

Поверхность раздела двух сред сама по себе является устройством

Герберт Крёмер



Мауриц Эшер «Три мира» (1956)

**Секция 8.
Магнитные пленки,
многослойные и ван-дер-ваальсовы
структуры**

УДК 537.65

Ультратонкие пленки ортоферрита иттрия $Y^{57}FeO_3$ – результаты рентгеновского и мессбауэровского исследования**Андреева М.А.**

д. ф.-м. н., гл. н. с. КФТТ физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Изюров В.В.

аспирант Института физики металлов УрО РАН

Носов А.П.

д. ф.-м. н., гл. н. с. Института физики металлов УрО РАН

Баулин Р.А.

к. ф.-м. н., с. н. с. КФТТ физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Грибов И.В.

к. ф.-м. н., с. н. с. Института физики металлов УрО РАН

Субботин И.А.

к. ф.-м. н., нач. отдела НИЦ "Курчатовский Институт"

Кондратьев О.А.

м. н. с. НИЦ "Курчатовский Институт"

Пашаев Э.М.

к. ф.-м. н., гл. н. с. НИЦ "Курчатовский Институт"

Аннотация. Ультратонкие монокристаллические пленки $Y^{57}FeO_3$ с градиентом толщины от 2 нм до 40 нм изготовлены методом магнетронного распыления в ИФМ РАН. Исследования кристаллической структуры как в обычной геометрии дифракции, так и в скользящей геометрии подтвердили наличие сильно текстурированной $R\bar{3}m$ структуры $YFeO_3$, а также позволили выявить наличие включений фазы $Y_3Fe_5O_{12}$. Мессбауэровские спектры отражения измерялись в скользящей геометрии на синхротроне ESRF. По температурным зависимостям магнитного сверхтонкого поля $B_{hf}(T)$ в интервале от 3.5 К до 700 К прослежено уменьшение температуры Нееля с уменьшением толщины пленок почти на 100 К. Анализ изменения соотношения интенсивностей линий в мессбауэровском магнитном секстете позволил проследить за последовательным разворотом направления антиферромагнитных осей в $Y^{57}FeO_3$ к плоскости поверхности в зависимости от температуры и толщины.

Ключевые слова: магнитные пленки, ортоферрит иттрия, размерные эффекты, мессбауэровская рефлектометрия

Ultrathin $Y^{57}FeO_3$ Films - results of X-Ray and Mössbauer Studies**Andreeva M.A.,**

Doctor of Science in Physics and Mathematics, Chief research scientist in the Solid State Chair, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

Izyurov V.V.,

Postgraduate in M.N. Mikheev Institute of Metal Physics RAS

Nosov A.P.,

Doctor of Science in Physics and Mathematics, Chief research scientist in M.N. Mikheev
Institute of Metal Physics RAS

Baulin R.A.,

Ph.D. in Physics and Mathematics, Senior Researcher in the Solid State Chair, Faculty of
Physics, Lomonosov Moscow State University

Gribov I.V.,

Ph.D. in Physics and Mathematics, Senior Researcher in M.N. Mikheev Institute of Metal
Physics RAS

Subbotin I.A.,

Ph.D. in Physics and Mathematics, Chief of Department in National Research Center
“Kurchatov Institute”

Kondratev O.A.,

Junior Researcher in National Research Center “Kurchatov Institute”

Pashaev E.M.,

Ph.D. in Physics and Mathematics, Chief research scientist in National Research Center
“Kurchatov Institute”

Annotation. Ultrathin single-crystal $Y^{57}FeO_3$ films with a thickness gradient from 2 nm to 40 nm were prepared by magnetron sputtering at the Institute of Metal Physics RAS. The crystal structure was studied both in conventional and in grazing geometries of diffraction, and confirmed the existence of a highly textured $Pnma$ structure of $YFeO_3$ as well as the presence of $Y_3Fe_5O_{12}$ inclusions. Mössbauer reflectivity spectra were measured in grazing geometry at the ESRF synchrotron. Based on the temperature dependences of the magnetic hyperfine field $B_{hf}(T)$ in the range from 3.5 K to 700 K, a decrease in the Néel temperature with a decrease in film thickness by almost 100 K was traced. Analysis of the change in the ratio of line intensities in the Mössbauer magnetic sextets made it possible to observe the sequential reversal of the direction of the antiferromagnetic axes in $Y^{57}FeO_3$ to surface plane as a function of temperature and thickness.

Keywords: magnetic multilayers, yttrium orthoferrite, size effects, Mössbauer reflectometry

Ортоферрит иттрия $YFeO_3$ является одним из активно используемых в микроэлектронике антиферромагнитных (АФМ) материалов [1]. Большинство исследований выполнено для объемных образцов $YFeO_3$, в то время как современные технологии используют тонкие пленки, но в этих объектах закономерности изменений структурных и магнитных свойств с толщиной нетривиальны и нуждаются в экспериментальном подтверждении. В настоящей работе исследованы структурные и магнитные характеристики ультратонких монокристаллических пленок ортоферрита $Y^{57}FeO_3$ на синхротроне ESRF и в Курчатовском центре.

Ультратонкие пленки $Y^{57}FeO_3$ получены магнетронным напылением на подложке $r-Al_2O_3$ в ИФМ РАН. Клиновидные пленки имели градиентно-варьируемые толщины в пределах 2.5-4.1 нм, 6-11 нм, 8-23 нм, 23-40 нм. Рентгеновские дифракционные измерения, проведенные в Курчатовском институте для пленок аналогичных толщин [2], подтвердили

наличие $R\bar{3}m$ структуры, характерной для ортоферрита YFeO_3 . Пленки оказались если не полностью монокристаллическими, то сильно текстурированными с наибольшей осью c (0.76032 nm) перпендикулярной поверхности пленки для большинства образцов (но не для всех). Были также обнаружены дополнительные рефлексы, соответствующие включениям фазы $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и рефлексы, характеризующие гексагональную модификацию YFeO_3 .

Мессбауэровские спектры измерялись методом рефлектометрии с использованием синхротронного мессбауэровского источника на ESRF (станция ID18) при температурах от 3.5 К до 273 К и от 273 К до 700 К. На спектрах отражения кроме секстета, характеризующего YFeO_3 , обнаружен дополнительный секстет, соответствующий меньшему магнитному сверхтонкому полю (Рис. 1). Изменения спектров с температурой и под действием внешнего поля позволили выяснить, что по меньшей мере три секстета в различной пропорции характеризуют спектры в зависимости от толщины YFeO_3 пленки [2]. Мессбауэровские параметры для двух дополнительных секстетов соответствуют ферримагнетику $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG), имеющему два положения для атомов Fe (орто- и тетраэдрическое) в элементарной ячейке с заселенностью 2:3.

