculated for an arbitrary ratio of the sizes of point magnetic tunnel junctions and the free path of conduction electrons under applied voltage conditions.

Keywords: magnetic heterostructure, point magnetic tunnel junction, electrochemical potential, spin-polarized current, tunnel magnetoresistance

Введение

Эффективным методом решения задач электронного транспорта в теории проводимости гетероструктур являются квазиклассические уравнения для функций Грина (ФГ), см. работу [1]. Эти уравнения также могут быть математическим базисом для исследования транспортных свойств точечных магнитных туннельных контактов (МТК). В последующей работе [2], развивая квазиклассическую модель для ФГ, были получены выражения для спин-поляризованных токов при параллельной (P) и антипараллельной (AP) ориентации намагниченностей ферромагнитных гетероконтактов. В рамках этой модели [2] были исследованы зависимости гигантского магнитосопротивления магнитных наноконтактов как функции их радиусов a и длин свободного пробега электрона проводимости l . Предложенная схема вычисления ФГ основывалась на интерполяции слагаемых ФГ в двух режимах: диффузного ($l < a$) и баллистического ($l > a$).

Для того чтобы рассмотреть промежуточный случай, когда $l : a$, в настоящей работе учитывались градиентные слагаемые в разложении ФГ, что также позволяет исследовать неоднородности электрохимических потенциалов на интерфейсах МТК. Получено выражение для спин-поляризованного тока и вычислено туннельное магнитосопротивление (ТМС).

Рассчитаны зависимости ТМС от приложенного напряжения и отношения радиуса диэлектрика МТК к длине свободного пробега электрона проводимости. Точечный МТК моделируется круговым диэлектриком, радиуса a и толщиной d , соединяющим два однодоменных ферромагнитных металла (FM), левый FM^L и правый FM^R , см. рис. 1а.

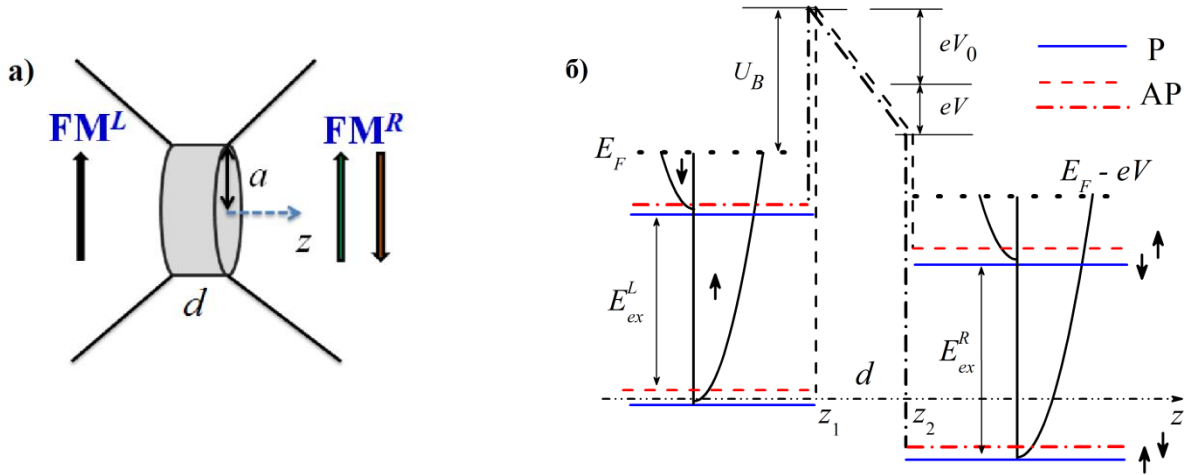


Рис. 1. Схематическое изображение: (а) точечного МТК двух ферромагнитных металлов FM^L левого и FM^R правого, где a – радиус и d – толщина диэлектрического слоя, стрелки показывают P и AP направление намагниченностей FM электродов; (б) законов дисперсии спиновых подзон электронов проводимости ферромагнитных металлов $FM^{L(R)}$ с левой (правой) стороны, а также энергетического потенциального барьера диэлектрика при приложенном напряжении V .

Для того чтобы рассчитать ТМС, необходимо, прежде всего, вычислить коэффициенты прохождения электронов через туннельный барьер (см. рис. 1б) и получить выражения для спин-поляризованных токов. На рис. 1б показаны законы дисперсии спиновых подзон электронов проводимости $FM^{L(R)}$ электродов с обменным расщеплением $E_{ex}^{L(R)}$, а также энергетический барьер диэлектрика с приложенным напряжением V и напряжением V_0 – контактной разности потенциалов между двумя разными металлами. Сплошные линии обозначают спиновые каналы (\uparrow, \downarrow) при P направлении намагниченностей $FM^{L(R)}$ металлов; штриховая и штрих-пунктирная линии обозначают спиновые каналы (\uparrow, \downarrow) при AP направлении намагниченностей; E_F – уровень Ферми, U_B – высота барьера над уровнем Ферми.

Спин-поляризованный ток МТК

Выражение для спин-поляризованного тока I_α , проходящего (вдоль оси z) через МТК, получено на основе решений системы уравнений для ФГ и системы квантово-механических уравнений, определяющих коэффициенты прохождения электронов энергетического барьера, см. рис. 1б. В наиболее лаконичной форме выражение для I_α можно записать в виде [2,3]

$$I_\alpha^{P(AP)} = \frac{e^2 p_{F,\alpha,\min}^2 a^2 V}{2\pi\hbar^3} \int_0^\infty dk \frac{J_1^2(ka)}{k} F_\alpha^{P(AP)}(k), \quad (1)$$

где $p_{F,\alpha,\min}$ – импульс Ферми, наименьший из импульсов $p_{F,\alpha}^L, p_{F,\alpha}^R$, контактирующих $FM^{L(R)}$, $\alpha = (\uparrow, \downarrow)$ – спиновый индекс, $J_1(ka)$ – функция Бесселя первого порядка, k – волновой вектор, определяющий неоднородность плотности тока в плоскости контакта. Функция $F_\alpha^{P(AP)}(k)$ под интегралом (1) представляет собой сумму трёх слагаемых:

$$F_{\alpha}^{P(AP)}(k) = \left\langle \cos\theta_{\alpha} D_{\alpha}^{P(AP)}(V, \cos\theta_{\alpha}) \right\rangle + G_{\alpha}^{heter}(k) + G_{\alpha}^{grad}(k), \quad (2)$$

где угловые скобки обозначают усреднение по телесному углу левой или правой стороны контакта, в зависимости от полярности приложенного напряжения. Здесь D_{α} – коэффициент прохождения туннельного барьера, θ_{α} – угол между осью z и направлением движения электронов к интерфейсу. Два других слагаемых $G_{\alpha}^{heter}(k)$ и $G_{\alpha}^{grad}(k)$ представляют собой суммы функциональных зависимостей и интегралов от коэффициентов прохождения D_{α} и параметров $p_{F,\alpha}^{L(R)}$, $l_{\alpha}^{L(R)}$, где $l_{\alpha}^{L(R)}$ – спин-зависимые длины свободного пробега. Процедуры вычисления и явный вид D_{α} , $G_{\alpha}^{heter}(k)$ и $G_{\alpha}^{grad}(k)$ показаны в работах [3,4]. Второе слагаемое $G_{\alpha}^{heter}(k)$ используется для вычисления проводимости при неоднородном распределении тока в точечном магнитном наноконтакте. Третье слагаемое $G_{\alpha}^{grad}(k)$ учитывает градиенты электрохимических потенциалов на границах слоёв МТК.

Туннельное магнитосопротивление точечного МТК

Спин-поляризованные туннельные токи, протекающие через МТК, существенно отличаются для каждой ориентации спина $\alpha = (\uparrow, \downarrow)$ и при P и AP ориентации намагниченностей электродов. Обычно ТМС определяется безразмерным отношением:

$$\text{TMC} = \frac{I^P - I^{AP}}{I^{AP}} \times 100\%, \quad (3)$$

где $I^{P(AP)} = I_{\uparrow}^{P(AP)} + I_{\downarrow}^{P(AP)}$. Результаты вычислений ТМС для несимметричного точечного МТК с различными значениями длинами свободного пробега электронов проводимости $l_{\alpha}^{L(R)}$ и импульсами Ферми $p_{F,\alpha}^{L(R)}$ показаны на рис. 2. Штриховые (красные) кривые вычислены без учёта градиентных слагаемых в разложениях ФГ, сплошные (синие) с учётом. Отметим, что при данных значениях, как показали расчёты, $I_{\uparrow}^{P(AP)} \gg I_{\downarrow}^{P(AP)}$. На рис. 2а также приведены значения толщины d диэлектрика и приложенного напряжения $V=0.1$ В. При расчётах V_0 принималась равной нулю. Другие значения физических параметров МТК показаны на рис. 2б, где m_B – эффективная масса электронов в диэлектрике в единицах массы свободного электрона m_e . Эффективные массы электронов проводимости в FM^{L(R)} электродах были равны m_e . Из рис. 2а видно, что учёт градиентов электрохимических потенциалов (третье слагаемое в формуле (2)) существенно увеличивает величину ТМС (сплошная кривая) при больших отношениях a/l_{\uparrow}^L , что соответствует диффузному режиму проводимости. На рис. 2б показано ТМС, рассчитанное с учётом градиентов электрохимических потенциалов, которое имеет необычный пик при приложенном напряжении $V \sim 0.9$ В.

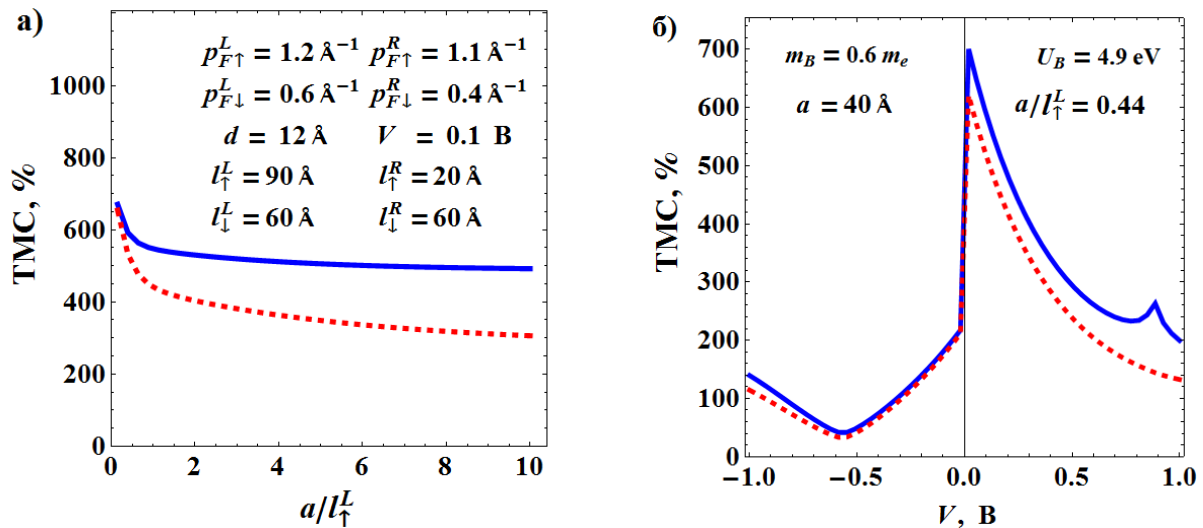


Рис. 2. Зависимости туннельного магнитосопротивления: (а) от отношения радиуса a , диэлектрика МТК к длине свободного пробега электрона проводимости левого FM^L электрода; (б) от приложенного напряжения. Сплошные (синие) кривые вычислены с учётом градиентов электрохимических потенциалов, а штриховые (красные) кривые без учёта.

По нашему мнению, этот пик связан с квантованием энергии электронов проводимости вблизи границ ФМ/диэлектрик и с сужением площади контакта. Здесь происходит эффект накопления электронов с одной проекцией спина и его переворота из одной спиновой подзоны в другую. На интерфейсе ФМ/диэлектрик спин зависимые электрохимические потенциалы имеют разные градиенты (и противоположную кривизну) выше и ниже энергии Ферми и совместно с обменной энергией усиливают проводимость электронов с одной проекцией спина. Эти эффекты при определенном сочетании параметров МТК с ограниченной геометрией приводят к резкому увеличению (резонансу) спин-поляризованной составляющей туннельного тока, например, I_{\uparrow}^P при определенном напряжении.

Представленные теоретические зависимости ТМС могут быть использованы при интерпретации экспериментальных данных, полученных при исследовании резистивных свойств точечных МТК, например гетероструктур на основе CoFeB/MgO/CoFe.

Список использованных источников:

1. Tagirov L.R., Vodopyanov B.P., Efetov K.B. Ballistic versus diffusive magnetoresistance of a magnetic point contact // Physical Review B. – 2001. – V.63. – P.104428(4).
2. Useinov A.N., Deminov R.G., Tagirov L.R., Pan G. Giant magnetoresistance in nanoscale ferromagnetic heterocontacts // J. Phys.: Condens. Matter. – 2007. – V.19. – P.196215(10).
3. Усеинов Н.Х. Квазиклассические функции Грина магнитных точечных контактов // ТМФ. – 2015. – Т.183. – С.301-311.
4. Усеинов Н.Х. Квазиклассическая теория спин-поляризованной проводимости и магнитосопротивления в магнитных наногетероконтактах: диссертация док. физ.-мат. наук. – Казань, 2023. – 445 с.

УДК 537.632

Топологические объекты в наноразмерных пленках при приложении внешнего магнитного поля**Филиппова В.В.**аспирант, младший научный сотрудник лаборатории теоретической физики ИФМК
УФИЦ РАН**Шульга Н.В.**к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории антиферромагнетиков и ферритов ИФМК
УФИЦ РАН**Дорошенко Р.А.**

д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ИФМК УФИЦ РАН

Гареева З.В.д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории теоретической физики ИФМК
УФИЦ РАН

***Аннотация.** Проведено численное моделирование процессов перемагничивания обменно – связанной магнитной наноструктуры, состоящий из двух слоев с анизотропией типа «легкая ось» и двух слоев с анизотропией типа «легкая плоскость». Исследованы микромагнитные состояния в системе и их трансформация под действием внешнего магнитного поля. Определены условия, необходимые для формирования нетривиальных микромагнитных состояний и топологических дефектов типа точек Блоха. Исследовано влияние констант магнитной анизотропии слоев и межслойного обменного взаимодействия на условия существования и структуру топологических объектов. Моделирование проводилось при помощи программы OOMMF (The Object Oriented MicroMagnetic Framework).*

***Ключевые слова:** микромагнетизм, топологические дефекты, наноструктуры, точки Блоха*

Topological objects in nanoscale films when an external magnetic field is applied**Filippova V.V.,**

graduate student, junior researcher IPMC UFSC RAS

Shulga N.V.,Candidate of Physical and Mathematical Sciences, researcher at the Laboratory of
Antiferromagnets and Ferrites**Doroshenko R.A.,**Doctor of of Physical and Mathematical Sciences, leading researcher at the Laboratory of
Antiferromagnets and Ferrites**Gareeva Z.V.**Doctor of of Physical and Mathematical Sciences, leading researcher at the Laboratory of
Theoretical Physics of the IPMC UFSC RAS

***Annotation.** The processes of magnetization reversal in an exchange-coupled magnetic nanostructure consisting of layers with anisotropy of the “easy axis” type and layers with anisotropy*

of the “easy plane” type were simulated. Micromagnetic states in the system and their transformation under an external magnetic field have been studied. The conditions necessary for the formation of nontrivial micromagnetic states and topological defects such as Bloch points are determined. The influence of the constants of magnetic anisotropy of layers and interlayer exchange interaction on the conditions of stability and the structure of topological objects has been explored. The simulation was carried out using the OOMMF (The Object Oriented MicroMagnetic Framework).

Keywords: micromagnetism, topological defects, nanostructures, Bloch points

Большой исследовательский интерес к себе привлекают топологические низкоразмерные структуры в магнитоупорядоченных материалах в виду того, что они обладают широким спектром физических свойств и могут быть использованы в устройствах магнитной памяти нового поколения [1 – 3]. Изучение топологических магнитных структур, таких как локализованные магнитные состояния (вихри, скирмионы, точки Блоха, хопфионы) [1] в кристаллах В20, пленках и синтетических магнитных структурах становится все более актуальным и пользуется повышенным интересом. Одним из условий их реализации является отсутствие операции пространственной инверсии в группе симметрии материала.

Цель проводимой работы заключается в изучении условий, необходимых для реализации магнитных структур вида точки Блоха (ТБ) в синтетических ферромагнитных пленках с различной магнитной анизотропией.

В качестве модельного объекта рассмотрена наноразмерная пленка (рис. 1), состоящая из двухслойных ферромагнитных структур с магнитной анизотропией вида «легкая ось»-«легкая плоскость», связанных друг с другом за счет межслойного обменного взаимодействия. Размеры сторон пленки «а» составляют 200×200 нм, полная высота пленки 96 нм ($h = 24$ нм). Исследованы процессы намагничивания и перемагничивания пленок под действием магнитного поля, приложенного по нормали к поверхности пленки, изучено два сценария процессов перемагничивания при изменении константы анизотропии: (i) – константы анизотропии типа «легкая ось» у слоев 2 и 3; (ii) – константы анизотропии типа «легкая плоскость» слоя 4.

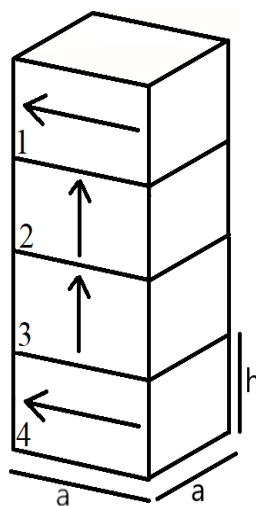


Рис. 1. Схематичное изображение пленки, используемой при моделировании

Расчеты проводились с использованием пакета микромагнитного моделирования Object Oriented Micro Magnetic Framework (OOMMF) [4]. Для расчетов использованы следующие значения параметров $M_i = 50$ kA/m, $A_{1,4} = 2.9 \cdot 10^{-12}$ J/m, $A_{2,3} = 4 \cdot 10^{-12}$ J/m, $K_{1,4} = -7 \cdot 10^5$ J/m³, $K_2 = 2 \cdot 10^5$ J/m³, $K_3 = 2 \cdot 10^3$ J/m³, $J_{12,34} = 3.5 \cdot 10^{-12}$ J/m, $J_{23} = 0.2 \cdot 10^{-12}$ J/m, данные значения характерны для пленок феррита – граната, где A_i – константа неоднородного обменного взаимодействия i – ого слоя, K_i – константа магнитной анизотропии в i – ом слое,

J_k – константа межслойного обменного взаимодействия, обозначение $k = 12, 23, 34$ введено с учетом номеров обменно-связанных слоев. Размеры ячейки моделирования составляют $(5 \times 5 \times 3)$ нм.

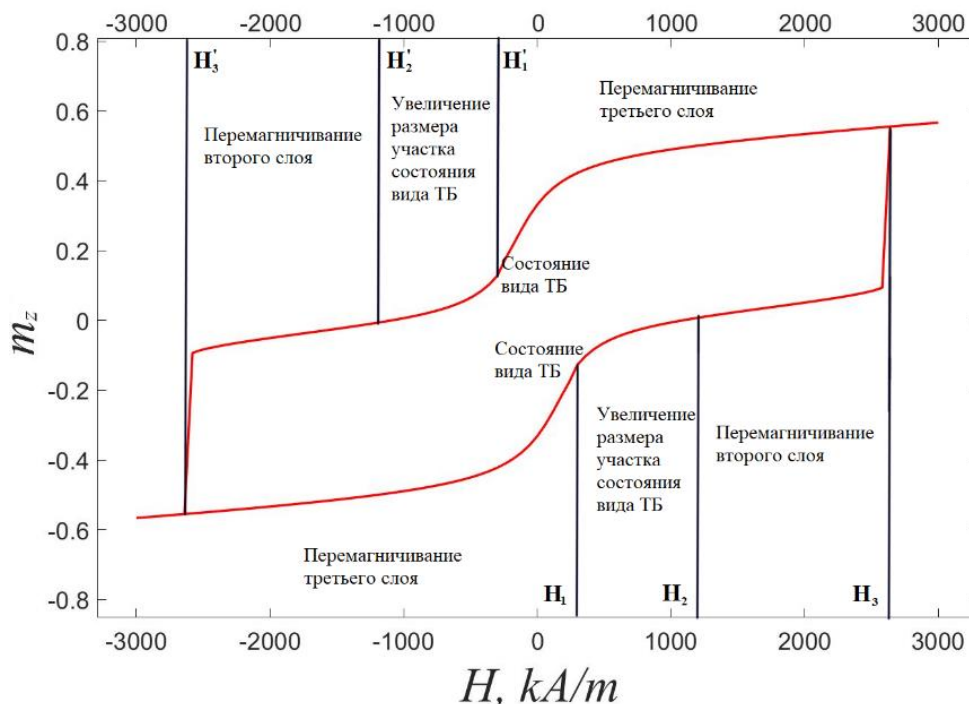


Рис. 2. Гистерезис намагниченности в магнитном поле $m_z(H)$, $K_2 = 2 \cdot 10^5 \text{ J/m}^3$, $K_3 = 2 \cdot 10^3 \text{ J/m}^3$.

Исследованы магнитные состояния, формирующиеся в процессе намагничивания и размагничивания рассматриваемой структуры в магнитном поле, приложенном в направлении по нормали к плоскости пленки (рис. 2).

Таблица 1. Параметры (K_2 , K_3 , H), при которых реализуется магнитная конфигурация вида ТБ

Константы магнитной анизотропии, $\times 10^3 \text{ J/m}^3$	$K_2 = 201,5$, $K_3 = 3,5$	$K_2 = 200,5$, $K_3 = 2,5$	$K_2 = 199,5$, $K_3 = 1,5$	$K_2 = 198,5$, $K_3 = 0,5$
Магнитное поле, кА/м	288	294	300	315

При исследовании влияния константы анизотропии по первому (i) сценарию получили диапазон величин полей, при которых реализуются различные микромагнитные состояния. В табл. 1 приведены величины полей, при которых реализуются состояния типа ТБ (с полярностью -1) при различных значениях констант анизотропии. При исследовании влияния константы анизотропии по второму (ii) сценарию получили, что состояний типа ТБ не наблюдается, однако, в ходе процесса перемагничивания пленки реализуются другие эффекты. При соотношении констант $K_4/K_1 \sim 0,1$ плоскостная ориентация магнитных моментов в четвертом слое отсутствует, процесс перемагничивания последовательных, сначала перемагничивание затрагивает четвертый слой, потом третий. При соотношении констант $K_4/K_1 \sim 0,01$ отсутствует плоскостная ориентация в четвертом слое, однако процесс перемагничивания третьего и четвертого слоев происходит одновременно.

Финансирование работы

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 23-22-00225.

Список использованной литературы:

1. M. T. Birch et al. Toggle-like Current-Induced Bloch Point Dynamics of 3D Skyrmion Strings in a Room Temperature Nanowire // Nat Commun. – 2022. – Т. 13. – № 1.
2. Q. L. He, T. L. Hughes, N. P. Armitage, Y. Tokura, and K. L. Wang. Topological Spintronics and Magnetoelectronics. // Nat. Mater. – 2022. – Т. 21 – №1. – С. 15–23
3. К.Л. Мелтов, Топологическая память на многосвязных планарных магнитных нанозементах. // Письма в ЖЭТФ. – 2023. – Т. 118. – № 2. – С. 95–101.
4. M. J. Donahue and D. G. Porter. OOMMF User's Guide, Version 1.0 // National Institute of Standards and Technology. 1999. – No. NIST IR 6376. – 94 с.

УДК 539.216.2:537.624

Толщинные зависимости коэрцитивной силы трехслойных магнитных пленок, полученных химическим осаждением

Чжан А.В.

д.ф.-м.н., профессор кафедры ЭФИТ, Сибирский федеральный университет

Орлов В.А.

к.ф.-м.н., заведующий кафедрой ЭФИТ, Сибирский федеральный университет

Аннотация. В работе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований коэрцитивной силы трехслойных пленок, полученных химическим осаждением, в зависимости от толщины немагнитной прослойки и магнитных слоев. Показано, что наблюдаемые изменения коэрцитивной силы в исследуемых системах обусловлены особенностями обменной связи между магнитными слоями с участием атомов промежуточного слоя, а также диполь-дипольного взаимодействия между ними.

Ключевые слова: трехслойные магнитные пленки, межслоевое взаимодействие, коэрцитивная сила

Thickness dependences of coercivity of three-layer magnetic films obtained by chemical deposition

Chzhan A.V.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of EFIT, Siberian Federal University

Orlov V.A.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of EFIT, Siberian Federal University

Annotation. The paper presents the results of experimental and theoretical studies of the coercivity of three-layer films obtained by chemical deposition, depending on the thickness of the non-magnetic layer and magnetic layers. It is shown that the observed changes in the coercivity in the systems under study are due to the peculiarities of the exchange coupling between the magnetic layers with the participation of atoms of the intermediate layer, as well as the dipole-dipole interaction between them.

Key words: *three-layer magnetic films, interlayer interaction, coercivity*

Интересным с физической и прикладной точек зрения является эффект значительного уменьшения коэрцитивной силы, который обнаруживается в многослойных пленках, содержащих магнитные слои с немагнитными прослойками [1]. Физические механизмы наблюдаемых изменений коэрцитивной силы во многом неясны. Они в основном связываются с взаимодействием доменных границ, разделяющих домены в соседних магнитных слоях.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований изменения поля смещения петли гистерезиса, а также коэрцитивной силы, в трехслойных пленках, полученных химическим осаждением в зависимости от толщины немагнитной прослойки и магнитных слоев. Показано, что наблюдаемые изменения коэрцитивной силы в исследуемых системах обусловлены особенностями обменной связи между магнитными слоями и дипольной – дипольного взаимодействия между ними.

Образцами для исследований являлись трехслойные пленки, полученных химическим осаждением [2]. Магнитные слои одинаковой толщины были выполнены из аморфного сплава Co-P, промежуточный – из парамагнитного сплава Ni-P.



Рис.1. Зависимость коэрцитивной силы и поля связи от толщины прослойки.

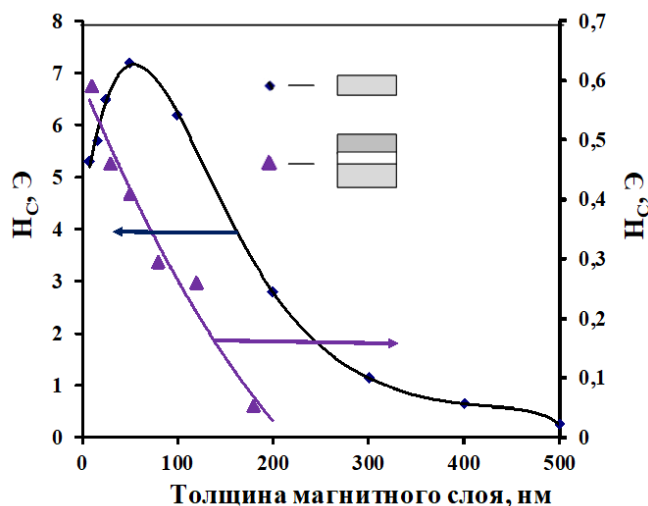


Рис.2. Зависимость коэрцитивной силы от толщины магнитных слоев трехслойных и однослойных пленок.

В том случае, если амплитуда перемагничивающего магнитного поля $H > H_s$, где H_s – поле насыщения, коэрцитивная сила испытывает немонотонную зависимость от толщины прослойки, и при ее значении ~ 2 нм H_c стремится к минимуму и, затем, растет с ростом толщины прослойки (рис.1). Наблюдаемые изменения коэрцитивной силы во многом коррелирует со значением поля смещения петли гистерезиса H_D , наличие которого связывается с разной коэрцитивной силой магнитных слоев [2].

Дальнейшее уменьшение коэрцитивной силы такой структуры можно достичь с помощью увеличения толщины магнитных слоев d . Как показано на рис. 2, с ростом d коэрцитивная сила уменьшается по линейному закону, и при толщине ~ 200 нм H_c достигает $\sim 0,05$ Э (толщина прослойки составляла ~ 2 нм). На этом же рисунке для сравнения приведена толщинная зависимость коэрцитивной силы однослойной пленки CoP. Из сравнения указанных графиков следует, что наличие прослойки приводит к уменьшению H_c на порядок. Для количественной оценки наблюдаемых изменений коэрцитивной силы от толщины магнитных слоев в работе приводится последовательный расчет поверхностной магнитостатической энергии трехслойной системы. Полученные выражения для критических полей зародышеобразования с учетом магнитостатического взаимодействия магнитных слоев при наличии прослойки хорошо согласуются с наблюдаемыми изменениями коэрцитивной силы.

Список использованных источников

1. Васьковский В.О., Савин П.А., Лепаловский В.Н., Кандаурова Г.С., Ярмошенко Ю.М. Особенности гистерезисных свойств и доменной структуры слоистых магнитных плёнок // ФММ. - 1995. - Т.79. - №3. - С. 70-77.
2. Chzhan A.V., Podorozhnyak S.A., Shahov A.N., Velikanov D.A., Patrin G.S. Thickness dependences of coercivity on in three layer films obtained by chemical deposition // J. Phys.: Conference Series. VII Euro-Asian Symposium "Trends in Magnetism". - 2019. - V. 1389. - P. 1–6.
3. Chzhan A. V., Orlov V. A. and Volochaev M. N. Interlayer Interaction and Coercivity of Three-Layer Films. Obtained by Chemical Deposition // Physics of Metals and Metallography, -2023. - Vol. 124. - No. 10. - P. 961–965.

УДК 537.622.6

Тонкие пленки гексаферрита ВаМ, выращенные методом лазерной молекулярно – лучевой эпитаксии на подложках Al_2O_3 **Кричевцов Б.Б.**

д.ф.м.н., внс, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Коровин А.М.

мнс, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Левин А.А.

к.ф.м.н., снс, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Сутурин С.М.

к.ф.м.н., внс, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Федоров В.В.

к.ф.м.н., снс, СПб АУ РАН им. Ж.И. Алферова

Телегин А.В.

к.ф.м.н., внс, Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН

Лобов И.Д.

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

Соколов Н.С.

д.ф.м.н., гнс, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

***Аннотация.** Работа посвящена исследованию тонких пленок гексаферрита ВаМ, выращенных методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках С - и R - срезов сапфира Al_2O_3 . Приводятся результаты изучения морфологии поверхности с помощью атомно-силовой микроскопии, химического состава полученных пленок методами энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и рассеяния ионов средних энергий, кристаллической структуры с помощью рентгеновской и электронной дифрактометрии, а также магнитных свойств магнитооптическими и магнитометрическими методами.*

***Ключевые слова:** лазерная молекулярно-лучевая эпитаксия, гексаферриты, кристаллическая структура, процессы намагничивания*

BaM-type hexaferrite thin films grown by laser molecular beam epitaxy on Al_2O_3 substrates**Krichevstov B.B.**

Dr. Sc., Leading researcher, Ioffe Institute

Korovin A.M.

Junior researcher, Ioffe Institute

Suturin S.M.

PhD., Leading researcher, Ioffe Institute

Fedorov V.V.

PhD., Senior researcher, Alferov University

Levin A.A.

PhD., Senior researcher, Ioffe Institute

Telegin A.V.

PhD., Leading researcher, IMP UB RAS

Lobov I.D.

Dr. Sc., Senior researcher, IMP UB RAS

Sokolov N.S.

Dr. Sc., Principal researcher, Ioffe Institute

Annotation. *The work is dedicated to the study of thin films of BaM hexaferrite grown by laser molecular beam epitaxy on C - and R - cuts Al₂O₃ sapphire substrates. The results of studying the surface morphology using atomic force microscopy, the chemical composition of the resulting films by energy-dispersive X-ray spectroscopy and medium energy ion scattering, their crystal structure using X-ray and electron diffraction are presented as well as magnetic properties by magneto-optical and magnetometric methods.*

Keywords: *laser molecular beam epitaxy, hexaferrites, crystal structure, magnetization processes*

Применения тонкопленочных структур магноники для передачи и обработки информации с помощью пакетов спиновых волн требуют выполнения ряда условий, к которым, в частности, относятся: нормальная к плоскости структуры ориентация намагниченности в отсутствие магнитного поля, узкая линия ферромагнитного резонанса (ФМР), высокое значение намагниченности насыщения [1]. Как показывают исследования, одновременно выполнить все эти условия достаточно сложно. Тонкие пленки иттриевого феррита граната YIG, имеют рекордно узкие линии ФМР, но характеризуются малыми значениями поля магнитной анизотропии и ориентацией намагниченности в плоскости в отсутствие магнитного поля [2]. Ферромагнитные шпинели имеют более высокие значения намагниченности насыщения и поля магнитной анизотропии, но также демонстрируют in-plane ориентацию намагниченности и более широкие линии ФМР [3]. Реализация нормальной к плоскости пленки ориентации намагниченности **M** возможна в структурах на основе гексаферритов, в частности, гексаферрита BaM (BaFe₁₂O₁₉), благодаря сильному полю одноосной магнитной анизотропии ($H_a \sim 18$ kOe). Кроме того, вследствие больших величин H_a и намагниченности насыщения ($4\pi M_s = 4,6$ kG), устройства на основе гексаферрита BaM могут работать на частотах до 60-100 GHz.

В представленном докладе приводятся результаты работ по росту и исследованию тонких пленок гексаферрита BaM, выращенных методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии, проводимых в ФТИ им. А.Ф. Иоффе и ИФМ им. М.Н. Михеева УрО РАН. Тонкие пленки гексаферрита BaM выращивались в ФТИ на подложках сапфира Al₂O₃ с ориентацией (0001) (C – срез) и (01-12) (R – срез). В первом случае ось C₃ сапфира направлена нормально к плоскости подложки, во втором под углом. Химический состав пленок изучался с помощью метода энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX), а также методом рассеяния ионов средних энергий (MEIS). Кристаллическая структура анализировалась in-situ с помощью дифракции быстрых электронов в отражении (RHEED), а также методами рентгеновской дифрактометрии (XRD) с использованием порошкового дифрактометра D2 Phaser (Bruker AXS, Germany) и дифрактометра SuperNova (Agilent, Oxfordshire, UK). Изучение статических магнитных свойств проводилось с помощью вибрационной магнитометрии (VSM) (Lake Shore Cryotronics) и магнитооптических методов, в частности полярного эффекта Керра (PMOKE). Кривые намагничивания измерялись при приложении магнитного поля **H**, как нормально, так и в плоскости структуры. Спектры ФМР измерялись с помощью спектрометра электронного парамагнитного резонанса JEOL-PE3 и генератора на лампе обратной волны Г4-141 (диапазон частот 38 – 53 GHz). Магнитооптические спектры PMOKE, поперечного эффекта Керра (ТКЕ) и магниторефрактивного эффекта (MRE) исследовались в диапазоне энергий фотонов 1,5 - 4 эВ. Для изучения морфологии поверхности использовался атомно-силовой микроскоп (AFM) Integra производства NT MDT (Москва,

Зеленоград).

Исследования химического состава выращенных пленок показали, что в них реализуются соотношения элементов, соответствующие гексаферриту ВаМ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$). В тоже время, анализ картин RHEED и данных XRD не выявил присутствия кристаллической решетки ВаМ в *as-grown* структурах. Кристаллическая структура ВаМ появляется только после отжига на воздухе при $T = 1000$ °С. Ее исследования с помощью XRD и RHEED показали, что направление гексагональной оси в отожженных пленках, выращенных на подложках С - среза сапфира $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ совпадает с направлением оси C_3 в подложке. Поверхность отожженной структуры состоит из набора нанокристаллитов, обладающих выраженной огранкой, характерной для кристаллов, у которых ось 6-го порядка, направлена нормально к подложке.

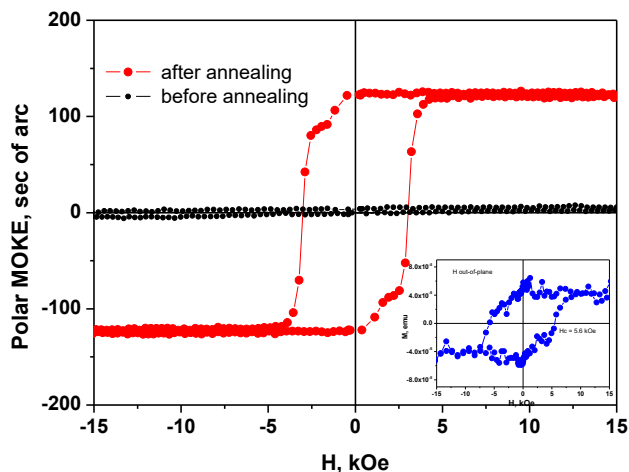


Рис.1. Петли гистерезиса РМОКЕ в пленке толщиной 50 нм до и после отжига в *out-of-plane* магнитном поле H . На вставке петля гистерезиса, полученная с помощью VSM.

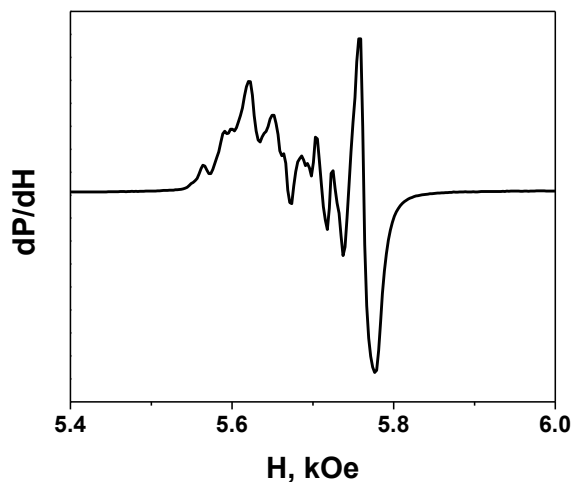


Рис.2. Спектр ФМР в отожженной пленке толщиной 50 нм, выращенной на $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$.

Исследования магнитных свойств показали, что только в отожженных пленках $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ наблюдаются ярко выраженные петли магнитного гистерезиса. Так, в пленках толщиной $h \sim 50$ нм, выращенных на $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$, после отжига видны практически прямоугольные петли гистерезиса с остаточной намагниченностью $M_r \approx M_s$ (Рис.1). Магнитометрические измерения показали, что величина M_s в пленках близка к наблюдаемой в монокристаллах $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. При увеличении толщины пленки до $h = 250-500$ нм прямоугольность петель и величина намагниченности уменьшается, что свидетельствует о появлении неоднородности магнитной структуры [4]. Тем не менее, остаточная намагниченность M_r остается близкой к M_s . Как показал эксперимент, прямоугольность петель не ухудшается в многослойных структурах, когда на подложке одна за другой выращиваются и отжигаются пленки гексаферрита ВаМ толщиной 50 нм.

Спектр ФМР в пленке толщиной 50 нм, выращенной на $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$, на частоте 50 GHz состоит из набора узких, близко расположенных линий (Рис.2). Резонансное поле наиболее сильной линии составляет $H_{\text{res}} = 5.76$ kOe, что позволяет дать оценку поля анизотропии $H_a = 16.4$ kOe. Ширина линии невелика и составляет $\Delta H_{\text{res}} \approx 20$ Oe.

Как показали измерения XRD и RHEED (Рис. 3, 4) в пленке, выращенной на подложке R - среза сапфира $\text{Al}_2\text{O}_3(01-12)$, после отжига получается монокристаллическая структура гексаферрита ВаМ высокого кристаллического качества, в которой отсутствуют поликристаллическая и текстура.

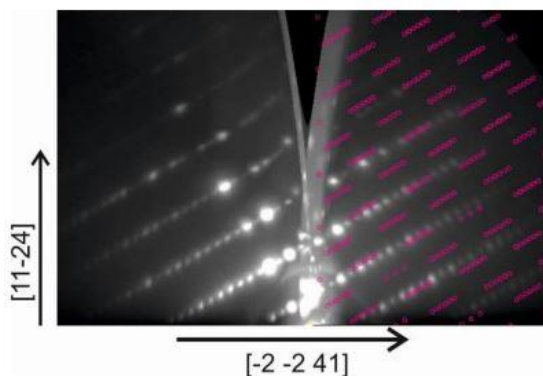


Рис.3. Сечение 3x-мерной реконструкции RHEED образца ВаМ, выращенного на $Al_2O_3(1-102)$ и прошедшего отжиг.

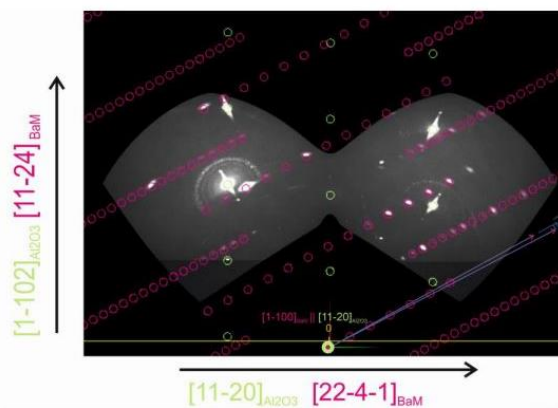


Рис.4. Сечение обратного пространства, снятое с помощью XRD. Красные кружки – модельные положения рефлексов решетки гексаферрита ВаМ. Зеленые кружки соответствуют подложке Al_2O_3 .

Моделирование картин дифракции показало, что плёнка ВаМ обладает кристаллической решеткой гексаферрита ВаМ (PDF-2 01-075-9113). Все рефлексы относятся либо к подложке, либо к пленке ВаМ и в структуре отсутствуют другие фазы и текстура (развороты вокруг нормали). Получены эпитаксиальные соотношения пленка - подложка: направление $[1-102]_{Al_2O_3}$ параллельно $[11-24]_{BaM}$ в плоскости подложки, а направление $[11-20]_{Al_2O_3}$ почти параллельно направлению $[22-4-1]_{BaM}$ с разворотом $\sim 1.2^\circ$ вокруг оси $[1-100]_{BaM}$. Гексагональная ось пленки отклонена от нормали к поверхности на угол $\varphi \sim 62^\circ$.

Исследования кривых намагничивания с помощью VSM и РМОКЕ также показали, что направление оси легкого намагничивания (ОЛН) ориентировано под углом к плоскости подложки. Об этом свидетельствуют азимутальные зависимости петель гистерезиса при ориентации магнитного поля в плоскости структуры (Рис.5,6). Отметим, что при in-plane ориентации поля сигнал РМОКЕ пропорционален изменению нормальной к плоскости (out-of-plane) компоненты намагниченности $M_{out-of-plane}$, а сигнал VSM - изменению in-plane компоненты намагниченности $M_{in-plane}$. Когда проекция оси легкого намагничивания на плоскость ортогональна направлению \mathbf{H} ($\theta = 90^\circ, 270^\circ$), наблюдаются очень слабые зависимости сигналов РМОКЕ и VSM от магнитного поля, характеризующиеся большой величиной H_c и малым остаточным значением намагниченности (Рис. 5, 6). Когда проекция ОЛН на плоскость параллельна ориентации магнитного поля ($\theta = 0^\circ, 180^\circ$), наблюдаются ярко выраженные петли с $H_c \approx 3.5$ кОе и большой остаточной намагниченностью. Расчеты петель гистерезиса в модели Стонера - Волфорта при использовании магнитных параметров объемных образцов ВаМ дает хорошее описание экспериментов для отклонения ОЛН от нормали к поверхности на угол $\varphi = 62^\circ$.

Спектральные зависимости магнитооптических эффектов РМОКЕ, ТКЕ и MRE в структурах $BaFe_{12}O_{19}/Al_2O_3(0001)$ показали проявление интенсивных полос при $E_{ph} \approx 3.2$ eV, характерной для монокристаллов гексаферрита ВаМ.

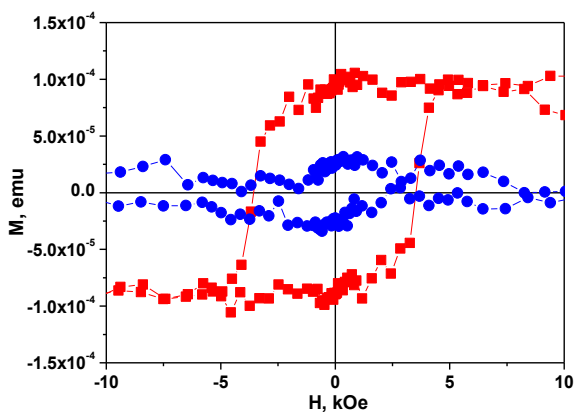


Рис.5. Кривые намагничивания (VSM), при двух ориентациях *in-plane* магнитного поля H в структуре $BaFe_{12}O_{19}/Al_2O_3(01-12)$. Красные символы $\theta = 0$, синие $\theta = 90^\circ$.

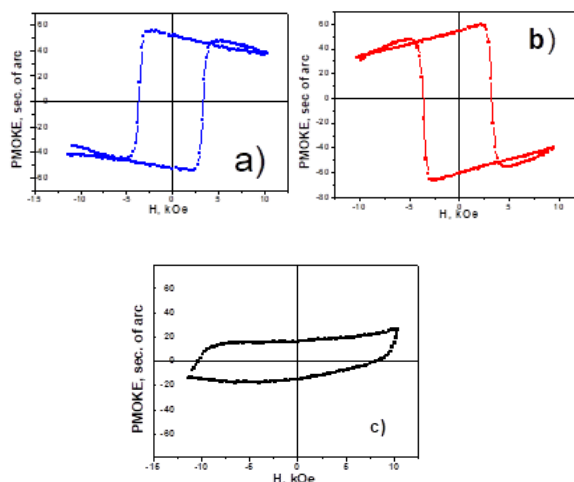


Рис.6. Кривые намагничивания (PMOKE), при трех ориентациях *in-plane* магнитного поля H в структуре $BaFe_{12}O_{19}/Al_2O_3(01-12)$: а) $\theta = 0$, б) $\theta = 180^\circ$, в) $\theta = 90^\circ$.