Выполнен анализ температурных зависимостей мессбауэровских спектров отражения в интервале от 3.6 К до 773 К [4], которые показали уменьшение температуры Нееля T_N при уменьшении толщины пленок. Для толщин пленок ~ 28 нм, ~ 6.5 нм и ~ 4 нм получены значения $T_N = 593 \pm 2$ К, 580 ± 2 К и 567 ± 2 К, соответственно (Для объемного образца $T_N \cong 650$ К). Определено значение критического параметра $\beta \cong (0.28 \div 0.3) \pm 0.02$, оказавшееся несколько меньше значения для объемного ортоферрита (0.34). Трансформация спектров, в частности появление квадрупольного дублета в центре магнитного секстета, начиная уже с 66 К для самой тонкой пленки, и увеличение его площади при дальнейшем повышении температуры, свидетельствует о последовательном переходе из АФМ в суперпарамагнитное состояние для отдельных кластеров или областей примесных фаз в пленках [3].

Обнаружено также последовательное изменение ориентации АФМ осей в $\text{Y}^{57}\text{FeO}_3$ с температурой, так что угол, задающий направление сверхтонкого поля B_{hf} относительно плоскости поверхности изменяется в среднем от $\sim 63^\circ$ до $\sim 45^\circ$, то есть с ростом температуры антиферромагнитная ось разворачивается к поверхности.

Эффект селективности по глубине спектров отражения проявился при сравнении спектров, измеренных при разных углах скольжения. В спектре, измеренном при большем угле скольжения 2.97 мрад заметно увеличивается доля дублетов в центральной части спектра. Обработка спектров показала, что парамагнитная структура присутствует в основном в области интерфейса с подложкой в слое с толщиной порядка ~ 1 нм на глубине ~ 3 нм.

Список использованной литературы:

1. Xiong D., Jiang Y., Shi K. et al., Antiferromagnetic spintronics: An overview and outlook // Fundamental Research. – 2022. - Vol. 2(4), pp. 522-534.
2. М.А. Andreeva, R.A. Baulin, A.P. Nosov, I.V. Gribov, V.V. Izyurov, O.A. Kondratev, I.A. Subbotin, E.M. Pashaev, Mössbauer Synchrotron and X-ray Studies of Ultrathin YFeO_3 Films // Magnetism (MDPI). - 2022. - Vol.2. pp.328–339.
3. В.В. Изюров, А.П. Носов, И.В. Грибов, М.А. Андреева, Магнитные фазовые переходы в ультратонких пленках YFeO_3 по данным синхротронной мессбауэровской рефлектометрии // Физика металлов и металловедение. - 2023. - т. 124(7). с. 566–576.

УДК 314.748

Морфология границ и обменное смещение в системе Al_2O_3 – кобальт**Кобяков А.В.**

к.ф.-м.н., доцент, Институт инженерной физики и радиоэлектроники СФУ; научный сотрудник, Институт физики им. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН

Патрин Г.С.

д.ф.-м.н. профессор, Институт инженерной физики и радиоэлектроники СФУ; заведующий лабораторией, Институт физики им. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН

Юшков В.И.

к.т.н., доцент, Институт инженерной физики и радиоэлектроники СФУ; научный сотрудник Институт физики им. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН

Косырев Н.Н.

к.ф.-м.н., научный сотрудник, Институт физики им. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН

***Аннотация.** Работа посвящена исследованию взаимосвязи технологических особенностей магнетронного напыления, морфологии интерфейса и поверхности с магнитными свойствами в системе Al_2O_3 – Co с окисленной поверхностью Co. Обнаружена смена знака обменного смещения при изменении очередности осаждения слоев. Эффект возникает при температурах ниже 200 К и толщинах Co менее 10 нм.*

***Ключевые слова:** ферромагнитная пленка, оксиды, обменное смещение, интерфейс*

Morphology of interfaces and exchange bias in the Al_2O_3 – cobalt system**Kobyakov A. V.**

PhD., Associate Professor, Institute of Engineering Physics and Radio Electronics of SFU; Researcher, Kirensky Institute of Physics of FRC KSC SB RAS

Patrin G. S.

Dr.Sc., professor, Institute of Engineering Physics and Radio Electronics of SFU; head of a laboratory; Kirensky Institute of Physics of FRC KSC SB RAS

Yushkov V. I.

PhD., Associate Professor, Institute of Engineering Physics and Radio Electronics of SFU; Researcher, Kirensky Institute of Physics of FRC KSC SB RAS

Kosyrev N. N.

PhD., Researcher, Kirensky Institute of Physics of FRC KSC SB RAS

***Annotation.** The work is devoted to the study of the relationship between the technological features of magnetron sputtering, the morphology of the interface and surface with magnetic properties in the Al_2O_3 – Co system with an oxidized surface Co. A change in the sign of the exchange bias was detected*

when the order of layer deposition changed. The effect occurs at temperatures below 200 K and Co thicknesses less than 10 nm.

Keywords: *ferromagnetic film, oxides, exchange bias, interface*

В последние годы наночастицы ферромагнитных металлов нашли практическое применение в таких областях, как медицина, технологии накопления электроэнергии, электроника и спинтроника. Такие устройства, часто представляют собой многослойные структуры, как с магнитными, так и с немагнитными слоями, с размерами нанометрового масштаба. Но в таких масштабах появляются проблемы фундаментального характера в области физики твердого тела, связанные с влиянием структурных, размерных и интерфейсных эффектов, на магнитные характеристики тонкопленочных структур [1-3].

Одним из актуальных направлений исследований в этой области является связь эффекта обменного смещения (ЕВ) с интерфейсными особенностями в многослойных системах. Эффект ЕВ возникает при охлаждении системы ферромагнетик/антиферромагнетик (ФМ/АФМ) ниже температуры Нееля. В работе [4] предложено, что атомы расположенные вблизи границы раздела имеют меньшее количество связей с соседями, чем атомы, расположенные в объеме. А при уменьшении размеров магнитных частиц энергия обменного взаимодействия между частицами уменьшается и становится сравнимой с тепловой энергией. Все это приводит к нарушению магнитного порядка на границе раздела. Поведение магнитных моментов ферромагнитных частиц становится подобным поведению магнитных моментов парамагнетиков.

Эффект ЕВ для системы Al_2O_3 - Co исследовался в работе [5]. Слои Co (с толщинами от 2.7 до 40 нм) осажденного на подложку Al_2O_3 ВЧ распылением естественно окислялся. В результате возникало положительное обменное смещение ниже температуры блокировки и отрицательное обменное смещения вблизи температуры блокировки (T_B). Однако в литературе мало информации о морфологии поверхности, интерфейса и их взаимосвязи с обменным смещением в системе Al_2O_3 . В работе [6] в структуре $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$ методом СКВИД магнитометрии и с помощью эффекта Керра анализировалась зависимость магнитных свойств от температуры при различных скоростях осаждения, но с фиксированной толщиной кобальта. В данной работе мы исследуем морфологические особенности, анализируем поведение эффекта ЕВ в системе Al_2O_3 - Co при температуре ниже 300 К с переменной толщиной кобальта (4 - 100 нм). Толщина слоя Al_2O_3 во всех образцах равна 5 нм.

Все образцы получены магнетронным напылением при базовом давлении $P = 10^{-7}$ Торр в атмосфере аргона при давлении 3 мТорр. В качестве материала подложки использовалось покровное стекло, очищенное *in situ* методом ионно-плазменного травления. Осаждение проводилось на вращающуюся подложку при ее температуре $T \approx 373$ К. Морфология поверхности пленок исследовалась на атомно-силовом микроскопе VeecoMultiMode. (разрешение 1 nm). Магнитные измерения проводились с помощью метода магнитооптического эффекта Керра (NanoMOKE-2). Магнитное поле прикладывалось в плоскости образца.

Исследование химического состава образцов проводилось на электронном спектрометре SPECS, оснащенный полусферическим анализатором PNOIBOS 150 MCD 9, с использованием монохроматического источника Al K α (1486,6 эВ). Разложение линий сделано с использованием полуэмпирического подхода описанного в работе [7]. При анализе фотоэлектронных спектров, обнаружено, что поверхности кобальтовых слоев состоят из основных компонент, характерных для кобальта с долей равной 49,7% ($2p_{3/2}$), и компонент оксидов с общей долей равной 41,6% (CoO и Co_3O_4 - антиферромагнетики с температурами

Нееля $T_N \sim 290$ К. и 40 К.). Поэтому магнитный слой можно рассматривать как систему: ФМ - АФМ.

На рис. 1 представлены зависимости средней шероховатости (Rms) поверхности образца $\text{glass}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$ в зависимости от толщины слоя кобальта нанесенного на оксид алюминия, осажденного на стекло (линия из точек). Для сравнения, приведена та же зависимость, но для образца glass/Co (сплошная линия).

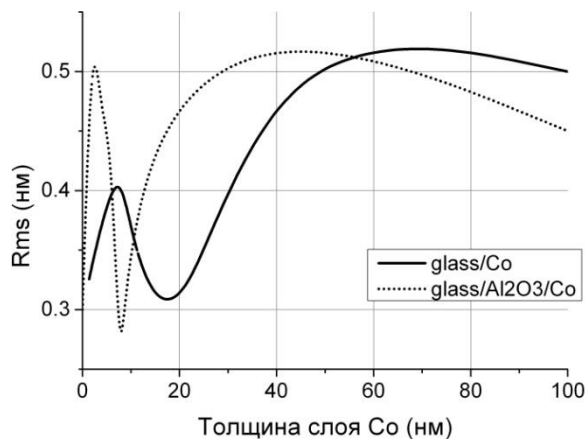
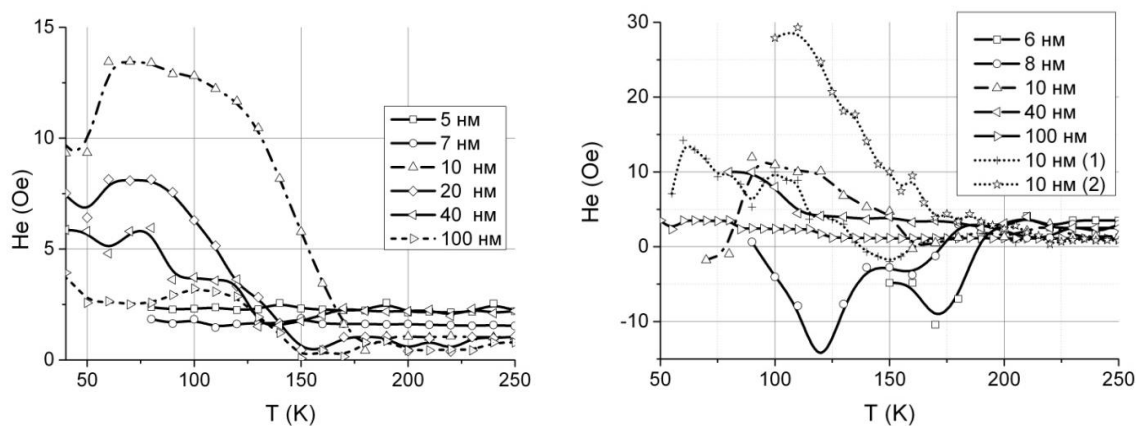


Рис. 1. Зависимости средней шероховатости (Rms) от толщины слоя кобальта.

На рис. 2 показаны зависимости обменных смещений от температуры для образцов glass/Co (а) и $\text{glass}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$ (б). При толщине кобальта менее 8 нм H_E мало (рис. 2а). Но при осаждении кобальта на Al_2O_3 , при тех толщинах, H_E имеет отрицательный знак (рис. 2б). При возрастании толщины кобальта от 10 до 20 нм H_E в обоих случаях имеет положительный знак и достигает максимума при температурах ~ 100 К. При дальнейшем увеличении толщины слоя кобальта в обоих случаях H_E уменьшается.



а)

б)

Рис. 2. Температурная зависимости обменного смещения для образцов glass/Co (а), $\text{glass}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$ (б). (1) – образец $\text{glass}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$ (10 нм.) с уменьшенной скоростью осаждения кобальта (1.2 нм./мин.). (2) – образец $\text{glass}/\text{Co}(10 \text{ нм.})/\text{Al}_2\text{O}_3$

Температура, при которой происходит смена знака H_E уменьшается от 190 К до 160 К при увеличении толщины кобальта от 6 до 10 нм в образцах glass/Al₂O₃/Co. При осаждении кобальта (10 нм) на Al₂O₃ с уменьшенной скоростью (от 7,2 до 1.2 нм/мин) H_E имеет отрицательный знак только от 140 до 160 К. А при изменении очередности осаждения glass/Co(10 нм)/Al₂O₃ H_E имеет всегда положительный знак (рис. 2а). В данном случае H_E имеет максимальные значения при температуре ~100 К., а зависимость $H_E(T)$ подобна как для образца glass/Co(10 нм). Для этой толщины Co зависимость R_{ms} (толщины слоя Co) имеет максимум 0,4 нм.

При анализе зависимостей $H_E(T)$ можно заметить несколько особенностей.

Для образцов с обратной очередностью слоев glass/Co/Al₂O₃ и при более медленном осаждении слоев glass/Al₂O₃/Co, зависимость $H_E(T)$ аналогична, как у системы Co/CoO (ФМ/АФМ) с температурой блокировки близкой к $T_B \sim 176$ К.

Для образцов glass/Al₂O₃/Co с толщинами Co менее 10 нм осажденного с повышенной скоростью, зависимость $H_E(T)$ подобна зависимости, получаемых от магнитных частиц ядро-оболочка Co-CoO. Очевидно, что такая магнитная структура образуется на интерфейсе Al₂O₃/Co. Увеличенная шероховатость при малой толщине Co (4-5 нм) и резкое ее уменьшение до 0,27 нм (10 нм кобальта), показывает резкое уменьшение относительной доли частиц Co-CoO.