Таким образом, пленки гексаферрита ВаМ, выращенные на подложках С- или R-среза сапфира, демонстрируют, в отсутствие магнитного поля, нормальную или ориентированную под углом к плоскости ориентацию намагниченности. Величина намагниченности в пленках близка к наблюдаемой в объемных образцах гексаферрита ВаМ, что показывает перспективность полученных наноструктур для создания СВЧ устройств.

Исследование выполнено счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00768, <https://rscf.ru/project/22-22-00768/>

Магнитометрические измерения проводились на оборудовании ЦКП ИФМ УрО РАН.

Список использованных источников:

1. Pullar R.C. Hexagonal Ferrites: A Review of the Synthesis, Properties and Applications of Hexaferrite Ceramics// Progress in Materials Science. – 2012. – v. 57. –С. 1191-1334.
2. Соколов Н.С., Кричевцов Б.Б., Сутурин С.М., Коровин А.М., Федоров В.В., Луцев Л.В., Бурсиан В.Э., Волков М.П. Наноструктуры на основе иттриевого феррита-граната $Y_3Fe_5O_{12}$, полученные методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии//Сборник трудов НМММ XXIII. – Москва 2018. – С. 640-643.
3. Krichevstov V.B., Suturin S.M., Korovin A.M., Kaveev A.K., Bursian V.E., Cunado J.L., Sokolov N.S. Diffused magnetic transitions in $NiFe_2O_4/SrTiO_3(001)$ epitaxial heterostructures// J. Magn. Magn. Mater. – 2022. – v. 562, ArtNo: #169754.
4. Krichevstov V., Korovin A., Suturin S., Levin A.A., Lobov I., Telegin A., Badalyan A., Sakharov V., Serenkov I., Dorogov M., Sokolov N. Structural, Magnetic, and Magneto-Optical Properties of Thin Films of ВаМ Hexaferrite Grown by Laser Molecular Beam Epitaxy//Materials. – v.16. – № 12. –ArtNo: #4417 (2023).

УДК 537.622.4

**О влиянии азота при напылении композитных плёнок
(CoFeB + SiO₂) на их структурные и резонансные магнитные свойства**

Котов Л.Н.

д.ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой радиофизики и электроники
Сыктывкарский государственный университет

Устюгов В.А.

к.ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой информационной безопасности,
Сыктывкарский государственный университет

Ковалёв П.Д.

магистр, инженер кафедры радиофизики и электроники,
Сыктывкарский государственный университет

Блинов З.Н.

аспирант кафедры радиофизики и электроники,
Сыктывкарский государственный университет

Калинин Ю.Е.

д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры твердотельной электроники,
Воронежский государственный технический университет

Ситников А.В.

д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры твердотельной электроники,
Воронежский государственный технический университет

***Аннотация.** В работе исследованы структурные свойства и параметры ферромагнитного резонанса (ФМР) композитных плёнок качественного состава (CoFeB + SiO₂) с разными концентрациями металлического сплава двух серий, одна из которых (серия В) была напылена в атмосфере азота, вторая (серия А) - без него. Выявлены и описаны существенные отличия в гранулярной и магнитной структуре указанных композитных плёнок. Описана модель взаимосвязи материальных параметров среды композитной плёнки с положением пика и шириной линии ФМР.*

***Ключевые слова:** условия напыления плёнок, гранулярная и гранулярно-перколяционная структура, ферромагнитный резонанс*

On the influence of nitrogen in the sputtering of composite films (CoFeB + SiO₂) on their structural and resonance magnetic properties

Kotov L.N.,

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of radiophysics and electronics, Syktyvkar State University

Ustyugov V.A.,

PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of informational security, Syktyvkar State University

Kovalyov P.D.,

magister's degree student of the Department of radiophysics and electronics, Syktyvkar State University

Blinov Z.N.,

postgraduate student of the Department of radiophysics and electronics,
Syktyvkar State University

Kalinin Yu.E.,

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor, Professor of the Solid-State Electronics Department, Voronezh State Technical University

Sitnikov A.V.,

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor, Professor of the Solid-State Electronics Department, Voronezh State Technical University

Annotation. *The structural properties and ferromagnetic resonance (FMR) parameters of composite films of qualitative composition (CoFeB + SiO₂) with different concentrations of metal alloy of two series, one of which (series B) was sputtered in nitrogen atmosphere, the second (series A) - without it, have been investigated in this work. Significant differences in the granular and magnetic structure of the above composite films have been identified and described. A model of the relationship between the material parameters of the composite film medium and the position of the peak and the width of the FMR line is described.*

Keywords: *film sputtering conditions, granular and granular-percolation structure, ferromagnetic resonance*

Разнообразие сфер и вариантов применения нанокompозитных структур обуславливает неугасающий интерес исследователей к совершенствованию методов их изготовления, поиску новых химических составов и геометрических конфигураций, наиболее полно отвечающих требованиям той или иной задачи [1]. В настоящей работе исследованы композитные плёнки качественного состава (CoFeB + SiO₂), полученные методом ионно-лучевого напыления. Для получения плёнок брались мишени в виде пластин из металлического сплава Co₄₁Fe₃₉B₂₀ и навесок из диэлектрика SiO₂ и листы лавсана размером 297×210 мм². Для анализа влияния условий напыления на структуру плёнок и их магнитные характеристики было получено две серии плёнок:

— серия А, напыление которой проводилось в атмосфере аргона 10⁻⁴ Па.

— серия В, напыление которой проводилось в атмосфере аргона 10⁻⁴ Па с добавлением азота 10⁻⁵ Па.

Толщины и химический состав образцов определялись с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA3. Изображения атомно-силовой микроскопии (АСМ) плёнок для статистического анализа гранулярного состава и магнитной структуры получены на атомно-силовом микроскопе NT-MDT (Россия). Резонансные высокочастотные параметры (положение и ширина линии ФМР) были измерены при комнатной температуре с помощью радиоспектрометра РЭ-1306 на частоте переменного магнитного поля 9.36 ГГц. Постоянное и переменное магнитные поля в эксперименте были направлены касательно к плоскости плёнки. Все эксперименты проведены при комнатной температуре. На рис. 1 приведены характерные АСМ изображения рельефа поверхности исследуемых пленок, поверх них полупрозрачным слоем наложено изображение магнитной структуры.

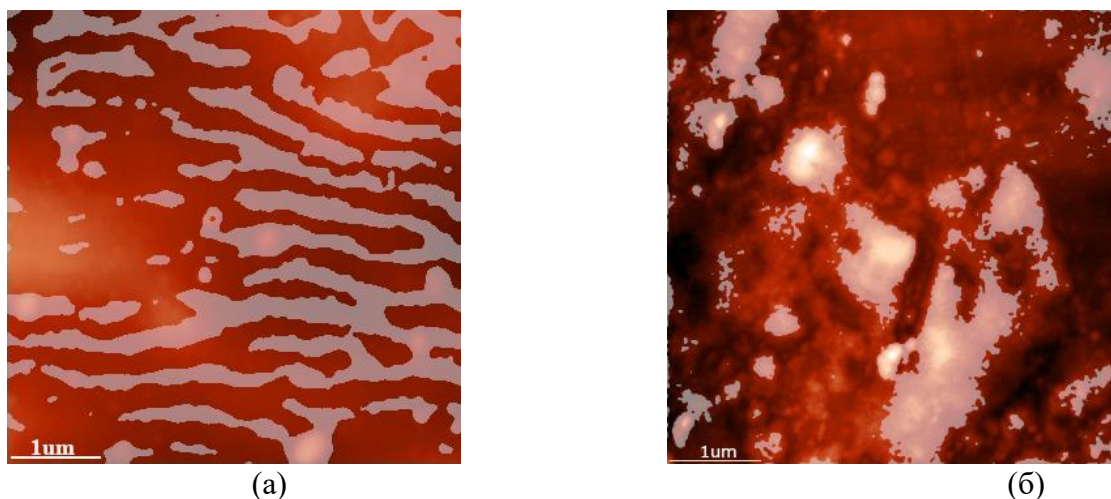


Рис. 1. Изображения рельефа и магнитной структуры поверхности плёнок ($\text{CoFeB}+\text{SiO}_2$) с $x=0.56$ серии А (а) и плёнок с $x = 0.52$ серии В (б)

Можно видеть, что плёнки А серии при концентрации металлического сплава $x=0.56$ обладают высокой однородностью поверхности, перепады по высоте поверхности не превышают 250 нм [3], а магнитный фазовый контраст свидетельствует о наличии гранулярно-перколяционной структуры, среди которой можно выделить и полосовую магнитную структуру (рис.1, а) Это косвенно отражает и высокую однородность фазового состава. В противоположность этому в плёнках серии В проявляется структура из четко идентифицируемых гранул различного размера. В литературе (например, [4]) влияние азота (реактивного газа) на результат формирования структуры плёнок описано как способствующее созданию гранулированной структуры за счёт рассеяния продуктов эрозии мишени, вследствие чего увеличивается количество центров роста металлических гранул на подложке пленки, а также за счет образования нитридов, обеспечивающих изоляцию гранул. Из рис. 1, б видно, что на поверхности плёнки выделяются гранулы различных размеров, причем при увеличении концентрации металла их объединение происходит не в сплошную металлическую матрицу, а в сложные агрегаты отдельных мелких и крупных частиц. Магнитная структура данных плёнок, как видно из рис. 1б, также имеет гранулярную структуру, причем области высокой намагниченности ассоциированы с топографическими выпуклостями. Высокая однородность структуры плёнок А серии проявляется и на спектрах ФМР. На рис. 2а видно, что величина резонансного поля существенно меньше, чем для пленок В серии. Для качественного определения резонансной частоты можно воспользоваться известной формулой Киттеля

$$\omega_0 = \gamma \sqrt{H_{res}(H_{res} + 4\text{ПМ})},$$

из которой очевидно, что при росте намагниченности насыщения (совместном с ростом концентрации металлического сплава) пик линии ФМР смещается в сторону меньших полей. Незначительное изменение ширины линии ФМР можно связать с изменением геометрии плёнки (в первую очередь — с увеличением толщины) с ростом концентрации металлического сплава.

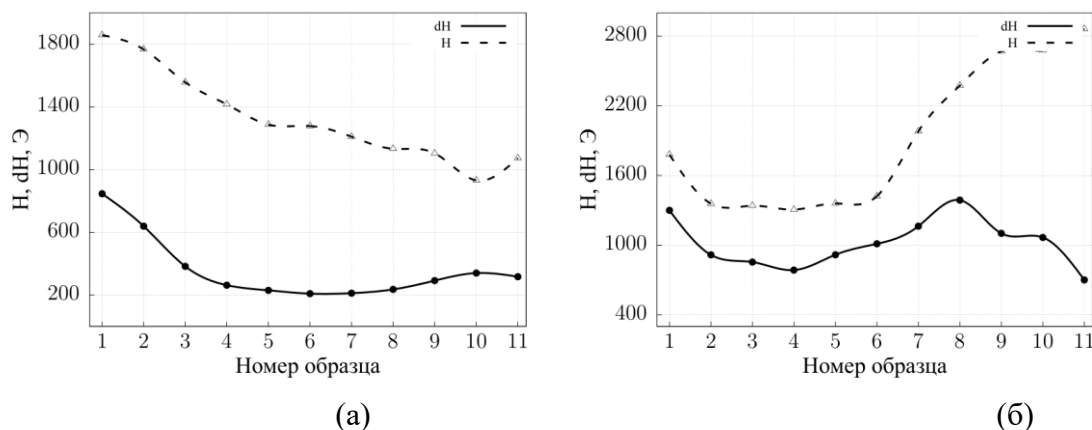


Рис. 2. Положение (резонансное поле) H и ширина dH линии ферромагнитного резонанса плёнок серии А (а) и серии В (б) от номера образцов

Слабое изменение ширины резонансной линии для плёнок В серии имеет место в связи с тем, что хотя гранулярная структура характеризуется параметрами случайного распределения частиц по размерам, но для различных концентраций металлического сплава эти параметры остаются в узких пределах. Это подтверждается автоматизированным анализом изображений АСМ топографии поверхности плёнок, в том числе, и на различных масштабах. Изменение положения пика резонансной линии, по-видимому, происходит благодаря изменению геометрии частиц в объёме плёнки, причем с ростом концентрации металлического сплава частицы остаются обособленными друг от друга за счёт сформированной в процессе напыления немагнитной прослойки.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №21-72-20048).

Список использованных источников:

1. S. Bedanta, A. Barman, W. Kleemann et al. Magnetic Nanoparticles: A Subject for Both Fundamental Research and Applications // Journal of Nanomaterials. — 2013. — Vol. 2013 — Article ID 952540. — P.22.
2. Kotov L. N., Turkov V. K., Vlasov V. S. et al. Relaxation of magnetization in thin composite $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ films // Materials Science and Engineering. — 2006. — Vol. 442, No 1. — P. 352.
3. L. N. Kotov, V. A. Ustyugov et. al. Structure and FMR Characteristics of $(\text{CoFeB}+\text{SiO}_2)$ Magnetic Composite Films // Bulletin of the RAS: Physics, — 2023 — Vol. 87 — No. 3 — pp. 385–388.
4. J. Endo, S. Murakami, S. Fujii et. al. Microstructure and magnetic properties of co-ni thin film sputtered in nitrogen atmosphere //IEEE transactions on magnetics, — 1987 — Vol. MAG-23, — No. 5.
5. Buffler, C. R. Ferromagnetic resonance near the upper limit of the spin wave manifold / C. R. Buffler // J. Appl. Phys. — 1959. — Vol. 30, — no. 4. — P. 172S.

УДК 537.622.4

Влияние технологических параметров роста FeCo нанопроволок на их структурные и магнитные свойства

Хайретдинова Д.Р.

аспирант, лаборант-исследователь лаборатории интеллектуальных сенсорных систем
кафедры технологии материалов электроники НИТУ МИСИС

Долуденко И.М.

к.т.н., научный сотрудник лаборатории роста тонких пленок и неорганических наноструктур
ИК им. А.В. Шубникова КККиФ НИЦ «Курчатовский институт»

Волчков И.С.

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории роста тонких пленок и неорганических
наноструктур ИК им. А.В. Шубникова КККиФ НИЦ «Курчатовский институт»

Панина Л.В.

д.ф.-м.н., профессор кафедры технологии материалов электроники НИТУ МИСИС

Загорский Д.Л.

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории роста тонких пленок и неорганических
наноструктур ИК им. А.В. Шубникова КККиФ НИЦ «Курчатовский институт»

***Аннотация.** В работе исследованы структурные и магнитные свойства FeCo нанопроволок, полученных методом электрохимического синтеза в порах трековых мембран с различным диаметром пор при различных временах роста. Были выявлены немонотонные зависимости от длины таких параметров как размер кристаллитов и коэрцитивной силы, что объясняется эффектом аномального соосаждения железа.*

Ключевые слова: нанопроволоки, электрохимический синтез, аномальное соосаждение, коэрцитивная сила

Influence of technological parameters of FeCo nanowire growth on their structural and magnetic properties

Khairatdinova D.R.,

Postgraduate student, laboratory researcher, Laboratory of Intelligent Sensor Systems,
Department of Electronic Materials Technology, NUST MISIS

Doludenko I.M.,

Candidate of Technical Sciences, Researcher of laboratory of the growth of thin films and
inorganic nanostructures of A.V. Shubnikov Institute of Crystallography, KCC&F, NRC
«Kurchatov Institute»

Volchkov I.S.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of laboratory of the
growth of thin films and inorganic nanostructures of A.V. Shubnikov Institute of Crystallography,
KCC&F, NRC «Kurchatov Institute»

Panina L.V.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Department of Electronic Materials Technology, NUST MISIS

Zagorskiy D.L.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher of laboratory of the growth of thin films and inorganic nanostructures of A.V. Shubnikov Institute of Crystallography, KCC&F, NRC «Kurchatov Institute»

Annotation. *The structural and magnetic properties of FeCo nanowires obtained by electrochemical synthesis in the pores of track membranes with different pore diameters and growth times were investigated in the study. Non-monotonic dependencies of parameters such as crystallite size and coercive force were observed, which can be explained by the effect of anomalous iron co-deposition.*

Keywords: *nanowires, electrochemical synthesis, anomalous codeposition, coercive force*

Введение

Нанопроволоки (НП) из ферромагнитных материалов могут использоваться во множестве применений, например, в качестве постоянных микромагнитов, а также функциональных материалов для применения в электронике, спинтронике и медицине [1-2]. Интерес представляет как использование НП в ростовых матрицах, так и отдельных НП вне матрицы [3-4]. Одной из особенностей НП, полученных методом матричного синтеза, является возможность контроля их свойств с помощью регулировки режимов их получения (напряжения осаждения, плотности тока, состава электролитов), а также с помощью изменения геометрии матриц и их материала (диаметр пор, плотность пор). В совокупности методика матричного синтеза позволяет получать наноструктуры не только с заданными размерами, но также и свойствами [5]. Между тем, существует ряд проблем, связанных с получением НП таким методом. Во-первых, остаются не до конца изученными процессы электрохимического осаждения материалов в ограниченных объемах пор, например, эффект аномального соосаждения железа [6]. Эта проблема обуславливает элемент непредсказуемости структуры и геометрии получаемых материалов. Во-вторых, не является полностью отработанной технология получения НП с заданными геометрией и свойствами. Так, длина НП может влиять на кристаллическую структуру и магнитные свойства. В работе рассмотрены особенности получения FeCo НП и их влияние на структурные и магнитные свойства материала.

Материалы и методы

Массивы НП были получены методом электрохимического осаждения в поры промышленных трековых мембран (ТМ) из ПЭТФ (ОИЯИ, г. Дубна) толщиной 12 микрон. Плотность пор N (10^9 пор/ см^2) зависит от их диаметра D : $D = 100$ нм, $N = 1,2$; $D = 65$ нм, $N = 4,5$; $D = 30$ нм, $N = 9$.

Для получения НП использовался следующий электролит: $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 0,173$ М, $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 0,057$ М, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} - 0,168$ М. В электролите был использован ряд добавок: H_3BO_3 в качестве буферной добавки для поддержания рН электролита, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ для предотвращения окисления ионов Fe^{2+} в Fe^{3+} , $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4\text{Na}$ – поверхностно активное вещество, предотвращающее образование крупных пузырьков водорода и смачивающее поверхность мембраны. Подготовка ТМ к электрохимическому осаждению и само осаждение проводилось по методике, описанной в [7]. В качестве источника использовался потенциостат-гальваностат Ellins P-2X. В работе было получено 3 серии образцов НП с различными временами осаждения, которые определяли высоту фронта роста массива НП. Максимальное время осаждения определялось по хроноамперограммам. Анализ длин НП проводился на растровом

электронном микроскопе (РЭМ) JSM 6000 Plus. Рентгенофазовый анализ (РФА) НП проводился на порошковых дифрактометрах Miniflex-600 и X'PERT PRO MPD, с излучением $\text{CuK}\alpha = 0,154 \text{ нм}$. Магнитные свойства НП были исследованы методом вибрационной магнитометрии на модернизированном магнитометре МВ-07 в двух положениях поля – вдоль нормали к плоскости мембраны (ООР) и в плоскости мембраны (IP).

Обсуждение результатов

РЭМ образцов позволила определить среднюю длину НП в массиве, которая представлена на рис.1 в зависимости от времени роста.

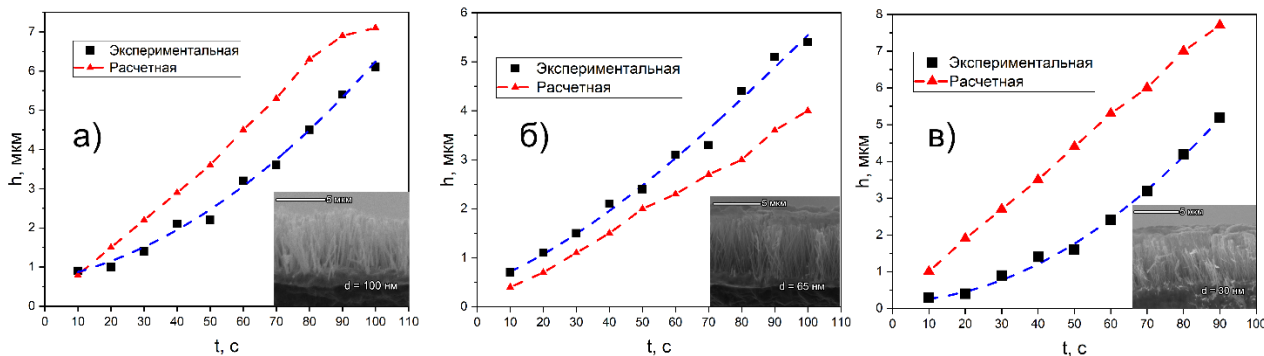


Рис.1. Зависимость длин НП от времени их роста для ТМ с диаметром пор а) 100 нм; б) 65 нм; в) 30 нм. На вставках приведены примеры полученных изображений.

Как видно, наблюдается небольшое отклонение от линейной зависимости, особенно для НП с меньшим диаметром.

Результаты РФА показали, что содержание Fe в составе НП зависит от длины (рис. 2). Для всех диаметров НП наблюдается отклонение содержания Fe относительно концентрации ионов Fe^{2+} (43 %) в электролите, что подтверждает эффект аномального соосаждения железа. Однако, для НП с диаметром 30 нм наблюдается стабилизация концентрации Fe по длине НП и приближение состава к эквиатомному. Кроме этого, средний размер кристаллитов в НП для всех диаметров также изменяется по мере увеличения их длины, что может быть связано не только с количеством Fe в составе, но и с ростовыми особенностями НП.

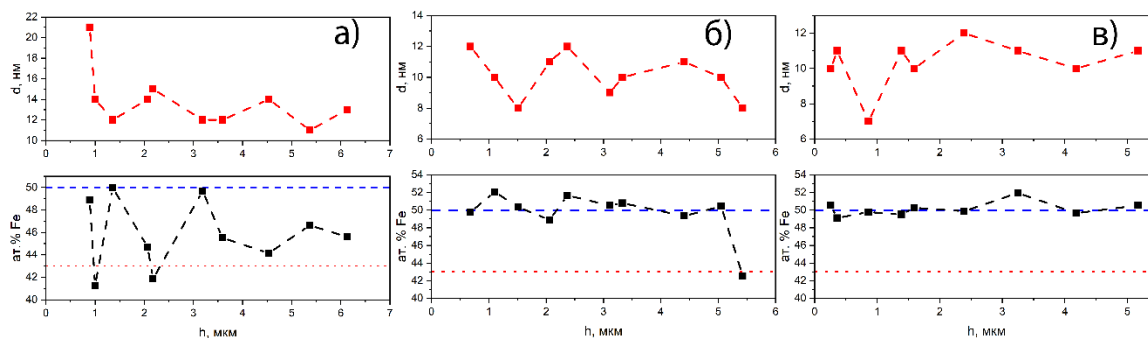


Рис. 2. Зависимости размера кристаллитов d и содержания Fe в составе НП от их длины: а) $D = 100 \text{ нм}$; б) $D = 65 \text{ нм}$; в) $D = 30 \text{ нм}$. Пунктирная красная линия на нижних рисунках соответствует содержанию железа в электролите

Исследования магнитных свойств показали, что величина коэрцитивной силы (H_c) сильно зависит от диаметра НП и от их длины (рис. 3).

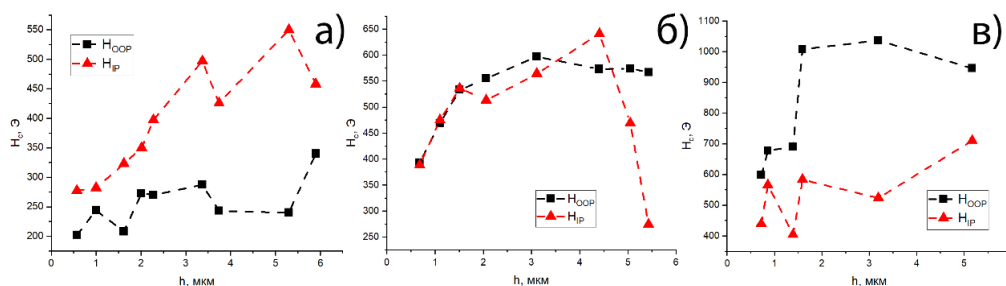


Рис. 3. Зависимости H_c в двух положениях поля для НП с диаметром а) 100 нм; б) 65 нм; в) 30 нм

Для НП с диаметром 100 нм характер изменения H_c коррелирует с изменением содержания Fe в составе НП. Наибольшие значения H_c наблюдаются для длины 5,3 мкм при IP направлении поля. Для НП с диаметром 65 нм зависимость H_c от длины при приложении поля в направлении OOP имеет более монотонный характер, причем наблюдается выход на плато при достижении длины приблизительно в 3 мкм. Зависимость H_c в поле IP имеет более сложный характер, при этом значения изменяются скачкообразно. Это может быть объяснено как нестройной сонаправленностью внешнего магнитного поля и плоскостью образца, так и отклонением содержания Fe в составе НП. Для НП с диаметром 30 нм зависимости также имеют немонотонный характер. Это может быть объяснено отклонением направления внешнего магнитного поля относительно положения OOP и IP образцов. Для всех длин НП значение H_c больше при поле, приложенном в направлении OOP. Максимальные значения $H_c = 1035$ Э наблюдаются при длине НП, равной 3,2 мкм.

Благодарности. Работа по получению НП и исследованию их структурных свойств проведена в рамках Государственного Задания НИЦ «Курчатовский институт». Магнитные измерения проведены на базе НИТУ МИСИС в рамках программы «Приоритет 2030» (проект К6-2022-043).

Список использованной литературы:

1. Moreno J.A., Bran C., Vazquez M. et al. Cylindrical Magnetic Nanowires Applications // IEEE Transactions on Magnetics. – 2021. – Т. 57. – № 4. – С. 800317.
2. Naud C., Thebault C., Carriere M. et al. Cancer treatment by magneto-mechanical effect of particles, review // Nanoscale Advances. – 2020. – Т. 2. – С. 3632.
3. Piraux L., Gomes T.D.C.S.C., Araujo F. A. et al. 3D magnetic nanowire networks // Magnetic Nano-and Microwires. – Woodhead Publishing, 2020. – с. 801-831.
4. Hangarter C.M., Rheem Y., Yoo B. et al. Hierarchical magnetic assembly of nanowires // Nanotechnology. – 2007. – Т. 18. – С. 205305.
5. Panina L.V., Zagorskiy D.L., Shymaskaya A. et al. 1D Nanomaterials in Fe-Group Metals Obtained by Synthesis in the Pores of Polymer Templates: Correlation of Structure, Magnetic, and Transport Properties // Physica Status Solidi A. – 2022. – Т. 219. – № 3. – С. 2100538.
6. Mansouri N., Benbrahim-Cherief N., Chainet E. et al. Electrodeposition of equiatomic FeNi and FeCo nanowires: Structural and magnetic properties. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2020. – Т. 493. – С. 165746.
7. Долуденко И. М. Особенности заполнения пор трековых мембран при синтезе нанопроволок из сплава FeNi //Перспективные материалы. – 2021. – №. 8. – С. 74-80.

УДК 314.748

Влияние легирования алюминием на структуру, магнитные и магнитотепловые свойства феррита магния**Лазарева Е.В.**

аспирант, Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

Киселева Т.Ю.

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

Худяков К.Е.

бакалавр, Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

Тяпкин П.Ю.

с.н.с., к.ф.-м.н. Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН

Иваненко И.П.

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

Марков Г.П.

С.н.с., к.ф.-м.н., Институт физики земли им.О.Ю.Шмидта

Григорьева Т.Ф.

Г.н.с., д.х.н., Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН

Уянга Э.

Др., руководитель группы, Институт физики и технологии Монгольской Академии наук

Жаргалан Н.

Др., руководитель лаборатории, Институт физики и технологии Монгольской Академии наук

Санга Д.

Академик, Институт физики и технологии Монгольской Академии наук

***Аннотация.** Методами сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской дифракции, Рамановской и Мессбауэровской спектроскопии, измерением полевых и температурных зависимостей намагниченности насыщения и магнитотеплового эффекта в переменном магнитном поле исследованы образцы $MgAl_xFe_{2-x}O_4$ ($x=0; 0,2; 0,3; 0,7$), синтезированные методом золь-гель. Изучено влияние увеличения концентрации алюминия на кристаллическую и магнитную структуру, магнитотермические свойства частиц феррита.*

***Ключевые слова:** ферриты, мессбауэровская спектроскопия, магнитотермия.*

Aluminum substitution influence on the structure, magnetic and magnetothermal properties of magnesium ferrite**Lazareva E.V.**

PhD student, Moscow M.V. Lomonosov State University, Faculty of Physics,

Kiseleva T.Yu.

Dr.Sci., associate professor, Moscow M.V. Lomonosov State University, Faculty of Physics,

Khudyakov K.E.

Bachelor, Moscow M.V. Lomonosov State University, Faculty of Physics

Тяпкин P.Yu.

PhD., senior researcher, Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS

Ivanenko I.P.

PhD, senior researcher, Moscow M.V. Lomonosov State University, Faculty of Physics

Markov G.P.

PhD., senior researcher, Schmidt' Institute of the Physics of the Earth

Grigoreva T.F.

Dr.sc., senior researcher, Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS

Uyanga E.

Dr.sci., Institute of Physics and Technology of the Mongolian Academy of Sciences

Jargalan N.

Dr.sci., Institute of Physics and Technology of the Mongolian Academy of Sciences

Sangaa D.

Academician, Institute of Physics and Technology of the Mongolian Academy of Sciences

Annotation. *MgAl_xFe_{2-x}O₄ (x=0; 0.2; 0.3; 0.7) samples were studied using scanning electron microscopy, X-ray diffraction, Raman and Mössbauer spectroscopy, and measuring the field and temperature dependences of saturation magnetization and the magneto-thermal effect in an alternating magnetic field. synthesized by the sol-gel method. The effect of increasing aluminum concentration on the crystalline and magnetic structure and magnetothermal properties of ferrite particles was studied*

Keywords: *ferrites, X-ray diffraction, Mössbauer spectroscopy, magnetotherapy*

Интерес к исследованию ферритов в виде субмикронных и наноразмерных частиц связан с наличием перспективы их применения в сфере биотехнологий, например, в качестве рабочих компонент композиционных систем для биосенсоров, контрастных агентов, компонент для магнитокоагуляционной терапии. Согласно публикациям в научной периодике, продолжаются работы по поиску оптимальных составов с выявлением физико-химических основ прогнозирования эффективности применения и возможности удешевления синтеза функциональных частиц.

Среди различных составов ферритов со структурой шпинели привлекательным является феррит магния MgFe₂O₄, который обладая подходящей температурой и скоростью нагрева в переменном магнитном поле для клинического применения, имеет наименьшую токсичность для организма. Однако продолжаются работы по оптимизации его функциональных характеристик и поиску путей управления функциональными свойствами [1-2].

Сложность исследований оксидных систем на основе компонентов, имеющих различные степени окисления, локальность прохождения реакций, наличие смешанных и метастабильных поверхностных состояний, размерные эффекты и нестехиометричность по кислороду, обуславливает необходимость применения методов, чувствительных к локальному окружению атомов, позволяющих исследовать структурные и размерные особенности на атомно-молекулярном уровне и их влияние на интегральные функциональные характеристики синтезированных частиц. Такими методами являются Мессбауэровская спектроскопия (МС), основанная на исследовании сверхтонких взаимодействий в структуре образца при взаимодействии с гамма-излучением, и спектроскопия комбинационного рассеяния (Рамановская спектроскопия (КР)), физические принципы которой обусловлены влиянием структурного и размерного состояния, поляризуемости субструктурных единиц при взаимодействии с когерентным лазерным излучением на частоту колебаний фононного спектра. Эти два метода в сочетании с методами электронной микроскопии и рентгеновской дифракции позволяют выявить структурно обусловленные особенности функционального магнитного поведения синтезированных частиц.

Целью настоящей работы являлось изучение влияния легирования алюминием на структурные, магнитные и магнитотермические свойства феррита магния, синтезированного методом золь-гель.

В работе исследовались образцы состава $MgAl_xFe_{2-x}O_4$ ($x=0.0, 0.2, 0.3$ и 0.7), синтезированные методом золь-гель. Водный золь был синтезирован из растворов стехиометрической смеси нитратов железа ($Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$), магния ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) и алюминия ($Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) в деионизированной воде. В этот раствор добавлялась лимонная кислота для увеличения растворения нитратов. Затем золь нагревался до $80^\circ C$ в течение 6 часов для образования геля. Далее образец подвергался отжигу при температуре $1200^\circ C$ в течение 1 часа.

Анализ структурно-морфологического состояния образцов проводился методом сканирующей электронной микроскопии. Изображения частиц были получены во вторичных электронах с помощью сканирующего электронного микроскопа Quanta 3D FEG FEI. Рентгенодифракционные исследования проводили на дифрактометре Panalytical Empyrean с использованием медного анода. Спектры комбинационного рассеяния (КР) снимали на спектрометре Raman Flex400 (PerkinElmer) с оптоволоконным зондом в геометрии отражения, длина волны возбуждения диодного лазера составляла 785 нм. Мессбауэровские спектры снимали на спектрометре MS1104Em с использованием Co (Rh) источника при комнатной температуре. Магнитные свойства (полевые зависимости намагниченности и их параметры) измеряли при комнатной температуре на вибрационном магнитометре VSM-7407 (LakeShore) в полях до 1.6 Тл. Магнитотермические свойства измеряли на лабораторном приборе во внешнем магнитном поле с частотой 70 кГц и интенсивностью 54,3 мТ. Температуру Кюри определяли по температурным зависимостям магнитной восприимчивости $\chi(T)$. Зависимость $\chi(T)$ при температурах выше комнатной регистрировалась с помощью измерителя температурных изменений магнитной восприимчивости (multi-function kappa-bridge - MFK1-FA, AGICO).

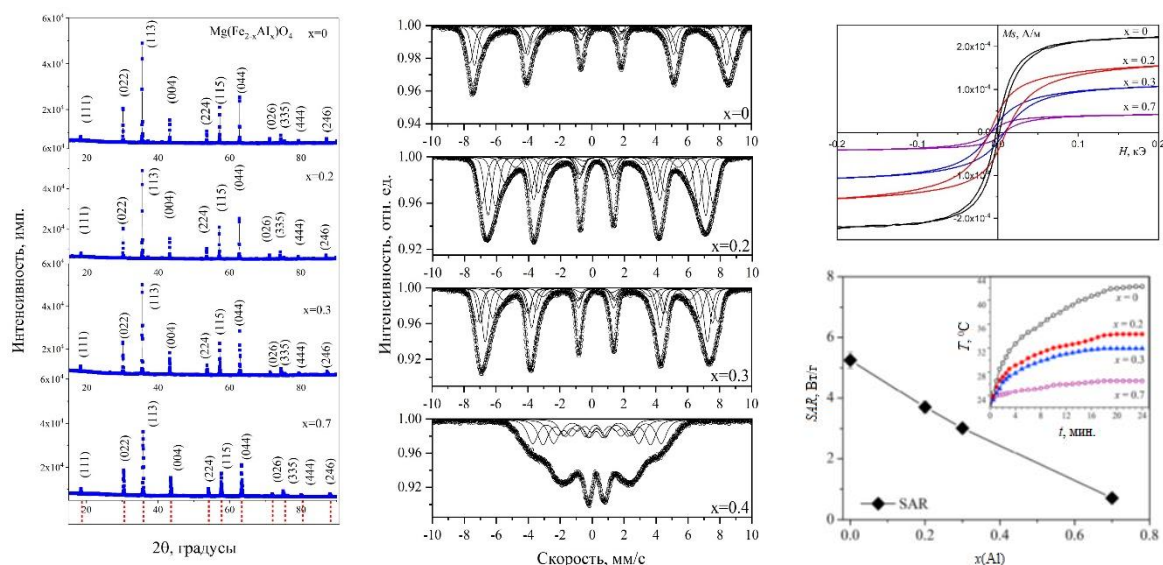


Рис. 1. Рентгендифрактограммы (а), Мессбауэровские спектры (б), полявые зависимости намагниченности (в), SAR и кривые разогрева в переменном магнитном поле (г)

В результате исследования установлено, что частицы синтезированы однофазными в кубической структуре шпинели ($Fd\text{-}3m$), при этом увеличение концентрации алюминия влияет на изменение кристаллической и магнитной структуры частиц. Происходит монотонное уменьшение параметра решетки в диапазоне 8.373 – 8.300 нм, что связано с эффектом замещения катионами меньшего радиуса и формированием более плотной структуры. Наблюдалось уменьшение среднего размера частиц и размеров зерна кристаллической фазы. Синтезированные частицы имели субмикронный размер 400-700 нм и размер областей когерентного рассеяния 130-240, что превышает критический размер магнитной однодоменности. Установлено, что алюминий в исследованном диапазоне концентраций распределяется в обеих подрешетках смешанной структуры магниевого феррита.

Установлено, что увеличение концентрации алюминия приводит к уменьшению среднего магнитного сверхтонкого поля на ядрах Fe $\langle H_{\text{эфф}}(A) \rangle$, $\langle H_{\text{эфф}}(B) \rangle$ и изомерного сдвига $I_s(A)$, $I_s(B)$ в обеих подрешетках, уменьшению общего магнитного момента. Общий магнитный момент уменьшается с увеличением концентрации алюминия, что связано с влиянием алюминия на катионное распределение железа по подрешеткам структуры феррита и ослаблением обменного магнитного взаимодействия.

Синтезированные частицы продемонстрировали магнитотермический эффект в переменном магнитном поле с частотой 70 кГц и величиной 54.3 мТ, при этом увеличение концентрации алюминия сказывается на уменьшении способности к разогреву в 5 раз с уменьшением величины температуры разогрева в два раза.

Список использованных источников:

1. Aono H. Development of nano-sized superparamagnetic ferrites having heat generation ability in an ac magnetic field for thermal coagulation therapy. // J. Ceram. society of Japan. -2014.- V. 122. - N. 4.- P. 237-240.
2. Khishigdemberel I., Uyanga E., Hirazawa H. et al. Structural, infrared and magnetic properties of $MgAl_xFe_{2-x}O_4$ compounds: Effect of the preparation methods and Al substitution. // Solid State Sciences.- 2020. -V. 109.- 106400.

УДК 537.86, 538.95

**Угловые зависимости параметров ФМР композитных плёнок
(CoTaNb+MgO/SiO₂)****Котов Л.Н.**

д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой радиофизики и электроники,
Сыктывкарский государственный университет

Блинов З.Н.

аспирант кафедры радиофизики и электроники,
Сыктывкарский государственный университет

Ковалёв П.Д.

магистр кафедры радиофизики и электроники,
Сыктывкарский государственный университет

Калинин Ю.Е.

д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры твердотельной электроники,
Воронежский государственный технический университет

Ситников А.В.

д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры твердотельной электроники,
Воронежский государственный технический университет

***Аннотация.** Исследованы угловые зависимости параметров (ширины и положения линии) ферромагнитного резонанса (ФМР) для двух серий композитных плёнок (CoTaNb+MgO/SiO₂) с разными концентрациями металлического сплава $x=0.32-0.85$, имеющих разную гранулярно-перколяционную структуру. Для композитных плёнок с разными x наблюдается рост параметров ФМР в зависимости от угла между постоянным магнитным полем и плоскостью плёнки, который зависит от микроструктуры плёнок. Установлено, что на основе поведения угловых зависимостей ширины линии и резонансного поля ФМР может быть получена информация о распределении ориентации магнитных гранул и микрообластей и о наличии выделенных направлений или о микроструктуре плёнок.*

***Ключевые слова:** ферромагнитный резонанс, угловые зависимости, композитные метал-диэлектрические плёнки, гранулярная, перколяционная структура*

Angular dependencies of FMR parameters composite films (CoTaNb+MgO/SiO₂)**Kotov L.N.**

Professor, Head. Dept. of Radiophysics and Electronics, Syktyvkar State University

Blinov Z.N.

Postgraduate student of the Dept. of Radiophysics and Electronics, Syktyvkar State University

Kovalev P.D.

Master of the Department of Radiophysics and Electronics, Syktyvkar State University

Kalinin Yu.E.

Dr. Sc., Professor of the Department of Solid State Electronics,

Voronezh State Technical University

Sitnikov A.V.Dr. Sc., Professor of the Department of Solid State Electronics,
Voronezh State Technical University

Annotation. *The angular dependences of the parameters (width and position of the line) of ferromagnetic resonance (FMR) were studied for two series of composite films (CoTaNb+MgO/SiO₂) with different concentrations of the metal alloy $x = 0.32-0.85$, having different granular-percolation structures. For composite films with different x , an increase in FMR parameters is observed depending on the angle between the constant magnetic field and the film plane, which depends on the microstructure of the films. It has been established that based on the behavior of the angular dependences of the linewidth and the FMR resonance field, information can be obtained on the distribution of the orientation of magnetic granules and microregions and on the presence of selected directions or on the microstructure of films.*

Keywords: *ferromagnetic resonance, angular dependences, composite metal-dielectric films, granular, percolation structure*

Композитные плёнки, состоящие из различных магнитных и немагнитных материалов, привлекают особое внимание благодаря их уникальным магнитоэлектрическим характеристикам, на базе которых можно создавать датчики высокой чувствительности к электрическим и магнитным полям. Перспективными материалами для подавления сверхвысокочастотных шумов также могут стать композитные магнитные плёнки [1]. Сильная зависимость свойств плёнок от направления постоянных и переменных магнитных полей по отношению к плоскости композитных плёнок усложняет задачу изменения магнитных свойств плёнок при действии на них электромагнитных полей, а также контроля над этими свойствами. Для того, чтобы определить возможность применения в этих устройствах композитных плёнок, важно знать зависимости интенсивности поглощения электромагнитных полей плёнками от угла φ между плоскостью плёнки и направлением постоянного магнитного поля. В данной работе проведены исследования концентрационных и угловых зависимостей параметров (положения и ширины линии) ферромагнитного резонанса (ФМР) металл-диэлектрических композитных плёнок с разными концентрациями металлических сплавов x : $\{[(\text{Co}_{0.84}\text{Nb}_{0.14}\text{Ta}_{0.02})_x(\text{MgO})_{1-x}], x=0.32-0.79\}$, $\{[(\text{Co}_{0.84}\text{Nb}_{0.14}\text{Ta}_{0.02})_x(\text{SiO}_2)_{1-x}], x=0.31-0.72\}$.

Напыление плёнок осуществлялось на лавсановый лист с размерами $210 \times 295 \text{ мм}^2$ методом ионной бомбардировки мишеней из металлического сплава $\text{Co}_{0.84}\text{Nb}_{0.14}\text{Ta}_{0.02}$ и диэлектриков MgO , SiO_2 [2, 3]. Измерения химического состава и толщины композитных плёнок проводились на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA3 LMH. Анализ результатов эксперимента был сделан с учётом изображений рельефа и магнито-фазового контраста (МФК) поверхности композитных плёнок, полученных с помощью атомно-силового микроскопа NT-MDT (Россия) (рис. 1) [2,3]. Изучение микроструктуры плёнок (CoTaNb+SiO₂/MgO) на основе полученных изображений магнито-фазового контраста показало, что композитные плёнки с малой концентрацией $x = 0.32 - 0.44$ обладают гранулированной структурой (рис. 1, a), а при $x = 0.45 - 0.74$ имеют гранулярно-перколяционную структуру, которая может иметь ярко выраженную полосовую магнитную структуру (рис.1, b). Для получения спектров ФМР был использован радиоспектрометр ЭПР РЭ-1306. Исследуемые образцы помещались в резонатор, в котором возбуждались СВЧ стоячие волны. Источником СВЧ излучения являлся клистронный генератор, настроенный на частоту 9.36 ГГц. При угле $\varphi = 0$ постоянное и переменное магнитные поля лежали в плоскости плёнки и были перпендикулярно друг другу.

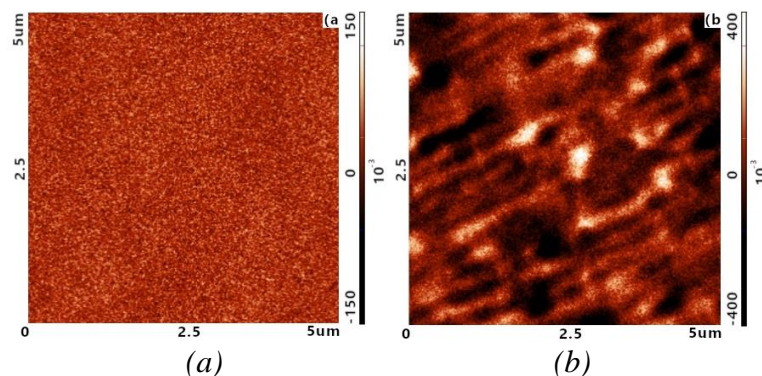
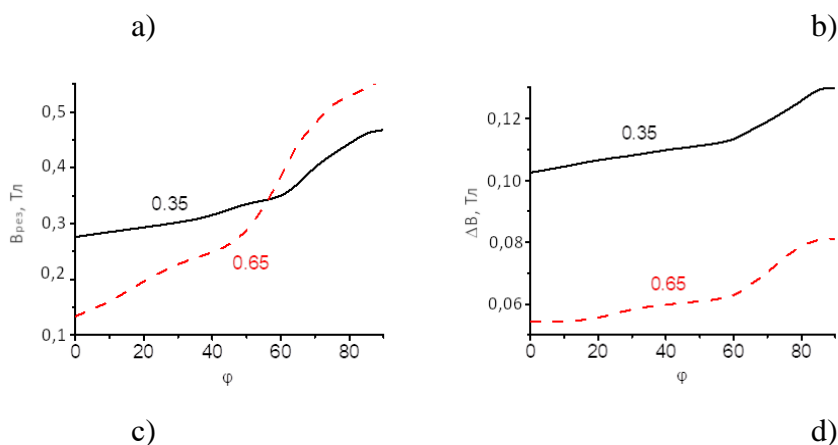


Рис.1. Изображения магнито-фазового контраста композитных плёнок ($CoFeB+MgO$) с концентрациями $x=0.35$ (a), 0.66 (b).