Морфологические неоднородности на поверхности кобальта и в интерфейсе Al₂O₃/Co приводят к изменению T_B при толщинах Co менее 20 нм. Увеличение доли АФМ составляющей (доли оксидов) относительно доли ФМ составляющей приводит к увеличению T_B ближе к T_N (рис. 2а).

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2023-0008).

Список использованных источников:

1. Blauert J. and Kiourti A. Theoretical Modeling and Design Guidelines for a New Class of Wearable Bio-Matched Antennas // IEEE TAP. – 2019. – V. 68. – № 3. – pp. 2040 – 2049.
2. Yetisen A. K., Martinez-Hurtado J. L., Ünal B., Khademhosseini A., Butt H. Wearables in Medicine // Adv. Mater. – 2018. – V. 30. – p. 1706910.
3. Tung R. T. The physics and chemistry of the Schottky barrier height // Appl. Phys. Rev. – 2014. – V. 1. – № 1.
4. Bean C. P., Livingston J. D. Superparamagnetism // J. Appl. Phys. – 1959. – V. 30. – № 4, – pp. 120S-129S.
5. Radu F., Etkorn M., Siebrecht R., Schmitte T. Interfacial domain formation during magnetization reversal in exchange-biased CoO/Co bilayers // Phys. Rev. – 2003. – V. 67. – P. 134409.
6. Kobayakov, A. V., Patrin, G. S., Yushkov, V. I., Shiyani, Magnetic and Resonance Properties of a Low-Dimensional Cobalt–Aluminum Oxide–Germanium Film Tunnel Junction Deposited by Magnetron Sputtering // Magnetochemistry. – 2022. – V. 8(10). – P. 130.
7. Biesinger M. C., Payne B. P., Grosvenor A.P., Lau L.W.M. Resolving surface chemical states in XPS analysis of first row transition metals, oxides and hydroxides: Cr, Mn, Fe, Co and Ni // Applied Surface Science. – 2011. – V. 257. – pp. 2717–2730.

УДК 537.61

Взаимодействие смещенных друг относительно друга магнитных профилированных пленок**Пятаков М.А.**

аспирант, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Акимов М.Л.

к.ф.-м.н., Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Поляков П.А.

д.ф.-м.н., профессор, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

***Аннотация.** В данной работе приводятся выражения для компонент поля профилированной магнитной пленки, имеющей поверхность в виде косинусоиды. Рассматривается взаимодействие двух подобных пленок, смещенных друг относительно друга на некоторую фазу, и приводятся рассчитанные значения вертикальной компоненты силы их взаимодействия, приходящейся на единицу площади плоской поверхности пленки, и энергии одной пленки в магнитном поле другой. Приведен анализ полученных соотношений.*

***Ключевые слова:** пленочные магнитные материалы, магнитное поле, магнитное взаимодействие, намагниченность*

Interaction of displaced relative to each other magnetic profiled films**Piatakov M.A.**

Postgraduate Student, M. V. Lomonosov Moscow State University

Akimov M.L.

Ph.D., M. V. Lomonosov Moscow State University

Polyakov P.A.

Dr.Sc., professor, M. V. Lomonosov Moscow State University

***Annotation.** This paper presents expressions for the field components of a profiled magnetic film having a cosine surface. The interaction of two similar films displaced relative to each other by some phase is also considered, and the calculated values of the vertical component of their interaction force per unit area of the flat surface of the film and the energy of one film in the magnetic field of the other are given. The analysis of the obtained relations is given.*

***Keywords:** magnetic films, magnetic field, magnetic interaction, magnetization*

Магнитные однослойные и многослойные пленочные структуры активно используются в микроэлектронике, спинтронике, в различных приборах и датчиках [1, 2]. Магнитное поле пленочного постоянного микромагнита может воздействовать на распределение векторов намагниченности в датчиках и биосенсорах. Этот способ воздействия более выгоден, если его

сравнивать с токовым источником магнитного поля, например, для уменьшения конструкции магнита и, как следствие, использующего его устройства. Однако магнитное поле пленки, однородно намагниченной перпендикулярно ее поверхности, очень слабое. Существует несколько методов преодоления данной проблемы. Один из них – это использование пленочных магнитных материалов с неоднородным распределением намагниченности в виде сборки Халбаха [3]. Другим технологичным способом является использование решеточных пленочных магнитов, которые способны создавать достаточно сильные неоднородные магнитные поля при определенных параметрах решеток [4, 5].

В данной работе рассматривается еще один способ создания однородно намагниченным пленочным магнитом достаточно большого магнитного поля посредством создания на его поверхности пространственного рельефа. Рассчитываются силы и энергии для взаимодействующих профилей, сдвинутых друг относительно друга на величину α .

Итак, исследуется однородно намагниченная микромагнитная пленка (пластина), расположенная в XOZ -плоскости. Она однородно намагничена с вектором намагниченности \vec{M} вдоль вертикальной оси, а ее рифленая поверхность, как показано на рис. 1, представлена в виде косинусоиды, что задается в виде функции

$$l \vec{n}_y(a + a \cos(kx')), \quad (1)$$

где \vec{n}_y – единичный вектор вдоль оси OY ; a – полувысота профиля в плоскости XOY ; l – вектор, проведенный перпендикулярно плоскости XOZ и имеющий длину, равную расстоянию между плоским и искривленным участками пленки в данной точке x' (рис. 1).