На рис. 2 приведены угловые зависимости резонансного поля и ширины линии ФМР для плёнок двух серий с разными диэлектриками ($CoFeB+SiO_2/MgO$) с концентрациями металлического сплава x (в атомных долях) $=0.34, 0.35$ (a, b); $0.65, 0.66$ (c, d). Выбор плёнок с такими концентрациями x для получения угловых зависимостей, обусловлен тем, что для плёнок с $x=0.35$ свойственна доперколяционная или гранулированная структура. А для плёнок с $x=0.66$ характерна гранулярно-перколяционная структура, для которой имеется большое число протяжённых металлических областей, лежащих в плоскости плёнки (рис.1, b). Как видно из рис. 2, для плёнок с разной x , при увеличении угла φ наблюдается рост параметров ФМР: резонансного поля $V_{рез}$ и ширины линии ΔB . Весь рабочий интервал углов можно разделить на два участка с медленным и быстрым ростом параметров ФМР от угла φ . Для плёнок ($CoTaNb+SiO_2$) с концентрацией $x=0.35$ граница этих участков на зависимости $V_{рез}(\varphi)$ наблюдается при $\varphi=63^\circ$, а для плёнок с $x=0.65$ граничный угол $\varphi=50^\circ$ (рис.2, a, b). Для зависимостей $\Delta B(\varphi)$ изменение граничного угла намного меньше. Такое поведение $V_{рез}(\varphi)$ свидетельствует о том, что при увеличении угла φ имеется разный рост внутреннего размагничивающего поля магнитных гранул и микрообластей и он изменяется при малой и большой концентрации x . При концентрациях ниже 0.35 магнитные гранулы ориентированы хаотично относительно плоскости плёнки, тогда как при $x > 0.65$ магнитные микрообласти находятся в плоскости плёнки. Аналогичное поведение на зависимости параметров ФМР от угла φ наблюдается и для плёнок с другим диэлектриком ($CoTaNb+MgO$) (рис.2, c, d). Это скорее всего связано с тем, что в этих двух сериях композитных плёнок используются разные диэлектрики SiO_2 и MgO , которые обладают разной проводимостью и имеют разные концентрации металлического сплава x , при которых начинаются процессы перколяции при напылении плёнок.



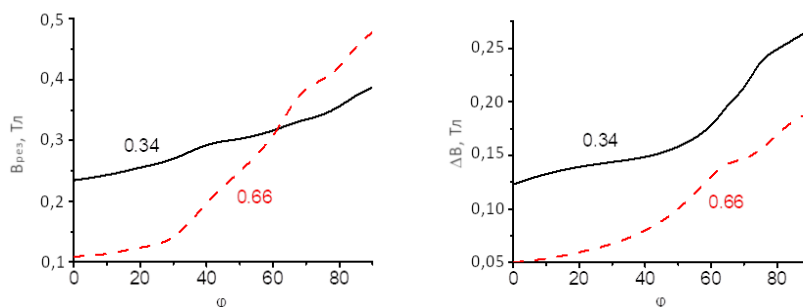


Рис. 2. Угловые зависимости резонансного поля $B_{рез}$ и ширины линии ФМР ΔB композитных плёнок ($CoFeB+MgO$) при концентрациях $x=0.35$ (a, b), 0.66 (c, d).

В результате проведённых исследований были выявлены общие закономерности поведения угловых зависимостей. В их число входит увеличение значения резонансного поля $B_{рез}$ и ширины линии ΔB при росте угла между плоскостью плёнки и направлением постоянного магнитного поля. Анализ угловых зависимостей резонансного поля и ширины линии ФМР показал, что на их поведение большое влияние оказывает микроструктура плёнок, особенно, в области концентраций металлического сплава x , при которых наблюдаются структурные переходы, например, от гранулированной к гранулярно-перколяционной структурам композитных плёнок. Результаты работы показывают, что угловые зависимости ширины линии и резонансного поля ФМР могут дать информацию о распределении ориентации магнитных гранул и микрообластей и о их выделенных направлениях.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда, проект №21-72-20048.

Список использованных источников:

1. Ki Hyeon Kim, Shinji Ikeda, Masahiro Yamaguchi, Ken-Ichi Arai. Soft Magnetic Thin Films FeCoHfO for High-Frequency Noise Suppression Applications // Chinese Physics Letters. – 2010. – № 27. – P. 097501-1–097501-4.
2. Kotov L., Vlasov V., Kovalev P. et al, Ferromagnetic Resonance in Nanocomposite MetalDielectric Films With Different types of the Structure // 2023 IEEE International Conference on Next Generation Electronics (NEleX 2023). | 979-8-3503-1908-8/23
3. Котов Л.Н., Устюгов В.А., Власов В.С., Уткин А.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В. Структура и ФМР характеристики магнитных композитных пленок ($CoFeB+SiO_2$) // Известия РАН, Серия физическая – 2023 – т. 87 – No. 3 – с. 441–445.

УДК 537.9

Исследование магнитной структуры ε -Fe₂O₃ методами ядерно-резонансной спектроскопии

Гервиц Н.Е.

к.ф.-м.н., научный сотрудник Лаборатории ЯМР твердого тела Физического института им. П.Н. Лебедева

Ткачев А.В.

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Лаборатории ЯМР твердого тела Физического института им. П.Н. Лебедева

Журенко С.В.

младший научный сотрудник Лаборатории ЯМР твердого тела Физического института им. П.Н. Лебедева

Старчиков С.С.

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Института кристаллографии им. А.В. Шубникова, Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники, НИЦ «Курчатовский институт»

Горбачев Е.А.

к.х.н старший преподаватель Факультета наук о материалах, МГУ-ППИ в Шэньчжэне

Гиппиус А.А.

д.ф.-м.н., профессор Кафедры физики низких температур и сверхпроводимости МГУ им. М.В. Ломоносова

***Аннотация.** Эпсилон-фаза оксида железа, которую ранее считали метастабильной, все чаще обнаруживается в горных породах и искусственных материалах. Из всех полиморфов Fe₂O₃ ε -Fe₂O₃ характеризуется наиболее интересным сочетанием уникальных магнитных свойств, прежде всего высокой коэрцитивной силой (20кЭ), сравнительно большой остаточной намагниченностью при малом размере частиц в нанометровом диапазоне. Магнитная структура оксида подлежит дальнейшему уточнению, для чего в данной работе мы впервые используем ЯМР-спектроскопию в нулевом поле на ε -Fe₂O₃ с целью непосредственного определения профиля магнитного поля на атомах железа. Исследование важно как для дальнейшего использования соединения в прикладных целях, так и с точки зрения фундаментальной науки.*

***Ключевые слова:** магнитные наночастицы, наноструктуры, ферримагнетизм, ε -Fe₂O₃, ЯМР, Мёссбауэровская спектроскопия*

Study of the magnetic structure of ε -Fe₂O₃ using nuclear resonance spectroscopy

Gervits N. E.

Ph.D, Researcher of the Solid State NMR Laboratory, Lebedev Physical Institute

Tkachev A.V.

Ph.D, Senior Researcher of the Solid State NMR Laboratory, Lebedev Physical Institute

Zhurenko S.V.

Junior Researcher of the Solid State NMR Laboratory, Lebedev Physical Institute

Starchikov S.S.

Ph.D, Leading Researcher of the A.V. Shubnikov Institute of crystallography of Kurchatov Complex of Crystallography and photonics, NRC “Kurchatov Institute”

Gorbachev E.A.

Ph.D, Senior Lecturer Department of Materials Science, Shenzhen MSU-BIT University

Gippius A.A.

D.Sc., Professor of the Low Temperature Physics and Superconductivity Department, Department of Physics, Moscow State University

Annotation. *The epsilon phase of iron oxide, previously thought to be metastable, is found in rocks and artificial materials. Of all the Fe₂O₃ polymorphs, only ε-Fe₂O₃ is characterized by a combination of unique magnetic properties, primarily a high coercive force (20 kOe), a relatively large remanent magnetization for a small particle size in the nanometer range. The magnetic structure of the oxide is subject to further clarification, for which in this work we use zero-field NMR spectroscopy on ε-Fe₂O₃ for the first time to obtain directly the profile of the local magnetic field on iron atoms. The study is important both for the further use of the compound for applied purposes and from the point of view of fundamental science.*

Keywords: *magnetic nanoparticles, nanostructures, ferrimagnetism, ε-Fe₂O₃, NMR, Mössbauer spectroscopy*

ε-Fe₂O₃ представляет собой редкую полиморфную модификацию оксида железа(III), привлекающую все больший интерес благодаря своим уникальным магнитным свойствам, сочетающим чрезвычайно высокую коэрцитивную силу и относительно большую намагниченность насыщения [1].

Ранее считалось, что ε-Fe₂O₃ это неколлинеарный четырехподрешеточный ферримагнетик, вероятно, пьезоэлектрик, с тремя октаэдрически и одной тетраэдрически координированными подрешетками, расположенными таким образом, что спины Fe в тетраэдрической подрешетке наклонены относительно спинов в октаэдрических [2]. Температура фазового перехода в парамагнитное состояние составляет около 490 К.

Однако магнитная структура ε-Fe₂O₃ до сих пор остается предметом дискуссии. Первоначальная оценка была подвергнута сомнению: предполагается, что при 300 К в тетраэдрической подрешетке не происходит схода спинов, а результирующая намагниченность ε-Fe₂O₃ просто обусловлена некомпенсированным магнитным моментом спинов в тетраэдрической и одной из октаэдрических подрешеток, в то время как моменты двух других октаэдрических подрешеток компенсируют друг друга [3]. Кроме того, ε-Fe₂O₃ демонстрирует интересное и еще не до конца изученное поведение при низких температурах.

Применение методов ядерного резонанса – Мёссбауэровской и ЯМР-спектроскопии позволяет углубить наше представление о магнитной структуре и потенциальных возможностях применения наноразмерного оксида ε-Fe₂O₃, в частности, напрямую определить профиль локального магнитного поля на атомах железа

Список использованной литературы:

1. Libor Machala, Jiří Tuček, Radek Zbořil. Polymorphous Transformations of Nanometric Iron(III) Oxide// Chem. Mater. –2011. –V. 23. –No 14. –P. 3255–3272
2. E. Tronc, C. Chanéac, J. P. Jolivet et. al. Spin collinearity and thermal disorder in ε-Fe₂O₃ // J. Appl. Phys. – 2005. –V.98. –P. 053901
3. Corbellini L., Lacroix C., Ménard D. et al. The effect of Al substitution on the structural and magnetic properties of epitaxial thin films of epsilon ferrite// Scripta Materialia –2017. –V. 140. – P. 63-66

УДК 539.216.2, 537.621.2

Микроструктура и магниторезистивные свойства сверхрешеток CoFeNi/Cu и CoFeNi/CuIn с различным числом слоев

Найданов И.А.

младший научный сотрудник лаборатории квантовой наноспинтроники ИФМ УрО
РАН

Миляев М.А.

д.ф.-м. н., заведующий лабораторией квантовой наноспинтроники ИФМ УрО РАН

Проглядо В.В.

научный сотрудник лаборатории квантовой наноспинтроники ИФМ УрО РАН

Аннотация.

Структурные особенности магнитных сверхрешеток с эффектом гигантского магнитосопротивления могут оказывать значительное влияние на их функциональные характеристики. В работе продемонстрировано послойное изменение микроструктурных и магниторезистивных свойств сверхрешеток $Co_{77}Fe_{17}Ni_6/Cu$ и $Co_{77}Fe_{17}Ni_6/Cu_{96}In_4$. Показано, что использование медно-индиевых прослоек положительно сказывается на магниторезистивных свойствах исследуемых объектов.

Ключевые слова: *магнитные сверхрешетки, эффект гигантского магнитосопротивления, размер кристаллитов, шероховатость интерфейсов, гистерезис*

Microstructure and magnetoresistive properties of CoFeNi/Cu and CoFeNi/CuIn multilayers with different number of layers

Naydanov I.A.

Junior Researcher of the Laboratory of Quantum Nanospintronics, Institute of Metal Physics
Ural Branch of RAS

Milyaev M.A.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Quantum
Nanospintronics, Institute of Metal Physics Ural Branch of RAS

Proglyado V.V.

Researcher of the Laboratory of Quantum Nanospintronics, Institute of Metal Physics Ural
Branch of RAS

Annotation. *Structural properties of magnetic multilayers with giant magnetoresistance effect can have significant influence on their functional characteristics. In this work, the layer-by-layer variation of microstructural and magnetoresistive properties of $Co_{77}Fe_{17}Ni_6/Cu$ and $Co_{77}Fe_{17}Ni_6/Cu_{96}In_4$ multilayers is demonstrated. It is shown that the use of copper-indium interlayers has a positive effect on the magnetoresistive properties of the studied objects.*

Keywords: *magnetic multilayers, giant magnetoresistance effect, crystallite size, interface roughness, hysteresis*

Магнитные сверхрешетки, обладающие эффектом гигантского магнитосопротивления, используются в различных приложениях в качестве материалов, чувствительных к магнитным полям. Один из способов получения большой чувствительности в области магнитных полей до 1000 Э состоит в использовании немагнитных прослоек в сверхрешетках, толщины которых соответствуют второму максимуму межслойного обменного взаимодействия РККИ типа, что приводит к уменьшению межслойного взаимодействия между ферромагнитными слоями. Поскольку константа обменного взаимодействия при таких толщинах прослоек ослаблена, по сравнению с величиной обменного взаимодействия соответствующего первому максимуму антиферромагнитного упорядочения, существенное влияние на магниторезистивные свойства сверхрешеток оказывают также и структурные особенности пленок. Управление структурными свойствами возможно путем вариации материалов напыляемых слоев в сверхрешетках.

В работе показано, что замена медных прослоек в сверхрешетках $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$ на прослойки $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ приводит к уменьшению размеров кристаллитов. На рис. 1 представлены снимки поверхности сверхрешеток БС/ $[\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6(15)/\text{Cu}(22)]_5/\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6(15)/\text{Ta}(50)$ (образец 1) и БС/ $[\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6(20)/\text{Cu}_{96}\text{In}_4(20)]_5/\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6(20)/\text{Ta}(50)$ (образец 2), полученных на атомно-силовом микроскопе, где БС = $\text{Ta}(50)/(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}(50)$. В скобках указаны толщины слоев в Å. Образцы были подготовлены методом магнетронного распыления. Толщины немагнитных прослоек и ферромагнитных слоев подбирались таким образом, чтобы сверхрешетки обладали максимальным магнитосопротивлением (МС). Уменьшение размеров кристаллитов при увеличении концентрации In в медно-индиевом сплаве также наблюдалось и в объемных образцах CuIn , что авторы связывают с отрицательной энтальпией смешения сплава [1]. Нами также было обнаружено, что с изменением размеров кристаллитов при замене немагнитных прослоек меди на прослойки $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ наблюдается изменение гистерезиса магнитосопротивления ΔH (рис. 2 (а)). В случае использования медно-индиевых прослоек в сверхрешетках ΔH значительно уменьшается, что согласуется с работой [2], в которой показана прямая зависимость гистерезиса магнитных материалов от размеров кристаллитов.

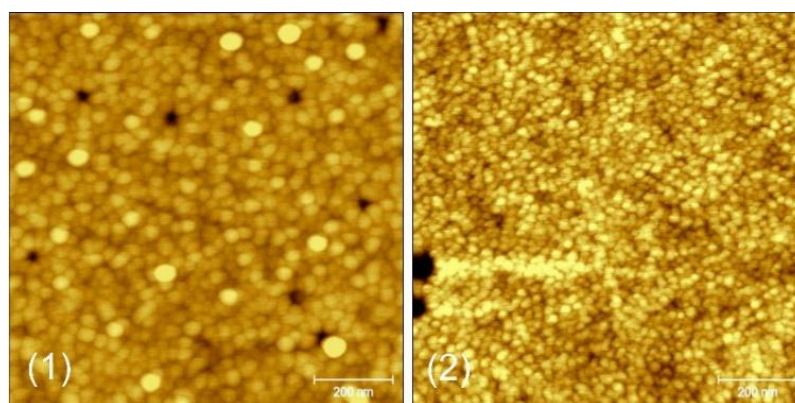


Рис. 1. АСМ снимки поверхности сверхрешеток образцов (1) и (2).

Для анализа послойного изменения магниторезистивных и микроструктурных свойств сверхрешеток были подготовлены две серии образцов с прослойками Cu и $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$, в которых менялось суммарное количество ферромагнитных слоев и немагнитных прослоек N . Толщины слоев для сверхрешеток с прослойками Cu и $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$, соответствовали толщинам образцов (1) и (2) соответственно. На рис. 2 (б) представлена зависимость МС сверхрешеток с Cu и $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$

от N . В двух сериях образцов наблюдается увеличение МС с добавлением в композицию наноструктур ферромагнитных слоев. В случае сверхрешеток с медными прослойками при $N = 3$ и 4 величина МС составляет менее 2%, что говорит об отсутствии в них антиферромагнитного порядка. Для сверхрешеток $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ при $N = 3$ и 4 такого явления не наблюдается.

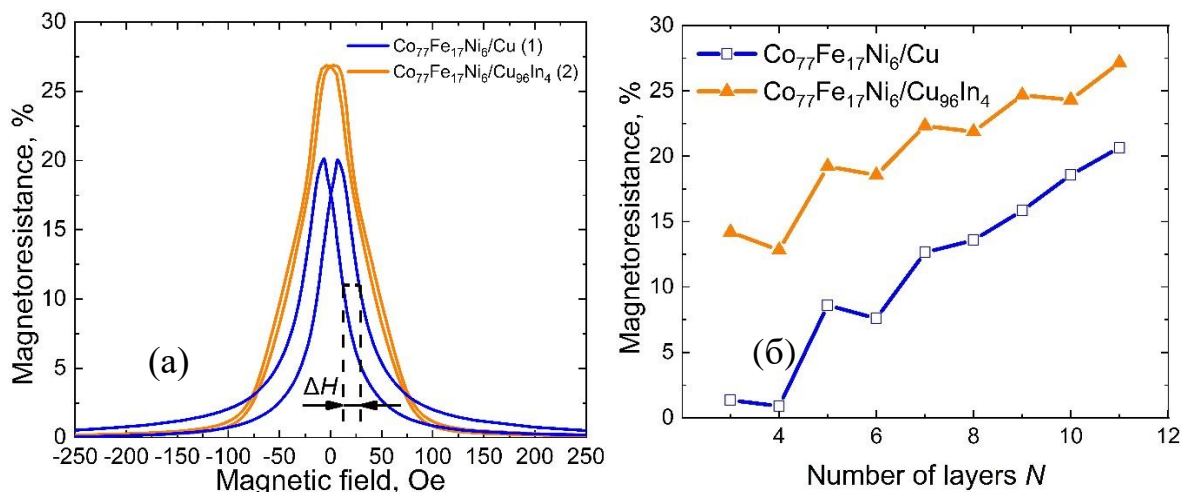


Рис. 2. Кривые магнитосопротивления образцов (1) и (2) (а) и зависимость магнитосопротивления сверхрешеток с прослойками Cu и $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ от числа слоев N (б).

Для сверхрешеток $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$ с числом $N = 11$, также обнаружена тенденция к формированию ферромагнитного порядка. Как показано на рис. 3 (а), при толщинах ферромагнитных слоев больше 17 \AA МС резко уменьшается, что говорит о формировании ферромагнитного упорядочения в наноструктурах. Помимо этого, из зависимости шероховатости поверхности двух серий сверхрешеток с прослойками Cu и $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ от N (рис. 3 (б)) видно, что с увеличением числа слоев наблюдается большее возрастание амплитуды шероховатости сверхрешеток $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$, по сравнению с образцами с медно-индиевыми прослойками. Причина подавления антиферромагнитной межслойной связи между ферромагнитными слоями в таких наноструктурах, вероятно, заключается в наличии более шероховатых интерфейсов в сверхрешетках с медными слоями, что облегчает переход в ферромагнитное состояние при возрастании магнитостатического взаимодействия за счет увеличения толщины магнитных слоев. Похожие результаты связанные с уменьшением шероховатости интерфейсов были получены на сверхрешетках Co/Cu при напылении буферного монослоя Ag , что обусловлено меньшим значением поверхностной свободной энергии Ag , по сравнению с Co и Cu [3]. Наличие малых значений шероховатости интерфейсов в сверхрешетках $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ может быть также вызвано малой поверхностной свободной энергией индия [4]. Стоит отметить, что использование сплава CuIn для немагнитных прослоек с концентрации индия больше 8 ат. % приводит к разрушению антиферромагнитного порядка [5]. Таким образом, замена медных прослоек в сверхрешетках на медно-индиевые может приводить к улучшению магниторезистивных свойств только в случае небольших концентраций индия в сплаве.

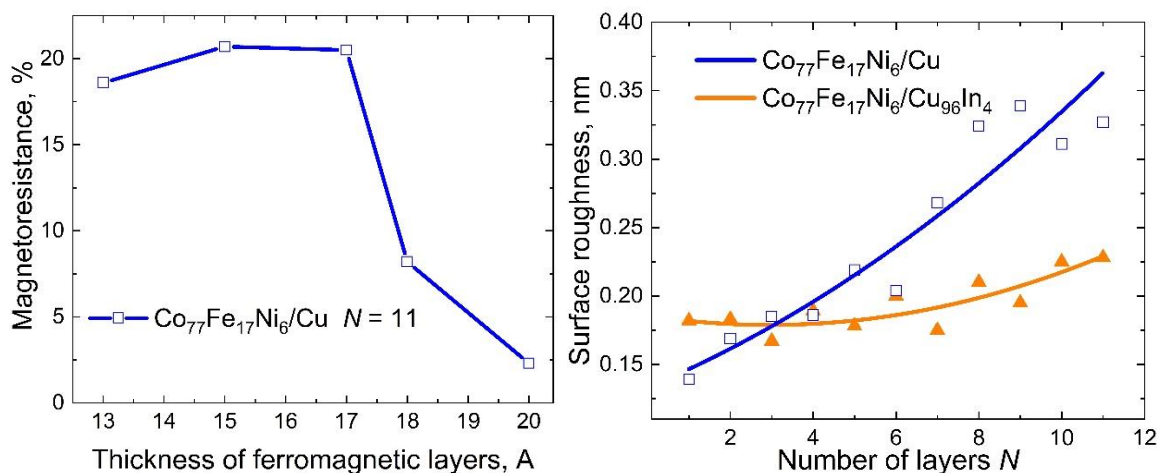


Рис. 3. Зависимость магнитосопротивления $\text{Co}_{77}\text{Fe}_{17}\text{Ni}_6/\text{Cu}$ при $N = 11$ от толщины магнитных слоев (а) и зависимость шероховатости поверхности сверхрешеток с прослойками Cu и $\text{Cu}_{96}\text{In}_4$ от числа слоев N .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-12-20022)

Список использованной литературы:

1. Straumal B.B., Kilmametov A.R., et. al. Transformations of Cu(in) supersaturated solid solutions under high-pressure torsion // *Materials Letters*. –2015. –Vol. 138. –P. 255–258.
2. Imry Y., Ma S.-K. Random-field instability of the ordered state of continuous symmetry // *Phys. Rev. Lett.* –1975. –Vol. 32. –P. 1399–1401.
3. Amir S.M., Mukul Gupta, et. al. Surfactant controlled interface roughness and spin-dependent scattering in Cu/Co multilayers // *Appl Phys A*. –2013. –Vol. 111. –P. 495–499.
4. Tyson W.R., Miller W.A. Surface free energies of solid metals estimation from liquid surface tension measurements // *Surface Science*. –1977. –Vol. 62. –P. 267–276.
5. Milyaev M.A., Naumova L.I., et. al. Advantages of using $\text{Cu}(1-x)\text{In}_x$ alloys as spacers in GMR multilayers // *Journal of Alloys and Compound*. –2022. –Vol. 917. –№165512.

УДК 537.633.9

Влияние концентрации металлической фазы на магниторезистивные свойства гранулированных композитов $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ и $(\text{CoFe})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$

Трегубова Т.В.

м.н.с, Воронежский Государственный Технический Университет

Стогней О.В.

д.ф.-м.н., профессор, Воронежский Государственный Технический Университет

Трегубов И.М.

к.ф.-м.н., доцент Воронежский Государственный Технический Университет

***Аннотация.** Исследованы электрические и магниторезистивные свойства, а также структура тонкопленочных композитов $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ и $(\text{CoFe})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ в широком диапазоне концентраций металлической фазы ($17 \text{ ат.}\% < x < 64 \text{ ат.}\%$ и $18 \text{ ат.}\% < x < 40 \text{ ат.}\%$, соответственно). Присутствие циркония в металлической фазе не влияет на величину магниторезистивного эффекта. Выявлено формирование нанокристаллической фазы CoFe в композитах обеих систем.*

***Ключевые слова:** композиты, тонкие пленки, магнитосопротивление, электрические свойства, структура*

Influence of metal phase content on magnetoresistive properties of granular composites $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ AND $(\text{CoFe})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$

Tregubova T.V.

RA, Voronezh State Technical University

Stognei O.V.

Dr. Sci., Prof., Voronezh State Technical University

Tregubov I.M.

Ph.D, assistant professor, Voronezh State Technical University

***Annotation.** Electrical, magnetoresistive properties and structure were studied of thin-film composites $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ and $(\text{CoFe})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ were studied in a wide range of metal phase concentrations ($17 \text{ ат.}\% < x < 64 \text{ ат.}\%$ and $18 \text{ ат.}\% < x < 40 \text{ ат.}\%$). The presence of zirconium in the metal phase does not affect the magnitude of the magnetoresistive effect. The formation of a nanocrystalline CoFe phase in composites of both systems was revealed.*

***Keywords:** composites, thin films, magnetoresistance, electric properties, structure*

Наногранулированные тонкопленочные композиты $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ и $(\text{CoFe})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ были получены методом ионно-лучевого распыления составной мишени с неравномерным расположением навесок MgF_2 на поверхности основания из металлического сплава CoFeZr в атмосфере аргона. Это позволило получить за один цикл синтеза композиты $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ с содержанием металлической фазы от 17 ат.% до 64 ат.% и композиты

$(\text{CoFe})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ – 18 – 40 ат.%. В качестве подложек для исследования электрических и магниторезистивных свойств использовали пластины ситалла СТ-50, для рентгенодифракционных исследований – стеклянные подложки. Толщина полученных пленок составила 0,8 - 2,8 мкм.

Анализ зависимостей удельного электрического сопротивления исследованных композитов от содержания металлической фазы показал, что они являются перколяционными системами. Установлено, что порог протекания (состав композита, при котором происходит резкое уменьшение удельного сопротивления) незначительно смещается «в металлическую» область при добавлении в металлическую фазу (Me) циркония. Порог перколяции составляет 25 ат.% Me в системе $(\text{CoFe})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ и 30 ат.% Me в системе $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$. Максимум магниторезистивного (MR) эффекта в композитах соответствует порогу перколяции (рис.1) (добавление Zr приводит к его сдвигу в область с высокой концентрацией металлической фазы) при этом, максимальное значение MR не чувствительно к добавлению циркония. В обеих системах максимальное значение MR достигает 3,9 %. Полученные результаты обсуждаются в рамках модели спин-зависимого туннелирования.

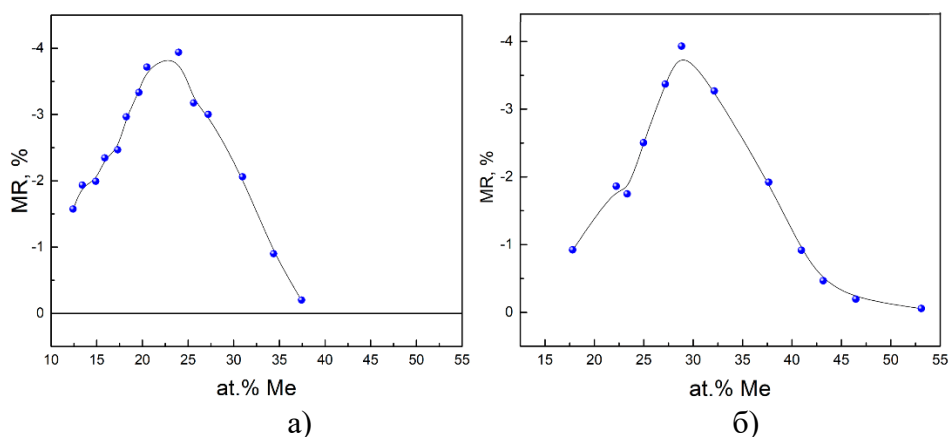


Рис.1. Концентрационные зависимости магнитосопротивления нанокompозитов и $(\text{CoFe})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ (а) $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ (б).

По данным рентгеновской дифрактометрии в обеих системах в процессе напыления формируются нанокристаллические фазы: металлическая – с решёткой CoFe (размер нанокристаллитов 5-10 нм) и диэлектрическая – с решеткой MgF_2 (размер нанокристаллитов 2-4 нм). С повышением концентрации CoFe и CoFeZr в композитах степень кристалличности металлических фаз повышается, причем, более интенсивно для композитов без циркония; а степень кристалличности фазы MgF_2 снижается – более интенсивно для композитов, содержащих цирконий.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2023-0006)

УДК 537.9+537.6

Мёссбауэровские и ЯМР-исследования железных нанопроволок, имеющих различные диаметры**Перунов И.В.**м.н.с., Отделение «Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова» НИЦ
«Курчатовский институт»**Фролов К.В.**в.н.с., к.ф.-м.н., Отделение «Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова» НИЦ
«Курчатовский институт»**Загорский Д.Л.**в.н.с., к.ф.-м.н., Отделение «Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова» НИЦ
«Курчатовский институт»**Долуденко И.М.**м.н.с., к.т.н., Отделение «Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова» НИЦ
«Курчатовский институт»**Гребёнев В.В.**с.н.с., к.ф.-м.н., Отделение «Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова» НИЦ
«Курчатовский институт»**Гиппиус А.А.**профессор, д.ф.-м.н., МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет,
г.н.с., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН**Лупандин Л.М.**

студент магистратуры, МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет

Ткачев А.В.

в.н.с., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Журенко С.В.

м.н.с., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Чуев М.А.д.ф.-м.н., зав. лаб. физики поверхности микроструктур, ФТИАН им. К.А.
Валиева РАН

Аннотация. Нанопроволоки из железа и его сплавов являются перспективными материалами, их магнитные свойства недостаточно хорошо изучены и продолжают интересовать исследователей. В настоящей работе представлены результаты исследования нанопроволок из чистого железа с помощью мёссбауэровской спектроскопии и ЯМР.

Ключевые слова: наноструктуры, магнитные нанопроволоки, магнитные свойства, мёссбауэровская спектроскопия, железо, ЯМР-спектроскопия.

Mossbauer and NMR studies of iron nanowires with different diameters**Perunov I.V.,**

junior scientific researcher, Department of the Shubnikov Institute of Crystallography of the National Research Centre "Kurchatov Institute"

Frolov K.V.,

leading scientific researcher, PhD in Physics and Mathematics, Department of the Shubnikov Institute of Crystallography of the National Research Centre "Kurchatov Institute"

Zagorsky D.L.,

leading scientific researcher, PhD in Physics and Mathematics, Department of the Shubnikov Institute of Crystallography of the National Research Centre "Kurchatov Institute"

Doludenko I.M.,

junior scientific researcher, Ph.D. of Engineering Sciences, Department of the Shubnikov Institute of Crystallography of the National Research Centre "Kurchatov Institute"

Grebenev V.V.,

senior scientific researcher, PhD in Physics and Mathematics, Department of the Shubnikov Institute of Crystallography of the National Research Centre "Kurchatov Institute"

Gippius A.A.,

Holder of an Advanced Doctorate (Doctor of Science) in Physics and Mathematics, professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics,

leading scientific researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences

Lupandin L.M.,

graduate student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics

Tkachev A.V.,

senior scientific researcher, PhD in Physics and Mathematics, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences

Zhurenko S.V.,

junior scientific researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences

Chuev M.A.

Holder of an Advanced Doctorate (Doctor of Science) in Physics and Mathematics, head of laboratory of physics of the surface of microelectronic structures, Valiev Institute of Physics and Technology RAS

Annotation. *Nanowires from iron and its alloys are promising materials, their magnetic properties have not been studied enough, and they still attract the attention of researchers. This report presents the results of the study of pure iron nanowires by means of Mössbauer spectroscopy and NMR spectroscopy.*

Keywords: *nanostructures, magnetic nanowires, magnetic properties, Mossbauer spectroscopy, iron, NMR spectroscopy.*

Нанопроволоки (НП) диаметрами до 500 нм, синтезированные различными методами полностью или частично из магнитных материалов, активно исследуются последние 20 лет в связи с их необычными свойствами, обусловленными в первую очередь сильной анизотропией формы. Данные наноструктуры могут в перспективе применяться в качестве сенсоров, в устройствах хранения данных высокой плотности, спинтронике, для генерации и преобразования электромагнитной энергии, а также для биомедицинских целей [1]. Для изучения магнитных свойств железосодержащих НП эффективным методом является ядерная гамма-резонансная (мёссбауэровская) спектроскопия на ядрах ^{57}Fe , поскольку она позволяет проводить исследования не только без приложения внешнего магнитного поля, но и без изменения состояний магнитных ионов. Хорошо дополняющим мёссбауэровскую спектроскопию, близким по точности и эффективности измерения величин магнитных полей на ядрах ^{57}Fe является метод ядерного магнитного резонанса в нулевом внешнем магнитном поле [2,3]. Однако, для чистого железа и железосодержащих соединений количество таких совместных исследований невелико [4-6], а для НП из чистого железа такие измерения ранее не выполнялись.

В данной работе методами ЯМР и мёссбауэровской спектроскопии (МС) на ядрах ^{57}Fe впервые были исследованы магнитные свойства массивов НП железа, электроосаждённые в трековых порах полимерной матрицы с диаметром пор от 35 нм до 600 нм. Первичная характеристика массивов НП была выполнена методами порошкового рентгенофазового анализа (РФА) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Исследования выполнены в рамках государственного задания КККиФ НИЦ Курчатовский институт и Физико-технологического института имени К.А. Валиева РАН.

Список использованной литературы:

1. Vázquez M. (ed.). Magnetic nano- and microwires: design, synthesis, properties and applications. – Woodhead Publishing, 2020, Second Edition
2. Bastow T. J., Trinchi A. NMR analysis of ferromagnets: Fe oxides //Solid State Nuclear Magnetic Resonance. – 2009. – Т. 35. – №. 1. – С. 25-31.
3. Streever R. L. Nuclear-Magnetic-Resonance Studies of Fe 57 in Barium Ferrite //Physical Review. – 1969. – Т. 186. – №. 2. – С. 285.
4. Butler M. A., Wertheim G. K., Buchanan D. N. E. Domain and Wall Hyperfine Fields in Ferromagnetic Iron //Physical Review B. – 1972. – Т. 5. – №. 3. – С. 990.
5. Lue C. S. et al. NMR and Mössbauer study of spin dynamics and electronic structure of $\text{Fe}_{2+x}\text{V}_{1-x}\text{Al}$ and Fe_2VGa //Physical Review B. – 2003. – Т. 67. – №. 22. – С. 224425.
6. Miglierini M., Lančok A., Kohout J. Hyperfine fields in nanocrystalline Fe–Zr–B probed by ^{57}Fe nuclear magnetic resonance spectroscopy //Applied Physics Letters. – 2010. – Т. 96. – №. 21.

УДК 543.424

Исследование интерфейсного взаимодействия Дзялошинского-Мории в многослойных структурах ТМ/ФМ методом Манделъштам-Бриллюэновской спектроскопии

Телегин А.В.

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

Теплов В.С.

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

Бессонова В.А.

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

Самардак А.С.

д.ф-м.н., ректор, Сахалинский государственный университет

***Аннотация.** Работа посвящена изучению особенностей магнитных свойств и взаимодействия Дзялошинского-Мории (ВДМ) в многослойных структурах ТМ/ФМ с помощью Манделъштам-Бриллюэновского рассеяния света, Керровской спектроскопии и вибрационной магнитометрии. Определены величины ВДМ в многослойных пленках Pt/Co и наноструктурах, содержащих сплавы Pt-Co и градиентные по составу слои. Рассмотрено низкотемпературное поведение ВДМ в наноструктурах W/CoFeB/MgO. Изучено влияние отжигов в НМ/ФМ наноструктурах с перпендикулярной магнитной анизотропией. Продемонстрирована модуляция ВДМ в структурах Pt/Ru(x)/Co за счет различной толщины барьера Ru между ФМ слоями.*

***Ключевые слова:** взаимодействие Дзялошинского-Мории, Манделъштам-Бриллюэновское рассеяние света, металлические наноструктуры, скирмионы, спинтроника*

BLS study of interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction in HM/FM multilayers

Telegin A.V.

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

Teplov V.S.

Ph.D., junior scientist, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, UB of RAS

Bessonova V.A.

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

Samardak A.S.

Professor, director, Sakhalin State University

***Annotation.** The work is dedicated to the study of the features of the magnetic properties and interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction (iDMI) in heavy metal/ ferromagnetic metal multilayers by means of Brillouin light scattering, Kerr spectroscopy and vibrating magnetometry. The strength of iDMI are determined in multilayered Pt/Co films and nanostructures possessing Pt-Co alloys and compositional gradient layers. Oscillatory-like modulation of iDMI in Pt/Ru/Co heterostructures is demonstrated by inserting a ruthenium spacer with different thicknesses between*

the ferromagnetic layers. Furthermore, the influence of external parameters such as annealing, temperature and magnetic field on Dzyaloshinskii-Moriya interaction is investigated in these multilayered structures.

Keywords: *Dzyaloshinskii-Moriya interaction, Brillion light scattering, metallic nanostructures, skyrmion, spintronics*

The interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction (iDMI) is of particular importance in the context of systems consisting of an ultrathin ferromagnetic (FM) film with perpendicular magnetic anisotropy in contact with a heavy metal (HM) layer. Thin-film metallic HM/FM nanostructures are particularly interesting from the application point of view due to the fast domain-wall motion driven by an electric current in the presence of the iDMI. In addition, there are interactions between the skyrmion and other magnetic structures (such as domain-walls and boundary magnetic moments) that make the design of future skyrmion-based memory and logical devices more flexible [1]. In such a system the iDMI arises due to the broken inversion symmetry at the interface and the large SOC of the HM atoms. Speaking about the interfacial DMI it is of the high importance to be able to measure the magnitude and sign of D constant in order to be able to optimize the effect. One of the most commonly used contactless experimental technique is a Brillion light scattering (BLS), where the sign and value of DMI is extracted by measuring the nonreciprocity of propagating spin waves in in-plane magnetized films (the Damon–Eshbach geometry) [2].

Here we aim to provide the results of study of iDMI in ferro- and ferrimagnetic thin-film nanostructures with different layer's combination and compositional gradient layers by BLS technique under different experimental conditions. Actually, a BLS set-up combined with a 532 nm laser source, a Fabry-Perot interferometer, a liquid nitrogen cryostat and an electromagnet was employed.

It was shown that the iDMI depends on the structural properties of the materials, and oscillations of the perpendicular magnetic anisotropy and DMI are ascribed to an almost inversely proportional dependence on the square of the interatomic distance between HM and FM atoms. It was demonstrated that the controllable spatial composition of Pt-Co alloys will allow manipulating the distribution of DMI vectors in three dimensions [3], that is essential for designing future spin-orbitronics devices. Moreover, there was a twice increase in D obtained during cooling the gradual Pt-Co alloy from 400 K to 80 K. Actually, the gradual Pt-Co alloy enhancement of the D reached 61.4% increase relative to layered Pt/Co sample. We also investigated effective iDMI energy density for Pt/Ru(x)/Co heterostructures, showed oscillating-like behavior as a function of Ru thickness, and theoretically verified this phenomenon.

The results will be of interest to experimenters and theorists working on systems with DMI. Support of the Russian Science Foundation № 21-72-20160 (<https://rscf.ru/en/project/21-72-20160>) is acknowledged.

References:

1. Giovanni F. et al. Magnetic skyrmions: from fundamental to applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2016. – V. 49. – P. 423001.
2. Giovannini L. et al. Light scattering characterization of metallic single films and multilayers // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1999. – P. 198.
3. Park, J. et al. Compositional gradient induced enhancement of DMI in Pt/Co/Ta heterostructures modulated by Pt–Co alloy intralayers // *Acta Materialia*. – 2022. – V. 241. – P. 118383.

УДК 537.636; 537.621.5

Моделирование нелинейной магнитной динамики и переключения в трехслойной структуре с межслойным обменным взаимодействием

Абрамовский И.Е.

аспирант, инженер кафедры радиофизики и электроники,
Сыктывкарский государственный университет

Котов Л.Н.

д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой радиофизики и электроники,
Сыктывкарский государственный университет

***Аннотация.** Работа посвящена исследованию магнитной динамики в трёхслойной анизотропной магнитной пластине с учётом обмена между первым и третьим магнитными слоями. Построены графики временных и частотных зависимостей компонент вектора намагниченности в параметрическом виде на основе численных решений уравнений Ландау-Лифшица-Гильберта. Исследовано влияние первой константы магнитной анизотропии и величины обменного взаимодействия на динамику компонент намагниченности. Результаты работы могут быть использованы при исследованиях в области спинтроники и при разработке устройств обработки и хранения информации.*

***Ключевые слова:** нелинейные магнитные колебания, магнитное переключение, трёхслойная структура, обменная связь, магнитная кубическая анизотропия*

Simulation of nonlinear magnetic dynamics and switching in a three-layer structure with interlayer exchange interaction

Abramovsky I.E.

Postgraduate student, engineer of the Department Radiophysics and Electronics
Syktyvkar State University

Kotov L.N.

Dr. Sc., professor, head of the department Radiophysics and Electronics,
Syktyvkar State University

***Annotation.** The work is devoted to the study of magnetic dynamics in a three-layer anisotropic magnetic plate, taking into account the exchange between the first and third magnetic layers. Graphs of time and frequency dependences of the components of the magnetization vector in parametric form were constructed based on numerical solutions of the Landau-Lifshitz-Gilbert equations. The influence of the first constant of magnetic anisotropy and the magnitude of the exchange interaction on the dynamics of the magnetization components has been studied. The results of the work can be used in research in the field of spintronics and in the development of information processing and storage devices.*

***Keywords:** nonlinear magnetic oscillations, magnetic switching, three-layer structure, exchange coupling, magnetic cubic anisotropy*

В наши дни произошёл экстенсивный и интенсивный рост области науки, применяющий

спинов электронов для кодирования и обработки информации. Устройства обработки, чтения и записи информации, основанные на нелинейных и ориентационных эффектах многослойных структур, хорошо реализуются благодаря активному развитию спинтроники [1]. Подобные устройства во многих аспектах не отстают от классических электронных аналогов, а также опережают их по части скорости работы, энергоэффективности и плотности компоновки элементов [1-3]. Сверхбыстрые эффекты могут быть использованы для управления магнитными наноструктурами на современном этапе развития магнитоэлектроники. Для дальнейшего улучшения характеристик подобных устройств необходимо продолжать изучение нелинейных ориентационных магнитных эффектов в многослойных планарных структурах. Данные исследования продвигают современную проектную деятельность по созданию спиновых устройств, теорию нелинейных волн и нелинейных динамических систем.

В работе получены численные решения уравнения магнитной динамики Ландау-Лифшица-Гильберта для трёхслойной пластины, состоящей из двух магнитных слоёв по краям и немагнитного слоя посередине [4]:

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{\gamma}{1+\alpha^2} \left([m \times H_{eff}] + \alpha [m \times [m \times H_{eff}]] \right), \quad (1)$$

где α – коэффициент диссипации, γ – гиромагнитное отношение электрона, m – единичный вектор намагниченности слоя, H_{eff} – эффективное магнитное поле, определяемое как вариационная производная объёмной плотности магнитной энергии, представленной выражением для следующей суммы объёмных плотностей энергии:

$$U_{\square} = U_Z + U_{dd} + U_a + U_{ex}, \quad (2)$$

где U_Z – плотность зеемановской энергии, включающей в себя H_{0z} – постоянное поле вдоль нормали структуры и $h_{x,y}$ – круговое переменное поле, действующее в плоскости OXY структуры; U_{ex} – плотность энергии обменного взаимодействия между 1 и 3 магнитными слоями трёхслойной структуры; U_{dd} – плотность энергии размагничивающего поля; U_a – плотность энергии магнитной анизотропии. Магнитные слои 1 и 3 трёхслойной плёнки обладают кубической магнитной анизотропией, имеют различную намагниченность насыщения и связаны между собой полем обмена, регулировка величины которого может осуществляться изменением толщины немагнитного 2 слоя. Пластина намагничена вдоль нормали к плоскости, а в самой плоскости пластины действует циркулярное переменное магнитное поле. Значения материальных параметров системы подбирались такими, чтобы выполнялось условие возникновения магнитных ориентационных переходов.

Для решения поставленной задачи были использованы пакеты математических программ MATLAB и Scilab, в которых моделировалась нелинейная магнитная динамика векторов намагниченности трёхслойной пластины без учёта действия краевых эффектов. С помощью метода Рунге-Кутты 4-5 порядков были найдены решения системы дифференциальных уравнений, графическое представление которых было выражено в параметрической форме, а также в форме частотной и временной зависимости компонент намагниченностей для магнитных

слоёв системы.