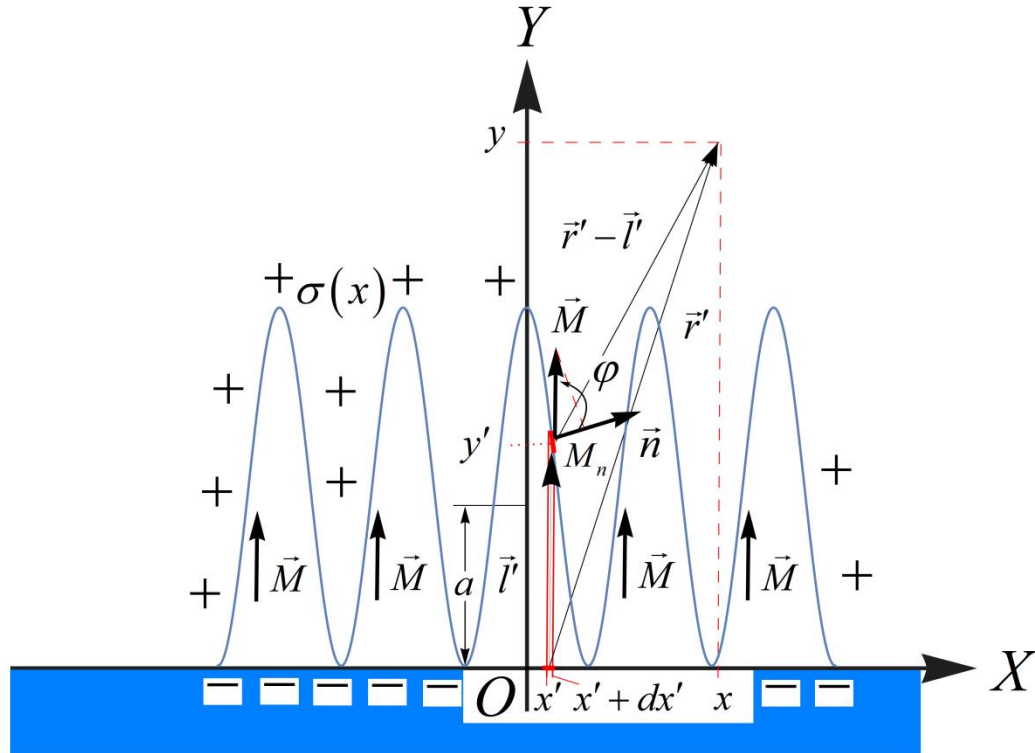


Рис. 1. Однородно намагниченная пленка с синусоидальным рельефом

Причем в рассматриваемой модели пленка бесконечно большая относительно ее толщины, в связи с чем граничными условиями мы пренебрегаем, а также задача решается в

модели фиктивных магнитных зарядов с поверхностной плотностью, которая представляет собой функцию координаты и выражается соотношениями [6]

$$\sigma(x) = M_n(x) = (\vec{M}(x) \cdot \vec{n}(x)) = M \cos \varphi(x), \tag{2}$$

где угол φ показан на рис. 1. В данной модели можно считать, что полем нижней части (объемного участка с плоскими границами) можно пренебречь по сравнению с полем искривленного участка, если провести аналогию с плоским конденсатором с пластинами бесконечно большого размера.

Разбивая всю поверхность на такие линейные бесконечно длинные по оси OZ магнитные заряды, можно записать точное значение дифференциала потенциала как функцию координат x и y точки наблюдения для пары элементарных линейных зарядов, имеющих абсциссу x' . Оно выглядит следующим образом:

$$d\varphi = 2\sigma dx' \left[\ln \left((x-x')^2 + y^2 \right)^{1/2} - \ln \left((x-x')^2 + (y-a(1+\cos(kx')))^2 \right)^{1/2} \right] + C_1, \tag{3}$$

где C_1 – некоторая константа.

В данной работе для упрощения расчетов при вычислении магнитного поля данного намагниченного образца рассматривалось классическое дипольное приближение, которое задавалось условием

$$|\vec{l}'| \ll |\vec{r}'|, \tag{4}$$

где \vec{l}' здесь имеет смысл плеча элементарного двумерного диполя, который расположен в точке с абсциссой x' . В этом приближении выражения для компонент поля, создаваемого нашей магнитной пленкой, выглядят как

$$\begin{cases} H_x(x, y) = \pi\sigma a k e^{-ky} \sin(kx) = \pi M_n a k e^{-ky} \sin(kx), \\ H_y(x, y) = \pi\sigma a k e^{-ky} \cos(kx) = \pi M_n a k e^{-ky} \cos(kx). \end{cases} \tag{5}$$

В дипольном приближении вертикальная компонента силы взаимодействия на единицу площади плоской поверхности верхней пленки (вдоль осей OX и OZ) двух смещенных рельефов (сила на верхнюю пленку со стороны нижней), поверхность нижнего из которых задается функцией (1), а верхнего – аналогичной зависимостью с аргументом $kx' + \alpha$ у косинуса, также была вычислена. Профили показаны на рис. 2.

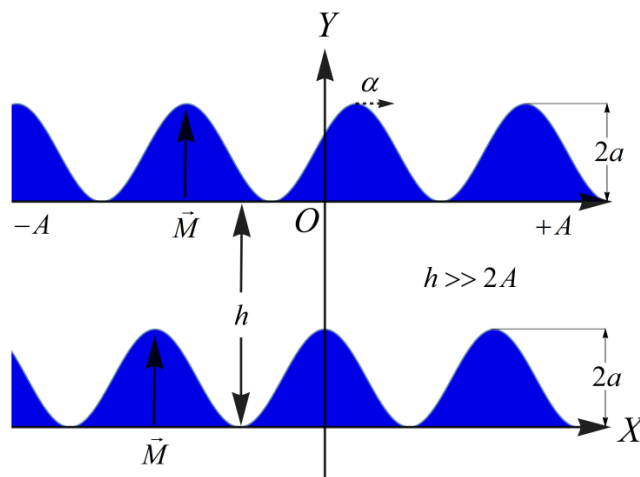


Рис. 2. Два взаимодействующих рельефа в дипольном приближении

Соотношение для этой компоненты выглядит следующим образом:

$$\frac{F_y}{2A} = -\frac{1}{2} \pi \sigma^2 (ak)^2 e^{-kh} \cos(\alpha), \quad (6)$$

где $2A$ – некоторый (достаточно большой) линейный размер пленки (рис. 2); $0 \leq \alpha < 2\pi$ – величина сдвига профилей; k – величина, отражающая пространственный период изменения нашего рельефа (или через длину волны $\lambda = \frac{2\pi}{k}$); h – расстояние между пленками.

Энергия же взаимодействия профилей, или энергия верхней пластины в магнитном поле нижней, имеет вид

$$W = -\pi (\sigma a)^2 k e^{-kh} A \cos(\alpha). \quad (7)$$

Анализ полученных соотношений для силы и энергии показывает следующее. Во-первых, максимальное значение (по модулю) вертикальной компоненты силы на единицу площади плоской поверхности пленки, то есть величина максимального притяжения пластин, равна с учетом (6)

$$\left(\frac{F_y}{2A} \right)_{\min} = -\frac{2\pi}{e^2} \left(\frac{a}{h} \right)^2 \sigma^2 \cos(\alpha). \quad (8)$$

Во-вторых, если $0 \leq \cos(\alpha) < \pi/2$ или $3\pi/2 < \cos(\alpha) < 2\pi$, то $\cos(\alpha) > 0$, мы имеем притяжение пленок с профилем, то есть $F_y < 0$ согласно (6). Если же $\pi/2 < \cos(\alpha) < 3\pi/2$, то $\cos(\alpha) < 0$, пленки с профилем отталкиваются друг от друга, так как $F_y > 0$ согласно (6). В-третьих, если предоставить верхнюю пластину самой себе, но будет находиться в магнитном поле нижней, то она займет положение с минимальной энергией, что происходит при $\alpha = 0$.