Интерпретируя полученные графики, можно записать следующие выводы. Действие поля обменного взаимодействия имеет неоднозначную роль в процессе магнитных колебаний слоёв с обменной связью, хотя сама форма выражения для него выглядит весьма похоже на одноосную анизотропию. Сложность интерпретации влияния поля обмена заключается в неоднозначности локализации его влияния, иначе говоря, в зависимости от величины поля обменного взаимодействия, выражаемого константой обмена J , область его максимального приложения перемещается по часовой стрелке (если анализировать параметрические портреты) с увеличением J . Энергетический ландшафт и без того имеет достаточно сложную форму, а внесение возмущений полем обменной связи создаёт дополнительные искажения формы энергетической поверхности. Данные искажения приводят к возникновению условий для СВЧ переключений вектора намагниченности из одного метастабильного состояния в другое, что отчётливо наблюдается на временных зависимостях компонент намагниченности (рис. 1). При нулевой константе обменной связи $J=0$ переключение вектора намагниченности во втором слое не возникает и наблюдаются линейные магнитные колебания. При включении обменной связи $J=4$ эрг/см³ возникает пересечение компонент m_x (синяя линия) и m_y (красная линия) и вначале наблюдается переключение, после которого происходят нелинейные магнитные колебания.

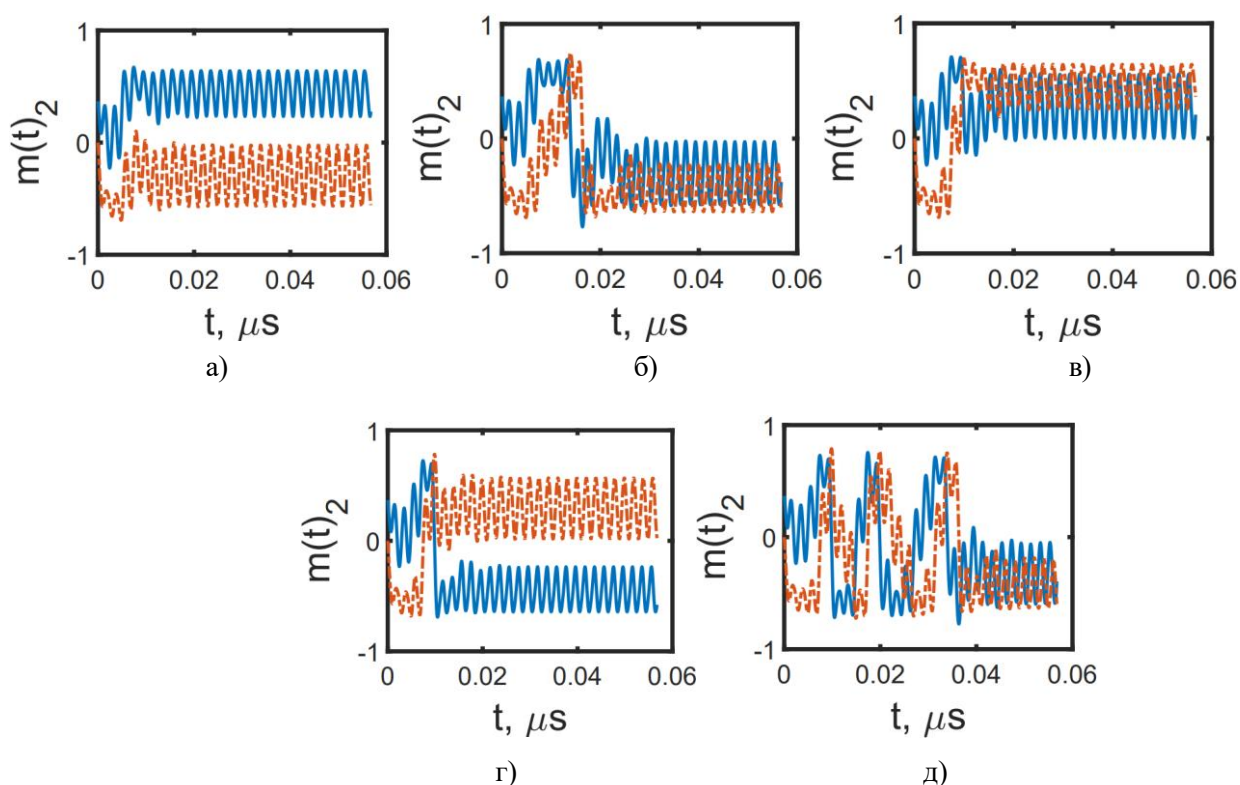


Рис. 1. Временные зависимости компонент намагниченности для второго магнитного слоя трёхслойной структуры с константой обмена J (эрг/см³): 0 (а), 4 (б), 8 (в), 12 (г), 16 (д).

При дальнейшем увеличении константы обменной связи J от 8 до 12 эрг/см³ происходит изменение равновесных состояний компоненты m_y (красная линия) и её дальнейшие нелинейные колебания, что демонстрирует наличие переключения, при этом процесс переключения происходит устойчиво. При большой константе обменной связи $J=16$ эрг/см³, процесс колебаний происходит неустойчиво, при этом в начальный момент времени

происходит несколько переключений подряд. После трёх переключений наблюдаются сильные нелинейные колебания.

Таким образом, в данной работе показано влияние константы обменной связи между соседними магнитными слоями, разделёнными немагнитным слоем, на возникновение нелинейных магнитных колебаний и магнитное переключения в слоях трёхслойной структуры.

Исследование выполнено за счёт гранта российского научного фонда (РНФ), проект № 21-72-20048.

Список использованных источников:

1. Barman A., Mondal S., Sahoo S. and De A. Magnetization dynamics of nanoscale magnetic materials: A perspective // *Journal of Applied Physics*. – 2020. – Vol. 128(17). – pp. 170901.
2. Lutz J., Schlangenotto H., Scheuermann U., Doncker R.D. *Semiconductor Power Devices: Physics, Characteristics, Reliability* – London New York: Springer Heidelberg Dordrecht, 2018. – pp. 714
3. Vlasov V.S., Kotov L.N., Shavrov V.G., Shcheglov V.I. Asymmetric excitation of the two-order magnetization precession under orientational transition conditions // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2012. – Vol. 57. – pp. 453-467.
4. Котов Л.Н., Абрамовский И.Е., Власов В.С., Устюгов В.А. Особенности магнитных колебаний в двухслойной структуре с обменной связью // *Челябинский физико-математический журнал*. – 2024. – Т. 9, вып.1. – С. 124–132.
5. Vlasov V.S., Kirushev M., Kotov L.N., Shavrov V.G., Shcheglov V.I. The second-order magnetization precession in an anisotropic medium. Part 2: The cubic anisotropy // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2013. – Vol. 58. – pp. 847-862.

УДК 537.61.3

Особенности стабилизации вихреподобных неоднородностей в ультратонких ферромагнитных модифицированных плёнках

Вахитов Р.М.

д.ф. – м.н., профессор, Физико-технический институт УУНиТ

Ахметова А.А.

научный сотрудник, Физико-технический институт УУНиТ

Солонецкий Р.В.

к.ф. – м.н., научный сотрудник, Физико-технический институт УУНиТ

Филиппов М.А.

аспирант, Физико-технический институт УУНиТ

***Аннотация.** Работа посвящена исследованиям условий стабилизации вихреподобных микромагнитных структур на тонкоплёночном диске с колумнарным дефектом в центре. С помощью микромагнитного моделирования в данной модели были численно найдены значения материальных параметров, при которых возможны устойчивые состояния $k\pi$ – скирмионов ($k = 0, 1, 2, 3, 4$). Для этих структур были определены диаграммы их устойчивости в зависимости от величины взаимодействия Дзялошинского – Мория (DMI), величины магнитной анизотропии и радиуса дефекта.*

***Ключевые слова:** магнитный скирмион, магнитная плёнка, модулированная одноосная анизотропия, взаимодействие Дзялошинского – Мория.*

Features of stabilization of vortex-like inhomogeneities in ultrathin ferromagnetic modified films

Vakhitov R.M.

Dr.Sc., professor, Physico-Technical Institute of UUST

Akhmetova A.A.

Research assistant, Physico-Technical Institute of UUST

Solonetsky R.V.

Dr.Sc., research assistant, Physico-Technical Institute of UUST

Filippov M.A.

Graduate student, Physico-Technical Institute of UUST

***Annotation.** The work is dedicated to studying the conditions for stabilization of vortex-like micromagnetic structures on a thin – film disk with a columnar defect in the center. Using micromagnetic modeling in this model, the values of material parameters were numerically found at which stable states of $k\pi$ – skyrmions ($k = 0, 1, 2, 3, 4$). For these structures, their stability diagrams were determined depending on the magnitude of the Dzyaloshinskii – Moriya interaction (DMI), the magnitude of magnetic anisotropy and the radius of the defect.*

Keywords: *magnetic skyrmion, magnetic film; modulated uniaxial anisotropy, Dzyaloshinskii – Moriya interaction*

Магнитные скирмионы, представляющие собой топологически защищённые вихреподобные неоднородности с уникальными физическими свойствами (наномасштабные размеры, высокие скорости движения, возможность манипулирования ими с помощью электрического тока малой плотности и т.д.) [1], имеют реальные перспективы для применения в устройствах логики и памяти нового поколения [2]. С момента своего экспериментального обнаружения в 2009 году [3] они впоследствии были найдены в разнообразных типах материалов. Первоначально скирмионы были обнаружены в объёмных материалах с отсутствием центральной симметрии, в которых они стабилизируются за счёт объёмного взаимодействия Дзялошинского – Мориа (DMI) [4]. В таких плёнках предпочтительнее появляются скирмионы блоховского типа. В монослойных плёнках достаточно сложно было получить стабильные магнитные скирмионы при комнатных температурах и в отсутствии внешнего магнитного поля, поэтому в исследованиях в последнее время произошёл переход к многослойным плёнкам, содержащим большое количество интерфейсов магнитных и немагнитных металлов. В таких структурах скирмионы (в основном неелевского типа) стабилизируются уже за счёт межфазного DMI, которое возникает на границах разделов слоёв [4]. Но помимо межфазного DMI, другие материальные параметры (обменный параметр A и магнитная анизотропия K_u) должны создавать баланс энергии для стабилизации, который из-за малой толщины слоёв (~1 нм) значительно усложняется.

В связи со сказанным возникает потребность в альтернативных методах получения и стабилизации магнитных скирмионов. Один из возможных способов был предложен в [5]. Он заключается в создании в одноосной ферромагнитной плёнке колумнарного дефекта (с отрицательным значением константы анизотропии), на котором при определённых значениях материальных параметров могут стабилизироваться магнитные скирмионы. В [5] было экспериментально показано, что путём сфокусированного облучения поверхности магнетика ионами He^+ можно получить подобные наноструктурированные плёнки Co/Pt с локально изменёнными участками, в которых константа одноосной анизотропии будет иметь пониженное значение. На полученной решётке дефектов типа потенциальная яма были обнаружены устойчивые магнитные скирмионы в отсутствии DMI.

В данной работе исследуются условия стабилизации вихреподобных неоднородностей на описанном выше колумнарном дефекте (типа «потенциальная яма»), который расположен в центре магнитоодноосного диска, в отсутствии внешнего магнитного поля. На данном дефекте скачком меняется константа K_u (в области дефекта $K_u < 0$, а вне дефекта $K_u > 0$). Остальные материальные параметры считаются постоянными во всём диске. Учитывается также наличие изотропного межфазного DMI, которое имеет место в реальных многослойных плёнках. Исследование проводилось методом микромагнитного моделирования в пакете программ открытого доступа OOMMF [6] с дополнительным модулем [7].

Стоит отметить, что решение подобной задачи уже проводилось в [8], но в отсутствии DMI. В результате были получены стабильные состояния магнитных скирмионов блоховского типа на дефекте, а также исследовалось воздействие перпендикулярного и плоскостного магнитных полей на структуру скирмионов.

По результатам моделирования было численно найдено, что магнитный скирмион неелевского типа (Рис.1.а.) стабилизируется при следующих параметрах: радиус диска $R=300$ нм, толщина диска $L=5$ нм, радиус дефекта $R_0=30$ нм, $K_{u1}=3 \times 10^4$ Дж/м³ (вне дефекта), $K_{u2}=-0.5 \times 10^4$ Дж/м³ (на дефекте), $M_s=2.0 \times 10^5$ А/м, $A=2.5 \times 10^{-11}$ Дж/м, $D=0.8 \times 10^{-3}$ Дж/м². Отметим, что толщина диска $L \leq \Delta$, где $\Delta = \sqrt{A_1/K_{eff}} \approx 70$ (нм), $K_{eff} = K_{u1} - \mu_0 M_s^2/2$ [1]. Размеры ячейки при моделировании брались $2,5 \times 2,5 \times 2,5$ нм, что значительно меньше Δ .

При постепенном увеличении константы DMI до значения $D=0.9 \times 10^{-3}$ Дж/м² в центре диска на дефекте стабилизируется 2π – скирмион (скирмиониум) (Рис.1.б.), в котором разворот намагниченности происходит на 360° . При дальнейшем увеличении DMI до значения $D=1.4 \times 10^{-3}$ Дж/м² происходит переход 2π – скирмиона в 3π -скирмион (Рис.1.в.), а при достижении значения $D=1.9 \times 10^{-3}$ Дж/м² стабилизируется 4π – скирмион (Рис.1.г.). Таким образом, в данной задаче наблюдается образование $k\pi$ – скирмионов при увеличении коэффициента DMI, где коэффициент k – число разворотов вектора намагниченности в доменных границах. Наличие зависимости DMI и числа k подтверждаются в [1, 4].

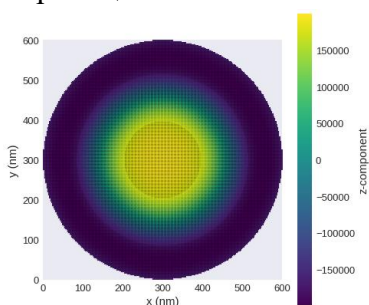


Рис. 1.а. Изображение скирмиона

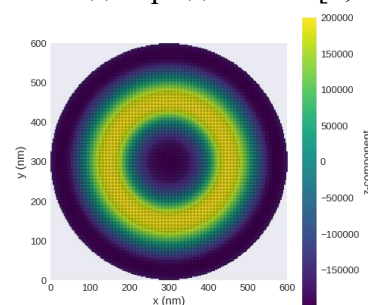


Рис. 2.б. Изображение скирмиониума

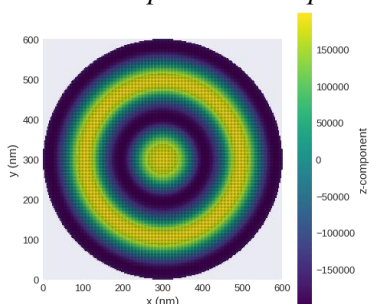


Рис. 2.в. Изображение 3π-скирмиона

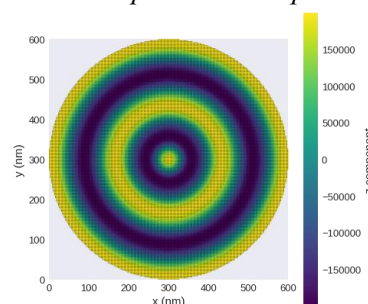


Рис. 2.г. Изображение 4π-скирмиона

Кроме того, проводился анализ влияния константы DMI и глубины потенциальной ямы, характеризующейся величиной легкоплоскостной анизотропии на дефекте, на типы стабилизируемых вихреподобных неоднородностей. На графике (Рис.2.) можно наблюдать, что до критического значения $D=0.8 \times 10^{-3}$ Дж/м² диск был однородно намагничен. После достижения этого значения на диске начинают стабилизироваться π – скирмионы. Но их область стабильности достаточно узкая (~ 0.5 мДж/м²). При постепенном увеличении константы DMI начинает возрастать число k . При достижении $D=1 \times 10^{-3}$ Дж/м² начинается область устойчивости только скирмиониума. При значении $D=1.4 \times 10^{-3}$ Дж/м² появляются устойчивые 3π – скирмионы, а при $D=1.9 \times 10^{-3}$ Дж/м² – 4π – скирмионы. В большинстве случаев переход между разными типами скирмионов происходит скачкообразно, но в некоторых случаях наблюдаются и промежуточные состояния. Следует также отметить, что для данного радиуса дефекта (60 нм) основным фактором, влияющим на устойчивость определённых типов скирмионов, является DMI. Влияние величины легкоплоскостной анизотропии на этот процесс незначителен. Аналогичный анализ проводился и для радиуса

дефекта 120 нм.



Рис. 2. Диаграмма устойчивости магнитных скирмионов.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания на выполнение научных исследований лабораториями (Теория, моделирование и получение новых тонкопленочных, наноструктурированных и гибридных структур (FRRR – 2024 – 0001)).

Список использованных источников:

1. Самардак А.С., Колесников А.Г., Давыденко А.В., Стеблина М.Е., Огнев А.В. Топологически нетривиальные спиновые текстуры в тонких магнитных пленках // ФММ – 2022. –Т. 123. № 3. – С. 260-283.
2. Lee. O., Msiska. O.R., Brems. M.A., Klaui M., Kurebayashi H. Perspective on unconventional computing using magnetic skyrmions // Appl. Phys. Lett. – 2023. – V. 122(26). – 260501.
3. S. Mühlbauer, B. Binz, F. Jonietz, C. Pfleiderer, A. Rosch, A. Neubauer, R. Georgii, and P. Böni // Skyrmion Lattice in a Chiral Magnet // Science. – 2009. – V. 323. – P. 915-919.
4. Börge Göbel, Ingrid Mertig, Oleg A. Tretiakov. Beyond skyrmions: Review and perspectives of alternative magnetic quasiparticles // Physics Reports – 2021. V. 895. – P. 1-28.
5. M.V. Sapozhnikov, S.N. Vdovichev, O.L. Ermolaeva, N.S. Gusev, A.A. Fraerman, S.A. Gusev, Yu.V. Petrov Artificial dense lattice of magnetic bubbles // J. Appl. Phys. – 2016. V. 109(4). – 042406.
6. M.J. Donahue, D.G. Porter OOMMF User's Guide, Version 1.0 Interagency Report – National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1999.
7. O.G.Udalov, M.V.Sapozhnikov Orientation and internal structure of domain walls in ferromagnetic films with anisotropic Dzyaloshinskii-Moriya interaction // JMMM – 2021. – V. 519 – 167464.
8. R.M. Vakhitov, R.V. Solonetsky, A.A Akhmetova, M.A. Filippov // Symmetry. – 2022. – V. 14(3). – P. 612.

УДК 537.622

Микромагнитное моделирование гистерезисных характеристик зювитов импактного кратера Жаманшин

Харитонский П.В.

д.ф.-м.н., в.н.с., Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Сетров Е.А., студент, **Гареев К.Г.**, к.т.н., доцент

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Шейдаев Т.С.

Студент, Университет ИТМО

Сергиенко Е.С.

к.ф.-м.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет

***Аннотация.** На основе согласованного теоретического моделирования с использованием двух независимых моделей, учитывающих возможную химическую неоднородность частиц и магнитостатическое взаимодействие между ними, были рассчитаны гистерезисные характеристики зювитов импактного кратера Жаманшин, соответствующие экспериментальным данным, и оценены концентрации ферромагнитных частиц в образцах, включая суперпарамагнитную фракцию.*

***Ключевые слова:** зювиты, микромагнитное моделирование, двухфазные частицы, магнитостатическое взаимодействие, частотная зависимость восприимчивости, наночастицы, магнитометрия, магнетит, гематит.*

Micromagnetic modeling of hysteresis characteristics of suevites of the Zhamanshin impact crater

Kharitonskii P.V., Dr. Sci., lead. res.

Ioffe Institute

Setrov E.A., student, **Gareev K.G.**, Ph. D., assoc. prof.

Saint Petersburg Electrotechnical University

Sheidaev T.S., student

ITMO University

Sergienko E.S., Ph. D., assoc. prof.

Saint Petersburg University

***Annotation.** On the basis of coordinated theoretical modelling using two independent models that take into account possible chemical inhomogeneity of particles and magnetostatic interaction between them, we calculated the hysteresis characteristics of zuvites of the impact crater Zhamanshin corresponding to the experimental data and estimated the concentrations of ferrimagnetic particles in the samples, including the superparamagnetic fraction.*

***Keywords:** suevites, micromagnetic modeling, two-phase particles, magnetostatic interaction,*

superparamagnetism, frequency-dependent susceptibility, nanoparticles, magnetometry, magnetite, hematite.

Импактиты – это горные породы, образующиеся в результате высокоскоростного соударения космических тел. Зювиты – вид импактитов – представляют собой спеченную и сцементированную смесь фрагментов различных пород с частыми (10 – 15% и больше) включениями стекла и выражено гетерогенным составом [1]. Исследовались 4 образца зювитов из 14-километрового кратера Жаманшин (Казахстан, N 48.37° E 60.94°): три из восточной части кратера (обозначены ZSU-1-3) и один из северной (обозначен 17-135).

В контексте исследования магнитных свойств особенно интересными характеристиками образцов являются их химическая неоднородность, кластерное распределение и высокая магнитная вязкость (суперпарамагнитная фракция).

Изучение магнитных свойств образцов включало: 1) построение петель гистерезиса и кривых размагничивания остаточной намагниченности в максимальном поле 1,8 Тл при комнатной температуре на вибрационном магнитометре LakeShore 7410 (Lake Shore Cryotronics Inc., США); 2) измерения значений удельного магнитного момента насыщения M_s , остаточного удельного момента насыщения M_{rs} , коэрцитивной силы H_c и коэрцитивной силы по остаточной намагниченности H_{cr} (табл. 1); 3) построение частотно-полевых зависимостей магнитной восприимчивости χ на трех рабочих частотах (976, 3904 и 15616 Гц), с использованием моста восприимчивости MFK-1FA (AGICO, Чехия) и расчета величины FD-фактора (см., например, [2, 3]) Наличие таких зависимостей доказывает присутствие частиц, находящихся в суперпарамагнитном состоянии, и позволяет оценить максимально возможные значения доли этих частиц.

Используя значения магнитной восприимчивости на верхней χ_h и нижней частотах χ_l в слабом поле, можно рассчитать величину FD-фактора для наших образцов [4, 5]:

$$fd = \frac{\chi_l - \chi_h}{\chi_l \lg(f_h/f_l)} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Таблица 1, Гистерезисные характеристики и величины FD-фактора образцов

Образец	M_s , эме/г	M_{rs} , эме/г	H_c , Э	H_{cr} , Э	M_{rs}/M_s	H_{cr}/H_c	fd , %
1	0,71	0,11	139	318	0,16	2,3	10
2	1,64	0,43	221	409	0,26	1,8	23
3	1,98	0,39	124	243	0,19	2,0	1
17-135	1,39	0,42	349	657	0,31	1,9	5

Значения магнитогранулометрических отношений M_{rs}/M_s и H_{cr}/H_c показывают, что в основном частицы находятся в одно- и малодоменном состоянии [6]. В то же время, значение FD-фактора показывает, что в образцах присутствует фракция, соответствующая истинно суперпарамагнитным частицам.

Используя приближение логнормального распределения частиц по объему, мы рассчитали наиболее вероятные диапазоны характерных размеров частиц в различных

магнитных состояниях. Доля суперпарамагнитных частиц может быть рассчитана в предположении логнормального распределения частиц по объему [7, 8]. Плотность вероятности логнормального распределения записывается как:

$$\varphi(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x/\alpha))^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

где $x = v/v_p$ – отношение объема частицы к среднему объему, σ – стандартное отклонение и α – среднее значение соответствующего распределения Гаусса.

При моделировании рассматриваются пять диапазонов размеров зерен, соответствующие разным магнитным состояниям: истинно суперпарамагнитные (SP), заблокированные суперпарамагнитные (bSP), однодоменные (SD), псевдооднодоменные (PSD) и многодоменные (MD) частицы с соответствующими диаметрами частиц приблизительно в интервалах 0–18, 18–25, 25–40, 40–100 и 100–500 нм. Максимально возможное содержание частиц в истинно суперпарамагнитном состоянии составляет от нескольких до десятков процентов (см. значение fd в табл. 1)

Введем относительные доли частиц, соответствующие указанным выше магнитным состояниям: n_{sp} , n_{ssd} , n_{fspd} и n_{cpsd} . Относительная доля каждой группы записывается как:

$$n = \int_{x_1}^{x_2} \varphi(x) dx / \int_{x_{min}}^{x_{max}} \varphi(x) dx, \quad (3)$$

где x_1 и x_2 – нижняя и верхняя границы диапазона объемов данной группы частиц соответственно, x_{min} ($d = 0$) и x_{max} ($d = 500$ нм) – минимальный и максимальный относительные объемы частиц соответственно.

Таблица 2, Расчеты объемных долей C и средних размеров d_{mean} , соответствующих значениям fd в интервале от 0,5 до 23%, где M – это математическое ожидание, SQ – среднеквадратичное отклонение логнормального распределения.

SQ	3	3	3	3	3	3	3
M	2,61	2,31	1,95	1,37	0,79	0,14	0,06
C_{SP} , %	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0	23,0
C_{bSP} , %	6,1	8,1	10,3	13,4	14,7	12,9	11,9
C_{SD} , %	44,7	44,1	42,5	38,1	32,0	22,2	19,6
C_{PSD} , %	48,6	46,6	44,7	42,3	40,0	34,2	31,8
C_{MD} , %	0,1	0,2	0,4	1,3	3,4	10,8	13,6
d_{mean} , нм	34	33	31	28	23	13	10

На основе модели двухфазных магнитостатически взаимодействующих частиц состава «магнетит-гематит» (см., например, [9, 10]) было показано, что наилучшее согласие с экспериментальными данными соответствует эффективной спонтанной намагниченности насыщения $I_{s\ eff}$ порядка 400 эме/см³ и эффективной спонтанной намагниченности $I_{rs\ eff}$ по остаточной намагниченности порядка 140-160 для образца ZSU-1, 200-300 для образца ZSU-2, 150 для образца ZSU-3 и 230-250 эме/см³ для образца 17-135. Занижение $I_{rs\ eff}$ связано с

химической и магнитной неоднородностью двухфазных частиц. При этом объемная концентрация ферритмагнетика в образце имеет порядок $10^{-3} - 10^{-2}$. Результаты расчетов хорошо согласуются с полученными ранее с использованием модели однодоменных взаимодействующих частиц с эффективной спонтанной намагниченностью [11].

Список использованных источников:

1. Фельдман В.И., Глазовская Л.И. Импактитогенез: учебное пособие. М: Книжный дом «Университет», 2018. 151 с. – 2018.
2. Eyre J. K. Frequency dependence of magnetic susceptibility for populations of single-domain grains // *Geophysical Journal International*. – 1997. – Т. 129. – №. 1. – С. 209-211.
3. Egli R. Magnetic susceptibility measurements as a function of temperature and frequency I: inversion theory // *Geophysical Journal International*. – 2009. – Т. 177. – №. 2. – С. 395-420.
4. Kharitonskii P. et al. Magnetic granulometry, frequency-dependent susceptibility and magnetic states of particles of magnetite ore from the Kovdor deposit // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2022. – Т. 553. – С. 169279.
5. Dearing J. A. et al. Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials // *Geophysical Journal International*. – 1996. – Т. 124. – №. 1. – С. 228-240.
6. Kirschvink J. L., Jones D. S., MacFadden B. J. (ed.). Magnetite biomineralization and magnetoreception in organisms: a new biomagnetism. – Springer Science & Business Media, 2013. – Т. 5.
7. Olin M., Anttila T., Dal Maso M. Using a combined power law and log-normal distribution model to simulate particle formation and growth in a mobile aerosol chamber // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2016. – Т. 16. – №. 11. – С. 7067-7090.
8. Fujihara A. et al. Log-normal distribution in a growing system with weighted and multiplicatively interacting particles // *Journal of the Physical Society of Japan*. – 2018. – Т. 87. – №. 3. – С. 034001.
9. Kharitonskii P. et al. Superparamagnetism of Artificial Glasses Based on Rocks: Experimental Data and Theoretical Modeling // *Magnetochemistry*. – 2023. – Т. 9. – №. 10. – С. 220.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666690 Российская Федерация. Микромагнитное моделирование ансамблей двухфазных химически неоднородных наночастиц с бесконечно тонкой межфазной границей: № 2023665340: заявл. 24.07.2023: опубл. 03.08.2023 / П. В. Харитонский, Е. А. Сетров, Т. С. Шейдаев; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова».
11. Bobrov N. et al. Magnetic Viscosity of Suevites from the Zhamanshin Impact Crater // *International Conference and School—Problems of Geocosmos*. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – С. 85-109.

УДК 537.9

Циркулярные доменные стенки в субмикронных наночастицах магнетита

Несмеянов М.С.

м. н. с., Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН
им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН)

Серебрякова О.Н.

с. н. с., Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН
им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН)

Усов Н.А.

д. ф-м. н., в.н.с., Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения
радиоволн РАН им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН)

***Аннотация.** С помощью численного моделирования рассчитаны распределения намагниченности вихревого типа в субмикронных сферических наночастицах магнетита в интервале диаметров $D = 100\text{--}500$ нм. Обнаружено два типа циркулярных доменных структур с близкими полными энергиями, в которых ось вихря параллельна одной из легких, либо одной из трудных осей кубической магнитной анизотропии магнетита, соответственно. Показано, что приведенная остаточная намагниченность сферических наночастиц магнетита резко уменьшается при увеличении диаметров частиц и становится менее 0.03 при $D \geq 400$ нм.*

***Ключевые слова:** наночастицы магнетита, доменные структуры, остаточная намагниченность, численное моделирование*

Circular domain walls in submicron magnetite nanoparticles

Nesmeyanov M.S.

Researcher, Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave
propagation (IZMIRAN)

Serebryakova O.N.

Senior Researcher, Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave
propagation (IZMIRAN)

Usov N.A.

Dr.Sc., Leading Researcher, Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio
wave propagation (IZMIRAN)

***Annotation.** The vortex-type of magnetization distributions in submicron spherical magnetite nanoparticles in the diameter range $D = 100\text{--}500$ nm are calculated by means of numerical simulation. Two types of circular domain structures with close total energies have been discovered. In the first structure the vortex axis is parallel to one of the easy axes of cubic magnetic anisotropy of magnetite, however in the second structure it is parallel to one of the hard axes. It has been shown that the reduced remanent magnetization of spherical magnetite nanoparticles sharply decreases with increasing particle diameters and becomes less than 0.03 at $D \geq 400$ nm.*

***Keywords:** magnetite nanoparticles, domain structures, remanent magnetization, numerical simulation*

Микромагнитные расчеты неоднородных распределений намагниченности в наночастицах магнетита проводятся в последнее время в широком интервале диаметров частиц [1–4], поскольку изучение магнитных свойств ансамблей субмикронных наночастиц магнетита важно для корректной интерпретации большого массива палеомагнитных и геофизических данных. Недавно было предположено [2,3], что однородно намагниченные коры вихревых микромагнитных состояний в субмикронных наночастицах магнетита могут давать существенный вклад в остаточную намагниченность вулканических горных пород. Более того, так как равновесные направления вихревых коров наночастиц разделены высокими энергетическими барьерами, остаточная намагниченность разреженного ансамбля субмикронных наночастиц магнетита может быть стабильной в течение миллиардов лет [2,3]. Для проверки этих гипотез, в данной работе, путем решения уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта [4], подробно изучены два типа циркулярных доменных структур в субмикронных наночастицах магнетита, реализующихся в интервале диаметров $D = 100\text{--}500$ нм. Намагниченность насыщения частиц магнетита принята равной $M_s = 480$ эме/см³, константа кубической магнитной анизотропии $K_c = -1.24 \times 10^5$ эрг/см³, обменная константа $A = 1.33 \times 10^{-6}$ эрг/см. Легкие оси кубической анизотропии магнетита предполагаются параллельными направлениям $(\pm 1, \pm 1, \pm 1)$. Для численного моделирования сферическая наночастица магнетита аппроксимируется совокупностью $N = 2 \times 10^4\text{--}2.5 \times 10^5$ малых ферромагнитных кубиков с размером ребра 2.5–5 нм, малым по сравнению с обменной длиной магнетита, $L_{ex} = 31.4$ нм.

В результате проведенных расчетов получены координатные зависимости единичных векторов намагниченности $\vec{\alpha}(\rho, \phi, z) = (\alpha_\rho, \alpha_\phi, \alpha_z)$ двух стабильных вихревых состояний, которые удобно анализировать в цилиндрической системе координат с осью z , параллельной оси симметрии вихря и началом координат в центре частицы. Заметим, что ось симметрии вихревого состояния типа ha параллельна одной из трудных осей кубической магнитной анизотропии частицы, например, направлению $(0, 0, 1)$. Напротив, ось симметрии состояния типа ea параллельна одной из легких осей анизотропии, например, направлению $(1, 1, 1)$.

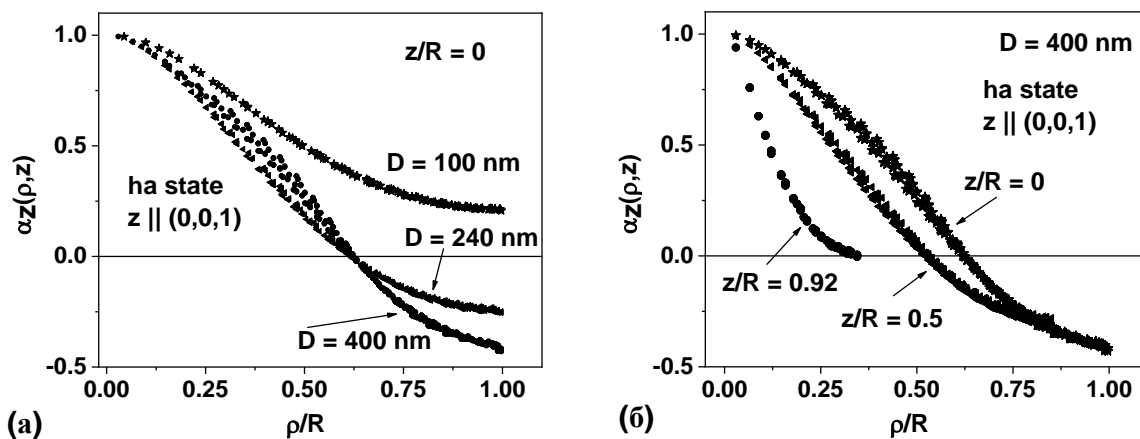


Рис. 1. (а) Радиальная зависимость z компоненты единичного вектора намагниченности для вихревого состояния ha в центральном сечении, $z/R = 0$, для частиц с диаметрами $D = 100, 240$ и 400 нм. (б) Поведение α_z компоненты в различных сечения верхней полусферы частицы магнетита диаметром $D = 400$ нм.

На рис. 1а показана эволюция радиальной зависимости z компоненты единичного вектора намагниченности, $\alpha_z(\rho, z)$, в центральном сечении частицы, $z/R = 0$, для вихревого состояния типа ha , для которого можно пренебречь слабой зависимостью распределения намагниченности от азимутальной координаты ϕ . Поведение α_z компоненты в верхней полусфере, $z/R \geq 0$, для частицы диаметром $D = 400$ нм показано на рис. 1б. Как показывает рис. 1а, для частицы диаметром $D = 100$ нм α_z компонента всюду положительна. Это приводит к большой приведенной остаточной намагниченности этой частицы, $M/M_s = 0.467$, поскольку

последняя есть интеграл от α_z компоненты по объему частицы. Однако, при увеличении диаметра частицы, $D \geq 240$ нм, α_z компонента меняет знак в области $\rho/R > 0.5 - 0.6$, что приводит к образованию в частице радиальной доменной стенки, и существенно уменьшает приведенную остаточную намагниченность до значений $M/M_s = 0.06$ и 0.011 для частиц с диаметрами $D = 240$ и 400 нм, соответственно.

Структуру состояния ha в наночастицах диаметром $D = 100-500$ нм можно, в пренебрежении слабой зависимостью относительно малой радиальной компоненты от угловой переменной φ , описать распределением намагниченности вида

$$\alpha_z(\rho, z) = \frac{1 - f_1(z)\rho^2}{1 + f_2(z)\rho^2}, \quad f_1(z) = a_1 + a_2 z^2, \quad f_2(z) = b_1 + b_2 z^4, \quad (1)$$

$$\alpha_\rho(\rho, z) = (g_1(z)\rho - g_2(z)\rho^2)z, \quad g_1(z) = 1 + z^8, \quad g_2(z) = c_1 + c_2 z^4, \quad (2)$$

$$\alpha_\varphi(\rho, z) = \pm \sqrt{1 - \alpha_\rho^2 - \alpha_z^2}. \quad (3)$$

Здесь a_1, a_2, b_1, b_2, c_1 и c_2 – есть численные вариационные параметры, значение которых зависит от диаметра частицы. В формулах (1)–(3) используются приведенные цилиндрические координаты, нормированные на радиус частицы R . Радиальная компонента единичного вектора $\alpha_\rho(\rho, z)$ отлична от нуля лишь вблизи полюсов сферы и по амплитуде не превышает 0.2. Вариационные параметры как функции диаметра частицы можно найти, минимизируя полную энергию частицы, которая включает обменную, магнитную энергии и энергию магнитной анизотропии. Так, для частицы диаметром $D = 320$ нм в результате минимизации полной энергии получены следующие значения безразмерных вариационных параметров: $a_1 = 2.6, a_2 = 5.5, b_1 = 3.7, b_2 = 46.0, c_1 = 0.7, c_2 = 1.6$.

Структуру состояния ea в том же интервале диаметров можно описать аналогичными формулами с той разницей, что α_z компонента в этом состоянии испытывает угловые осцилляции, описываемые дополнительным множителем $\cos(\varphi/3)$. Тем не менее, как показывает рис. 2, полные энергии и остаточные намагниченности состояний ha и ea в исследованном интервале диаметров близки.

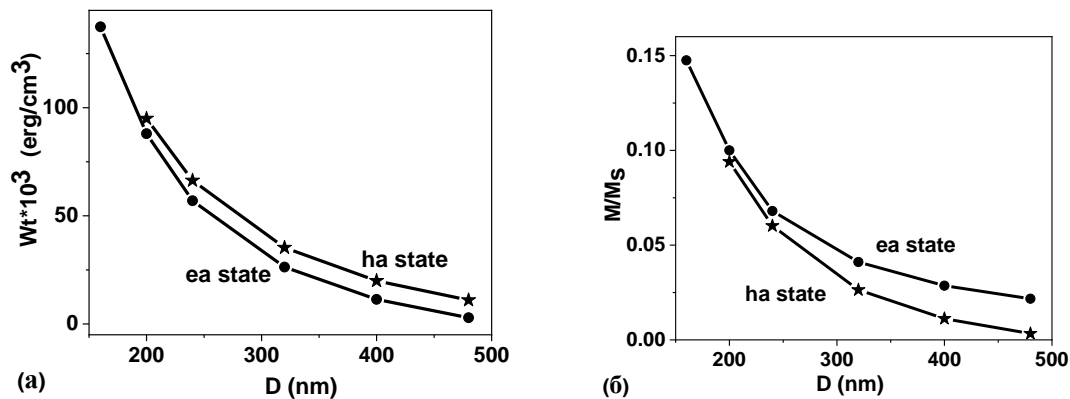


Рис. 2. Полная энергия (а) и остаточная намагниченность (б) вихревых состояний типа ha и ea в зависимости от диаметра сферической частицы магнетита.

Расчеты показывают (см. рис. 2а), что состояние ea является нижайшим по энергии в интервале диаметров $D > 100$ нм. В то же время, энергия состояния ha оказывается нижайшей при $D \leq 80$ нм. Интересно, что при всех исследованных диаметрах обменная и магнитная энергии указанных вихревых состояний весьма близки. Выигрыш же в полной энергии состояния ea для частиц больших диаметров связан с меньшим значением энергии магнитной анизотропии. Очевидно, это есть следствие того обстоятельства, что для состояния ea однородно намагниченный кор вихря направлен вдоль легкой оси магнитной анизотропии частицы, в то время как для состояния ha он направлен вдоль трудной оси анизотропии.

Будучи основным по энергии, состояние ea заведомо является устойчивым в области больших диаметров частицы.

Важно также отметить, что как показывает рис. 2б, для вихревых состояний обоого типа приведенная остаточная намагниченность сферических наночастиц магнетита с диаметрами $D > 400$ нм принимает весьма малые значения, $M/M_s < 0.03$. Поэтому на наш взгляд, представляется сомнительным, что остаточная намагниченность вулканических пород может быть полностью объяснена вкладом приблизительно однородно намагниченных коров вихревых состояний, существующих в наночастицах магнетита субмикронных размеров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00250, <https://rscf.ru/project/24-27-00250>.

Список использованных источников:

1. Witt A., Fabian K., Bleil U., Three-dimensional micromagnetic calculations for naturally shaped magnetite: Octahedra and magnetosomes// Earth Planet Sci. Lett. – 2005 –vol. 233 – p. 311.
2. Nagy L., Williams W., Muxworthy A.R., Fabian K., Almeida T.P., Conbhui P.O., Shcherbakov V.P., Stability of equidimensional pseudo–single-domain magnetite over billion-year timescales. //Proc. Natl. Acad. Sci. USA – 2017 – vol. 114 – p. 10356.
3. Fabian K., Shcherbakov V.P., Energy barriers in three-dimensional micromagnetic models and the physics of thermoviscous magnetization.//Geophysical Journal International – 2018 – vol. 215 – p. 314.
4. Usov N.A., Serebryakova O.N. Non uniform micromagnetic states in spheroidal magnetite nanoparticles.// J. Magn. Magn. Mater. – 2023 – vol. 588 – p. 171345.

УДК 537.9

Процессы перемагничивания неоднородных наночастиц магнетита

Усов Н.А.

д.ф-м.н., в.н.с., Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН)

Серебрякова О.Н.

с.н.с., Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН)

Аннотация. С помощью численного моделирования рассчитаны квазистатические петли гистерезиса неоднородных сфероидальных наночастиц магнетита с аспектным отношением полуосей $1 \leq a/b \leq 2.0$ в интервале поперечных диаметров $D = 60-90$ нм. Показано, что перемагничивание наночастиц происходит с образованием вихревых микромагнитных состояний. Определена остаточная намагниченность и коэрцитивная сила ориентированных и неориентированных разреженных ансамблей наночастиц в зависимости от аспектного отношения и диаметра частиц.

Ключевые слова: наночастицы магнетита, вихревое состояние, петли гистерезиса, остаточная намагниченность

Magnetization reversal processes in non-single-domain magnetite nanoparticles

Usov N.A.

Dr.Sc., Leading Researcher, Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation (IZMIRAN)

Serebryakova O.N.

Senior Researcher, Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation (IZMIRAN)

Annotation. *Quasi-static hysteresis loops of non-single-domain spheroidal magnetite nanoparticles with a semi-axes aspect ratio $1 \leq a/b \leq 2.0$ are calculated in the range of transverse diameters $D = 60 - 90$ nm using numerical simulation. It is shown that magnetization reversal of nanoparticles occurs with the formation of vortex micromagnetic states. The remanent magnetization and coercive force of oriented and non-oriented dilute assemblies of nanoparticles are determined depending on the aspect ratio and particle diameter.*

Keywords: *magnetite nanoparticles, vortex state, hysteresis loops, remanent magnetization*

Хорошо известно [1], что частицы магнетита субмикронных размеров часто встречаются в рассеянных природных ансамблях, сформировавшихся в вулканических породах, или в водных отложениях. Свойства таких наночастиц имеют большое значение для палеомагнитных исследований, поскольку наночастицы магнетита дают основной вклад в остаточную намагниченность горных пород и придонных отложений [1,2]. Неоднородные микромагнитные состояния вихревого типа наблюдаются в неоднородных наночастицах магнетита с помощью электронно-голографических методов [2,3]. В работе [4] на основе решения уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта (ЛЛГ) были рассчитаны устойчивые вихревые микромагнитные конфигурации, существующие в неоднородных сфероидальных наночастицах магнетита с отношением полуосей $a/b = 0.5-2.0$ в отсутствие внешнего магнитного поля. В данной работе, путем решения динамического уравнения ЛЛГ с феноменологическим затуханием [4], изучены процессы перемагничивания вытянутых неоднородных частиц магнетита. Намагниченность насыщения частиц принята равной $M_s = 450$ эме/см³, константа кубической магнитной анизотропии $K_c = -10^5$ эрг/см³, обменная константа $C = 2A = 2 \times 10^{-6}$ эрг/см. Частицы предполагаются вытянутыми вдоль оси Z декартовой системы координат, причем a и b есть продольная и поперечная полуоси частицы, соответственно, $D = 2b$ есть поперечный диаметр частицы. Легкие оси кубической анизотропии магнетита предполагаются параллельными единичным векторам $(\pm 1/\sqrt{3}, \pm 1/\sqrt{3}, \pm 1/\sqrt{3})$. Для численного моделирования сфероидальная наночастица аппроксимируется совокупностью $N \sim 10^4$ малых ферромагнитных кубиков с размером ребра 3 – 5 нм, малым по сравнению с обменной длиной магнетита, $L_{ex} = 31.4$ нм. Параметр магнитного затухания принят равным $\kappa = 0.5$. В работе построены петли гистерезиса разреженных ориентированных ансамблей наночастиц магнетита в зависимости от поперечного диаметра частиц D для различных направлений внешнего магнитного поля по отношению к оси симметрии сфероидальной частицы. Петли гистерезиса случайно ориентированных ансамблей наночастиц получены затем усреднением петель ориентированного ансамбля по направлениям внешнего магнитного поля, которое задается сферическими углами ω и ψ .

Рассчитанные с помощью компьютерного моделирования нисходящие части квазистатических петель гистерезиса частиц с аспектным отношением $a/b = 1.5$ показаны на рис. 1 различными символами для частиц с поперечными диаметрами $D = 62, 74$ и 82 нм, соответственно, для различных углов наклона поля ω при фиксированном значении азимутального угла $\psi = 0$. Зависимость петель от угла ψ незначительна. Частица с поперечным диаметром $D = 62$ нм является однодоменной, но перемагничивается с помощью неоднородной моды закручивания [5], в то время как частицы с $D = 74$ и 82 нм в отсутствие внешнего магнитного поля находятся в вихревых состояниях. Петли гистерезиса в области

абсолютной однодоменности, $D \leq D_{cr}$, которые не зависят от диаметра частицы, показаны на рис. 1 сплошными кривыми и обозначены как SD_cr.