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

Список использованных источников:

1. Wang K., Zhang Y., Xiao G. Anomalous Hall Sensors with High Sensitivity and Stability Based on Interlayer Exchange-Coupled Magnetic Thin Films // Phys. Rev. Applied. – 2020. – Vol. 13. – No. 6.
2. Tsidaeva N.I. et al. Magneto-Optical Investigation of Thin-Film Magnetic Structures // Physica Scripta. – 2013. – Vol. 157.
3. Meribout M., Sonowan S. Optimal Halbach Magnet Array Design for Portable NMR Targeting Multiphase Flow Metering Applications // IEEE Trans. Magn. – 2019. – Vol. 55. – No. 1.
4. Пятаков М.А., Акимов М.Л., Поляков П.А. Взаимодействие неоднородного постоянного магнита, состоящего из решетки магнито жестких полосок, с массивной ферромагнитной средой // Изв. РАН. Сер. физ. – 2021. – Т. 85. – № 11. – С. 1568–1572.
5. Пятаков М.А., Поляков П.А., Русакова Н.Е. Изучение взаимодействия ферромагнетиков и расчет меры этого взаимодействия // Изв. РАН. Сер. физ. – 2020. – Т. 84. – № 5. – С. 719–722.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Физматлит, 2016. 656 с.

УДК 539.216.2:

Магнитные свойства и магнитосопротивление многослойных наноструктур $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_n$

Калинин Ю.Е.

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

Ситников А.В., Макагонов В.А., Фошин В.А.

Воронежский государственный технический университет, Воронеж

Волочаев М.Н.

Институт физики имени Л. В. Киренского СО РАН

Припеченков И.М., Перова Н.Н., Ганьшина Е.А.

Физический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Рыльков В.В.

д.ф.-м.н., в.н.с., Национальный научный центр «Курчатовский институт»

Грановский А.Б.

д.ф.-м.н., профессор, Физический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

***Аннотация.** Исследованы структурные, электрические, магнитные, магнитооптические свойства и магнитосопротивление гибридных мультислоев $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_n$ (где n -число бислоев в пленке) при вариации толщин слоев нанокompозита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$ и полупроводника ZnO . Обсуждаются возможные механизмы ферромагнитного или антиферромагнитного упорядочения, усиления магнитооптического отклика и магнитосопротивления в многослойных наноструктурах.*

***Ключевые слова:** гибридные многослойные структуры, наноструктуры, намагниченность, отрицательное магнитосопротивление.*

Magnetic properties and magnetoresistance of hybrid multilayer nanostructures $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_n$

Kalinin Y.E., Sitnikov A.V., Makagonov V.A., Foshin V.A.

Voronezh State Technical University

Volochaev M.N.

Kirensky Institute of Physics,

Pripechenkov I.M., Perova N.N., Ganshina E.A.

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

Rylkov V.V.

National Research Center Kurchatov Institute

Granovsky A.B.

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

***Annotation.** The structural, electrical, magnetic, magneto-optical properties and magnetoresistance of $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_n$ multilayer structures, where $n = 50$ is the number of $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$ nanocomposite and ZnO bilayers have been studied. Some*

examples of high-tech solutions to problems using the method of LCT. Possible mechanisms of ferromagnetic and antiferromagnetic ordering, enhancement of the magneto-optical response and magnetoresistance in multilayer nanostructures are discussed.

Keywords: hybrid multilayers, nanostructures, magnetization, negative magnetoresistance.

Получение образцов многослойных структур $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_n$ (где n – число бислоев в пленке) осуществлялось ионно–лучевым методом на напылительной установке, спроектированной на основе вакуумного напылительного поста УВН–2М на вращающуюся подложку по методике [1]. Для напыления многослойных структур композит – полупроводник использовались составная мишень из металлического сплава $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})$ с тринадцатью равномерно (или неравномерно) распределенными на его поверхности навесками SiO_2 , а также мишень из полупроводника оксида цинка. В процессе напыления между одной из мишеней (ZnO) и подложкой устанавливался V–образный экран, который позволял регулировать в широком диапазоне толщину полупроводниковой прослойки. 5 серий из 75 керамических подложек размером $60 \times 3 \times 0,6 \text{ мм}^3$ закреплялась на подложкодержателе параллельно плоскости мишени вдоль ее длинной стороны.

Исследования дифракции методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) подтвердили аморфную структуру составляющих слоев пленки (вставка к рисунок 1), а микрофотографий поперечного сечения системы $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_n$ – формирование композитных прослоек $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$ и многослойной структуры (рисунок 1), при этом толщина прослоек в исследуемом образце $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$ была равна 1.1 нм, а ZnO 1.2 нм.

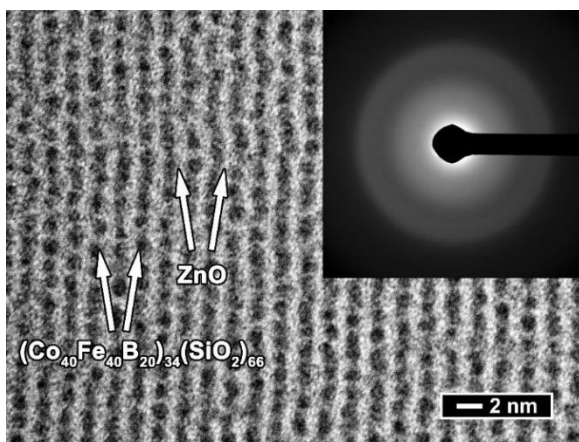


Рис. 1. Микроизображение ПЭМ поперечного сечения многослойной структуры $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_{100}$ (на вставке представлена микродифракция исследуемой пленки)

На рис. 2 а представлены концентрационные зависимости удельного электрического сопротивления нанокompозитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$, измеренные при комнатной температуре. При распылении составной мишени с неравномерным расположением навесок оксида кремния изменение концентрации металлической фазы X от 25 до 64 ат. % немонотонно уменьшает электрическое сопротивление исследуемой системы примерно на 5 порядков (кривая 1 на рис. 2 а). Полученная зависимость характерна для многих гетерогенных систем металл–диэлектрик, а значительное уменьшение удельного электрического сопротивления композитов при увеличении концентрации металлической фазы связывается с переходом от неметаллического типа проводимости к металлическому. На зависимости удельного электрического сопротивления ρ пленок многослойной структуры

$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_n$ от толщины прослойки ZnO $\rho(h)$ удельное электрическое сопротивление слабо изменяется с изменением толщины прослойки до $h \sim 1.2$ нм, а затем ρ уменьшается примерно на 3 порядка при $h=4$ нм (рис. 2б).

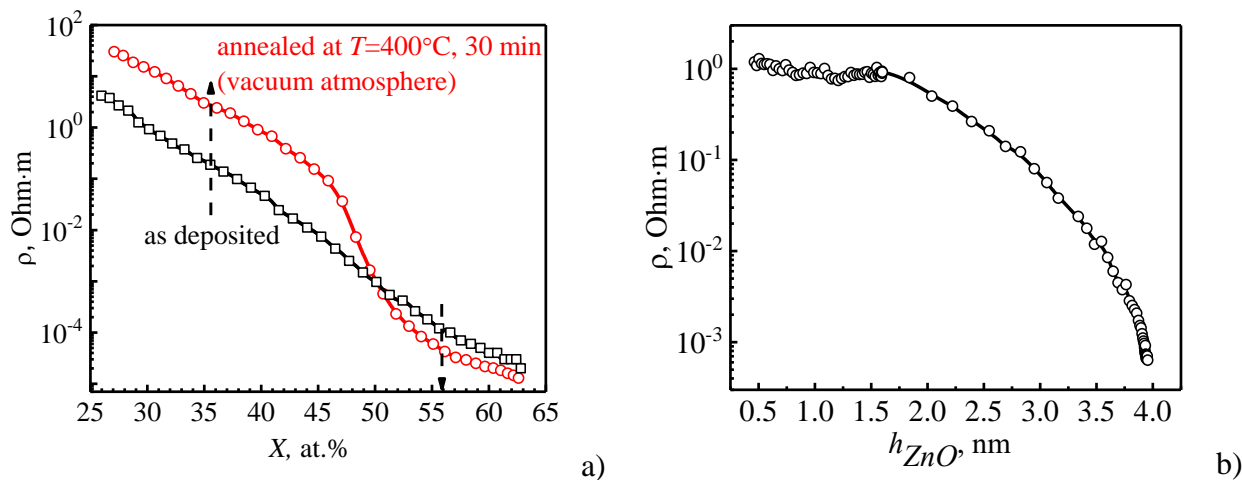


Рис. 2. Электрические свойства пленок плёнок композитов различных составов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ (а), и многослойной структуры $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_{50}$ различных серий от толщины полупроводниковой прослойки (б) при толщине слоя нанокompозита порядка 3 нм

На Рис. 3 показаны кривые намагниченности двух типов мультислоев: при толщине прослойки ZnO $h=0.46$ нм (Рис 3а) и $h=3.94$ нм (Рис. 3б), измеренные с помощью вибрационного магнитометра. Для всех образцов не выявили ферромагнитного упорядочения, так как петли гистерезиса не наблюдались как при комнатной, так и более низких температурах (до 100 К) при точности измерения коэрцитивной силы до 0.1 Э. Ферромагнетизм в исследуемых гибридных мультислоях мог возникнуть по трем причинам:

- ферромагнетизм в прослойках ZnO при проникновении в эти слои ионов Co в процессе напыления или после напыления за счет диффузии;
- за счет ферромагнитного обмена между соседними гранулами нанокompозитных слоев через тонкую прослойку ZnO;
- за счет ферромагнитного обмена в интерфейсном слое магнитных гранул через приповерхностный слой ZnO и повышении температуры блокировки наногранул $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ в интерфейсном слое за счет изменения константы магнитной анизотропии.

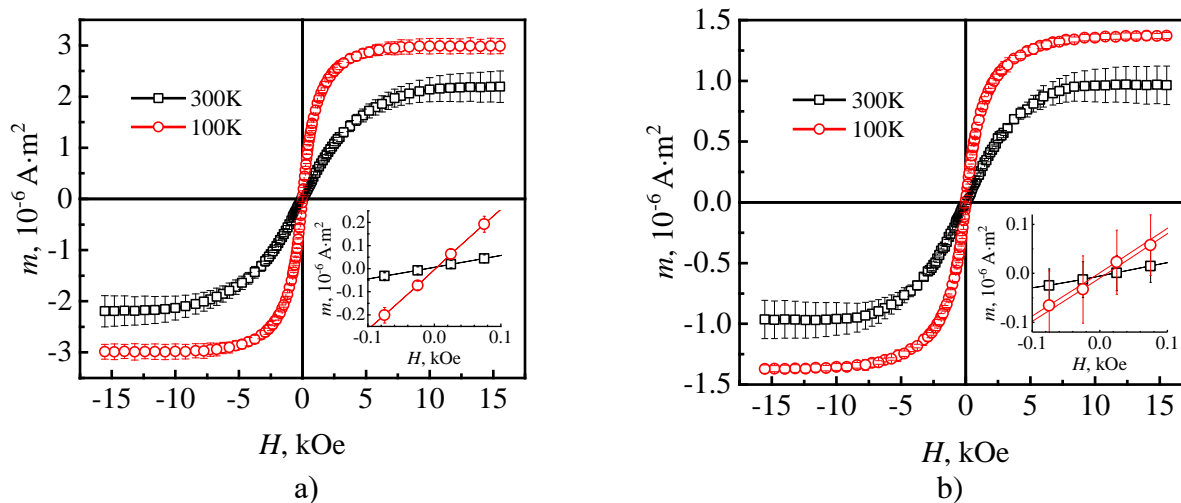


Рис. 3 Кривые намагниченности двух типов мультислоев: с тонкими (а) и толстыми (б) прослойками ZnO, измеренные с помощью вибрационного магнитометра

На рис. 4 даны примеры магнитооптических спектров для ряда составов. Так как магнитооптический отклик однослойных пленок ZnO отсутствует, то можно ожидать, что магнитооптические спектры гибридных мультислоев целиком определяются нанокompозитными слоями $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$. Однако это не так (Рис. 4). Отличительными чертами представленных данных являются, во-первых, наличие дополнительных особенностей (максимумов) по отношению к однослойным нанокompозитам, а во-вторых, большая величина сигнала для определенных составов. Влияние интерференционных эффектов мы исключаем, так как глубина формирования магнитооптического сигнала порядка 100 нм, что сравнимо с суммарными толщинами образцов, а слои достаточно тонкие. Мы связываем появление дополнительных особенностей в спектрах ТКЕ с плазменным усилением ТКЕ за счет прослоек ZnO.

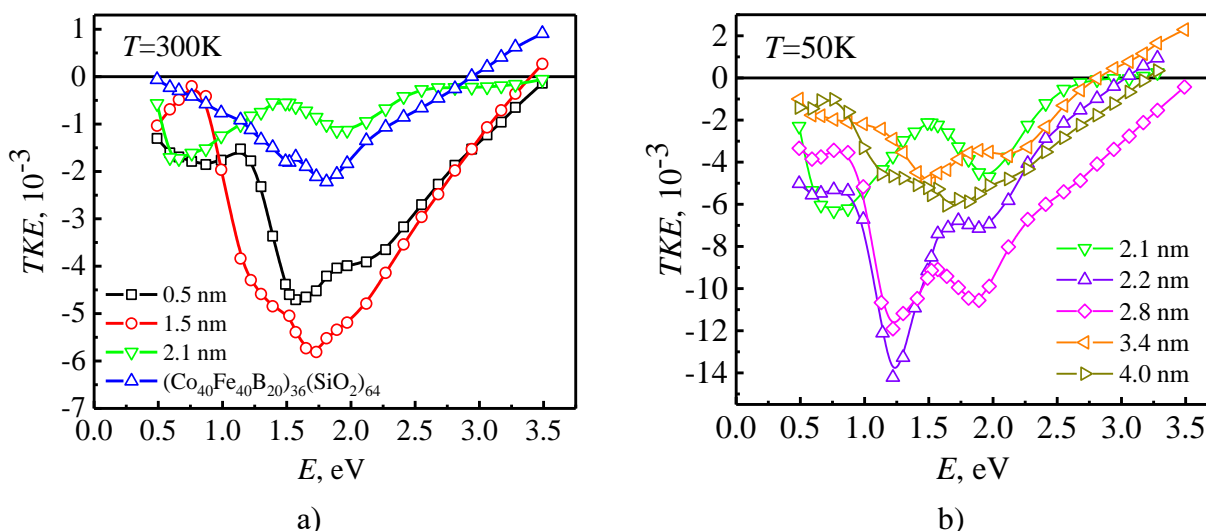


Рис.4. Спектральные зависимости ЭК для композита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$ и системы $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_5$, (с разными толщинами ZnO) при комнатной температуре (а) и при $T=50\text{ K}$ (b)

Изменение магнитосопротивления от толщины полупроводниковой прослойки показано на рис. 5 при комнатной температуре (1) и $T=77\text{ K}$ (2).