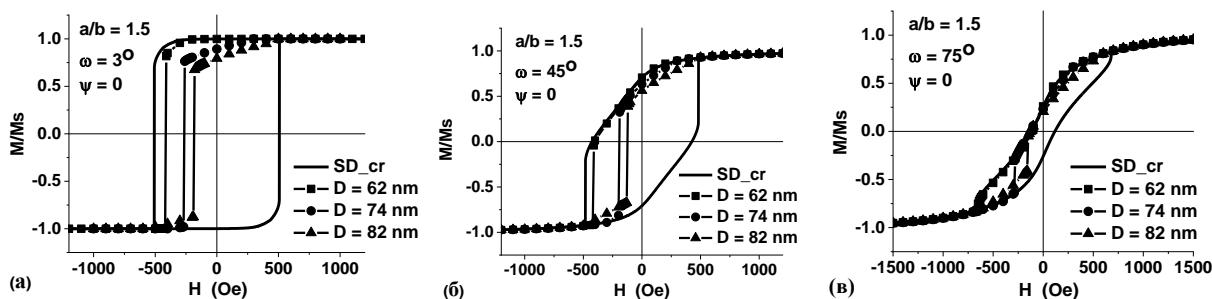


Рис. 1. Угловая зависимость нисходящих частей петель гистерезиса частиц с $a/b = 1.5$ и диаметрами $D = 62, 74$ и 82 нм (различные символы), в сравнении с петлями гистерезиса в области абсолютной однодоменности, $D \leq D_{cr}$, которые обозначены как SD_cr.

Как показывает рис. 1, при уменьшении магнитного поля от большого положительного значения петли гистерезиса для частиц с $D = 62$ нм идут фактически по кривым SD_cr вплоть до точки нуклеации моды закручивания. При этом, за счет более ранней нуклеации моды закручивания, коэрцитивная сила частицы с $D = 62$ нм уменьшается по сравнению с петлями Стонера – Вольфарта [5]. Однако, с увеличением угла наклона поля $\omega \geq 60^\circ$ уменьшение коэрцитивной силы этой частицы становится незначительным. В то же время, для частиц с диаметрами $D = 74$ и 82 нм нуклеация вихревого состояния происходит уже в положительном магнитном поле. В результате нуклеации вихревого состояния, остаточная намагниченность этих частиц при углах поля $\omega \leq 30^\circ$ заметно понижается и их петли гистерезиса существенно отклоняются от кривых SD_cr.

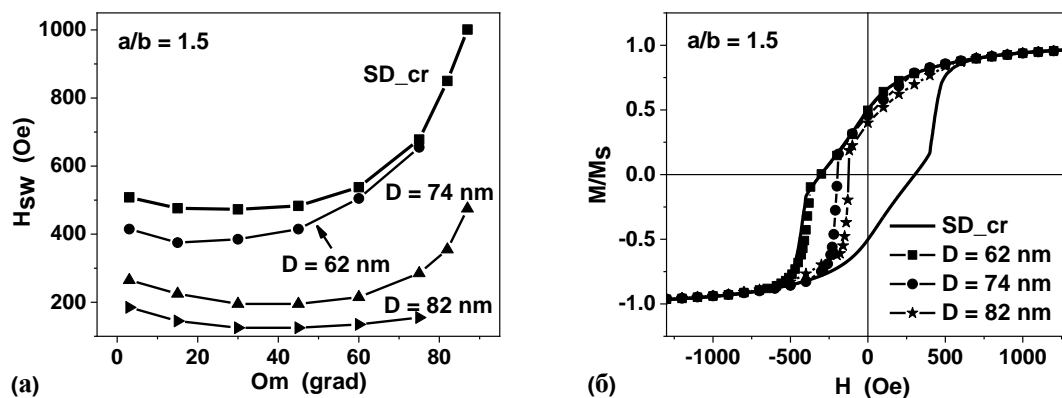


Рис. 2. а) Угловая зависимость полей перемагничивания сфероидальных наночастиц магнетита с аспектным отношением $a/b = 1.5$ в зависимости от поперечного диаметра частиц. б) Петли гистерезиса разреженных неориентированных сфероидальных частиц магнетита различных диаметров.

Кроме того, как показывает рис. 2а, коэрцитивная сила для неоднородных наночастиц магнетита уменьшается с увеличением диаметра частицы и оказывается значительно меньше, чем коэрцитивная сила частицы с $D = 62$ нм. Очевидно, что существенное уменьшение коэрцитивной силы можно рассматривать как характерной свойство частиц, находящихся в вихревых состояниях в области слабых магнитных полей. На рис. 2б различными символами показаны петли гистерезиса случайно ориентированных, разреженных ансамблей частиц магнетита с диаметрами $D = 62, 74$ и 82 нм и аспектным отношением $a/b = 1.5$ в сравнении с соответствующей петлей для ансамбля однодоменных частиц с когерентным вращением намагниченности, SD_cr. Как видно из этого рисунка, петля гистерезиса для частиц с $D = 62$ нм лишь незначительно отличается от петли SD_cr, в то время как петли гистерезиса для

неоднородных частиц с диаметрами $D = 74$ и 82 нм имеют пониженную остаточную намагниченность и существенно меньшее значение коэрцитивной силы.

Аналогичные результаты были получены также для сферических частиц магнетита (рис. 3а) и вытянутых сфероидальных частиц с аспектным отношением $a/b = 2.0$ (рис. 3б).

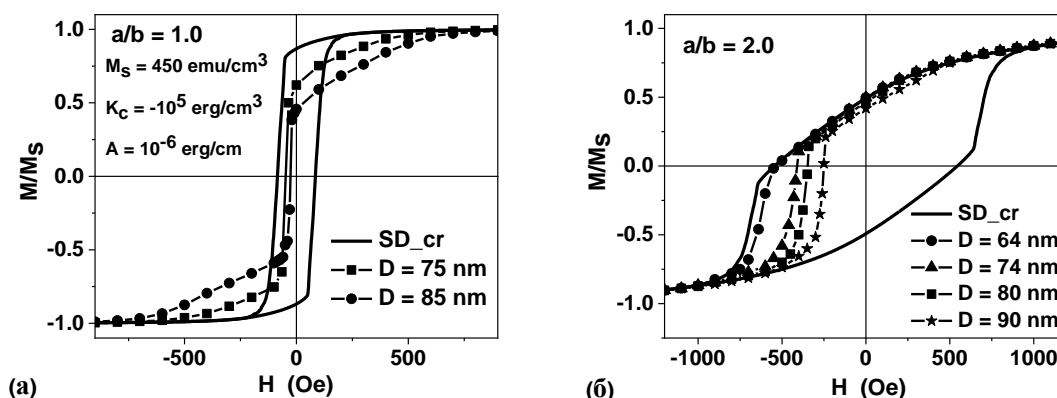


Рис. 3. Петли гистерезиса неориентированных разреженных ансамблей сферических наночастиц магнетита (а) и сфероидальных наночастиц с аспектным отношением $a/b = 2.0$ (б) в зависимости от поперечного диаметра частиц $D = 2b$.

Для ориентированных ансамблей сферических наночастиц магнетита присутствует некоторая зависимость квазистатических петель гистерезиса от азимутального угла ψ , которая исчезает при усреднении по этому углу в хаотически ориентированном ансамбле наночастиц. Как показывает рис. 3а, кроме уменьшенного значения коэрцитивной силы, для сферических наночастиц характерно также заметное снижение остаточной намагниченности неориентированного ансамбля при увеличении диаметра частиц. В то же время, как видно из рис. 3б, для наночастиц с аспектным отношением $a/b = 2.0$ в исследованном интервале поперечных диаметров петли гистерезиса идут достаточно близко к кривой SD_cr, которая представляет петлю гистерезиса неориентированного ансамбля частиц с когерентным вращением намагниченности. Таким образом, хотя для вытянутых сфероидальных частиц характерна существенно пониженная коэрцитивная сила, их остаточная намагниченность близка к таковой для ансамбля однодоменных наночастиц.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00250, <https://rscf.ru/project/24-27-00250>.

Список использованных источников:

1. Dunlop D.J., Ozdemir O. Rock magnetism, fundamentals, and frontiers – Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K. – 1997 – 565 с.
2. Harrison R.J., Dunin-Borkowski R.E., Putnis A. Direct imaging of nanoscale magnetic interactions in minerals.// Proc. Natl. Acad. Sci. USA, – 2002 – vol. 99 – p. 16556 – 16561.
3. Almeida T.P., Kasama T., Muxworthy A.R., Williams W., Nagy L., Dunin-Borkowski R.E. Observing thermomagnetic stability of nonideal magnetite particles: Good paleomagnetic recorders?// Geophys. Res. Lett. – 2014 – vol. 41 – p. 7041 – 7047.
4. Usov N.A., Serebryakova O.N. Non uniform micromagnetic states in spheroidal magnetite nanoparticles.// J. Magn. Magn. Mater. – 2023 – vol. 588 – p. 171345.
5. Aharoni A., Introduction to the theory of ferromagnetism – Clarendon Press, Oxford – 1996 – 315 с.

УДК 537.636, 537.621.2

Формирование обменного смещения в системе микрообъектов на основе спиновых клапанов с различной композицией синтетического антиферромагнетика

Гермизина А.А.

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

Миляев М.А.

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

Наумова Л.И.

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

Чернышова Т.А.

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

Павлова А.Ю.

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

Проглядо В.В.

н.с., Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН

***Аннотация.** Микрообъекты в форме ромба, реализующие схему моста Уитстона, были изготовлены из пленок спиновых клапанов с синтетическим антиферромагнетиком. Найдена процедура единой термомагнитной обработки микрообъекта, формирующая противоположные по знаку поля обменного смещения в непараллельных сторонах ромба. В работе исследовано влияние композиции синтетического антиферромагнетика на выходную характеристику моста Уитстона после формирования однонаправленной магнитной анизотропии путем единой термомагнитной обработки имеющего форму ромба микрообъекта.*

***Ключевые слова:** спиновый клапан, мост Уитстона, магнитная анизотропия, анизотропия формы, магнитное поле обменного смещения*

Formation of exchange bias in a system of micro-objects based on spin valves with a different synthetic antiferromagnet composition

Germizina A.A.

Junior Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the UB RAS

Milyaev M.A.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Head of laboratory, Senior Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the UB RAS

Naumova L.I.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the UB RAS

Chernyshova T.A.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Junior Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the UB RAS

Pavlova A.Y.

Candidate of Technical Sciences, Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the UB RAS

Proglyado V.V.

Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the UB RAS

Annotation. *Rhombus-shaped micro-objects implementing the Wheatstone bridge scheme were fabricated from films of spin valves with a synthetic antiferromagnet. A procedure for the unified thermomagnetic treatment of a micro-object is found. The procedure forms exchange displacement fields opposite in sign in the nonparallel sides of the rhombus. The effect of the composition of a synthetic antiferromagnet on the output characteristic of the Wheatstone bridge after the formation of unidirectional magnetic anisotropy by a single thermomagnetic treatment of a rhombus-shaped micro-object is investigated.*

Keywords: *spin valve, Wheatstone bridge, magnetic anisotropy, shape anisotropy, exchange bias field*

Наноструктуры типа спиновый клапан являются магниточувствительным материалом для микросенсоров магнитного поля. Использование схемы моста Уитстона позволяет достичь высокой чувствительности и точности измерений, а также снижения шума и температурного дрейфа. [1-4]

Основными слоями спинового клапана являются два ферромагнитных (ФМ) слоя, разделенные немагнитным слоем, и антиферромагнитный (АФМ) слой. Один из ФМ слоев называется свободным и перемагничивается в полях, близких к нулевому. Второй ФМ слой называется закрепленным и его магнитный момент связан обменным взаимодействием с соседним АФМ слоем. Петля гистерезиса перемагничивания закрепленного ФМ слоя сдвинута от $H = 0$. Для увеличения этого обменного сдвига и уменьшения магнитостатического взаимодействия между ФМ слоями закрепленный слой спинового клапана заменяют синтетическим антиферромагнетиком (САФ). САФ состоит из двух ФМ слоев, закрепленного и референтного, разделенных слоем Ru. Толщина слоя Ru соответствует антиферромагнитному максимуму косвенного обменного взаимодействия.

При напылении спинового клапана в магнитном поле индуцируется одноосная анизотропия с осью легкого намагничивания (ОЛН). В результате обменного взаимодействия, закрепленного ФМ слоя и АФМ слоя, возникает однонаправленная анизотропия, которая характеризуется осью однонаправленной анизотропии (ООА). Для микрообъектов на основе спиновых клапанов существенна анизотропия формы.

В напыленном спиновом клапане процедура термомагнитной обработки (ТМО) позволяет сформировать отличное от изначального, направление ООА. ТМО включает в себя нагрев до температуры блокировки АФМ и последующее охлаждение в магнитном поле. На формирование новых ООА при ТМО микрообъекта влияет не только одноосная анизотропия, но и анизотропия формы. Также существенное влияние может оказывать величина суммарного магнитного момента, закрепленного и референтного ФМ слоев САФ спинового

клапана. Суммарный магнитный момент в свою очередь зависит от соотношения толщин ФМ слоев в САФ.

Объектом исследования в данной работе являлись изготовленные из единой пленки спинового клапана микрообъекты, имеющие форму ромба и реализующие схему моста Уитстона. Проведено исследование зависимости выходных характеристик моста Уитстона от композиции САФ в спиновом клапане.

Спиновые клапаны $\text{Ta}(5)/[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}]_{60}\text{Cr}_{40}(5)/\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}(5,5)/\text{Cu}(2,2)/\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}(t_p)/\text{Ru}(0,8)/\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}(t_3)/\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{50}(10)/\text{Ta}(5)$ изготовлены методом магнетронного напыления (толщины слоев указаны в нм). Закрепленный слой - САФ $\text{CoFeNi}/\text{Ru}/\text{CoFeNi}$. Синтезированные наноструктуры обладают высоким совершенством микроструктуры слоев и гладкими интерфейсами. С помощью метода безмасковой лазерной литографии изготовлены микрообъекты в форме ромба. Длина стороны ромба равна 315 мкм, ширина - 2 мкм. ОЛН направлена вдоль длинной диагонали ромба. В результате двухэтапной ТМО микрообъекта в поле магнитного насыщения спинового клапана и в магнитном поле, близком к нулевому, в соседних сторонах ромба были сформированы попарно противоположные по знаку ООА. Каждая сторона ромба действует как активный магниточувствительный элемент и устройство работает в режиме полного моста Уитстона. При ТМО магнитное поле было приложено вдоль короткой диагонали ромба.

Полученные сенсорные элементы имеют выходную характеристику в форме ступени в поле, приложенном вдоль длинной диагонали ромба. Разница толщин ФМ слоев в САФ составляла 0,3, 0,5, 1, 1,5, 2 нм. На рис. 1 представлены выходные характеристики сенсоров на основе спиновых клапанов с разными толщинами референтных слоев.

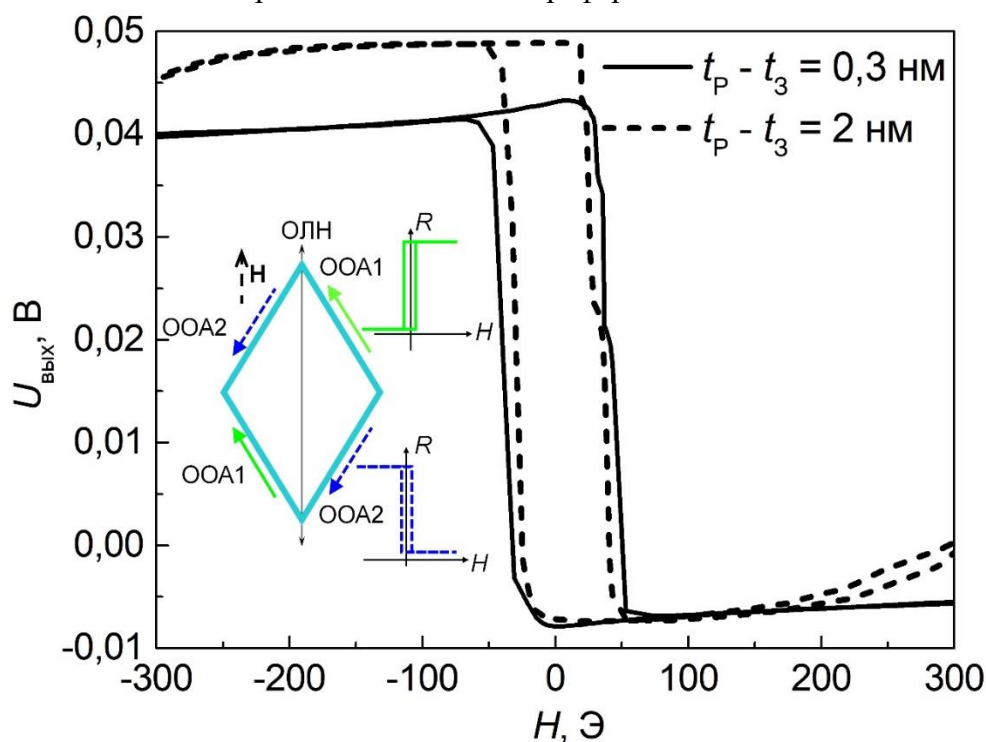


Рис. 1. Выходные характеристики сенсорных элементов с разными соотношениями толщин ФМ слоев в САФ. Вставка: схема микрообъекта в виде ромба с направлениями ООА в каждой микрополоске, ОЛН, магнитного поля при измерении H и полевые зависимости сопротивления микрополосок.

С увеличением разницы в толщинах референтного и закрепленного слоев возрастает суммарный магнитный момент структуры САФ. Для синтетического антиферромагнетика $\text{CoFeNi}/\text{Ru}/\text{CoFeNi}$ определено соотношение толщин ферромагнитных слоев, при которых в результате ТМО по всей площади микрополоски формируется одинаковый обменный сдвиг.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ (тема “Спин”, № 122021000036-3)

Список использованной литературы:

1. Mabarroh N., Alfansuri T., Wibowo N.A., Istiqomah N.I., Tumbelaka R.M., Suharyadi E. Detection of green-synthesized magnetite nanoparticles using spin-valve GMR-based sensor and their potential as magnetic labels // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2022. – Vol. 560. – 169645.
2. Freitas P.P., Ferreira R., Cardoso S. Spintronic sensors // *Proc. IEEE.* – 2016. – Vol. 104, Issue 10. – p. 1894–1918.
3. Carvalho M., Ribeiro P., Romão V., Cardoso S. Smart fingertip sensor for food quality control: Fruit maturity assessment with a magnetic device // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2021. – Vol. 536. – 168116.
4. Luong V.S., Nguyen A.T., Tran T.H.D. Antiparallel-Pinned Spin Valves with Modified Artificial Antiferromagnetic Layer for Full-Bridge Magnetic Sensors // *IEEE Trans. Magn.* – 2018. – Vol. 54, Issue 11. – 4001705.

УДК 538.955, 621.377.624.6, 004.942

Критическое поле переключения спинового вентиля в магнитном поле произвольного направления

Юсипова Ю.А.

главный специалист отдела разработки программного обеспечения
ООО «Альфачип»

***Аннотация.** Благодаря большому числу режимов работы спиновые вентили являются универсальными элементами микроэлектронных устройств, поэтому исследования, направленные на повышение их энергоэффективности и чувствительности, являются актуальными. В данной работе аналитически получены зависимости критического поля переключения спинового вентиля с планарной и перпендикулярной анизотропией слоев от коэффициента анизотропии и направления магнитного поля. Построены бифуркационные диаграммы в плоскостях магнитное поле — угол отклонения от оси анизотропии, на которых выделены области с качественно различной динамикой вектора намагниченности свободного слоя спинового вентиля. Показано, что наименьшее значение критического поля переключения наблюдается при отклонении магнитного поля от оси анизотропии на угол 45° .*

***Ключевые слова:** спиновый вентиль, считывающие головки жестких дисков, магнитные датчики, поле переключения.*

Critical switching characteristics of the spin valve in the arbitrary directional magnetic field

Iusipova Yu.A.

Chief specialist of software development department of limited liability company
«Alphachip»

***Annotation.** Due to the large number of operating modes, spin valves have become universal elements of microelectronic devices, so research aimed at increasing their energy efficiency and sensitivity is actual. In this work, the dependences of the spin-valve critical switching field with planar and perpendicular anisotropy of layers on the anisotropy coefficient and the direction of the magnetic field were analytically obtained. Bifurcation diagrams were constructed in the planes magnetic field — angle of deviation from the anisotropy axis, in which regions with qualitatively different dynamics of the magnetization vector of the spin-valve free layer were identified. It is shown that the lowest value of the critical switching field is observed when the magnetic field deviates from the anisotropy axis by an angle of 45° .*

***Keywords:** spin valve, hard disk read heads, magnetic field sensor, switching field.*

Магнитные сверхрешетки, такие как спиновые вентили, широко применяются в микроэлектронике благодаря своей универсальности, масштабируемости и совместимости с К-МОП технологиями. Однако одной из главных проблем их применения является высокое энергопотребление при переключении магнитным полем [1, 2]. Данная работа была направлена на исследование поведения спинового вентиля в магнитном поле произвольного

направления для нахождения способов снижения энергопотребления спиновых вентилях, как ячеек магнитной памяти и повышения чувствительности, как датчиков магнитного поля.

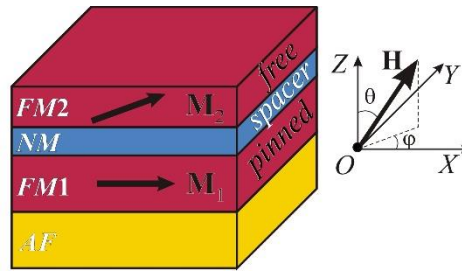


Рис. 1. Геометрия модели.

Объект исследования работы представлен на рис. 1. Это спиновый вентиль с квадратным поперечным сечением, состоящий из двух ферромагнитных слоев $FM1$ и $FM2$, соединенных немагнитной прослойкой NM . Рассматривались два типа анизотропии ферромагнитных слоев: планарная (Рис. 1) и перпендикулярная к плоскости слоев. Антиферромагнитный слой AF нужен для фиксации направления намагниченности \mathbf{M}_1 толстого (закрепленного) ферромагнитного слоя структуры $FM1$. Сопротивление свёрхрешетки зависит от направления вектора намагниченности \mathbf{M}_2 тонкого (свободного) слоя $FM2$. Структура помещена в магнитное поле \mathbf{H} , направление которого определяется азимутальным φ и зенитным θ углами. В качестве базовых материалов для слоев $FM1$ и $FM2$ рассматривались шесть магнитомягких материалов: кобальт, железо, $Fe_{70}Co_{30}$, $Fe_{60}Co_{20}B_{20}$, $Co_{93}Gd_7$ и $Co_{80}Gd_{20}$, а также четыре магнитотвердых сплава: $Co_{50}Pt_{50}$, $Fe_{50}Pt_{50}$, $Fe_{50}Pd_{50}$, $Fe_{50}Ni_{50}$.

Спиновый вентиль имеет два стационарных состояния: параллельное с сопротивлением R_P и антипараллельное с сопротивлением R_{AP} . Полное сопротивление магнитной свёрхрешетки для любого положения вектора \mathbf{M}_2 описывается выражением $R = 0.5 (R_P + R_{AP}) + 0.5 (R_P - R_{AP})(M_i / M_s)$, где M_i — проекция вектора \mathbf{M}_2 на ось анизотропии, а M_s — намагниченность насыщения.

Динамика вектора \mathbf{M}_2 описывается уравнением Ландау-Лифшица-Гильберта

$$\frac{\partial \mathbf{M}_2}{\partial t} = -|\gamma| \mu_0 \left[\mathbf{M}_2 \times \mathbf{H}_{\text{эфф}} \right] + \frac{\alpha}{M_s} \left[\mathbf{M}_2 \times \frac{\partial \mathbf{M}_2}{\partial t} \right], \quad (1)$$

где α — коэффициент диссипации, γ — гиромагнитное отношение, $\mathbf{H}_{\text{эфф}}$ — эффективное магнитное поле, включающее в себя поле анизотропии, поле размагничивания и поле, обусловленное вкладом спин-поляризованного тока, а также внешнее магнитное поле.

В работах [1, 2] проведен бифуркационный анализ системы (1), при этом было обнаружено, что критическое поле переключения спинового вентиля H_{\min} из параллельного состояния в антипараллельное в сильной степени зависит от направления вектора магнитного поля \mathbf{H} , а функция $H_{\min}(\varphi, \theta)$ имеет нелинейный характер. В статье [1] показано, что для планарной анизотропии при уменьшении зенитного угла θ критическое поле переключения монотонно растет, поэтому, в этом случае, минимальное H_{\min} будет наблюдаться при $\theta = \pi / 2$. Для перпендикулярной анизотропии H_{\min} напротив не зависит от угла φ , и немонотонно зависит от угла θ [2].

Для того, чтобы численно получить зависимость $H_{\min}(\varphi, \theta)$, следуя методике работ [1, 2] были построены бифуркационные диаграммы (рис. 2) для спинового вентиля на основе кобальта с планарной анизотропией в плоскости $\varphi - H$ ($\theta = \pi / 2$) и для $Fe_{50}Pt_{50}$ с перпендикулярной анизотропией для $\theta - H$. На них выделены области с качественно различной динамикой вектора намагниченности \mathbf{M}_2 . В областях I и VI переключения спинового вентиля быть не может, так как оба основных стационарных состояния являются устойчивыми. В областях II и IV наблюдается переключение в параллельное состояние, а в областях III и V — в антипараллельное. Красным выделены линии бифуркации ограничивающие I и VI области — это линии устойчивости особых точек системы (1),

соответствующих параллельному и антипараллельному состоянию спиновому вентилю. Они определяют зависимость критического поля переключения от углов φ и θ .

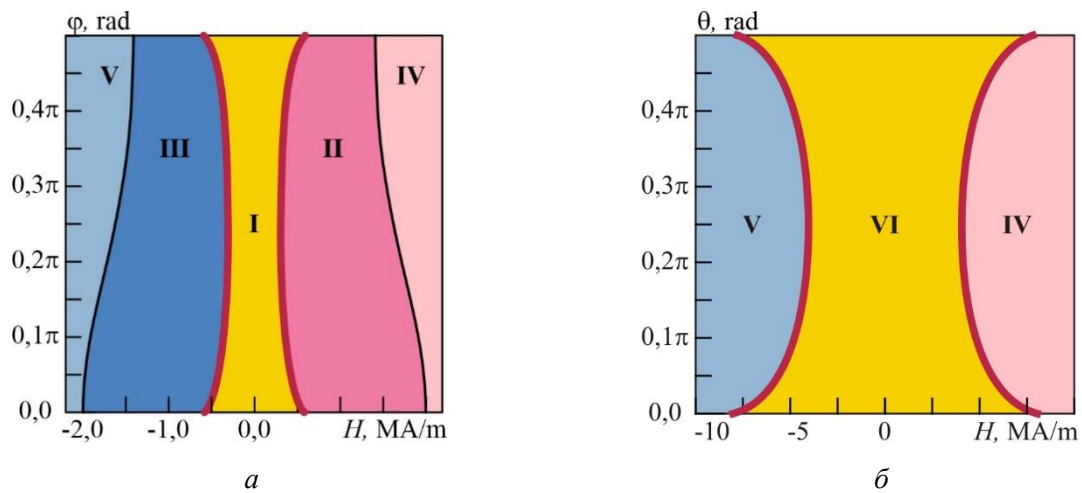


Рис. 2. Бифуркационные диаграммы, рассчитанные для спинового вентиля на основе кобальта с планарной анизотропией $\theta = \pi / 2$ (а) и для сверхрешетки с ферромагнитными слоями из $Fe_{50}Pt_{50}$ с перпендикулярной анизотропией (б).

В работах [1, 2] были получены уравнения расчета особых точек системы (1) для планарной и перпендикулярной анизотропий. Применяв к ним критерии потери устойчивости стационарных состояний спиновое вентиля, в ходе данного исследования, была аналитически получена формула для расчета критического поля переключения нормированного на намагниченность насыщения (2).

$$H_{\min} / M_s = h_{\min} = \pm N((q^2 + sq + s^2 - 1) / q)^{1/2}, \quad (2)$$

где $q = (0.5(s - 1)((4s + 5)^{1/2} + 2s + 2s^2 - 1))^{1/3}$, для планарной анизотропии ($\theta = \pi / 2$) $N = k$, $s = 9\cos^4\varphi - 9\cos^2\varphi + 1$, для перпендикулярной анизотропии (φ — любое) $N = k - 1$, $s = 9\cos^4\theta - 9\cos^2\theta + 1$. Коэффициент поля анизотропии k рассчитывается с помощью константы анизотропии K_a и намагниченности насыщения $k = 2K_a / (M_s^2\mu_0)$. На рис. 3 представлены соответственные графики зависимости $h_{\min}(k, \varphi)$ и $h_{\min}(k, \theta)$ для планарной и перпендикулярной анизотропии. Для планарной анизотропии минимальное значение h_{\min} половине k при $\theta = \pi / 2$, $\varphi = \pi / 4$, а для перпендикулярной анизотропии — $(k - 1) / 2$ при $\theta = \pi / 4$, что в два раза меньше, чем критическое поле переключения при направлении магнитного поля вдоль оси анизотропии. Это означает двукратное снижение энергопотребления спиновое вентиля как ячейки памяти. В табл. 1 представлены рассчитанные критические поля переключения спиновое вентиля при направлении поля вдоль оси анизотропии и при его отклонении от него на 45° , а также оценки времени переключения t при этих полях, сделанные с помощью моделирования переключения спиновое вентиля методом Рунге-Кутты. Из данных табл. 1 видно, что практически для всех материалов время переключения ниже для поля, отклоненного от оси анизотропии на угол в $\pi / 4$. Соответствующие ячейки закрашены серым.

При переключении спиновое вентиля в поле непараллельном оси анизотропии, устойчивая особая точка, в которую происходит переключение, смещена относительно стационарного состояния равновесия. Таким образом, переключение будет происходить в два этапа: в магнитном поле вектор \mathbf{M}_2 переключится в устойчивую особую точку вблизи стационарного состояния, а затем при выключении магнитного поля конец \mathbf{M}_2 перейдет в стационарное состояние, в бассейне притяжения которого он будет находится.

Спиновое вентиля как датчика магнитного поля S_0 обратно пропорциональна критическом полю переключения (табл. 1). Однако смещение устойчивого положения равновесия от стационарного снижает коэффициент гигантского магнетосопротивления, что в свою очередь уменьшает чувствительность S_0 . Проведенные численные эксперименты для десяти рассмотренных материалов по моделированию динамики спиновое вентиля в

магнитном поле, отклоненном от оси анизотропии, показали, что при величине поля близкой к критической отклонение особой точки от стационарного состояния составляет не более 10%.

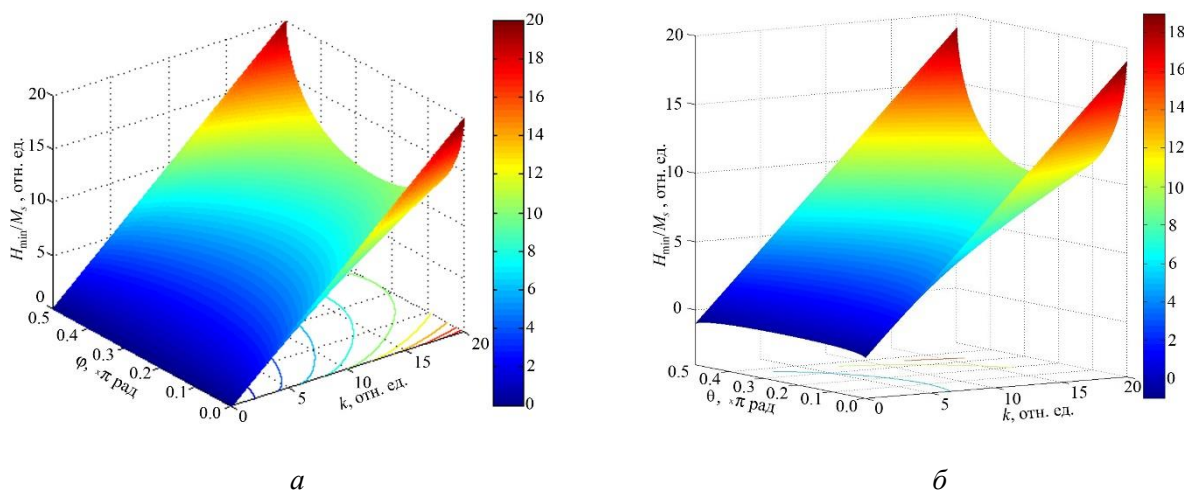


Рис. 3. Зависимость поля переключения H_{min} для планарной анизотропии слоев от коэффициента k и угла φ .

Таблица 1. Критические поля переключения, время переключения при этих полях и чувствительность спинового вентиля, рассчитанные для различных материалов.

Материал	Планарная анизотропия						Перпендикулярная анизотропия					
	$\theta = \pi / 2, \varphi = 0$			$\theta = \pi / 2, \varphi = \pi / 4$			$\theta = 0$			$\theta = \pi / 4$		
	$H_{min},$ МА/м	$t,$ нс	$S_0,$ Ом/Тл	$H_{min},$ МА/м	$t,$ нс	$S_0,$ Ом/Тл	$H_{min},$ МА/м	$t,$ нс	$S_0,$ Ом/Тл	$H_{min},$ МА/м	$t,$ нс	$S_0,$ Ом/Тл
Co	0.605	9	0.27	0.301	7	0.52	0.922	47	0.20	0.461	42	0.39
Fe	0.047	17	7.69	0.022	21	14.91	1.899	55	0.21	0.949	60	0.40
Fe ₇₀ Co ₃₀	0.032	11	23.01	0.015	3	44.64	2.416	18	0.36	1.208	16	0.69
Fe ₆₀ Co ₂₀ B ₂₀	0.218	7	6.66	0.107	4	12.93	1.425	29	1.06	0.712	25	2.06
Co ₉₃ Gd ₇	0.013	12	45.92	0.007	8	89.08	1.003	84	0.15	0.501	73	0.29
Co ₈₀ Gd ₂₀	0.028	442	0.77	0.014	135	1.49	0.069	464	0.41	0.034	126	0.79
Co ₅₀ Pt ₅₀	9.645	5	0.02	4.851	1	0.04	9.347	17	0.02	4.673	10	0.04
Fe ₅₀ Pd ₅₀	2.616	9	0.23	1.314	6	0.45	1.631	254	0.40	0.815	212	0.77
Fe ₅₀ Pt ₅₀	9.126	4	0.04	4.610	1	0.08	8.179	49	0.05	4.089	24	0.09
Fe ₅₀ Ni ₅₀	1.645	7	0.04	0.817	9	0.07	0.427	446	0.17	0.213	382	0.32

В работе получена зависимость критического поля переключения спинового вентиля H_{min} от его направления. Определено, что отклонение магнитного поля на угол в 45° от оси анизотропии снижает H_{min} в два раза и увеличивает быстродействие спинового вентиля для большинства рассмотренных материалов. Показано, что уменьшение чувствительности за счет отклонения магнитного поля от оси анизотропии полностью нивелируется ее ростом за счет двукратного снижения H_{min} .

Список использованной литературы:

1. Юсипова Ю.А., Скиданов В.А. Динамика вектора намагниченности свободного слоя спинового вентиля с планарной анизотропией под действием магнитных полей произвольного направления // Известия РАН. Серия Физическая. – 2023. – т. 87. – № 3. – с. 359-367.
2. Iusipova Iu.A. Precession frequency and switching time of the magnetization vector in the spin-valve active layer with perpendicular anisotropy // IEEE Magnetics Letters. – 2022. – V. 13. – Art. No. 4501605.

УДК 537.6

Магнитные и магнитокалорические свойства пленок упорядоченного сплава FeAl, модифицированного ионным облучением**Пашенькин И.Ю.**

младший научный сотрудник, Институт физики микроструктур РАН

Полушкин Н.И.

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт физики микроструктур РАН

Скуратов В.А.д.ф.-м.н., профессор, Государственный университет «Дубна»
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
начальник сектора, Объединенный институт ядерных исследований**Курляндская Г.В.**

д.ф.-м.н., профессор, Уральский федеральный университет

Кудюков Е.В.

к.ф.-м.н., научный сотрудник, Уральский федеральный университет

Фраерман А.А.

д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Институт физики микроструктур РАН

Сапожников М.В.д.ф.-м.н., заведующий отделом, Институт физики микроструктур РАН
профессор, Нижегородский Государственный Университет им. Н.И. Лобачевского

***Аннотация.** Экспериментально исследованы магнитные и магнитокалорические свойства пленок упорядоченного сплава FeAl, модифицированных ионным облучением. Показано, что термический отжиг в вакууме при температуре 673 К слоев Fe₆₀Al₄₀, полученных методом магнетронного распыления, приводит к сверхструктурному упорядочению, которое сопровождается падением величины намагниченности насыщения с 600 до 100 ед/см³, а также полному исчезновению остаточной намагниченности. Увеличение степени упорядоченности сплава после термического отжига подтверждается картинками электронной микродифракции. Облучение упорядоченных слоев Fe₆₀Al₄₀ ионами Xe с энергией 160 MeV приводит к увеличению намагниченности насыщения и появлению остаточной намагниченности при дозе в 0,1 ион/нм². При этом все пленки, облученные дозами в диапазоне 0,03 – 3 ион/нм², обладают анизотропией типа «легкая плоскость». Обнаружено увеличение магнитокалорического потенциала ΔS пленок Fe₆₀Al₄₀ после их облучения ионами с дозой 0,1 ион/нм². Однако измеренное значение ΔS существенно меньше теоретически предсказываемых значений. Это может быть связано с частичной упорядоченностью исходной пленки и наличием в ней суперпарамагнитных кластеров.*

***Ключевые слова:** сплавы Fe-Al, парамагнетизм, ферромагнетизм, сверхструктура, ионное облучение, магнитокалорический эффект, суперпарамагнитные кластеры*

Magnetic and magnetocaloric properties of films of ordered FeAl alloy modified by ion irradiation

Pashen'kin I. Yu.

Junior researcher, Institute for Physics of Microstructures of RAS

Polushkin N. I.

Ph.D., Senior Researcher, Institute for Physics of Microstructures of RAS

Skuratov V. A.

Dr.Sc., professor, Dubna State University
National Research Nuclear University MEPhI
Head of the Department, Joint Institute for Nuclear Research

G. V. Kurlyandskaya

Dr.Sc., professor, Ural Federal University

Kudyukov E. V.

Ph.D., Researcher, Ural Federal University

Fraerman A. A.

Dr.Sc., Principal Investigator, Institute for Physics of Microstructures of RAS

Sapozhnikov M. V.

Dr.Sc., Head of the Department, Institute for Physics of Microstructures of RAS
professor, Lobachevsky State University

Annotation. *The magnetic and magnetocaloric properties of films of an ordered FeAl alloy modified by ion irradiation were experimentally studied. It has been shown that thermal annealing in vacuum at a temperature of 673 K of Fe₆₀Al₄₀ layers deposited by magnetron sputtering leads to the superstructural ordering, which is accompanied by a drop in the saturation magnetization value from 600 to 100 emu/cm³, as well as the complete disappearance of residual magnetization. The increase in the ordering of the alloy after thermal annealing is confirmed by electron microdiffraction patterns. Irradiation of ordered Fe₆₀Al₄₀ layers with Xe ions with an energy of 160 MeV leads to an increase in saturation magnetization and an appearance of significant remanent magnetization already at a dose of 0.1 ion/nm². Moreover, all films irradiated with doses in the range 0.03 – 3 ion/nm² have in-plane anisotropy. It is also shown that the magnetocaloric potential ΔS of Fe₆₀Al₄₀ films irradiated with a fluence of 0.1 ion/nm² increases slightly, but its value is significantly less than the theoretically predicted values. This may be due to the partial ordering of the initial film and the presence of superparamagnetic clusters in it.*

Keywords: *Fe-Al alloys, paramagnetism, ferromagnetism, superstructure, ion irradiation, magnetocaloric effect, superparamagnetic clusters*

В последнее время наблюдается значительный интерес к магнитокалорическим свойствам наноструктурированных магнитных материалов [1]. Необходимым условием для использования магнитных наноструктур в магнитокалорических приложениях является отсутствие магнитного гистерезиса и нулевая остаточная намагниченность. Это может быть достигнуто в системах невзаимодействующих магнитных наночастиц или суперпарамагнитных (SP) кластеров. Любая система, которая ведет себя как парамагнетик (PM), может проявлять значительный магнитокалорический эффект (МКЭ) вблизи фазового перехода. Одним из преимуществ использования магнитных наноструктур является возможность уменьшения магнитных полей, необходимых для достижения заметного МКЭ,

до нескольких кОе. Такие относительно слабые поля могут создаваться с помощью небольших постоянных магнитов.

В рамках данной работы исследованы магнитные и магнитокалорические свойства матрицы «слабого» ферромагнетика (или РМ) с наноразмерными включениями «сильного» ферромагнетика (FM). При наличии сильного обменного взаимодействия между включениями и матрицей встроенные обменные поля, возникающие на границах, могут изменять намагниченность матрицы и ее магнитную энтропию, т.е. ее магнитокалорический потенциал ΔS . Поскольку поле перемагничивания FM-материалов обычно не превышает несколько кОе, в такой композитной системе возможен выигрыш в магнитокалорической эффективности $\Delta S/\Delta H$. Эффект обменного усиления МКЭ был предсказан теоретически [2] и подтвержден экспериментально в FM/PM структурах из ультратонких (≈ 1 нм) слоев [3]. Однако для применения в магнитном охлаждении необходимо получить объемный материал, в котором оно было бы реализовано. Одним из возможных способов достижения этой цели является локальное изменение магнитных свойств материала путем ионного облучения, которое может индуцировать изменения в атомной структуре и привести к возникновению FM-каналов (треков) в РМ-матрице [4] (рис. 1), которые будут ее подмагничивать эффективным обменным полем. В качестве РМ-матрицы нами была использована пленка упорядоченного сплава $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ (сверхструктура B2-FeAl), а для формирования FM-включений, образованных треками из неупорядоченного сплава FeAl, она облучалась ионами $^{132}\text{Xe}^{26+}$ с энергией 160 MeV различными дозами в диапазоне $0,03 - 3 \text{ ion/nm}^2$.

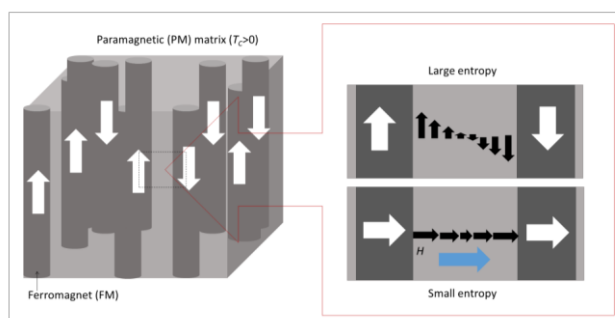


Рис. 1. Иллюстрация обменного усиления МКЭ в РМ с ненулевым T_C путем внедрения FM-включений.

Пленки $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ толщиной 50 nm были выращены при комнатной температуре методом совместного магнетронного распыления (давление Ar $2 \cdot 10^{-3}$ Torr) из отдельных мишеней Fe и Al на подложке Si (100) с поверхностным слоем естественного оксида. Состав контролировался путем индивидуальной регулировки скорости распыления Fe (Al) и проверялся с помощью рентгеновской рефлектометрии и вторично-ионной масс-спектрометрии. Для формирования сверхструктуры B2-FeAl подготовленные образцы подвергались термическому отжигу в вакууме при температуре 673 K в течение двух часов, результатом которого стало падение величины намагниченности насыщения с 600 до 100 emu/cm^3 , а также полное исчезновение остаточной намагниченности. Увеличение степени упорядоченности сплава после термического отжига подтверждается картинками электронной дифракции, на которых зафиксировано существенное увеличение интенсивности сверхструктурных пиков.

Облучение упорядоченной пленки FeAl ионами $^{132}\text{Xe}^{26+}$ с энергией 160 MeV приводит

к увеличению намагниченности насыщения и появлению существенной остаточной намагниченности в плоскости уже при дозе в 0.1 ion/nm^2 . Появление ферромагнитного сигнала при достаточно низкой дозе облучения (0.1 ion/nm^2), предположительно, обусловлено образованием наноразмерных ферромагнитных частиц (треков), которые отделены друг от друга в РМ-среде. При этом все пленки, облученные дозами в диапазоне $0,03 - 3 \text{ ion/nm}^2$, обладают анизотропией типа «легкая плоскость».

Для исследования вопроса обменного усиления МКЭ в пленках FeAl, модифицированных ионным облучением, были получены кривые их намагничивания при различных температурах (рис. 2 (а,б)). Для расчета магнитокалорического потенциала использовалось соотношение Максвелла.

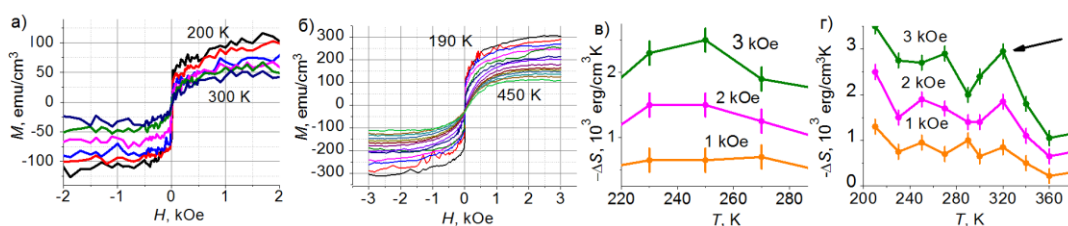


Рис. 2. а), б) – кривые намагничивания отожженных пленок FeAl до и после облучения ионами $^{132}\text{Xe}^{26+}$ дозой $0,1 \text{ ion/nm}^2$ соответственно; в), г) – магнитокалорический потенциал отожженных пленок FeAl до и после ионного облучения соответственно.

Магнитокалорический потенциал ΔS пленок $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$, облученных дозой 0.1 ion/cm^2 , несколько увеличивается, однако его величина существенно меньше предсказываемых теоретически значений. Это может быть связано с частичной упорядоченностью исходной пленки и наличием в ней суперпарамагнитных кластеров.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-22-00044)

Список использованных источников:

1. Khattak Kh.S., Aslani A., Nwokoye Ch.A et al, Magnetocaloric properties of metallic nanostructures //Cogent Engineering – 2015, –v.2, – p. 1050324.
2. Fraerman A.A., Shereshevskii I.A. Magnetocaloric effect in ferromagnet/paramagnet multilayer structures// JETP Letters – 2015 – v. 101 – p. 618–621.
3. Kuznetsov M.A., Pashenkin I.Y., Polushkin N.I., Sapozhnikov M.V., Fraerman A.A. Magnetocaloric effect in exchange-coupled strong/weak/strong ferromagnet stacks//J. Appl. Phys. – 2020 – v. 127 – p. 183904.
4. Nozieres J.P., Ghidini M., Dempsey N.M., et al. Swift heavy ions for magnetic nanostructures// Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B – 1998 – v. 146 – p. 250-259.

УДК 537.632

Терагерцовое излучение периодическими структурами на основе спинтронных источников

Караштин Е.А.

к.ф.-м. н., старший научный сотрудник ИФМ РАН

Гусев Н.С.

ведущий инженер-технолог ИФМ РАН

Сапожников М.В.

д.ф.-м.н., заведующий отделом магнитных наноструктур ИФМ РАН

Авдеев П.Ю.

стажер-исследователь, лаборатория физики для нейроморфных вычислительных систем
ИПТИП РТУ МИРЭА

Лебедева Е.Д.

стажер-исследователь, лаборатория физики для нейроморфных вычислительных систем
ИПТИП РТУ МИРЭА

Буряков А.М.

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, доцент кафедры наноэлектроники ИПТИП РТУ
МИРЭА

***Аннотация.** Исследуются эффекты, возникающие в терагерцовом излучении при облучении мощным фемтосекундным лазерным импульсом спинтронных источников, представляющих собой периодическую систему полос, изготовленных из тонких плёнок ферромагнетик / тяжёлый металл (в частности, $\text{Co}(2\text{нм})/\text{Pt}(2\text{нм})$), с периодом от 8мкм до 1000мкм. Показано, что с уменьшением периода структуры возрастает анизотропия в амплитуде ТГц излучения при намагничивании вдоль и поперёк полос. При периоде структуры существенно меньшем, чем характерная длина волны излучения (300мкм для частоты 1ТГц), это позволяет эффективно управлять излучением ТГц сигнала с помощью приложения внешнего магнитного поля. Также показано, что спектр излучения ТГц сигнала такими структурами зависит от угла между нормалью к структуре и приёмником. В частности, установка непропускающего экрана вблизи направления на нормаль приводит к сдвигу спектрального максимума в область более низких частот (около 0.5ТГц).*

***Ключевые слова:** наноструктуры, терагерцовое излучение, фемтосекундный лазерный импульс*

Terahertz radiation by periodic spintronic emitters

Karashtin E.A.

Candidate of physical and mathematical Sciences, senior research fellow, IPM RAS

Gusev N.S.

Leading process engineer, IPM RAS

Sapozhnikov M.V.

Doctor of physical and mathematical Sciences, head of department of magnetic nanostructures, IPM RAS

Avdeev P. Yu.

Research intern, laboratory of physics for neuromorphic computing systems, IPTIP of MIREA – Russian Technological University

Lebedeva E.D.

Research intern, laboratory of physics for neuromorphic computing systems, IPTIP of MIREA – Russian Technological University

Buryakov A.M.

Candidate of physical and mathematical Sciences, senior research fellow, Associate Professor, Department of Nanoelectronics, IPTIP of MIREA – Russian Technological University

***Annotation.** The effects that arise in terahertz radiation from spintronic sources irradiated by a femtosecond laser pulse, which are a periodic system of strips made from thin ferromagnetic / heavy metal films (in particular, Co(2nm)/Pt(2nm)), with a period from 8 μm to 1000 μm . It is shown that as the period of the structure decreases, the anisotropy in the ratio of amplitudes of THz radiation increases when magnetized along vs. across the stripes. With a structure period significantly shorter than the characteristic wavelength of the radiation (300 μm for a frequency of 1 THz), this makes it possible to effectively control the emission of a THz signal by applying an external magnetic field. It is also shown that the emission spectrum of the THz signal from such structures depends on the angle between the normal to the structure and the detector. In particular, installing a non-transmitting screen near the normal direction leads to a shift of the spectral maximum to the region of lower frequencies (about 0.5 THz).*

Keywords: nanostructures, THz radiation, femtosecond laser pulse

В последнее десятилетие активно исследуются перспективные источники ТГц излучения, основанные на многослойной магнитной наноструктуре, которая состоит из тонкого ферромагнитного слоя (ФМ), имеющего границу с тонким слоем тяжелого металла. Известно, что такая структура может выступать в качестве широкополосного ТГц-излучателя, сравнимого по эффективности с полупроводниковыми аналогами [1,2]. При облучении такой системы фемтосекундным оптическим импульсом большой интенсивности протекает короткий импульс спинового тока из ФМ в НМ. Это, в свою очередь, вызывает электрический ток в результате обратного спинового эффекта Холла в НМ, который излучает короткий и широкополосный импульс электромагнитной волны, соответствующий терагерцовому диапазону частот. Недавно в работе [2] изучалась структура с двумя слоями железа, разделенными слоем платины толщиной 4 нм. Слои Fe инжектируют спиновый ток в Pt. Генерируемый в платине электрический ток либо компенсируется для ферромагнитного состояния системы, либо суммируется для антиферромагнитного, что позволяет управлять излучением терагерцового сигнала внешним магнитным полем. Принципиальным ограничением для такой системы является наличие у слоев железа других пограничных слоев, в частности, антиферромагнетика IrMn, в которых также происходит излучение ТГц сигнала [4]. Поэтому соотношение интенсивности сигнала в "работающем" и "выключенном" состоянии составляет примерно 15.

В данной работе исследуются спинтронные источники, представляющие собой периодическую систему полос, изготовленных из тонких плёнок ферромагнетик / тяжёлый металл (в частности, $\text{Co}(2\text{нм})/\text{Pt}(2\text{нм})$ либо $\text{W}(2\text{нм})/\text{Co}(2\text{нм})/\text{Pt}(2\text{нм})$), изготовленные методом магнетронного распыления), с периодом от 8мкм до 1000мкм. Мы показываем, что с уменьшением периода структуры возрастает соотношение амплитуд ТГц излучения при намагничивании поперёк и вдоль полос. Это объясняется тем, что электрический ток, возникающий в результате обратного спинового эффекта Холла, протекает либо вдоль, либо поперёк полос, соответственно. При периоде структуры 1000мкм (коэффициент заполнения 1/2) отличия в сигналах практически нет, в то время, как при периоде 100мкм наблюдается отличие в два, а при периоде 50мкм — в три раза. Это связано с тем, что период структуры становится меньшим, чем характерная длина волны излучения (300мкм для частоты 1ТГц), что позволяет эффективно управлять излучением ТГц сигнала с помощью приложения внешнего магнитного поля. При этом принципиальных ограничений на соотношение сигналов в "работающем" и "выключенном" состоянии прибора нет: с уменьшением ширины полос оно растёт, а абсолютное значение сигнала может быть увеличено за счет уменьшения зазора между полосами. Мы демонстрируем это на примере структуры с периодом 8мкм и коэффициентом заполнения 3/4.

Также мы демонстрируем, что спектр излучения ТГц сигнала периодическими структурами зависит от угла между нормалью к структуре и приёмником. В частности, установка непропускающего экрана вблизи направления на нормаль приводит к сдвигу спектрального максимума в область более низких частот (около 0.5ТГц). С другой стороны, выделение с помощью диафрагмы области вблизи нормали приводит к сдвигу максимума в спектре излучения в область более высоких частот (около 1.5ТГц). Это связано с тем, что периодическая структура является антенной решёткой и наиболее заметно проявляется для больших периодов (300-1000мкм).

Таким образом, изготовление периодической системы полос на основе спинтронных источников терагерцового излучения с периодом порядка 10-1000мкм позволяет эффективно управлять амплитудой ТГц излучения путем приложения магнитного поля, а также спектром излучения путем установки диафрагмы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №23-22-00295.

Список использованной литературы:

1. C. Bull, S.M. Hewett, R. Ji et al. // APL Mater. - 2021 - 9 - 090701.
2. T. Seifert, S. Jaiswal, U. Martens et al. // Nature Photonics - 2016 - 10 - 483.
3. M. Fix, R. Schneider, S.M. de Vasconcellos et al. // Appl. Phys. Lett. - 2020 - 117 - 132407.
4. Y. Saito, F. N. Kholid, E. Karashtin et al. // Phys. Rev. Appl. - 2023 - 19 - 064040.

УДК 537.622.4

Получение магнитных нанопроволок различных типов и их исследование методом зондовой микроскопии

Бизяев Д.А.

к. ф.-м. н., старший научный сотрудник лаборатории физики и химии поверхности КФТИ им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанского научного центра РАН

Загорский Д.Л.

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории роста тонких пленок и неорганических наноструктур ИК им. А.В. Шубникова КККиФ НИЦ «Курчатовский институт»

Долуденко И.М.

к.т.н., научный сотрудник лаборатории роста тонких пленок и неорганических наноструктур ИК им. А.В. Шубникова КККиФ НИЦ «Курчатовский институт»

Хайретдинова Д.Р.

инженер лаборатории роста тонких пленок и неорганических наноструктур ИК им. А.В. Шубникова КККиФ НИЦ «Курчатовский институт»

Бухараев А.А.

д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории физики и химии поверхности КФТИ им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанского научного центра РАН

***Аннотация.** Работа посвящена исследованию нанопроволок (НП) из металлов группы железа. Три типа НП - гомогенные (из одного металла - железа или никеля), гомогенные из железоникелевого сплава и гетерогенные – из чередующихся слоёв меди и никеля – были получены методом матричного синтеза. Для изучения топографии и намагниченности на локальном уровне использовались методы зондовой микроскопии - атомно- и магнитно-силовая микроскопия (АСМ и МСМ соответственно). Для первых двух типов образцов проведены исследования НП непосредственно в полимерной матрице – «с торца». Изучена намагниченность отдельных НП в исходном состоянии и процесс перемагничивания массива НП во внешнем поле. Показано, что характер перемагничивания зависит не только от характеристик отдельной НП, но и от их взаимного расположения: близко расположенные друг к другу НП перемагничиваются в более широком диапазоне полей. Для третьего типа НП – слоевых – исследован характер намагниченности «вдоль» НП. Показано разбиение НП на домены, размеры которых коррелируют с толщинами слоёв. Изучено перемагничивание таких НП в изменяющемся магнитном поле. Также выявлена зависимость от взаимного расположения НП - агломераты близкорасположенных НП перемагничиваются поэтапно и в более широком диапазоне полей. Для всех случаев показана роль взаимодействия между соседними НП.*

***Ключевые слова:** Матричный синтез, нанопроволоки, магнитно-силовая микроскопия, намагниченность*

Obtaining of magnetic nanowires of different types and their investigation by probe microscopy

Bizyaev D.A.,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of the laboratory of surface physics and chemistry, Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS

Zagorskiy D.L.,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher of the laboratory of the growth of thin films and inorganic nanostructures of A.V. Shubnikov Institute of Crystallography, KCC&F, NRC “Kurchatov Institute”

Doludenko I.M.

Candidate of Technical Sciences, Researcher of laboratory of the growth of thin films and inorganic nanostructures of A.V. Shubnikov Institute of Crystallography, KCC&F, NRC “Kurchatov Institute

Khairtdinova D.R.,

Engineer of the laboratory of the growth of thin films and inorganic nanostructures of A.V. Shubnikov Institute of Crystallography, KCC&F, NRC “Kurchatov Institute”

Bukharaev A.A.,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, Chief Researcher of the laboratory of surface physics and chemistry, Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC KSC of RAS

Annotation. *The work is devoted to the study of nanowires (NWs) made of iron group metals. Three types of NWs were obtained by matrix synthesis: homogeneous (from one metal Fe, Ni or Co), homogeneous from FeCo or FeNi alloys and heterogeneous- from alternating layers of Cu and Ni (or Co). To study topography and magnetization at the local level, probe microscopy methods were used – atomic and magnetic force microscopy (AFM and MFM, respectively). For the first two types of samples, NW` studies were carried out directly in the polymer matrix- “from the top”. The magnetization of individual NWs in the initial state and the process of magnetization reversal of an array of NWs in the external field were studied. It is shown that the nature of magnetization reversal depends not only on the characteristics of an individual NW, but also on their relative position: NWs located close to each other are remagnetized in a wider range of fields. For the third type of samples-layered NWs-the nature of magnetization “along” the NW was studied. The fragmentation of NWs into domains, the size of which correlated with the thickness of the layers, is shown. The magnetization reversal of such NWs in varying magnetic field was studied. The dependence on the relative position of NWs was also revealed – agglomerates of closely located NWs are remagnetized step by step in a wider range of fields. So, for all cases the role of interaction between neighboring NWs is shown.*

Keywords: *matrix synthesis, nanowires, magnetic-force microscopy, magnetization*

Нанопроволоки (НП) (1D- материалы) весьма перспективны для многих применений – в частности, как элементы микроэлектроники и спинтроники (микроманиты, сенсоры, элементы микроэлектроники). В настоящей работе массивы НП из 3-d металлов (Fe, Co, Ni, а также Cu) были получены методом матричного (темплатного) синтеза на основе трековых мембран. Синтез НП из металлов группы железа позволяет получать НП с регулируемыми магнитными характеристиками. Отметим, что в отличие от объёмных магнитов НП дают возможность варьирования параметров как за счёт наноразмеров, так и за счёт вытянутой формы. Однако исследованию магнитных свойств НП на локальном уровне посвящено очень мало работ (среди них можно отметить [1-6]).

В настоящей работе были получены НП трёх типов. При создании образцов ПЕРВОГО ТИПА были использованы два вида матриц: НП из чистого железа были получены с использованием мембраны с диаметром пор $d=150$ нм (плотность 10^9 пор/см²) и электролита на основе FeSO₄·7H₂O. Для получения НП из чистого никеля применялись матрицы с большим

диаметром пор $d = 540$ нм (с малой плотностью $\sim 10^8$ пор/см²) и электролит Уоттса на основе солей никеля $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (рабочая температура – 50–60 °С). Осаждение проводилось в потенциостатическом режиме при напряжении на ячейке 1200 мВ.

Образцы ВТОРОГО ТИПА – гомогенные НП из FeNi (т.н. «сплав»; по составу близкий к магнито-мягкому пермаллою). В этом случае использовалось три вида матриц – с одинаковыми диаметрами пор 100 нм, но с различной плотностью пор – $1 \cdot 10^8$, $5 \cdot 10^8$ и $1.2 \cdot 10^9$ пор/см². Используемый электролит состоял из солей железа и никеля: $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Получение образцов ТРЕТЬЕГО ТИПА проводилось с использованием трековой мембраны с порами диаметром 100 нм и поверхностной плотностью 10^9 пор/см². В порах этой матрицы, используя электролит, содержащий ионы никеля и меди и, применяя т. н. импульсный режим (чередование импульсов различного напряжения), были получены гетерогенные (слоевые) НП. Они состояли из чередующихся слоёв никеля и меди (толщиной 400 и 300 нм каждый).

В первых двух случаях исследовался «металл-полимерный композит»: металлические НП не выделялись из ростовой матрицы. Методом АСМ/МСМ проводилось исследование поверхности мембраны с НП, концы которых находились на одном уровне с поверхностью («заподлицо»). В третьем случае НП отделялись от ростовой матрицы и наносились на «горизонтальную» поверхность. Отметим, что при этом решалась проблема преодоления агломерации НП (их слипания друг с другом из-за магнитного взаимодействия). Уменьшение агломерации было достигнуто за счёт осаждения взвеси на поверхность держателя во внешнем вращающемся магнитном поле. При этом были получены как единичные (отдельные) НП, так и НП, соединённые в группы из двух и более штук. Схема расположения НП и их сканирования методом АСМ/МСМ показана на рис. 1.

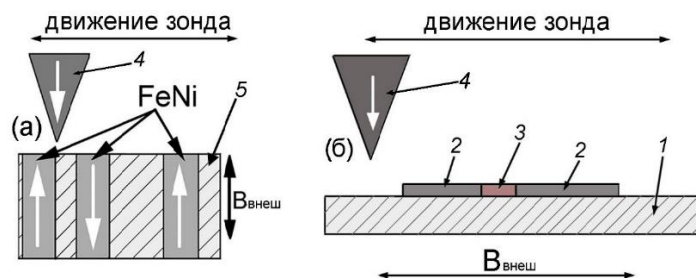


Рис. 1 Схема расположения НП и их сканирования зондом в образцах первого и второго типа (а) и третьего типа (б). 1 – подложка держатель, 2 – Ni, 3 – Cu, 4 – МСМ зонд, 5 – матрица с порами. Стрелками показано направление сканирования зондом и внешнего магнитного поля ($B_{\text{внеш}}$)

Последующее изучение проводилось методом зондовой микроскопии: на приборах Solver P-47 (NT-MDT, Зеленоград) и Ntegra, работавшими в режиме тэйпинга в АСМ и МСМ модах. Использовался магнитный кантеливер (с кобальтовым покрытием). Измерения проводились в однопроходном режиме. Внешнее магнитное поле создавалось в первом и втором случае в вертикальном направлении. Внешнее магнитное поле создавалось в первом и втором случае в вертикальном направлении в пределах ± 34 мТл. В третьем случае горизонтальное поле изменялось электромагнитом в пределах ± 16 мТл.

Для образцов ПЕРВОГО ТИПА проводилось перемагничивание при приложении внешнего магнитного поля (± 200 мТл.). При этом величина остаточной намагниченности составляла всего 9 % от величины намагниченности насыщения. Это позволяет сделать вывод о том, что большая часть НП после снятия внешнего магнитного поля перемагничиваются так, что соседние НП намагничены противоположно друг другу. Результатом этого является понижение магнитостатической энергии всего ансамбля НП. Для образцов первого типа из чистого никеля перемагничивание проводилось в плавно изменяющемся внешнем магнитном поле. Меньшая плотность пор (и соответственно большее расстояние между НП) приводили к ослаблению их диполь-дипольного взаимодействия.

На образцах ВТОРОГО ТИПА можно условно выделить два различных вида НП – уединённые и близкорасположенные, «групповые». Критерием разделения может служить предложенная ранее для аналогичных массивов НП оценка расстояния между соседями в 400-500 нм. Перед прикладыванием внешнего магнитного поля исследовалось исходное состояние намагниченности. Далее включалось максимальное магнитное поле (-34 мТл) для намагничивания НП в заданном направлении. После чего производилось постепенное уменьшение поля с шагом 1 мТл и при переходе через ноль делалось его увеличение с тем же шагом в сторону положительных значений. При этом для уединённых НП наблюдалось переключение их намагниченности в полях 7-10 мТл практически во всех случаях. Эта величина не зависит от типа матрицы - очевидно, из-за того, что такие НП практически не взаимодействуют с соседями. Напротив, в «группах» переключение намагниченности НП происходит поэтапно, при этом границы диапазона перемагничивания (верхняя – где начинаются первые изменения в намагниченности ансамбля НП и нижняя – где заканчиваются эти изменения) становятся шире по мере увеличения плотности НП. В образце с наибольшей плотностью НП уединённых НП на исследуемых участках поверхности матрицы не наблюдалось. В этих образцах наблюдался максимальный диапазон полей перемагничивания.

Для ТРЕТЬЕГО ТИПА образцов сканирование проводилось вдоль единичных НП. В исходном состоянии было показано их разбиение на домены, размер которых соответствовал размеру отдельного слоя (около 400 нм). Приложение внешнего поля (направленного вдоль поверхности держателя, параллельно оси НП) приводило к перемагничиванию единичных НП, коэрцитивная сила которых составила порядка 4-5 мТл. В то же время для агрегатов – двойных и более НП – наблюдалось значительное увеличение их поля переключения до 12-15 мТл. Под полем переключения понимается такая величина внешнего магнитного поля, при котором группа НП меняет направление намагниченности на противоположное. Агрегаты, состоящие из нескольких «слипшихся» НП перемагничивались поэтапно, при последовательном увеличении поля. Показано, что при этом могут образовываться достаточно стабильные промежуточные конфигурации.

Благодарности. Работа (приготовления образцов типа 3 и их АСМ/МСМ исследований) поддержана грантом РФФИ 22-22-00983. Работы по синтезу и аттестации образцов типов 1 и 2 проведены в рамках выполнения Госзадания НИЦ «Курчатовский Институт».

Список использованной литературы:

1. Andersen I. M., Rodriguez L. A., Bran C. et al. Exotic transverse-vortex magnetic configurations in CoNi nanowires // ACS nano. – 2019. – Т. 14. – №. 2. – С. 1399-1405.
2. Sorop T. G., Untiedt C., Luis F. et al. Magnetization reversal of ferromagnetic nanowires studied by MFM // Physical Review B. – 2003. – Т. 67. – №. 1. – С. 014402.
3. Wang T., Wang Y., Fu Y. et al. Magnetic behavior in an ordered Co nanorod array // Nanotechnology. – 2008. – Т. 19. – №. 45. – С. 455703.
4. Wang T., Wang Y., Fu Y. et al. A magnetic force microscopy study of the magnetic reversal of a single Fe nanowire // Nanotechnology. – 2009. – Т. 20. – №. 10. – С. 105707.
5. Samardak A. S., Ognev A. V., Samardak A. Yu. et al. Variation of magnetic anisotropy and temperature-dependent FORC probing of compositionally tuned Co-Ni alloy nanowires // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Т. 732. – С. 683-693.
6. Samardak A.Y., Jeon Y.S., Samardak V.Yu. et al. Interwire and Intrawire Magnetostatic Interactions in Fe-Au Barcode Nanowires with Alternating Ferromagnetically Strong and Weak Segments // Small. – 2022. – Т. 18. – №. 47. – С. 2203555.

УДК 544.032.53

Влияние стехиометрического состава наноструктурированного сплава Nd-Fe-B на фазовый состав

Алисултанов М.Э.

аспирант, Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

Абдурахмонов О.Э.

к.т.н., Ташкентский химико-технологический институт

Аннотация. Разработан химический метод синтеза постоянных магнитов Nd-Fe-B с различным стехиометрическим составом. Были получены наноструктурированные порошки со следующим стехиометрическим составом: $Nd_{12}Fe_{84}B_6$, $Nd_{14}Fe_{80}B_6$, $Nd_{16}Fe_{76}B_8$ и $Nd_{16}Fe_{72}B_8$. Полученные образцы исследовались с помощью рентгенофазового анализа.

Ключевые слова: постоянные магниты, Nd-Fe-B, $Nd_2Fe_{14}B$, неодимовые магниты, магнитные наночастицы, наночастицы.

The effect of the stoichiometric composition of the nanostructured Nd-Fe-B alloy on the phase composition

Alisultanov M.E.,

Postgraduate student, Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

Abdurakhmanov O.E.

Candidate of Technical Sciences, Tashkent Institute of Chemical Technology

Annotation. A chemical method for the synthesis of Nd-Fe-B permanent magnets with different stoichiometric compositions has been developed. Nanostructured powders with the following stoichiometric composition were obtained: $Nd_{12}Fe_{84}B_6$, $Nd_{14}Fe_{80}B_6$, $Nd_{16}Fe_{76}B_8$ and $Nd_{16}Fe_{72}B_8$. The obtained samples were examined using X-ray phase analysis.

Keywords: permanent magnets, Nd-Fe-B, $Nd_2Fe_{14}B$, neodymium magnets, magnetic nanoparticles, nanoparticles.

Редкоземельные магниты (РЗМ) были впервые представлены на рынке в 1960-х годах в виде сплавов самария и кобальта ($SmCo_5$, Sm_2Co_{17}), характеристики которых превосходили магнитные сплавы на основе альнико (Al-Ni-Co-Fe) и гексаферрита бария и стронция ($BaO \cdot 6Fe_2O_3$, $SrO \cdot 6Fe_2O_3$) [1].

Крупный технологический прорыв произошел в начале 1980-х годов с открытием постоянных магнитов на основе соединения неодим-железо-бор (Nd-Fe-B). Исследования по оптимизации магнитных свойств и разработке методов получения редкоземельных магнитов (РЗМ) на основе Nd-Fe-B активизировались с началом использования их в электромобилях, высокоэффективных ветрогенераторах и электродвигателях [2-3].

В данной работе представлен химический синтез магнитотвердого сплава системы Nd-Fe-B. Химический метод позволяет контролировать размер в диапазоне однодоменности для Nd-Fe-B 110-230 нм, благодаря чему можно добиться высоких магнитных характеристик за счет

наноструктурирования [4]. Из раствора солей, методом химического осаждения с последующим прокаливанием были получены наночастицы: Nd_2O_3 , Fe_2O_3 , Fe_3VO_6 . Полученные порошки Nd_2O_3 , Fe_2O_3 , Fe_3VO_6 смешали в стехиометрическом соотношении: $\text{Nd}_{12}\text{Fe}_{84}\text{B}_6$, $\text{Nd}_{14}\text{Fe}_{80}\text{B}_6$, $\text{Nd}_{16}\text{Fe}_{76}\text{B}_8$ и $\text{Nd}_{16}\text{Fe}_{72}\text{B}_8$ [5-6]. После проводили двухстадийный восстановительно-диффузионный процесс с помощью H_2 при температуре 900°C и на второй стадии восстановителем выступал CaH_2 в среде Ar при температуре 800°C . Для удаления образовавшегося CaO проводили промывку раствором NH_4Cl в $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

Известно, что коэрцитивная сила зависит от содержания фазы $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, соответственно за счет увеличения содержания данной фазы можно повысить коэрцитивную силу наноструктурированного сплава Nd-Fe-B . Для этого были получены порошки наноструктурированного сплава Nd-Fe-B со следующим стехиометрическим составом: $\text{Nd}_{12}\text{Fe}_{84}\text{B}_6$, $\text{Nd}_{14}\text{Fe}_{80}\text{B}_6$, $\text{Nd}_{16}\text{Fe}_{76}\text{B}_8$ и $\text{Nd}_{16}\text{Fe}_{72}\text{B}_8$.

Порошок наноструктурированного сплава Nd-Fe-B со следующим стехиометрическим составом $\text{Nd}_{12}\text{Fe}_{84}\text{B}_6$ после процесса промывки, по данным РФА, состоит из смеси магнитотвердой фазы 76,1 % $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и магнитомягкой фазы 23,9 % $\alpha\text{-Fe}$ (рис. 1 а). По данным РФА порошок со стехиометрическим составом $\text{Nd}_{14}\text{Fe}_{80}\text{B}_6$ состоит из двух фаз с содержанием: 91,1 % $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и 8,9 % $\alpha\text{-Fe}$ (рис. 1 б). В порошке со стехиометрическим составом $\text{Nd}_{16}\text{Fe}_{76}\text{B}_8$ по данным РФА не наблюдалось содержания магнитомягкой фазы $\alpha\text{-Fe}$, он состоит из фазы $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (рис. 1 в). По данным РФА в порошке со стехиометрическим составом $\text{Nd}_{16}\text{Fe}_{72}\text{B}_8$, было обнаружено образование двух фаз с содержанием: 90,2 % $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и 9,8 % NdH_2 (рис. 1 г).

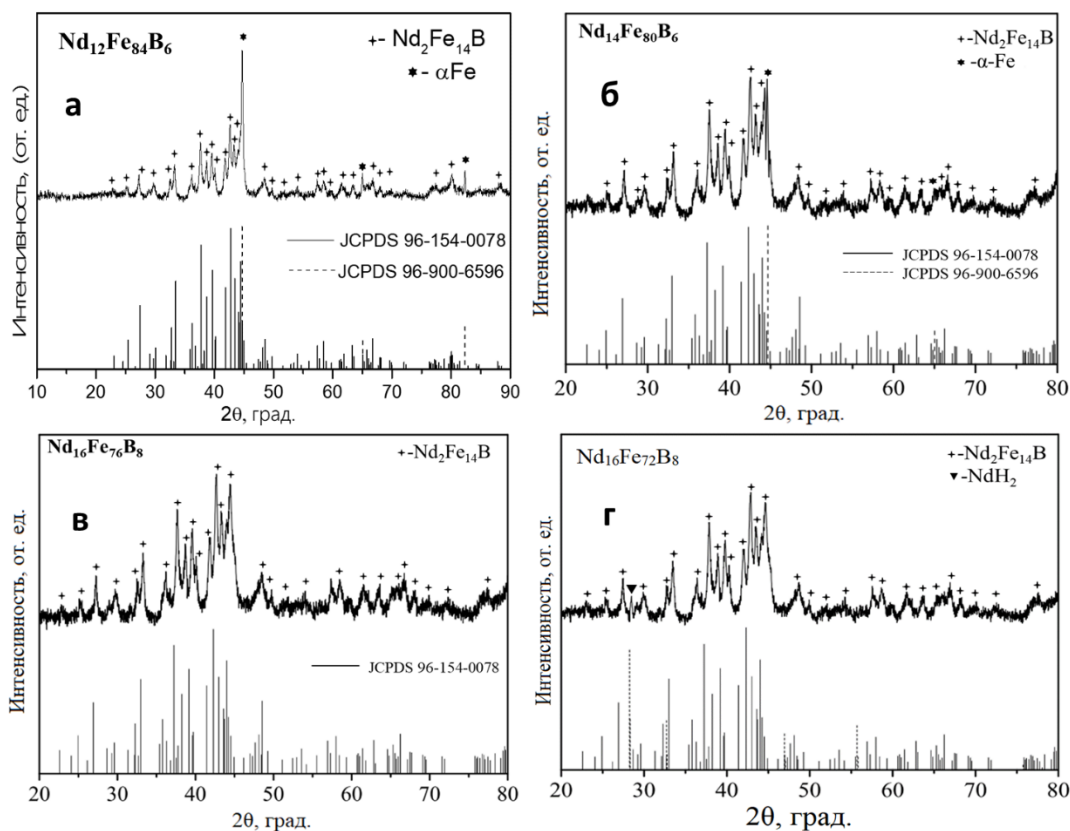


Рис. 1. Дифрактограммы порошков наночастиц а – $\text{Nd}_{12}\text{Fe}_{84}\text{B}_6$, б – $\text{Nd}_{14}\text{Fe}_{80}\text{B}_6$, в – $\text{Nd}_{16}\text{Fe}_{76}\text{B}_8$ и г – $\text{Nd}_{16}\text{Fe}_{72}\text{B}_8$

Установлено, что с увеличением содержания Nd и B в наноструктурированном сплаве со следующими стехиометрическими составами $\text{Nd}_{14}\text{Fe}_{80}\text{B}_6$ и $\text{Nd}_{16}\text{Fe}_{76}\text{B}_8$ наблюдается увеличение содержания магнитотвердой фазы $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Полученный

наноструктурированный сплав со стехиометрическим составом $\text{Nd}_{16}\text{Fe}_{76}\text{B}_8$ обладает оптимальными магнитными характеристиками $H_c=8439$ Э, $M_r=78,01$ А·м²/кг соответственно.

Список использованной литературы:

1. Skomski R. Permanent Magnets: History, Current Research, and Outlook // Springer Series in Materials Science. 2016. P. 359-395.
2. Bonfante M. C. Achieving Sustainable Development Goals in rare earth magnets production: A review on state of the art and SWOT analysis // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 137. P. 110616.
3. Абдурахмонов О.Э., Алисултанов М.Э., Вертаева Д.А., Шарапаев А.И., Мурадова А.Г. Химический метод синтеза нанопорошков $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ // Химическая промышленность сегодня. 2022. Т. 1. С. 14-25.
4. Abdurakhmonov O.E., Alisultanov M.E., Yurtov E.V., Savchenko E.S., Savchenko A.G. Synthesis of nanopowders $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ by chemical method // International Journal of Nanotechnology. 2024. Vol. 21. № 1/2. P. 3-16.
5. Abdurakhmonov O.E., Alisultanov M.E., Abdurakhmonov S.E., Muradova A. G. On the Synthesis of $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ Nanoparticles by the Method of Chemical Deposition to Obtain a Magnetically Hard Nd–Fe–B Alloy // Nanobiotechnology Reports. 2023. Vol. 18. № 2.
6. Abdurakhmonov O.E., Alisultanov M.E., Vertaeva D.A., Muradova A.G. The Effect of Annealing Temperature on Crystallization of Nd_2O_3 Nanoparticles Synthesized by the Deposition Method // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2022. Vol. 67. № 7. С. 1032-1038

УДК 538.955

Исследование упорядоченных конфигураций в сплавах МХенов, содержащих переходные металлы, в зависимости от состава**Замкова Н.Г.**

д.ф.-м. н., ведущий научный сотрудник Института физики СО РАН, ФИЦ “КНЦ СО РАН”

Жандун В.С.

к.ф.-м. н., старший научный сотрудник Института физики СО РАН, ФИЦ “КНЦ СО РАН”

Драганюк О.Н.

Младший научный сотрудник Института физики СО РАН, ФИЦ “КНЦ СО РАН”

***Аннотация.** Двумерные карбиды и нитриды переходных металлов, известные как МХены, привлекают все большее внимание. В настоящее время около 20 из них синтезированы и изучается их применение в самых разных областях: от хранения энергии до медицинских приложений. Для облегчения поиска новых МХенов, содержащих ранние переходные металлы, в данной работе в рамках теории функционала плотности и метода кластерного разложения мы исследуем взаимосвязь структура-стабильность для ряда упорядоченных сплавов МХенов, а именно $Cr_{1-x}Mn_x)_3C_2$, $(Ta_{1-x}Cr_x)_3C_2$, $(Ta_{1-x}Mn_x)_3C_2$, $(V_{1-x}Cr_x)_3C_2$ с $0 \leq x \leq 1$. Используемый подход позволяет проанализировать энергии образования большого числа различных упорядоченных конфигураций и исследовать стабильность их предшественников МАХ-фаз для выяснения возможности синтеза высокоупорядоченных МХенов.*

***Ключевые слова:** МАХ фазы, МХены, кластерное разложение, теория функционала плотности, 2D структуры, магнитные и электронные свойства*

Investigation of ordered configurations in transition metal MXene alloys depending on composition**Zamkova N.G.**

Doctor of Science, Leading scientist, Institute of Physics SB RAS, Federal Research Center “KSC SB RAS”

Zhandun V.S.

PhD Sc., Senior Scientist, Institute of Physics SB RAS, Federal Research Center “KSC SB RAS”

Draganyuk O.N.

Junior Researcher, Institute of Physics SB RAS, Federal Research Center “KSC SB RAS”

***Annotation.** Two-dimensional transition metal carbides and nitrides, known as MXenes, are attracting increasing attention. Currently, about 20 of them have been synthesized and their use in a variety of areas, from energy storage to medical applications, is being studied. To facilitate the search for new MXenes with transition metals, in this work, within the framework of density functional theory and the cluster expansion method, we study the structure-stability relationship for a number of ordered MXene alloys, namely $(Cr_{1-x}Mn_x)_3C_2$, $(Ta_{1-x}Cr_x)_3C_2$, $(Ta_{1-x}Mn_x)_3C_2$, $(V_{1-x}Cr_x)_3C_2$ with $0 \leq x \leq 1$.*

$_{x}Mn_x)_3C_2$, $(Ta_{1-x}Cr_x)_3C_2$, $(Ta_{1-x}Mn_x)_3C_2$, $(V_{1-x}Cr_x)_3C_2$ with $0 \leq x \leq 1$. The approach used makes it possible to analyze the formation energies of a large number of different ordered configurations and study the stability of their MAX phase precursors to determine the possibility of synthesizing highly ordered MXenes.

Keywords: MAX phases, MXenes, cluster decomposition, density functional theory, 2D structures, magnetic and electronic properties

Двумерные (2D) материалы обладают интригующими свойствами, которые отличаются от их объемных аналогов. Недавнее открытие МХенов [1,2] создало еще один большой класс перспективных 2D-материалов. МХены представляют собой 2D-слоистые карбиды и/или нитриды переходных металлов, полученные в основном путем селективного травления слоев А-элемента (в основном групп от IIIA до IVA) из их исходных тройных карбидов и нитридов, называемых МАХ-фазами. Будучи проводящими, МХены широко изучаются для использования в качестве электродов в батареях и суперконденсаторах, для защиты от электромагнитных помех [3], в качестве электрокатализаторов для реакции выделения водорода [4], и в качестве топологических изоляторов [5]. Большое разнообразие химического состава МХенов обеспечивает большую универсальность с точки зрения дизайна свойств новых материалов. При легировании переходным металлом распределение легирующих элементов определяет его свойства и, в конечном итоге, эффективность МХенов в предполагаемом применении.

Одним из перспективных направлений является использование магнитных свойств и спиновых степеней свободы МХенов с переходным металлом для различных приложений. Первым шагом на пути к созданию новых магнитных сплавов МХенов является оценка относительной стабильности их различных структурных конфигураций. Несмотря на активное развитие направления, на сегодняшний день синтезировано мало МХенов с переходными или двойными переходными металлами, поскольку невозможно экспериментально перебрать и исследовать все возможные конфигурационные составы. В свою очередь расчеты из первых принципов могут использоваться для прогнозирования стабильности структур сплавов, которые еще не изучены и могут быть впоследствии синтезированы. В данной работе мы исследовали взаимосвязь структура-стабильность, чтобы дать представление о фазовой стабильности сплавов МХене различных составов и их оптимальных упорядоченных конфигурациях. В рамках теории функционала плотности и метода кластерного разложения [6-8] мы оценили относительную стабильность и магнитные и электронные свойства различных упорядоченных конфигураций для сплавов МХене, содержащих переходной (двойной переходной) металл: $(Cr_{1-x}Mn_x)_3C_2$, $(Ta_{1-x}Cr_x)_3C_2$, $(Ta_{1-x}Mn_x)_3C_2$, $(V_{1-x}Cr_x)_3C_2$ с $0 \leq x \leq 1$. Результатом явилась диаграмма энергия-состав для каждого варианта легирования (Рисунок 1) для определения наиболее перспективных кандидатов. Для каждого варианта легирования мы рассмотрели влияние состава на степень и тип упорядочения, а также на магнитные и электронные свойства. На основе этих исследований мы обсуждаем возможности формирования упорядоченных сплавов МХене, которые еще предстоит синтезировать экспериментально. На Рисунке 1 приведены зависимости энергии образования (E_f) МХенов первого ($(V_{1-x}Cr_x)_2C$) и второго ($(Cr_{1-x}Mn_x)_3C_2$) порядков от концентрации x . Каждая точка представляет структуру, чья относительная стабильность соответствует энергии образования E_f . МХен первого порядка $(V_{1-x}Cr_x)_2C$ реализован экспериментально для концентраций хрома $x \approx 0.5$. Как видно из Рис.1а расчет относительной стабильности методом кластерного разложения соответствует экспериментальным данным. Для МХена второго порядка $(Cr_{1-x}Mn_x)_3C_2$ наш расчет также предсказывает существование ряда стабильных упорядоченных конфигураций в широком интервале концентраций марганца (Рис.1б).

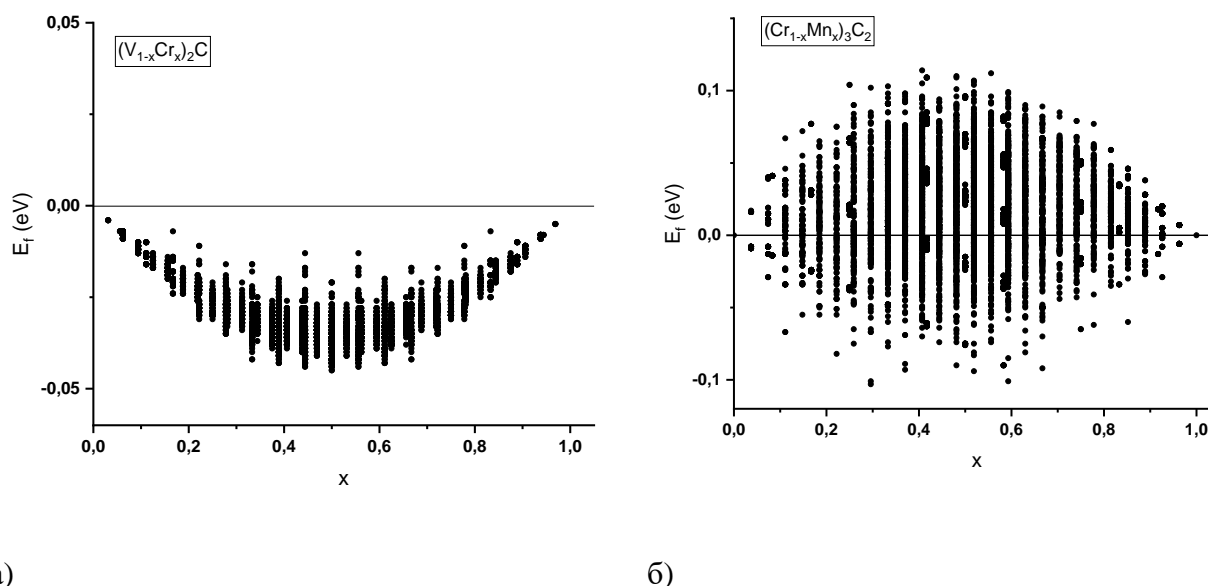


Рисунок 1. Зависимость энергии формирования сплавов МХенов от концентрации металлов для а) $(V_{1-x}Cr_x)_2C$ (б) $(Cr_{1-x}Mn_x)_3C_2$

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-22-10020, <https://rscf.ru/project/23-22-10020>, Красноярского краевого фонда науки.

Список использованной литературы:

1. Naguib, M.; Mochalin, V. N.; Barsoum, M. W.; Gogotsi, Y. 25th Anniversary Article: MXenes: A New Family of Two-Dimensional Materials. *Adv. Mater.* 2014, 26, 992–1005.
2. Naguib, M.; Mashtalir, O.; Carle, J.; Presser, V.; Lu, J.; Hultman, L.; Gogotsi, Y.; Barsoum, M. W. Two-Dimensional Transition Metal Carbides. *ACS Nano* 2012, 6, 1322–1331.
3. Koo, C. M.; Gogotsi, Y. Electromagnetic Interference Shielding with 2D Transition Metal Carbides (MXenes). *Science* 2016, 353, 1137–1140.
4. Seh, Z. W.; Fredrickson, K. D.; Anasori, B.; Kibsgaard, J.; Strickler, A. L.; Lukatskaya, M. R.; Gogotsi, Y.; Jaramillo, T. F.; Vojvodic, A. Two-Dimensional Molybdenum Carbide (MXene) as an Efficient Electrocatalyst for Hydrogen Evolution. *ACS Energy Lett.* 2016, 1, 589–594.
5. Weng, H.; Ranjbar, A.; Liang, Y.; Song, Z.; Khazaei, M.; Yunoki, S.; Arai, M.; Kawazoe, Y.; Fang, Z.; Dai, X. Large-Gap Two-Dimensional Topological Insulator in Oxygen Functionalized MXene. *Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys.* 2015, 92, 075436.
6. Sanchez, J. M.; de Fontaine, D. The fcc Ising Model in the Cluster Variation Approximation. *Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys.* 1978, 17, 2926–2936.
7. Walle, A.; Ceder, G. Automating First-Principles Phase Diagram Calculations. *J. Phase Equilib.* 2002, 23, 348–359.
8. Connolly, J. W. D.; Williams, A. R. Density-Functional Theory Applied to Phase Transformations in Transition-Metal Alloys. *Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys.* 1983, 27, 5169.

УДК 548.3, 549.52

Анализ структурных превращений, происходящих на этапах синтеза каталитических наночастиц в порых силикагеля

Новакова А.А.

д. ф.-м. н., главный научный сотрудник кафедры физики твердого тела физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова

Чернавский П.А.

Д. х. н., профессор кафедры физической химии химического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова

Петровская Г.А.

к. ф.-м. н., научный сотрудник кафедры физики твердого тела физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова

Панфилов С.И.

магистрант кафедры физики твердого тела физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова

***Аннотация.** Мессбауэровская спектроскопия – мощный инструмент в определении структурного и магнитного состояния железосодержащих фаз, формирующихся в изучаемых образцах. Этот метод является более чувствительным по сравнению с рентгендифракционным анализом при анализе формирования сложной структуры новых функциональных наноматериалов [ссылка на статью в Магнетохимии]. Метод позволяет определять размеры, а также магнитное, спиновое и валентное состояние наночастиц, что дает возможность объяснять магнитные свойства создаваемых материалов. В данной работе такие исследования были проведены для создаваемого нанокатализатора для нефтесинтеза.*

***Ключевые слова:** наночастицы оксидов железа, силикагель, мессбауэровская спектроскопия, магнитные измерения.*

Novakova A. A.

Doctor of physical and mathematical Sciences, principal scientist of Solid State physics department of Faculty of Physics of M. V. Lomonosov State University

Chernavskiy P. A.

Doctor of chemical Sciences, Professor of the Department of Professor of Faculty of Chemistry of M. V. Lomonosov State University

Petrovskaya G. A.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, scientist of Solid State physics department of Faculty of Physics of M. V. Lomonosov State University

Panfilov S. I.

Postgraduate of Solid State physics department of Faculty of Physics of M. V. Lomonosov State University

Annotation. Mossbauer spectroscopy is a powerful tool in identifying and quantifying the iron phases formed in the samples under investigation. This method is more sensitive than X-ray diffraction analysis in analyzing the formation of the complex structure of new functional nanomaterials [link to article in Magnetochemistry]. The method allows to determine the size as well as the magnetic, spin and valence states of nanoparticles, which makes it possible to explain the magnetic properties of the created materials. In this work, such studies were carried out for the created nanocatalyst for petroleum synthesis.

Keywords: iron oxides nanoparticles, silica gel, Mossbauer spectroscopy, magnetic measurements.

Применение наночастиц в качестве катализаторов в процессах нефтесинтеза значительно более эффективно, чем применение их массивных аналогов. В настоящее время в нашей стране возникла острая необходимость создания отечественных нанокатализаторов. В нашей работе проводится неразрушающий структурный анализ образцов, полученных на разных стадиях предложенного синтеза: силикагель пропитывается раствором нитрата железа, затем на первом этапе прокаливается в атмосфере аргона, на втором добавляется глюкоза, на третьем этапе происходит прокаливание на воздухе. Для получившейся структуры создаются условия, при которых идет цепочка реакций превращения $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. В работе использовались силикагели с порами размера: 10 нм; 15 нм; 30 нм.

Полученные образцы анализировались методами рентгенодифракционного анализа на дифрактометре Empirion с вертикальным гониометром и мессбауэровской спектроскопии на установке MC-1104Em. Измерения магнитных превращений в зависимости от температуры нагрева проводились в режиме *in situ* на специально изготовленном приборе [2].

В работе исследованы последовательные фазовые преобразования, происходящие в порах силикагеля $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Методом рентгенодифракционного анализа установлено, что в процессе роста наночастиц их максимальный размер определяется характерным размером пор силикагеля. При этом мессбауэровская спектроскопия показала наличие распределения по размерам частиц в пределах пор.

Анализ результатов показывает, что в порах силикагеля всех размеров образуются наночастицы катализатора $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, и хотя на промежуточных этапах происходят процессы образования наночастиц различных окислов железа, но в конечном итоге образуются только наночастицы $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

Анализ полученных частиц по размерам показал, что в процессе синтеза частицы увеличиваются в размерах, но не превышают размеров пор. С увеличением размера пор увеличивается распределение по размерам в полученных частицах $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, что соответствует широкому диапазону времен релаксации магнитных моментов суперпарамагнитных частиц нанокатализатора, что приводит к особенностям на кривых намагниченности.

1. P. A. Chernavskiy, A. A. Novakova, G. V. Pankina, D. A. Pankratov, S. I. Panfilov, G. A. Petrovskaya. Synthesis and Characterization of Hematite, Magnetite and Maghemite Supported on Silica Gel // Magnetochemistry 2023, 9, 228.
2. P. A. Chernavskii, B. S. Lunin, R. A. Zakharyan, G. V. Pankina, N. S. Perov, Experimental setup for investigating topochemical transformations of ferromagnetic nanoparticles // Instr. Exp. Tech. 2022, 57, 78.

УДК 541.1

Возможности метода ультрамикроскопии для исследований физико-химических свойств магнитных наночастиц в жидких средах**Курьяков В.Н.**

к.ф.-м.н., в.н.с. ИПНГ РАН

***Аннотация.** Метод ультрамикроскопии, благодаря специальному освещению лазером, позволяет визуализировать нанообъекты в жидкости, наблюдать за их движением, подсчитать их. При этом сами нанообъекты не видны – наблюдается рассеяние на них лазерного излучения. Данный метод позволяет неинвазивно наблюдать за движением наночастиц в жидких средах (броуновским или под действием внешних сил/полей) и подсчитав их в единице объема жидкости, измерить их численную концентрацию. В данной работе представлены результаты исследований влияния ультразвукового диспергирования и магнитного поля на магнитные наночастицы в воде.*

***Ключевые слова:** магнитные наночастицы, ультрамикроскопия, концентрация, ультразвуковое диспергирование*

Possibilities of the ultramicroscopy method for studying the physicochemical properties of magnetic nanoparticles in liquid media**Kuryakov V.N.**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS

***Annotation.** The ultramicroscopy method, thanks to special laser illumination, allows you to visualize nanoobjects in a liquid, observe their movement, and count them. In this case, the nanoobjects themselves are not visible – laser radiation is scattered on them. This method allows you to non-invasively observe the movement of nanoparticles in liquid media (Brownian or under the influence of external forces/fields) and, by counting them per unit volume of liquid, measure their numerical concentration. This paper presents the results of studies of the influence of ultrasonic dispersion and magnetic field on magnetic nanoparticles in water.*

***Keywords:** magnetic nanoparticles, ultramicroscopy, concentration, ultrasonic dispersion*

Развитие нанотехнологий требует развития экспериментальных методов исследований объектов наномасштаба. В связи с этим появляются, как совсем новые методы исследований, так и модифицируются, с учетом развития технических средств, старые. Одним из таких экспериментальных методов является метод ультрамикроскопии. За разработку этого метода и исследования этим методом коллоидных систем Рихард Зигмонди был удостоен Нобелевской премии по химии в 1925 году. Однако только появление мощных персональных компьютеров, цифровых камер и лазеров позволило реализовать приборы на данном методе для рутинного использования. В методе ультрамикроскопии для освещения образца используется лазер, направленный под углом 90 градусов к оптической оси наблюдения. Наблюдение за образцом жидкости, при этом, происходит при помощи оптического микроскопа. Таким образом, при отсутствии частиц в жидкости в поле зрения микроскопа

будет темное поле – весь свет лазера пройдет мимо объектива микроскопа. Если в исследуемой жидкости есть частицы, то на них лазерное излучение будет рассеиваться (Рэлеевское рассеяние) и в поле зрения будут видны светящиеся точки – рассеяние от каждой частицы [1]. Характерный вид поля зрения ультрамикроскопа представлен на рис. 1. В сфокусированном луче лазера видны частицы, вне луча частиц не видно. Ограничений, связанных с дифракционным пределом здесь нет, поскольку, видны не сами частицы, а рассеяние от них.

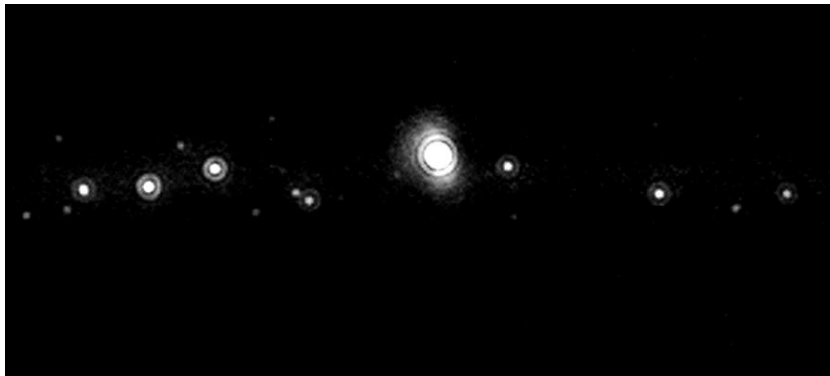


Рис. 1. Характерный вид поля зрения ультрамикроскопа при наблюдении наночастиц ($R=55$ нм) в воде

Благодаря возможности визуализации частиц таким способом становится возможным подсчитать их число в единице объема – измерить численную концентрацию, а также исследовать поведение частиц в реальном времени при воздействии на них различных физических полей, например, магнитного.

В работе представлены результаты исследований водных дисперсий магнитных наночастиц (коммерческих и синтезированных). Для исследованных образцов определена численная концентрация наночастиц в исходном образце и после ультразвукового (УЗ) диспергирования. Показано, что УЗ диспергирование приводит к повышению численной концентрации наночастиц в следствие разрушения кластеров.

Проведено исследование поведения магнитных наночастиц в постоянном магнитном поле. Показано, что не все наночастицы притягиваются магнитом к стенке кюветы. При этом если провести слив жидкости, содержащей не примагниченные частицы и залить чистую воду, перемешать такой образец без воздействия магнитного поля, то при повторении процедуры притягивания частиц магнитом к стенке кюветы, часть из них опять останется в объеме жидкости не примагниченная. Таким образом измерена зависимость числа частиц, которые остаются в растворе не притянутыми магнитом к стенке кюветы, от количества итераций смены растворителя на чистую воду.

Список использованной литературы:

1. Описание метода ультрамикроскопии: [сайт]. URL: <http://npcounter.ru/> (дата обращения: 01.04.2024).

УДК 537.632

Спектральные свойства композитов на основе наночастиц оксида железа $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и силикогеля/ксерогеля SiO_2 .**Пястолова Ю.В.**

к.ф.-м. н., научный сотрудник ИФ им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН

Дубровский А.А.

к.ф.-м. н., старший научный сотрудник ИФ им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН

Томилин Ф.Н.

к.ф.-м. н., старший научный сотрудник ИФ им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН

Кириллов В.Л.

ведущий инженер ФИЦ ИК им. Г.К. Борескова

Балаев Д.А.

д.ф.-м. н., директор ИФ им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН

Мартьянов О.Н.

д. х. н., зам. дир. ФИЦ ИК им. Г.К. Борескова

***Аннотация.** Спектральные исследования являются универсальным инструментом для исследования наноструктур в ИК диапазоне спектра. Серьезную роль при исследовании наноструктур играют размерные и поверхностные эффекты, т.е. размеры и поверхность частиц значительным образом влияют на оптические и спектроскопические свойства наноструктур. Также важно взаимодействие наночастиц со средой, в которую они иммобилизованы. В данной работе проведены исследования межатомных связей и колебаний атомов в композитных материалах из оксида железа $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и силикогеля/ксерогеля SiO_2 методом ИК-спектроскопии и расчётов методом функционала плотности (DFT).*

Ключевые слова: наноструктуры, $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, размерные эффекты, ИК-спектроскопия, расчёт методом функционала плотности

Influence of nanostructure parameters on optical and magneto-optical spectra**Puastolova Yu.V.**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher of Kirensky Institute of Physics Federal Research Center KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences

Dubrovskiy A.A.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of Kirensky Institute of Physics Federal Research Center KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences

Tomilin F.N.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of Kirensky Institute of Physics Federal Research Center KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences

Kirillov V.L.

Lead engineer of Federal Research Center Boreskov Institute of Catalysis

Balaev D.A.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Director of Kirensky Institute of Physics
Federal Research Center KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences

Martyanov O.N.

Doctor of Chemical Sciences, Deputy Director of Federal Research Center Boreskov
Institute of Catalysis

Annotation. *Spectral studies are a universal tool for studying nanostructures in the IR spectral range. Size and surface effects play a major role in the study of nanostructures, i.e. The size and surface of particles significantly influence the optical and spectroscopic properties of nanostructures. The interaction of nanoparticles with the medium in which they are immobilized is also important. In this work, interatomic bonds and atomic vibrations in composite materials of iron oxide ϵ -Fe₂O₃ and silica gel/xerogel SiO₂ were studied using IR spectroscopy and density functional theory (DFT) calculations.*

Keywords: *nanostructures, ϵ -Fe₂O₃, size effects, IR spectroscopy, density functional theory*

Эпсилон-фаза (ϵ -Fe₂O₃) представляет собой метастабильную фазу оксида железа (III), промежуточную между маггемитом и гематитом, обладает орторомбической нецентросимметричной структурой с пространственной группой $Pna2_1$ в области комнатной температуры и является единственным полиморфом оксида железа (III), в котором ионы железа занимают четыре неэквивалентных кристаллографические позиции [1-5].

Исследование спектроскопических свойств ϵ -Fe₂O₃ в диапазоне частот между терагерцовыми и миллиметровыми волнами в перспективе является интересным направлением исследования данного полиморфа. Еще одним будущим направлением является исследование ϵ -Fe₂O₃ для новой методологии оптомагнитной записи. Поскольку ϵ -Fe₂O₃ позиционируется как материал для магнитных записей и высокочастотных поглотителей миллиметровых волн, добавление характеристики поглощения миллиметровых волн к технологии магнитной записи может расширить возможности применения данной фазы оксида железа. Также для магнитооптической записи может быть полезен наблюдающийся в данном материале магнитооптический переход [3].

Ранее были изготовлены образцы, содержащие полиморф ϵ -Fe₂O₃ в двух типах матрицы: силикогеля SiO₂ [4] и ксерогеля SiO₂ [5]. Для проверки наличия химической связи между оксидом железа и оксидом кремния, а также для выявления разницы в связях между ϵ -Fe₂O₃ и SiO₂ в виде силикогеля и ксерогеля, в данной работе были сделаны измерения колебательных спектров двух серий образцов. Первая серия, представляющая образцы наночастиц оксида железа, помещенных в матрицу ксерогеля SiO₂ (обозначена как FX) содержит четыре образца: 5FX, 10 FX, 20FX и 33FX. Цифры показывают, сколько массовых долей ϵ -Fe₂O₃ содержит данный образец. Вторая серия состоит из четырех образцов, в которых наночастицы оксида железа находятся в матрице силикогеля SiO₂ (обозначена как FS): 0.5 FS; 3 FS; 6 FS и 12 FS, цифры также указывают на массовую долю оксида железа в каждом образце. Кроме того, в качестве некоего ориентира был исследован образец чистого ϵ -Fe₂O₃, не содержащегося в матрице SiO₂. Также все образцы отличаются распределением наночастиц по размерам: чем выше массовая доля оксида железа в образце, тем больше средний размер частиц ϵ -Fe₂O₃, содержащихся в данном образце.

Для выявления структурных особенностей состояния высокодисперсного ϵ -Fe₂O₃ в матрице ксерогеля и силикогеля SiO₂, применен метод инфракрасной спектроскопии с

преобразованием Фурье (FT-IR). Полученные образцы исследовались с помощью вакуумного Фурье-спектрометра VERTEX 80V (BRUKER) в средней ИК области $380\text{--}4000\text{ см}^{-1}$. Для расчёта ИК-спектра структуры $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ было использовано моделирование теории функционала см^{-1} плотности с использованием кода CRYSTAL 17. В этих рамках в расчётах был использован гибридный функционал B3LYP из-за его высокой точности при описании структурных, электронных и колебательных свойств кристаллических и молекулярных материалов. На рис. 1 представлены ИК спектры $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ в матрице силикогеля (FS) и ксерогеля (FX) SiO_2 при комнатной температуре.

Частоты колебаний связей Si-O и Fe-O в оксидных соединениях различаются незначительно, а также они изменяются от условий синтеза. Связи Si-O являются сильными имея ковалентный характер в области частот деформационных колебаний $460\text{--}430\text{ см}^{-1}$ и валентных колебаний $1100\text{--}900$. Для большой совокупности кремниевых соединений, независимо от того содержатся ли в них другие ионы, характеристические частоты сохраняют постоянство.

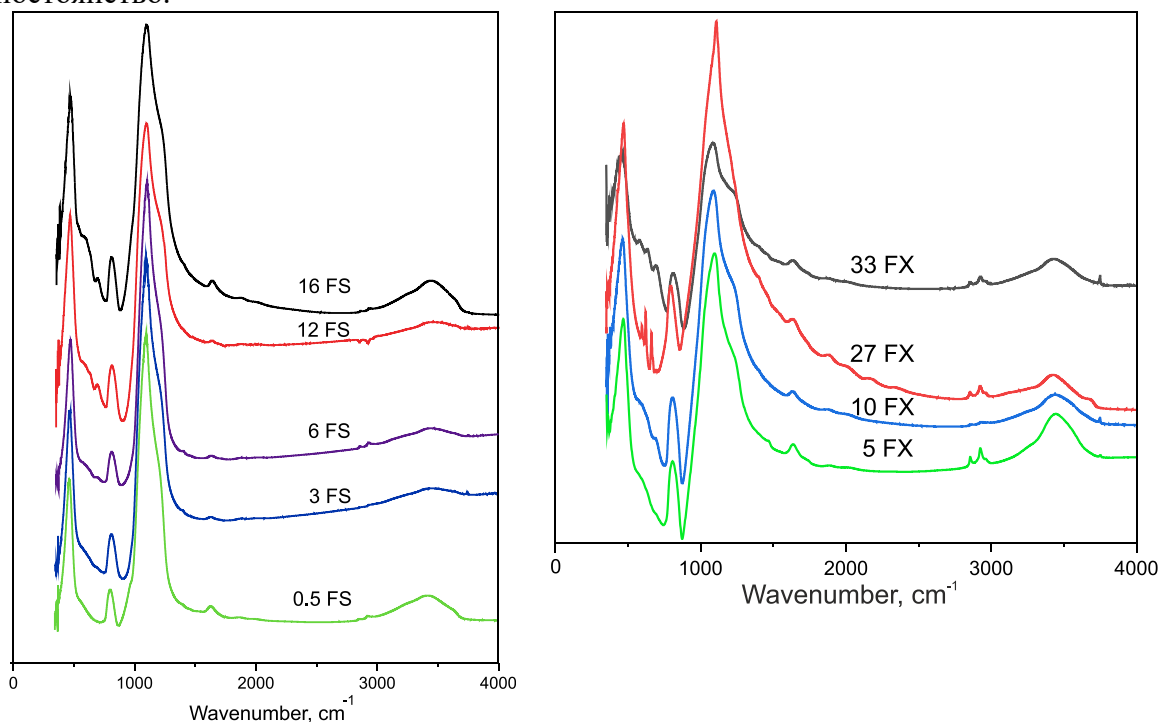


Рис. 1. Спектры инфракрасного поглощения $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ в матрице силикогеля (FS) и ксерогеля (FX) SiO_2 при комнатной температуре.

В исследуемых образцах наблюдаются следующие колебания: 454 см^{-1} $\delta(\text{O-Si-O})$; 587 см^{-1} $\delta(\text{Fe}_3\text{-O-Fe}_4)$ (маятниковые и ножничные); 629 см^{-1} $\nu(\text{Fe}_2\text{-O})$ (симметричные); 689 см^{-1} $\nu(\text{Fe}_1\text{-O})$ (симметричные); 810 см^{-1} $\nu_s(\text{O-Si-O})$; $1049, 1080\text{ см}^{-1}$ $\nu_{as}(\text{O-Si-O})$ широкая полоса; 1633 см^{-1} $\delta(\text{O-H, H-O-H})$ поверхностные; 3434 см^{-1} $\nu(\text{H-O-H})$. Несмотря на то, что спектр с оптимизированной структурой все же имеет смещение в длинноволновую область, замечено, что экспериментальный спектр и теоретический хорошо согласуются в пределах спектральной области $550\text{--}800\text{ см}^{-1}$.

Спектры исследуемых образцов имеют отличия в области колебания связей Si-O. В образцах, содержащих оксид железа в матрице ксерогеля, колебания связей Fe-O имеет меньшую интенсивность, чем для образцов с матрицей из силикогеля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках исследовательского проекта № 24-12-20011

Список использованной литературы:

1. J. Tuček, R. Zbořil, A. Namai, S. Ohkoshi, Chem. Mater. – 2010. – No. 22. – p. 6483.
2. Yu. V. Knyazev, A. I. Chumakov, A. A. Dubrovskiy, S. V. Semenov, I. Sergueev, S. S. Yakushkin, V. L. Kirillov, O. N. Martyanov and D. A. Balaev, Nuclear forward scattering application to the spiral magnetic structure study in ϵ -Fe₂O₃. // Physical Review B. – 2020. – 101. – 094408.
3. S. Ohkoshi, A. Namai, T. Yamaoka, M. Yoshikiyo, K. Imoto, T. Nasu, S. Anan, Y. Umeta, K. Nakagawa, H. Tokoro. //Sci. Rep. – 2016. – 6. – 27212.
4. S. S. Yakushkin, D. A. Balaev, A. A. Dubrovskiy, S. V. Semenov, Yu.V. Knyazev, O.A. Bayukov, V.L. Kirillov, R.D. Ivantsov, I.S. Edelman, O. N. Martyanov // Ceramics International. – 2018. – 44(15). – 17852-17857.
5. S. S. Yakushkin, D. A. Balaev, A. A. Dubrovskiy, S. V. Semenov, K. A. Shaikhutdinov, M. A. Kazakova, G. A. Bukhtiyarova, O. N. Martyanov, O. A. Bayukov. //J. Supercond. Nov. Magn. – 2018. – 31. – 1209.

УДК 537.632

Эволюция фазового состава и магнитных свойств композита на основе наночастиц ϵ -Fe₂O₃, иммобилизованных в ксерогель SiO₂, при увеличении концентрации оксида железа и магнитные свойства наночастиц ϵ -Fe₂O₃, извлеченных из композита ϵ -Fe₂O₃/ксерогель

Дубровский А.А.

к.ф.-м. н., старший научный сотрудник ИФ им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН

Семёнов С.В.

к.ф.-м. н., старший научный сотрудник ИФ им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН

Князев Ю.В.

к.ф.-м. н., старший научный сотрудник ИФ им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН

Кириллов В.Л.

ведущий инженер ФИЦ ИК им. Г.К. Борескова

Балаев Д.А.

д.ф.-м. н., директор ИФ им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН

Мартьянов О.Н.

д. х. н., зам. дир. ФИЦ ИК им. Г.К. Борескова

***Аннотация.** ϵ -Fe₂O₃ является достаточно редкой полиморфной модификацией оксида железа и существует только в виде наночастиц. Как и во всех наноструктурах, поверхностные и размерные эффекты играют важную роль в проявляемых магнитных свойствах. В данной работе мы исследовали эволюцию фазового состава и магнитных свойств композита на основе наночастиц ϵ -Fe₂O₃, иммобилизованных в ксерогель SiO₂, при увеличении концентрации оксида железа и сопутствующего данному увеличению роста размеров наночастиц оксида железа, а также магнитные свойства наночастиц ϵ -Fe₂O₃, извлеченных из композита ϵ -Fe₂O₃/ксерогель.*

***Ключевые слова:** наночастицы, размерные эффекты, поверхностные эффекты, ϵ -Fe₂O₃*

Evolution of the phase composition and magnetic properties of a composite based on ϵ -Fe₂O₃ nanoparticles immobilized in SiO₂ xerogel with increasing iron oxide concentration and magnetic properties of ϵ -Fe₂O₃ nanoparticles extracted from the ϵ -Fe₂O₃/xerogel composite

Dubrovskiy A.A.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of Kirensky Institute of Physics Federal Research Center KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences

Semenov S.V.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of Kirensky Institute of Physics Federal Research Center KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences

Knyazev Yu.V.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of Kirensky Institute

of Physics Federal Research Center KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences

Kirillov V.L.

Lead engineer of Federal Research Center Boreskov Institute of Catalysis

Balaev D.A.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Director of Kirensky Institute of Physics
Federal Research Center KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences

Martyanov O.N.

Doctor of Chemical Sciences, Deputy Director of Federal Research Center Boreskov
Institute of Catalysis

Annotation. $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ is a rather rare polymorphic modification of iron oxide and exists only in the form of nanoparticles. As with all nanostructures, surface and size effects play important roles in the exhibited magnetic properties. In this work, we investigated the evolution of the phase composition and magnetic properties of a composite based on $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles immobilized in SiO_2 xerogel with an increase in the concentration of iron oxide and the accompanying increase in the size of iron oxide nanoparticles, as well as the magnetic properties of $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles extracted from $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{xerogel}$ composite

Keywords: nanoparticles, size effects, surface effects, $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$

Оксид железа $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ привлекает внимание исследователей из-за своей магнитокристаллической анизотропии, которая отличает его от других полиморфов и приводит к гигантскому коэрцитивному полю, составляющим 25 кЭ при комнатной температуре. Это самое большое значение среди магнитов на основе оксидов металлов [1–3].

Ранее были изготовлены образцы, содержащие полиморф $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ в матрице ксерогеля SiO_2 [4]. Данная серия, представляющая образцы наночастиц оксида железа, помещенных в матрицу ксерогеля SiO_2 (обозначена как FX) содержит четыре образца: 5FX, 10 FX, 20FX и 33FX. Цифры показывают, сколько массовых долей $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ содержится в матрице ксерогеля. Кроме того, в качестве некоего ориентира был исследован образец чистого $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, не содержащегося в матрице SiO_2 . Также все исследуемые материалы отличаются распределением наночастиц по размерам: чем выше массовая доля оксида железа в образце, тем больше средний размер частиц $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, содержащихся в данном объекте [4].

На рис.1 представлены зависимости намагниченности исследуемых образцов от магнитного поля при температуре $T = 4$ К. Величина намагниченности нормирована на массу оксида $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$, содержащегося в исследуемом композите. Видно, что максимальная величина намагниченности тем больше, чем меньше размер частиц. Это объясняется тем, что малые частицы остаются незаблокированными, т.е. находятся в суперпарамагнитном состоянии. Одновременно с этим эффектом мы можем наблюдать увеличение коэрцитивной силы при переходе от образца с меньшим содержанием частиц (и с меньшими размерами частиц!) к композиту с большим содержанием $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Это объясняется ростом размера частиц, которые остаются однодоменными. Данный эффект известен в системе $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ достаточно давно [1-4].

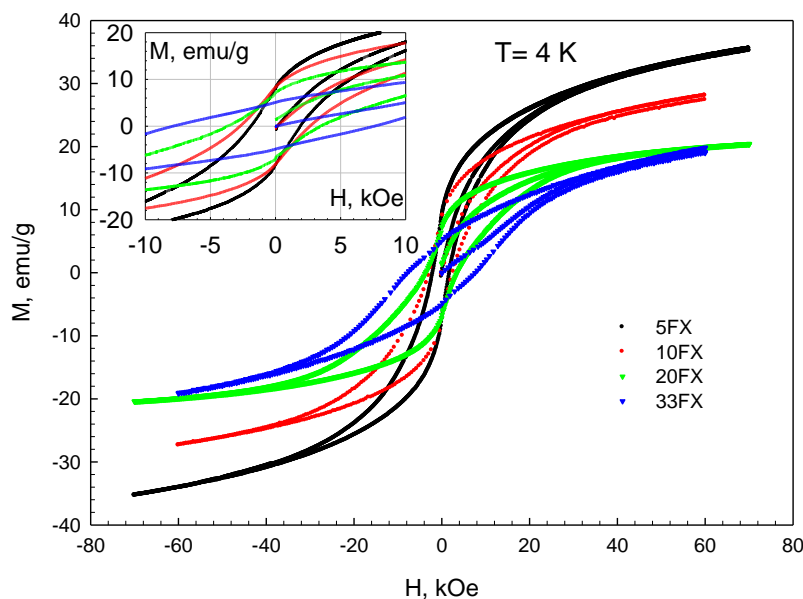


Рис. 1. Зависимости намагниченности серии образцов от приложенного магнитного поля, измеренные при температуре $T = 4$ К. На вставке: увеличенный участок петель в области малых полей.

На рис. 2 приведены зависимости реальной части магнитной восприимчивости исследуемых образцов при частоте $f = 1$ kHz от температуры. Видно, что максимальная величина восприимчивости также хорошо коррелирует с размерами частиц. Также видно, что в объектах, где содержание малых частиц достаточно велико (5FX, 10 FX и 20 FX), хорошо прописывается «горб» в районе температуры $T = 40$ К. Данный максимум показывает блокировку малых частиц. Для образцов, где средний размер частиц смещён в область больших размеров («чистый» и 33FX), такого максимума не наблюдается. «Чистый» образец – это 20FX, где частицы ϵ - Fe_2O_3 вытравлены из матрицы ксерогеля, при данной процедуре малые частицы также теряются, остаются только наибольшие по размерам.

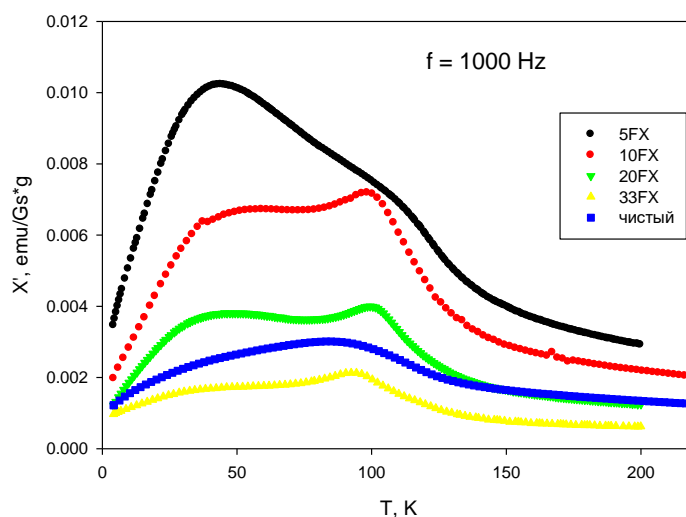


Рис. 2. Зависимости реальной части магнитной восприимчивости исследуемых образцов при частоте $f = 1$ kHz от температуры.

Второй максимум соответствует известному фазовому переходу полиморфа ϵ - Fe_2O_3 , наблюдающемуся в диапазоне температур $T = 80 \div 150$ К. Видно, что образец 5FX наименее выражено демонстрирует данный переход, что указывает на большее влияние на его свойства малых частиц.

В заключение можно отметить, что распределение частиц по концентрациям в исследуемых материалах ε -Fe₂O₃/ксерогель приводит к сильной разнице в распределении наночастиц по размерам, а, следовательно, к возможности управления размерными эффектами путем контроля количества наночастиц в образце.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках исследовательского проекта № 24-12-20011.

Список использованной литературы:

1. S. Ohkoshi, A. Namai, T. Yamaoka, M. Yoshikiyo, K. Imoto, T. Nasu, S. Anan, Y. Umeta, K. Nakagawa, H. Tokoro. Sci. Rep. – 2016. – 6. – 27212.
2. J. Jin, S. Ohkoshi, K. Hashimoto, Adv. Mater. – 2004. – 16. – 48.
3. S. Ohkoshi, S. Sakurai, J. Jin, K. Hashimoto, J. Appl. Phys. 2005, 97, 10K312. Lima, E., Tanaka, T., Toyoda, I., Progress In Electromagnetics Research M. – 2018. – Vol. 75. – 141–148.
4. S. S. Yakushkin, D. A. Balaev, A. A. Dubrovskiy, S. V. Semenov, Yu. V. Knyazev, O. A. Bayukov, V. L. Kirillov, R. D. Ivantsov, I. S. Edelman, O. N. Martyanov, Ceramics International. – 2018. – 44(15). – 17852-17857.

УДК 537.636 + 546.72 + 54.05

Гибридные магнитные полимер–неорганические нанокompозиты

Макарова Л.А.

к.ф.-м. н., кафедра магнетизма физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Перов Н.С.

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

Спиридонов В.В.

к.х.н., доцент кафедры нанoeлектроники химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Ярославов А.А.

д.х.н., чл.-корр. РАН, профессор кафедры нанoeлектроники химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

***Аннотация.** Гибридные магнитные полимер-неорганические нанокompозиты были синтезированы на основе природного и синтетического полиэлектролитов. Характерные размеры структурных элементов нанокompозитов не превышают 300 нм, и каждый из них содержит 30-50 наночастиц маггемита. В синтезируемых нанокompозитах магнитные наночастицы образуют узлы между полимерными цепями. Разные по длине полиакрилатные цепи по-разному участвуют во взаимодействии с наночастицами маггемита, локально формируя области с наночастицами, обладающие различными свойствами. Исследования нанокompозитов проводились методами ИК-спектроскопии, динамического рассеяния света, вибрационной магнитометрии. Предлагаемые нанокompозиты биосовместимы и*

перспективны для использования в медицине и биологии, в частности, для магнитной гипертермии.

Ключевые слова: полимерные нанокомпозиты, магнитные наночастицы, маггемит, полианины, полиакрилат

Hybrid magnetic polymer-inorganic nanocomposites

Makarova L.A.,

PhD, Physical Faculty, Lomonosov MSU

Perov N.S.,

Dr.Sc., Professor, Physical Faculty, Lomonosov MSU

Spiridonov V.V.,

PhD, Associate Professor, Chemical Faculty, Lomonosov MSU

Yaroslavov A.A.

Dr.Sc., Cor. Member of RAS, Professor, Chemical Faculty, Lomonosov MSU

Annotation. Hybrid magnetic polymer-inorganic nanocomposites were synthesised on the basis of natural and synthetic polyelectrolytes. The characteristic sizes of the structural elements of the nanocomposites do not exceed 300 nm, and each nanocomposite contains 30-50 maghemite nanoparticles. In the synthesised nanocomposites, magnetic nanoparticles form nodes between polymer chains. Different lengths of polyacrylate chains participate differently in the interaction with the maghemite nanoparticles, locally forming regions with nanoparticles having different properties. The nanocomposites were investigated by IR spectroscopy, dynamic light scattering, and vibrational magnetometry. The proposed nanocomposites are biocompatible and promising for use in medicine and biology, in particular, for magnetic hyperthermia.

Keywords: polymer nanocomposites, magnetic nanoparticles, maghemite, polyanines, polyacrylate

В работе были получены нанокомпозиты на основе полианионов и наночастиц, обладающих ярко выраженными магнитными свойствами. В качестве полианионов были выбраны природный и синтетический полиэлектролиты, характеризующиеся биосовместимостью и не являющиеся токсичными. Поэтому получаемый в итоге магнитный нанокомпозиционный материал является нетоксичным, а также биосовместимым. Это открывает перспективу биомедицинского применения получаемых нанокомпозитов [1].

Синтез композиционного материала на основе природного и синтетического полиэлектролитов проводился при комнатной температуре следующим образом: к раствору, содержащему природный полиэлектролит, добавляли соль Мора, восстановитель и гидроксид натрия. После появления тёмно-коричневой окраски реакционной смеси приливали раствора, содержащий синтетический полиэлектролит. Полученную смесь интенсивно перемешивали. В результате были получены хорошо растворимые в водной среде волокна красно-коричневого цвета. Методом лазерного микроэлектрофореза были измерены z-потенциалы частиц образцов. Все полученные соединения характеризуются ярко выраженными отрицательными значениями электрофоретической подвижности, что свидетельствует о практически неограниченной диспергируемости полученных нанокомпозитов.

Характер взаимодействия полианионов с поверхностью наночастиц, образующихся в процессе синтеза нанокомпозитов определяли, используя метод ИК-спектроскопии. Установлено, что присутствие наночастиц в нанокомпозитах нарушает систему водородных связей в полимерной матрице; функциональные группы полианионов образуют электростатические (через карбоксильные группы в составе) и координационные (через

гликозидные и гидроксильные группы) связи с ионами Fe^{3+} на поверхности наночастиц магнитной фазы.

Методом динамического рассеяния света были изучены гидродинамические характеристики индивидуальных частиц нанокompозитов, полученных в ходе синтеза. Исследования методом динамического рассеяния света были проведены как в водном, так и водно-солевом (физиологическом) растворах. Установлено, что полученные нанокompозиты характеризуются размерами структурных элементов (гидродинамическими диаметрами), не превышающими 300 нм в водной среде, и незначительным уменьшением размеров, не влияющим на коллоидную устойчивость, в физиологической среде.

Магнитные свойства нанокompозитов были исследованы с помощью вибрационного магнитометра LakeShore 7400 при комнатной температуре в диапазоне полей до 16 кЭ. Было обнаружено, что магнитные свойства меняются в зависимости от концентрации наночастиц маггемита, что зависит от соотношения ионов железа в карбоксильной группе в составе полиэлектролитов. Заметное влияние на магнитные свойства оказывали длина цепи добавляемого полиакрилата и массовое соотношение между альгинатом и полиакрилатом. На Рисунке ниже представлены петли гистерезиса для композитов с различной длиной цепи полиакрилата (ПА). Различие в магнитных свойствах объясняется количеством образуемых кластеров наночастиц при использовании различных полимерных цепей. А именно, разные по длине полиакрилаты по-разному участвуют во взаимодействии с наночастицами. До определенных значений уменьшение длины цепи приводит к тому, что магнитные наночастицы собираются в кластеры с более плотной упаковкой.

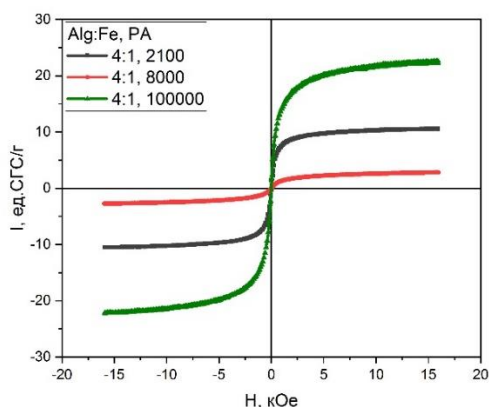


Рис.1 Зависимость удельной намагниченности от магнитного поля для нанокompозитов с различной длиной цепи полиакрилата.

Как уже отмечалось, полученные магнитные нанокompозиты являются биосовместимыми, их раствор может быть использован для исследования их нагрева в переменном магнитном поле для применения в магнитной гипертермии.

Список использованной литературы:

1. V. V. Spiridonov, I. G. Panova, L. A. Makarova et al.// Carbohydrate Polymers. — 2017. — Vol. 177. — P. 269–274.

УДК 538.9

Магнитные свойства нанокompозитов типа ядро@оболочка на основе карбидов и оксидов железа, синтезированных золь-гель методом**Старчиков С.С.**

к.ф.-м.н., Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники, НИЦ «Курчатовский институт»

Заяханов В.А.

Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники, НИЦ «Курчатовский институт»

Линь Ч.-Р.

Факультет прикладной физики, Национальный университет Пиндун

Любутин И.С.

д.ф.-м.н., профессор, Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники, НИЦ «Курчатовский институт»

***Аннотация.** Предложен новый одностадийный безводный золь-гель метод синтеза нанокompозитов ядро@оболочка на основе карбидов и оксидов железа. Изучены фазовый состав, структура и магнитные свойства полученных продуктов. По данным мёссбауэровской спектроскопии построена массовая диаграмма фаз, содержащих железо. Установлено, что при температуре синтеза $T_{syn} = 1000^\circ\text{C}$ образуются нанокompозиты ядро@оболочка $\text{Fe}_3\text{C}@Fe_2\text{O}_3@C$, $\text{Fe}_3\text{C}@C$, $\text{Fe}_2\text{O}_3@C$, а также сферические частицы и пластинки графита. Для наночастиц оксидов железа рассчитан параметр $\alpha = KV/k_B T$, где K – константа магнитной анизотропии, V – объем наночастицы, k_B – постоянная Больцмана, T – температура. Температурная зависимость намагниченности $M(T)$ образца, синтезированного при $T_{syn} = 1000^\circ\text{C}$, имеет специфический характер, где наблюдаются три резких спада при температурах, близких к точке Нееля/Кюри, для объемных Fe_3C , Fe_3O_4 и $\alpha\text{-Fe}$. Такое своеобразное поведение намагниченности представляется важным, поскольку может найти применение в технике.*

***Ключевые слова:** наноструктуры, нанокompозиты, ядро@оболочка, карбиды железа, оксиды железа, мёссбауэровская спектроскопия.*

Magnetic properties of the iron carbide and oxide core@shell nanocomposites synthesized by sol-gel method**Starchikov S.S.**

Ph.D., A.V. Shubnikov Institute of crystallography of Kurchatov Complex of Crystallography and photonics, NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

Zayakhanov V.A.

A.V. Shubnikov Institute of crystallography of Kurchatov Complex of Crystallography and photonics, NRC “Kurchatov Institute” Moscow, Russia

Lin Chun-Rong

Department of Applied Physics, National Pingtung University, Pingtung City, Taiwan

Lyubutin I.S.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, A.V. Shubnikov Institute of crystallography of Kurchatov Complex of Crystallography and photonics, NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

Annotation. A new one-stage anhydrous sol-gel method for the synthesis of core@shell nanocomposites based on iron carbide and oxide is proposed. The phase composition, structure and magnetic properties of the obtained products were studied. The mass diagram of iron-containing phases was constructed from Mössbauer spectroscopy data. It was found that at the synthesis temperature $T_{syn} = 1000^{\circ}\text{C}$ core@shell nanocomposites $\text{Fe}_3\text{C}@Fe_2\text{O}_3@C$, $\text{Fe}_3\text{C}@C$, $\text{Fe}_2\text{O}_3@C$ as well as spherical graphite particles and plates were formed. The parameter $\alpha = KV/k_B T$ was calculated for iron oxide nanoparticles, where K is the magnetic anisotropy constant, V is the volume of the nanoparticle, k_B is the Boltzmann constant, and T is the temperature. The $M(T)$ curve of the sample synthesized at $T_{syn} = 1000^{\circ}\text{C}$ has a specific character - there are three sharp drops at temperatures close to the Néel/Curie point for bulk Fe_3C , Fe_3O_4 , and $\alpha\text{-Fe}$. Such peculiar behavior of magnetization seems to be important, since it can find application in technology.

Keywords: nanostructures, nanocomposites, core@shell, iron carbides, iron oxides, Mössbauer spectroscopy

Магнитные наноматериалы на основе карбидов железа в углеродных оболочках рассматриваются как перспективные магнитоуправляемые платформы для биомедицинских применений в адресной доставке лекарств, гипертермии, в качестве контрастных агентов для МРТ [1]. Одним из возможных методов простого и экономичного синтеза таких нанокompозитов является метод золь-гель [2]. Отметим, что в научной литературе редко встречается золь-гель синтез наночастиц карбидов железа и обсуждаются их магнитные свойства.

В работе изучены структура и магнитные свойства наночастиц карбида железа Fe_3C синтезированные новым одностадийным безводным золь-гель методом. Характеризация образцов проводилась с помощью рентгенофазового анализа, электронной микроскопии (включая методы TEM/STEM/ED/EDX), рамановской и мессбауэровской спектроскопии, магнитометрии. TEM/STEM/ED/EDX исследования показали наличие 4х типов наночастиц в образце, синтезированном при 1000°C . Это сферические частицы типа ядро-оболочка $\text{Fe}_3\text{C}@Fe_2\text{O}_3@C$ (Рис.1), $\text{Fe}_3\text{C}@C$, $\text{Fe}_2\text{O}_3@C$, а также сферические частицы и пластинки графита. По данным мессбауэровской спектроскопии построена массовая диаграмма фаз, содержащих железо.

Используя модель многоуровневой суперпарамагнитной релаксации, для наночастиц оксидов железа рассчитан параметр $\alpha = KV/k_B T$, где K – константа магнитной анизотропии, V – объем наночастицы, k_B – постоянная Больцмана, T – температура. Кривые намагниченности всех образцов имеют характерный для ферромагнетиков гистерезис. Значения намагниченности насыщения образцов находятся в диапазоне 20 – 68 эме/г.

Обнаружено аномальное поведение намагниченности наночастиц при нагреве до 1000°C в атмосфере аргона. Температурная зависимость намагниченности $M(T)$ этого образца имеет специфический характер – наблюдаются три резких спада при температурах, близких к точке Нееля/Кюри, для объемных Fe_3C , Fe_3O_4 и $\alpha\text{-Fe}$ (Рис. 2). Проведенное исследование показало, что это поведение связано с каскадом химических превращений в исследуемом образце [3]. Такое своеобразное поведение намагниченности представляется важным, поскольку может найти применение в технике.

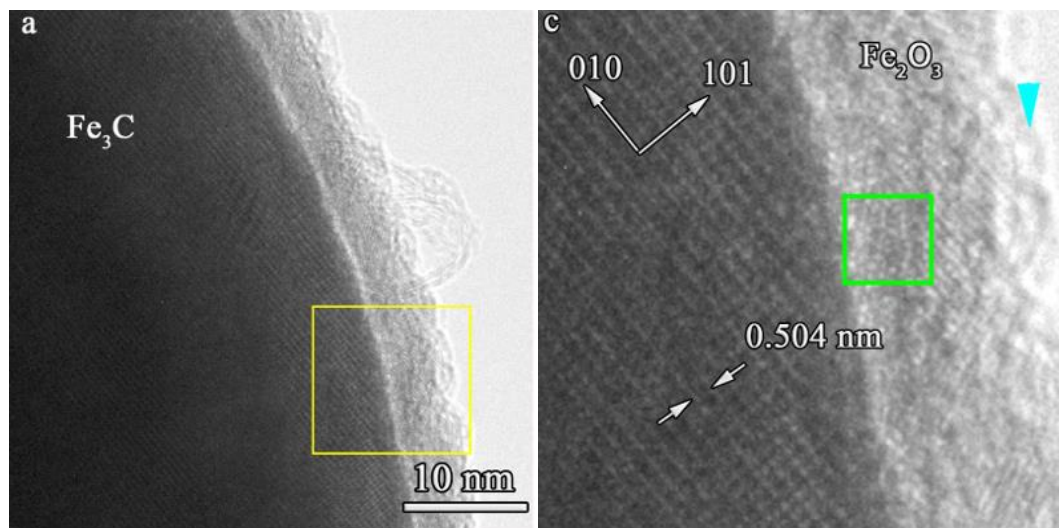


Рис. 1. (а) HR TEM-изображение увеличенной области частицы $\text{Fe}_3\text{C}@Fe_2O_3@C$ в образце. Область, отмеченная желтым квадратом, показана на (с); область зеленого квадрата соответствует Fe_2O_3 и использовалась для анализа кристаллической структуры. Синяя стрелка указывает на предполагаемую углеродную оболочку.

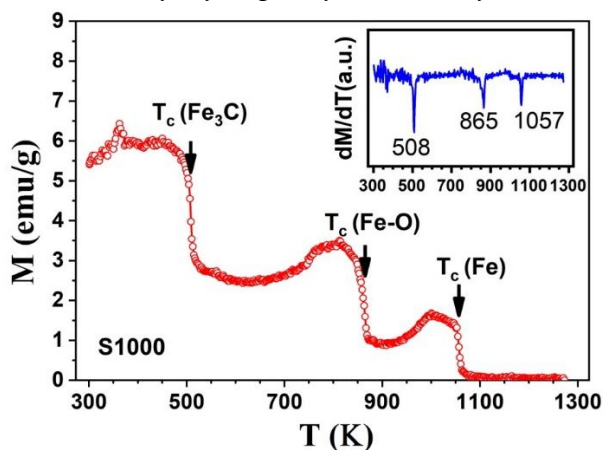


Рис. 2. Температурная зависимость намагниченности (кривая $M-T$) для образца S1000. На вставке показана первая производная кривой $M-T$ (кривая dM/dT) с минимальным значением, которое определяется как температура магнитного перехода.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт»

Список использованной литературы:

1. Yu J. et.al. Iron Carbide Nanoparticles: An Innovative Nanoplatform for Biomedical Applications // *Nanoscale Horizons*. – 2017. – Т.2. – № 2. – С.81-88.
2. Esposito S. “Traditional” Sol-Gel Chemistry as a Powerful Tool for the Preparation of Supported Metal and Metal Oxide Catalysts // *Materials*. – 2019. – Т.12. – № 4. – С. 668
3. Zayakhanov V.A., Starchikov S.S., M.V. Lyubutina et al. Phase composition, structural and magnetic properties of core-shell nanoparticles based on iron carbide Fe_3C synthesized by the sol-gel method // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2024. – Т.976. – С.172965.

УДК 537.622.4

Синтез и магнитное поведение массивов Ni нанопроволок типа «медуза» - эксперимент и моделирование**Самардак А.Ю.**

к.ф.-м. н., старший преподаватель департамента общей и экспериментальной физики
ИНТиПМ ДВФУ

Собиров М.И.

инженер-исследователь лаборатории плёночных технологий ИНТиПМ ДВФУ

Рогачёв К.А.

инженер-исследователь лаборатории плёночных технологий ИНТиПМ ДВФУ

Шишелов А.Ф.

инженер-исследователь лаборатории плёночных технологий ИНТиПМ ДВФУ

Огнев А.В.

д. ф.-м. н, профессор департамента общей и экспериментальной физики ИНТиПМ ДВФУ
проректор СахГУ

Самардак А.С.

д. ф.-м. н., профессор департамента общей и экспериментальной физики ИНТиПМ ДВФУ
и.о. ректора СахГУ

***Аннотация.** Ферромагнитные наноструктуры с нетривиальной геометрией зачастую обладают уникальным магнитным поведением, определяемым сильной анизотропией формы. В одномерных наноструктурах она определяет существование ярко выраженной одноосной анизотропии, а манипуляции с формой одномерного объекта приводят к образованию необычных микромагнитных конфигураций, интересных как с фундаментальной точки зрения, так и в плане применения таких структур на практике. В данной работе мы представляем синтез Ni нанопроволок типа «медуза» на основе двухслойных пористых матриц оксида алюминия, а также приводим детальное исследование их морфологии, магнитных и структурных свойств. С использованием микромагнитного моделирования, построенного на основе полученных эмпирических данных, мы приводим результаты исследования доменной структуры и процессов перемагничивания таких нанобъектов, определяющих их потенциальное применение в качестве элементов памяти и компьютерной логики нового поколения.*

***Ключевые слова:** наноструктуры, нанопроволоки, FORC-метод, микромагнитное моделирование*

Synthesis and magnetic behavior of jellyfish-like Ni nanowire arrays - experiment and simulation**Samardak A.Yu.**

Candidate of physical and mathematical Sciences, Senior lecturer of Department of General and Experimental Physics, ИТaAM, Far Eastern Federal University

Sobirov M.I.

Research Engineer, Laboratory of Thin Film Technologies, IHTaAM, Far Eastern Federal University

Rogachev K.A.

Research Engineer, Laboratory of Thin Film Technologies, IHTaAM, Far Eastern Federal University

Shishelov A.F.

Research Engineer, Laboratory of Film Technologies, IHTaAM, Far Eastern Federal University

Ognev A.V.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor of Department of General and Experimental Physics, IHTaAM, Far Eastern Federal University, Vice-Rector, SSU

Samardak A.S.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor of Department of General and Experimental Physics, IHTaAM, Far Eastern Federal University, Acting Rector, SSU

Annotation. *Ferromagnetic nanostructures with nontrivial geometry often exhibit unique magnetic behavior determined by strong shape anisotropy. In one-dimensional nanostructures, it determines the existence of pronounced uniaxial anisotropy, and manipulations with the shape of a one-dimensional object lead to the formation of unusual micromagnetic configurations, interesting both from a fundamental point of view and in terms of the practical application of such structures. In this work, we present the synthesis of jellyfish-type Ni nanowires based on bilayer porous alumina templates, and provide a detailed study of their morphology, magnetic and structural properties. Using micromagnetic simulations based on the obtained empirical data, we present the results of a study of the domain structure and magnetization reversal processes of such nanoobjects, which determine their potential use as memory elements and computer logic of a new generation.*

Keywords: *nanostructures, nanowires, FORC-method, micromagnetic simulations*

При уменьшении структур до масштаба, сравнимого с атомными размерами, квантовые и поверхностные эффекты оказывают всё большее влияние на их свойства, причем характер таких эффектов напрямую зависит от пространственной кривизны объекта. В магнитных наноструктурах зависимость свойств от их геометрии проявляется в особенной степени из-за сильной анизотропии формы, которая усиливается на наноуровне. Как результат, сильная одноосная магнитная анизотропия часто определяет магнитное поведение таких наноструктур, что приводит к образованию уникальных микромагнитных конфигураций и необычной динамике их переключения. Благодаря созданию и исследованию объектов с нетривиальной формой возможно обнаружение эффектов, обуславливающее их потенциальное применение в качестве носителей информации высокой плотности [1] и агентов адресной доставки лекарств и гипотермии [2]. На данный момент существует множество способов синтеза магнитных нанообъектов различной формы, но наиболее эффективными и экономически целесообразными являются методы одновременного создания массивов наноструктур путём их самосборки в благоприятных условиях. Одним из таких методов является электроосаждение ферромагнитного материала в пористые матрицы оксида алюминия, которые позволяют синтезировать одномерные нанообъекты различной формы – от цилиндрических нанопроволок [3] до геликоидально закрученных нанопружин [4].

Эта работа является развитием идей, направленных на синтез массивов ферромагнитных наноструктур нетривиальной формы с использованием нанопористых матриц анодного оксида алюминия с модифицированными конфигурациями пор. [5, 6]. В рамках исследования мы представляем метод синтеза двухслойных нанопористых матриц анодного оксида алюминия со сквозными каналами разных диаметров в соответствующих слоях и создание на их основе массивов Ni нанопроволок типа «медуза», состоящих из «головы» большого диаметра, соединенной с «ножками» меньшего диаметра. Изображение растровой электронной микроскопии таких ферромагнитных структур представлено на рис. 1. Для исследования зависимости свойств таких нанопроволок от их формы образцы с разным диаметром «ног» комплексно исследовались для получения информации об их морфологии, структуре и магнитных свойствах. На основе полученных экспериментальных данных была построена микромагнитная модель, в хорошей степени описывающая исследуемую систему, которая позволила исследовать доменную структуру и процессы перемагничивания, в том числе генерацию доменных стенок на интерфейсе между «головой» и «ножками» и их движение с использованием спин-поляризованного тока, что открывает возможности для использования ферромагнитных нанопроволок типа «медуза» в качестве носителей информации и элементов памяти на беговых дорожках.

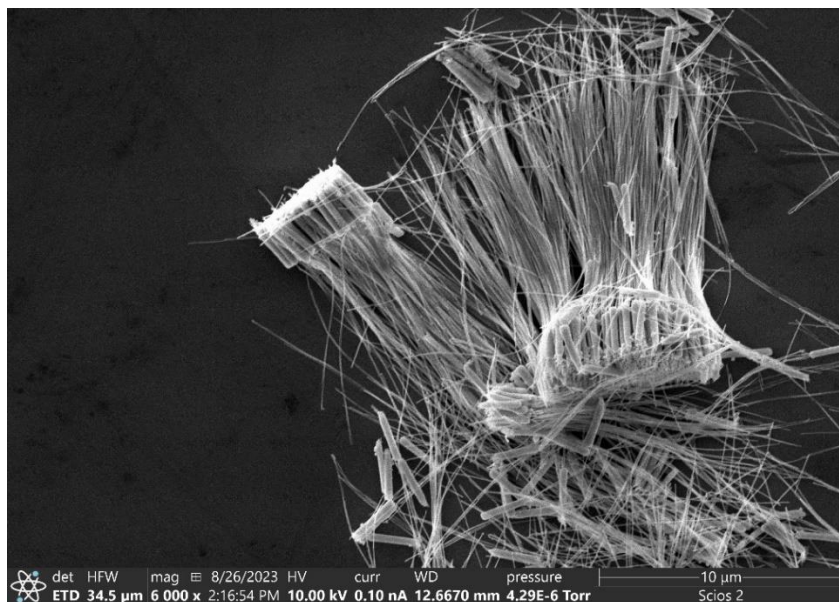


Рис 1. Изображение растровой электронной микроскопии Ni нанопроволок типа «медуза», вытравленных из пористой матрицы оксида алюминия

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России по государственному заданию (проект № FZNS-2023-0012).

Список использованной литературы:

1. Moreno J. A., Bran C., Vazquez M., Kosel J. Cylindrical Magnetic Nanowires Applications // IEEE Transactions on Magnetics. – 2021. – Т. 57, № 4.
2. Mukhtar A., Wu K., Cao X., Gu I. Magnetic nanowires in biomedical applications // Nanotechnology. – 2020. – Т. 31, № 43. – С. 433001.
3. Yoon J., Moon J. H., Chung J., Kim Y. J., Kim K., Kang H. S., Jeon Y. S., Oh E., Lee S. H., Han K., Lee D., Lee C.-H., Kim Y. K., Lee D. Exploring the Magnetic Properties of Individual Barcode Nanowires using Wide-Field Diamond Microscopy (Small 40/2023) // Small. – 2023. – Т. 19, № 40. – С. 2370329.

4. Nam D. Y., Samardak A. Y., Jeon Y. S., Kim S. H., Davydenko A. V., Ognev A. V., Samardak A. S., Kim Y. K. Magnetization reversal of ferromagnetic nanosprings affected by helical shape // *Nanoscale*. – 2018. – Т. 10, № 43. – С. 20405-20413.
5. Bran C., Fernandez-Roldan J. A., Moreno J. A., Fraile Rodríguez A., del Real R. P., Asenjo A., Saugar E., Marqués-Marchán J., Mohammed H., Foerster M., Aballe L., Kosel J., Vazquez M., Chubykalo-Fesenko O. Domain wall propagation and pinning induced by current pulses in cylindrical modulated nanowires // *Nanoscale*. – 2023. – Т. 15, № 18. – С. 8387-8394.
6. Zankowski S. P., Chaykina D., Vereecken P. M. Interconnected Ni nanowires integrated with Li_xMnO_2 as fast charging and high volumetric capacity cathodes for Li-ion batteries // *Journal of Materials Chemistry A*. – 2020. – Т. 8, № 28. – С. 14178-14189.

УДК 537.632

Синтез и исследование магнитных и магниторезистивных свойств нанопроволок FeNi

Дрягина А.Е.

инженер-исследователь, УрФУ, ИЕНиМ

Горьковенко А.Н.

к.ф.-м.н., научный сотрудник, УрФУ, ИЕНиМ

Кулеш Н.А.

к.ф.-м.н.

Кудюков Е.В.

к.ф.-м.н., младший научный сотрудник, УрФУ, ИЕНиМ

Юшков А.А.

научный сотрудник, УрФУ, ИЕНиМ

Васьковский В.О.

д.ф.-м.н., заведующий кафедрой, УрФУ, ИЕНиМ

***Аннотация.** Работа посвящена исследованию морфологии, структуры, магнитных и магниторезистивных свойств нанопроволок в матрицах оксида алюминия. Изготовление нанопроволок включает в себя все этапы начиная с изготовления оксидных матриц. Показано, что нанопроволоки являются поликристаллическими. Все типы образцов обладают эффектом магнитосопротивления.*

***Ключевые слова:** нанопроволоки, анодирование, электроосаждение, магнитосопротивление, магнитные свойства*

Synthesis and investigation of magnetic and magnetoresistive properties of FeNi nanowires

Dryagina A.E.

Research Engineer, Ural Federal University named after The First President of Russia, Boris Yeltsin

Gorkovenko A.N.

Ph.D., Research Associate, Ural Federal University named after The First President of Russia, Boris Yeltsin

Kulesh N.A.

Ph.D.

Kudukov E.V.

Ph.D., Associate Researcher, Ural Federal University named after The First President of Russia, Boris Yeltsin

Yushkov A.A.

Associate Researcher, Ural Federal University named after The First President of Russia, Boris Yeltsin

Vas'kovsky V.O.

Doctor of Ph.D., Head of the Department, Ural Federal University named after The First President of Russia, Boris Yeltsin

***Annotation.** The work is devoted to the study of the morphology, structure, magnetic and magnetoresistive properties of nanowires in aluminum oxide matrices. The manufacture of nanowires includes all stages, starting with the manufacture of oxide matrices. It is shown that nanowires are polycrystalline. All types of samples have a magnetoresistance effect.*

***Keywords:** nanowires, anodization, electrodeposition, magnetoresistance, magnetic properties*

Наноструктурированные системы являются актуальной темой исследования в области физики магнитных явлений. В частности, большой интерес представляют наноматериалы с анизотропией формы, например, нанопроволоки [1]. Они уже зарекомендовали себя в разных областях науки и техники в качестве сенсоров и датчиков, сред для записи информации, устройств для нейроморфных вычислений, устройств спинтроники и др. [2, 3]. Одним из наиболее перспективных методов исследования и влияния на магнитное состояние нанопроволок является пропускание через них электрического тока, что обуславливает интерес к возможности создания надежного электрического контакта на торцевых поверхностях массивов нанопроволок. Данная работа направлена на исследование морфологии, структуры, магнитных и магнитнорезистивных свойств массивов нанопроволок FeNi, к которым возможно подведение электрического контакта с обеих торцевых поверхностей.

Синтез магнитных нанопроволок выполнялся путем электролитического осаждения материала в пористые шаблоны оксида алюминия [4]. Наряду с относительной простотой, данная методика позволяет получать высокоупорядоченные массивы нанопроволок, расположенных перпендикулярно поверхности подложки. В качестве основы для синтеза матриц использовались фольги высокочистого алюминия толщиной ~ 1 мм. Анодирование фольг выполнялось в два этапа в водном растворе щавелевой кислоты (3 М) при комнатной температуре. Наличие двух этапов необходимо для получения более упорядоченного оксидного слоя [4]. В конце второго этапа анодирования производилось истончение барьерного слоя методом ступенчатого понижения тока и напряжения до достижения напряжения 6–7 В и 0,5 В для образцов типа А и Б, соответственно. Затем на образцах типа А в водном растворе хлорида меди и соляной кислоты удалялся слой металлического алюминия. После этого на оксидную матрицу с помощью магнетронного распыления наносился слой меди, который использовался в качестве электрода для последующего осаждения нанопроволок [5]. Образцы типа Б выдерживались в водном растворе 5 % ортофосфорной кислоты для удаления барьерного слоя на дне пор.

Заполнение готовых матриц оксида алюминия типа А и Б производилось методом электролитического осаждения FeNi (20/80) из водного раствора сульфата железа и сульфата никеля с добавлением борной кислоты при комнатной температуре. Электрический контакт на верхней стороне массивов нанопроволок обеспечивался путем переполнения пор медью, осажденной из водного раствора сульфата меди. Поскольку образцы типа Б не требуют удаления

металлического алюминия и осаждения дополнительного слоя меди, они являются более привлекательными с технологической точки зрения и представляют наибольший исследовательский интерес.

Морфология и структура образцов исследовалась при помощи просвечивающего электронного микроскопа JEOL-2100. Магнитные свойства полученных массивов нанопроволок были исследованы с помощью вибрационного магнетометра LakeShore 7407 при комнатной температуре, в диапазоне полей ± 10 кЭ. Магниторезистивные свойства исследовались на оригинальной установке в диапазоне полей ± 8 кЭ.

Средний диаметр нанопроволок типа А составил 56 нм, типа Б – 63 нм, длина нанопроволок обоих типов в среднем была ~ 10 мкм. Диаметр нанопроволок отличался в связи с более длительной выдержкой образца типа Б в ортофосфорной кислоте для удаления барьерного слоя. Исследование структуры показало, что образцы обоих типов являются поликристаллическими и не имеют выраженной текстуры, обладают как относительно крупными монокристаллическими зёрнами (~ 60 – 100 нм), так более мелкими кристаллитами.

Измерения магнитных гистерезисных свойств показали наличие ярко выраженной оси легкого намагничивания соответствующей оси массива нанопроволок для всех типов образцов, что соответствует теории [6].

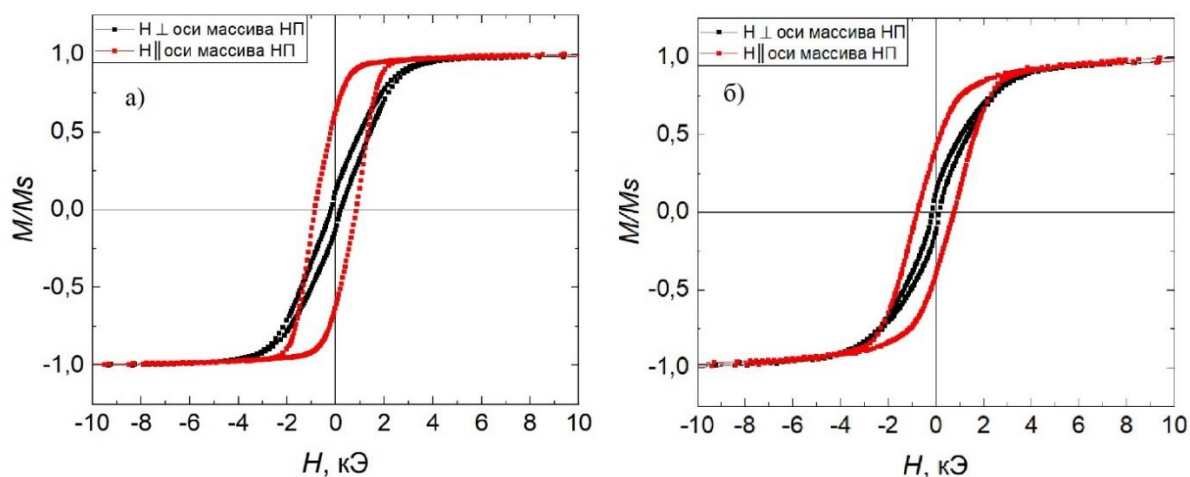


Рис. 1. Петли гистерезиса для двух типов образцов, измеренные перпендикулярно (черная линия) и параллельно (красная линия) оси массива нанопроволок: а) нанопроволоки с прямым контактом с медью; б) нанопроволоки с прямым контактом с алюминием.

Измерение магниторезистивных свойств показало наличие эффекта магнитосопротивления при приложении внешнего магнитного поля перпендикулярно оси массива нанопроволок. При приложении поля параллельно оси массива нанопроволок изменение сопротивления было близким к нулю, что соответствует данным в литературе [7]. Эффект магнитосопротивления составил: 2,09 % и 1,24 % для образцов типа А и Б, соответственно (рис. 2).

Таким образом, в работе были исследованы морфология, структура и магнитные свойства полученных образцов двух типов: с удалением металлического алюминия и барьерного слоев с использованием проводящего слоя меди и без растворения металлического алюминия. Структурные исследования показали, что полученные образцы являются поликристаллическими.

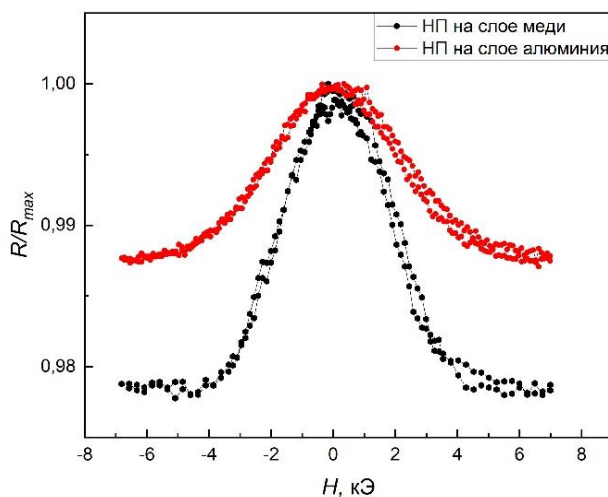


Рис. 2. Зависимость электрического сопротивления от внешнего поля приложенного перпендикулярно оси массива нанопроволок для двух типов образцов: с прямым контактом с медью (черные точки) и с прямым контактом с алюминием (красные точки).

Все образцы обладают выраженной осью легкого намагничивания вдоль направления оси нанопроволок. Некоторые различия в величине эффекта магнитосопротивления массивов нанопроволок типа А и Б, а также детальный анализ особенностей их перемагничивания позволяет сделать предположение о том, что в образцах типа Б присутствует фаза с ориентацией намагниченности перпендикулярно оси нанопроволок. Возможной причиной ее возникновения может быть длительная выдержка в ортофосфорной кислоте, которая кроме удаления барьерного слоя приводит к увеличению диаметра пор, в результате чего отдельные поры в области барьерного слоя могли объединиться. Однако данное предположение требует дополнительного исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства "Приоритет-2030".

Список использованных источников:

1. Fernández-Roldán J. A. Micromagnetism of cylindrical nanowires with compositional and geometric modulations, 2019. – 162 p.
2. Zhu, R. et al. Online dynamical learning and sequence memory with neuromorphic nanowire networks. //Nat. Commun. – 2023. – Т. 14. – №. 1. – С. 6697.
3. Mourachkine A. et al. Template nanowires for spintronics applications: nanomagnet microwave resonators functioning in zero applied magnetic field //Nano letters. – 2008. – Т. 8. – №. 11. – С. 3683-3687.
4. Lee W. et. al. Porous anodic aluminum oxide: anodization and templated synthesis of functional nanostructures //Chemical reviews. – 2014. – Т. 114. – №. 15. – С. 7487-7556.
5. Doludenko I. M. et al. Electrical properties arrays of intersecting of nanowires obtained in the pores of track membranes //Materials Chemistry and Physics. – 2022. – Т. 287. – С. 126285
6. Sun L. et al. Tuning the properties of magnetic nanowires //IBM Journal of Research and Development. – 2005. – Т. 49. – №. 1. – С. 79-102.
7. Ohgai T. et al. Electrochemical synthesis and magnetoresistance properties of Ni, Co and Co/Cu nanowires in a nanoporous anodic oxide layer on metallic aluminium //Journal of Materials Chemistry. – 2003. – Т. 13. – №. 10. – С. 2530-2534.

УДК 537.622.4

Массивы нанопроволок из металлов группы железа – получение, структура, магнитные свойства и возможные применения**Загорский Д.Л.**

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории роста тонких пленок и неорганических наноструктур ИК им. А.В. Шубникова КККиФ НИЦ «Курчатовский институт»

Долуденко И.М.

к.т.н., научный сотрудник лаборатории роста тонких пленок и неорганических наноструктур ИК им. А.В. Шубникова КККиФ НИЦ «Курчатовский институт»

Чигарев С.Г.

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории источников электромагнитного излучения Фрязинского филиала ИРЭ РАН

Хайретдинова Д.Р.

аспирант кафедры технологии материалов электроники НИТУ МИСИС
инженер лаборатории роста тонких пленок и неорганических наноструктур ИК им. А.В. Шубникова КККиФ НИЦ «Курчатовский институт»

Панина Л.В.

д.ф.-м.н., профессор кафедры технологии материалов электроники НИТУ МИСИС

Фролов К.В.

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории материалов с сильными электронными корреляциями экстремального состояния вещества ИК им. А.В. Шубникова КККиФ НИЦ «Курчатовский институт»

Перунов И.В.

младший научный сотрудник лаборатории материалов с сильными электронными корреляциями ЭСВ ИК им. А.В. Шубникова КККиФ НИЦ «Курчатовский институт»

Панов Д.В.

младший научный сотрудник лаборатории роста тонких пленок и неорганических наноструктур ИК им. А.В. Шубникова КККиФ НИЦ «Курчатовский институт»

Фомин Л.А.

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории физики полупроводниковых наноструктур ИПТМ РАН

Бедин С.А.

к.ф.-м.н., инженер лаборатории роста тонких пленок и неорганических наноструктур ИК им. А.В. Шубникова КККиФ НИЦ «Курчатовский институт»

***Аннотация.** В работе обсуждаются особенности матричного синтеза нанопроволок (НП) из металлов группы железа с точки зрения возможности управления их свойствами. Метод позволяет получать как гомогенные, так и слоистые НП различного состава, включая сплавы из двух и трех металлов. Электронная микроскопия и рентгеновский анализ позволяют провести всесторонние структурные исследования и определить связь структуры и*

элементного состава с условиями роста. Исследования магнитные свойств методами вибрационной магнитометрии, Мёссбауэровской спектроскопии и зондовой микроскопии выявили зависимость характерных магнитных параметров от состава, геометрии НП, плотности пор, а также от соотношения толщин ферромагнитных и немагнитных слоёв (в слоевых НП). Для массивов слоевых НП с гетеропереходами между двумя магнитными материалами показана возможность генерации ТГц излучения при пропускании тока. Обсуждается возможность применения полученных массивов НП в качестве поверхностей для катализа, эмиттеров молекул. Рассмотрены способы применения полученных фрагментов НП (калиброванных наночастиц) для медицинских целей – вскрытия капсул с лекарствами и гипертермии.

Ключевые слова: нанопроволоки, матричный синтез, структура, катализ, эмиссия, адресная доставка лекарств, гипертермия, генерация ТГц-излучения, радиационная модификация

Arrays of nanowires of iron group metals - fabrication, structure, magnetic properties, and possible applications

Zagorskiy D.L.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher of laboratory of the growth of thin films and inorganic nanostructures of A.V. Shubnikov Institute of Crystallography, KCC&F, NRC «Kurchatov Institute»

Doludenko I.M.

Candidate of Technical Sciences, Researcher of laboratory of the growth of thin films and inorganic nanostructures of A.V. Shubnikov Inst. of Crystallography, KCC&F, NRC «Kurchatov Institute»

Chigarev S.G.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher of laboratory of electromagnetic radiation sources, KIREE (Fryazino branch) RAS

Khairtdinova D.R.

Postgraduate student of Department of Electronic Materials Technology, NUST MISIS engineer of laboratory of the growth of thin films and inorganic nanostructures of A.V. Shubnikov Institute of Crystallography, KCC&F, NRC «Kurchatov Institute»

Panina L.V.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Department of Electronic Materials Technology, NUST MISIS

Frolov K.V.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher of laboratory of materials with strong electronic correlations of the extreme state of matter of A.V. Shubnikov Institute of Crystallography, KCC&F, NRC «Kurchatov Institute»

Perunov I.V.

Junior Researcher of laboratory of materials with strong electronic correlations of the extreme state of matter of A.V. Shubnikov Institute of Crystallography, KCC&F, NRC «Kurchatov Institute»

Panov D.V.

Junior Researcher of laboratory of the growth of thin films and inorganic nanostructures of A.V. Shubnikov Institute of Crystallography, KCC&F, NRC «Kurchatov Institute»

Fomin L.A.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of laboratory of physics of

semiconductor nanostructures, IMTHPM RAS

Bedin S.A.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Engineer of laboratory of the growth of thin films and inorganic nanostructures of A.V. Shubnikov Institute of Crystallography, KCC&F, NRC «Kurchatov Institute»

Annotation. *The paper discusses the features of matrix synthesis of nanowires (NWs) from iron group metals in terms of controlling their properties. The method allows for the production of both homogeneous and layered NWs of various compositions, including alloys of two and three metals. Electron microscopy and X-ray analysis enable comprehensive structural studies and determine the relationship between structure and elemental composition with growth conditions. Magnetic property studies using vibrational magnetometry, Mössbauer spectroscopy, and atomic force microscopy revealed the dependence of characteristic magnetic parameters on the composition, NW geometry, pore density, as well as the ratio of thicknesses of ferromagnetic and non-magnetic layers (in layered NWs). For arrays of layered NWs with heterojunctions between two magnetic materials, the possibility of generating terahertz radiation during current passage is demonstrated. The potential application of the obtained NW arrays as catalytic surfaces and molecular emitters is discussed. The methods for using the obtained NW fragments (calibrated nanoparticles) for medical purposes – drug capsule opening and hyperthermia are considered.*

Keywords: *nanowires, matrix synthesis, structure, catalysis, emission, drug delivery, hyperthermia, THz-irradiation, radiation modification*

Введение

Нанопроволоки (1D- материалы) из ферромагнитных металлов являются объектами, интересными как с научной точки зрения (наноразмерный магнетизм), так и в плане практического применения (микромагниты, сенсоры, элементы микроэлектроники, биометки) [1]. В силу этого они в последние 20–25 лет являются объектом пристального изучения. Возможность регулирования геометрии и состава таких структур даёт возможность изменения их свойств в широких пределах. Вместе с тем, ряд потенциальных применений, заявленных уже давно, до сих пор не реализованы. Одной из причин этого является недостаточная изученность их параметров и возможностей управления свойствами. В лаборатории роста тонких пленок и неорганических структур института Кристаллографии проводятся исследования различных типов НП в традиционной последовательности «синтез-структура-свойства». Ниже представлен обзор результатов, полученных в за последние годы.

Результаты и обсуждение

РОСТ. В работе для получения НП всех типов используется матричный синтез, т. е. заполнение требуемым веществом пор в специально приготовленной матрице [2]. При этом в качестве матриц применялись полимерные трековые мембраны, а способом заполнения пор было гальваническое электроосаждение металла. Были получены три типа НП и рассмотрены особенности их синтеза.

Гомогенные (монометаллические НП из Fe, Ni или Co). Для этих образцов показана нелинейность процесса электроосаждения, вызванная особенностями процессов диффузии в узком поровом канале [3]. Также показано, что характер электроосаждения может изменяться в зависимости от плотности пор. Это связано с тем, что отдельные диффузионные слои над поровыми каналами («шапки» с малым размером) при высокой плотности пор начинают перекрываться, образуя сплошной диффузионный слой значительно большей толщины [4]. Для НП из сплавов (FeCo и FeNi) исследована кинетика процесса (в частности, выявлено непостоянство скорости роста) и отработаны режимы осаждения [5].

Для слоевых НП определены условия получения НП с одинаковыми по длине слоями, с плоскими интерфейсами, с чётким разделением элементов по слоям. Показано, что этого можно добиться за счёт перехода к режиму контроля заряда и замедляя процесс [6].

СТРУКТУРА НП и их состав определяется составом электролита и условиями роста. Для гомогенных НП из Со повышение рН кислого раствора способствует переходу от кубической к гексагональной модификации [7]. Для НП из сплавов показано, что состав НП часто значительно отличается от состава электролита. Так, превышение содержания Fe может объясняться его т.н. аномальным со-осаждением. Этот эффект значительно выше для НП из FeNi сплавов (по сравнению с FeCo НП). Также, состав в ряде случаев заметно изменяется по длине НП. Возможной причиной этого может быть различная диффузионная подвижность ионов металлов [8]. Для этих составов возможно увеличение количества железа в НП с Со (или Ni) даже до 15-25 %, что способствует переходу от ГЦК решётки к ОЦК решётке [7]. При этом в пределах одной фазы достаточно точно выполняется т.н. правило Вегарда – линейная зависимость параметра решётки от соотношения концентраций компонентов [7]. Получены первые данные для трёхкомпонентных НП: показано, что добавление даже небольших количеств меди меняет условия роста и соотношение между основными магнитными металлами. Предложен способ контроля состава [9]. Для слоевых НП (включающих слой Cu) показано наличие двух фаз: почти чистой меди и магнитного металла с заметной примесью меди [10]. Обсуждаются способы получения других видов НП типа «ядро-оболочка», т.н. «градиентные» и конической формы.

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА были измерены различными способами, в первую очередь – методом вибрационной магнитометрии. Показано, что свойства в значительной степени определяются параметрами получения НП и, соответственно, их структурой: небольшое увеличение потенциала осаждения в FeCo НП приводит к кратному увеличению коэрцитивной силы (КС). Для FeNi НП уменьшение диаметра от 100 нм до 30 нм приводит к увеличению КС на порядок [11]. Соотношение толщин магнитного и немагнитного слоёв (в слоевых НП Ni/Cu и Co/Cu) приводит к изменению ориентации оси лёгкого намагничивания [12]. Изменение расстояния между НП в массиве и расстояния между слоями влияют на магнитодипольные взаимодействия ферромагнитных сегментов. Соответственно, возможно изменение оси лёгкого намагничивания, КС и образование «промежуточных» состояний с антипараллельным направлением намагниченности. Предполагается, что критическим расстоянием между слоями в слоевой НП и между параллельными НП в массиве является величина, сравнимая с диаметром НП [13].

Применение метода магнитно-силовой микроскопии (АСМ/МСМ) позволило провести оценки магнитных свойств на локальном уровне. Были изменены намагниченности и изучен характер перемагничивания отдельных НП в массиве, и отдельных слоёв единичной НП [14].

Мёссбауэровская спектроскопия железосодержащих НП показала, что угол разориентации намагниченности отдельных НП уменьшается с уменьшением ростового напряжения [15]. Для НП из чистого железа показано, что электроосаждение только при минимальном напряжении приводит к получению НП с параметрами секстета, совпадающими с параметрами объёмного материала [16] Впервые для НП из двойных сплавов определены магнитные поля на ядрах Fe^{57} : в НП FeCo они выше, чем в НП из FeNi. В обоих случаях поле возрастает с ростом содержания Fe [17,18].

ПРИМЕНЕНИЕ. Изучены возможные использования массивов НП, связанные с их геометрическими или магнитными параметрами:

Эмиссия и катализ. Ряд применений связан со специфической геометрией получаемых образцов. Показано, что использование поверхности с массивом НП на ней значительно усиливает каталитический эффект в ряде реакций. Изучено каталитическое окисление СО на НП из Cu [19] и гидрирование этилена на НП из Со [20]: каталитический эффект составлял десятки процентов, причём проявлялся при достаточно низких температурах. Очевидно, эффект связан с увеличением эффективной площади поверхности. Другой обнаруженный эффект – усиление эмиссии как электронов, так и молекул в т.ч. и

биологических, с большой молекулярной массой, нанесённых на поверхность с НП из меди, связан связан с явлением резкого усиления электрического поля на острие НП [21].

Возможные **применения в биологии** связаны с использованием цилиндрических магнитных наночастиц (ЦМНЧ): последние могут быть получены путём «разрезания» слоёвых НП и выделения из них магнитных фрагментов. Подобные частицы могут быть использованы как для традиционной адресной доставки лекарств, так и для разрыва транспортной капсулы [22]. Другим применением может быть гипертермия и магнитомеханические воздействия на клеточные мембраны. Преимуществом таких ЦМНЧ является их вытянутая форма и калиброванные размеры, которые обеспечивают одинаковое воздействие внешнего поля (поворот или нагрев) для всех частиц.

Генерация ТГц. Показано, что при пропускании тока через массив НП (в котором каждая НП состоит по крайней мере из двух частей из различных магнитных материалов) вследствие спиновой инжекции и последующей релаксации возможна генерация Э/М излучения ТГц частоты [23]. Оптимизированы конструкции образцов –излучателей (предложены т.н. «полосковые структуры»), показана нетепловая природа излучения. Рассмотрены идеи об использовании обратного эффекта и создания детектора ТГц излучения [24].

Благодарности. Работа проведена в рамках Госзадания НИЦ «Курчатовский институт». Магнитные измерения методом вибрационной магнитометрии проведены на базе НИТУ МИСИС.

Список использованной литературы:

1. Елисеев А.А., Лукашин А.В. Функциональные наноматериалы – М.: Физматлит, 2010. – 456 с.
2. Martin C.R. Nanomaterials: A Membrane-Based Approach // Science. – 1994. – V. 266. – № 5193. – P. 1961-1966.
3. Коротков В.В., Кудрявцев В.Н., Кругликов С.С. и др. Электроосаждение металлов группы железа в поры трековых матриц для получения нанопроволок // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2015. – Т. 23. – №1. – С.24–33.
4. Кругликов С.С., Загорский Д.Л., Колесников В.А. и др. Анализ условий электролитического формирования ансамблей металлических нанопроволок в порах трековых мембран // Теоретические основы химической технологии. – 2021. – Т. 55. – № 5. – С. 632–641.
5. Долуденко И. М. Особенности заполнения пор трековых мембран при синтезе нанопроволок из сплава FeNi // Перспективные материалы. – 2021. – №8. – С. 74–80.
6. Zagorskiy D., Doludenko I., Zhigalina O. et al. Formation of nanowires of various types in the process of galvanic deposition of iron group metals into the pores of track membrane // Membranes. – 2022. – V. 12. – № 2. – P. 195.
7. Долуденко И.М., Загорский Д.Л., Муслимов А.Э. и др. Особенности синтеза, структура и магнитные свойства НП из сплавов металлов группы Fe // Поверхность. – 2022. – № 4. – С. 58–64.
8. Долуденко И.М., Загорский Д.Л., Фролов К.В. и др. Нанопроволоки из сплавов FeNi и FeCo: синтез, структура и мёссбауэровские измерения // ФТТ. – 2020. – Т. 62. – № 9. – С 1474-1481.
9. Хайретдинова Д.Р., Долуденко И.М., Панина Л.В. и др. Нанопроволоки из двух- и трехкомпонентных сплавов: корреляция структурных и магнитных свойств // ФТТ. – 2022. – Т 64. – № 9. – С.1144–1152.
10. Жигалина О.М., Долуденко И.М., Хмеленин Д.Н. и др. Структура нанопроволок Cu/Ni, полученных методом матричного синтеза // Кристаллография. – 2018. – Т. 63. – № 3. – С. 455–462.
11. Panina L.V., Zagorskiy D.L., Shymskaya A. et al. 1D Nanomaterials in Fe-Group Metals Obtained by Synthesis in the Pores of Polymer Templates: Correlation of Structure, Magnetic, and Transport Properties // Physica Status Solidi A. – 2021. – V. 219. – № 3. – P. 2100538.

12. Черкасов Д.А., Загорский Д.Л., Хайбуллин Р.И. и др. Структура и магнитные свойства слоевых нанопроволок из 3d-металлов, полученных методом матричного синтеза // ФТТ. – 2020. – Т. 62. – № 9. – С. 1531-1541.
13. Бизяев Д.А., Хайретдинова Д.Р., Загорский Д.Л. и др. Магнитные свойства слоевых нанопроволок Ni/Cu // Физика металлов и металловедение. – 2023. – Т.124. – С. 717-725.
14. Bizyaev D.A., Zagorskiy D.L., Khairtadinova D.R. Probe Microscopy in the Investigation of Ni/Cu and FeNi Magnetic Nanowires // Nanobiotech.Rep. – 2023. – V.18, Sup. 2. – P. S325–S334.
15. Загорский Д.Л., Долуденко И.М., Фролов К.В. и др. Особенности получения методом матричного синтеза, структура и магнитные свойства нанопроволок из железа// ФТТ. – 2023. – Т. 65. – № 6. – С. 973-978.
16. Фролов К.В., Загорский Д.Л., Любутин И.С. и др. Синтез, фазовый состав и магнитные свойства нанопроволок железа, полученных в порах полимерных трековых мембран // Письма в ЖЭТФ. – 2014. – Т. 99. – № 10. – С. 656-663.
17. Фролов К.В., Загорский Д.Л., Любутин И.С. и др. Магнитные и структурные свойства нанопроволок Fe-Co, полученных методом матричного синтеза в порах трековых мембран // Письма в ЖЭТФ. – 2017. – Т. 105. – № 5. – С. 297-304.
18. Frolov K.V., Chuev M.A., Lyubutin I.S. et al Structural and magnetic properties of Ni-Fe nanowires in the pores of polymer track membranes // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2019. – V. 489. – P. 165415.
19. Панов Д.В., Бычков В.Ю., Тюленин Ю.П. и др. Нанопроволоки из меди как катализатор для окисления СО // Поверхность: Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2021. – № 12. – С. 12–17.
20. Panov D.V., Bichkov V.Yu., Tulenin Yu.P. et al. Cobalt Nanowires as a Catalyst for Ethylene Hydrogenation // Journal of Surface Investigation.– 2023. – V.17. – № 6. – P.1496-1501.
21. Oleinikov V.A., Zagorski D.L., Bedin S.A. et al The study of the desorption/ionization from the replicas of etched ion tracks // Radiation Measurements. – 2008. – V. 43. – P. S635-S638.
22. Долуденко И.М., Михеев А.В., Бурмистров И.А. и др. Получение цилиндрических магнитных наночастиц для функционализации полиэлектролитных микрокапсул // ЖТФ. – 2020. – Т. 90. – № 9. – С.1435-1441.
23. Гуляев Ю.В., Чигарев С.Г., Панас А.И. и др. Генерация ТГц излучения в магнитных переходах на основе нанопроволок // Письма в ЖТФ. – 2019. – Т. 45. – № 6. – С. 27-29.
24. Chigarev S.G., Fomin L.A., Rai D.P et al. Thermal and Dynamic Radiation in the THz Range Under Spin Current Injection in Magnetic Junctions // SPIN. – 2023. – V. 13. – P. 2350010.

УДК 538.955, 538.958

Магнитомеханические и фототермические исследования микротрубок из никеля с золотым покрытием для противораковых терапий

Аникин А.А.

Ph.D., научный сотрудник БФУ им. И.Канта

Моторжина А.В.

младший научный сотрудник БФУ им. И. Канта

Шумская Е.Е.

научный сотрудник Института химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси

Панина Л.В.

д.ф.-м.н., профессор кафедры технологии материалов электроники, МИСИС

Родионова В.В.

к.ф.-м. н., доцент БФУ им. И. Канта

***Аннотация.** Микро- и наноразмерные частицы имеют потенциал применения в биомедицинских приложениях, связанных с лечением рака. Комбинация различных терапий с использованием одного типа частиц является выгодна с точки зрения биосовместимости и эффективности лечения. В данной работе были исследованы оптические, магнитные и фототермические свойства никелевых микротрубок с золотым покрытием, изготовленных методом шаблонного синтеза. Покрытие микротрубок золотым слоем приводит к уменьшению их цитотоксичности. Кроме того, было обнаружено значительное увеличение фототермической эффективности микротрубок, которая проявляется в увеличении температуры нагрева раствора с микротрубками ИК лазером не только за счет их увеличенного оптического поглощения, но и за счет увеличенной эффективности фототермической конверсии.*

***Ключевые слова:** магнитные нанотрубки, темплатный синтез, фототермия, оптические свойства, гипертермия, биомедицина, магнитомеханическая терапия*

Magneto-mechanical and photothermal studies of gold-coated nickel microtubes for anticancer therapies**Anikin A.A.**

Ph.D., researcher at IKBFU

Motorzhina A.V.

junior researcher at IKBFU

Shumskaya E.E.

researcher at the Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus

Panina L.V.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Electronics Materials Technology, MISIS

Rodionova V.V.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, IKBFU

***Annotation.** Micro- and nano-sized particles have potential in biomedical applications related to cancer treatment. Combining different therapies using the same particle type is advantageous in terms of biocompatibility and treatment efficacy. In this work, the optical, magnetic and photothermal properties of gold-coated nickel microtubes fabricated by template synthesis were investigated. Coating microtubes with a gold layer reduces their cytotoxicity. In addition, a significant increase in the photothermal efficiency of microtubes was discovered, which manifests itself in an increase in the heating temperature of the solution with microtubes with an IR laser, not only due to their increased optical absorption, but also due to the increased efficiency of photothermal conversion.*

Keywords: *magnetic nanotubes, template synthesis, phototherapy, optical properties, hyperthermia, biomedicine, magnetomechanical therapy*

Исследование наночастиц, предназначенных для магнитомеханических и фототермических терапий имеет важное значение с точки зрения возможных клинических применений. В магнитомеханической терапии магнитные микро- или наночастицы испытывают воздействие низкочастотных магнитных полей [1]. В результате достигается удаленное механическое вмешательство в жизнедеятельность раковых клеток с дальнейшей их смертью [2]. При фототермической терапии частицы, имеющие значительное оптическое поглощение в ИК области, нагреваются за счет лазера и термически воздействуют на раковые клетки. Совмещение двух методик в рамках одной терапии позволяет уменьшить их концентрацию с сохранением терапевтического эффекта, что положительно сказывается на токсических свойствах частиц.

Данная работа представляет результаты оптических, магнитных и фототермических исследований никелевых микроотрубок, покрытых золотом. Микроотрубки были изготовлены с помощью шаблонного синтеза в полимерной матрице. Показано, что микроотрубки могут быть приведены в движение с помощью внешнего магнитного низкочастотного поля. Обнаружено, что оптическое поглощение микроотрубок с золотым покрытием примерно в два раза выше, чем у непокрытых микроотрубок. Также обнаружено, что в полтора раза увеличен коэффициент фототермической конверсии света в тепло, что дает дополнительный вклад в фототермический нагрев покрытых золотом микроотрубок. Проверка цитотоксичности микроотрубок показывает уменьшение их токсического воздействия на клетки в отсутствие внешнего физического воздействия.

Полученные микроотрубки потенциально применимы в комбинированной магнитомеханической и фототермической терапии, при которой на частицы подвергаются воздействию как со стороны внешнего низкочастотного магнитного поля, так и со стороны ИК излучения.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда № 21-72-20158.

Список использованной литературы:

1. Shen, Y.; Wu, C.; Uyeda, T.Q.P.; Plaza, G.R.; Liu, B.; Han, Y.; Lesniak, M.S.; Cheng, Y. Elongated Nanoparticle Aggregates in Cancer Cells for Mechanical Destruction with Low Frequency Rotating Magnetic Field // *Theranostics* – 2017. – 7. – 1735–1748, doi:10.7150/thno.18352
2. Zhao, L.; Zhang, X.; Wang, X.; Guan, X.; Zhang, W.; Ma, J. Recent Advances in Selective Photothermal Therapy of Tumor // *J Nanobiotechnology* – 2021. – 19 (1) – 335. <https://doi.org/10.1186/s12951-021-01080-3>