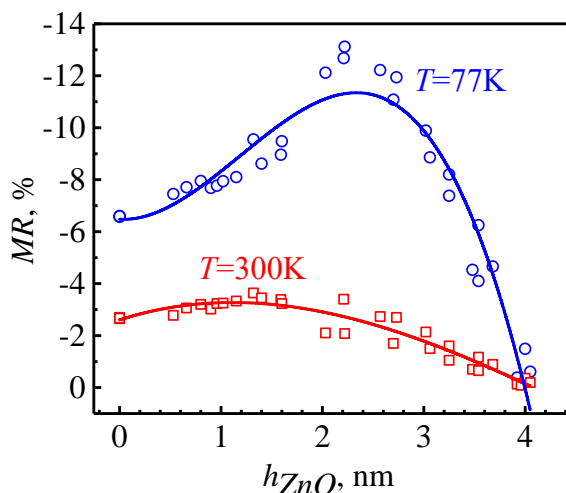


Рис. 5. Магнитосопротивление пленок многослойной структуры $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{ZnO}]\}_n$ от толщины полупроводниковой прослойки при комнатной температуре и $T=77\text{ K}$

Список использованных источников:

1. Гриднев С.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Стогней О.В. Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах, М.: Бинوم, Лаборатория знаний, 2012. – 352 с.

УДК 537.6

Применение пленок CoPd(Pt)/Au для элементов магнитной памяти**Здоровейщев А.В.**

к.ф.-м. н., с.н.с. НИФТИ ННГУ

Дорохин М.В.

д.ф.-м. н., в.н.с. НИФТИ ННГУ

Здоровейщев Д.А.

Инженер НИФТИ ННГУ

Темирязева М.П.

к.ф.-м. н., в.н.с. НИФТИ ННГУ

Темирязов А.Г.

к.ф.-м. н., в.н.с. НИФТИ ННГУ

***Аннотация.** В работе проведено исследование микромагнитной структуры и магнитных свойств пленок CoPd(Pt)/Au. Показана возможность создания ячейки памяти на основе данных пленок и способ увеличения информационной емкости ячейки. Обсуждается модель возникновения ступенчатой петли перемagnetизирования в многослойных пленках CoPd(Pt)/Au.*

***Ключевые слова:** магнитная память, микромагнитная структура, анизотропия намагниченности*

Application of Pd(Pt)/Au films for magnetic memory elements**Zdoroveyshchev A.V.**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Research institute for physics and technology of NNSU

Dorokhin M.V.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Leading Researcher, Research institute for physics and technology of NNSU

Zdoroveyshchev D.A.

Engineer, Research institute for physics and technology of NNSU

Temiryazeva M.P.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, IRE RAS

Temiryazev A.G.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, IRE RAS

***Annotation.** The paper investigates the micromagnetic structure and magnetic properties of Pd(Pt)/Au films. The possibility of creating a memory cell based on these films and the way of increasing the information capacity of the cell is shown. A model of the occurrence of a stepwise magnetization reversal loop in multilayer Pd(Pt)/Au films is discussed.*

***Keywords:** magnetic memory, micromagnetic structure, magnetization anisotropy*

Развитие технологии энергонезависимой памяти, повышение плотности записи требует поиска новых материалов и конструкций на их основе. Важнейшими для применения в устройствах памяти особенностями магнитных пленок являются: наличие перпендикулярной магнитной анизотропии, малая толщина, устойчивость к коррозии и мелкая доменная структура. Всеми этими качествами обладают пленки сплавов CoPd(Pt) [1].

Исследуемые многослойные пленки были сформированы методом электронно-лучевого попеременного испарения мишеней из высокочистых материалов в высоком вакууме. Для создания рисунка структуры и контактов в работе мы использовали сочетание фотолитографии с последующим ионно-плазменным травлением пленки CoPd(Pt) ионами Ar и импульсной силовой нанолитографии [2].

Для оценки минимально возможного размера элемента памяти в настоящей работе пленка CoPt (толщиной 8 нм) была нарезана на квадраты размером 50x50 нм. Обнаружено, что при таком размере ячейки пленка внутри неё становится однодоменной. Была показана возможность переключать намагниченность ячейки на противоположную воздействием магнитного поля зонда магнитно-силового микроскопа. Максимальная оценочная плотность записи составила 40 Гбит/см². Также в работе показана возможность изменять доменную структуру узкой (1 мкм) дорожки пленки CoPt с помощью токовых импульсов.

Для потенциального увеличения плотности записи информации в ячейку памяти нами была сформирована трехслойная пленка сплава CoPd (толщиной 5нм), разделенная немагнитными прослойками золота (толщиной 5нм). В работе проведено комплексное исследование характеристик такой пленки. Обнаружено, что магнитополевая зависимость намагниченности пленки имеет ступенчатый вид, а намагниченность имеет 6 устойчивых состояний. При исследовании доменной структуры выявлено, что отдельные ферромагнитные пленки имеют как независимую, так и связанную доменную структуру, которая, по-видимому, объясняет вид зависимости намагниченности. Обсуждается перспектива применения данных пленок в элементах магнитной памяти.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-79-20186.

Список использованной литературы:

1. А.В. Здоровейщев, М.В. Дорохин, О.В. Вихрова, и др. Свойства ферромагнитных слоев CoPt для применения в спиновых светоизлучающих диодах // ФТТ – 2016. – Т. 58. – С. 2186.
2. Temiryazev A.G. Pulse force nanolithography on hard surfaces using atomic force microscopy with a sharp single-crystal diamond tip // Diamond & Related Materials – 2014. – V. 48. – pp. 60.

УДК 537.622.5, 537.634

Об эффекте Эйнштейна–де Гааза в микроэлектромеханических квазидвумерных системах

Колюшенков М.А.

Студент кафедры физики колебаний физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Пятаков А.П.

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

***Аннотация.** Рассмотрен электроиндуцированный гиромагнитный эффект в антиферромагнитных 2D-пленках, аналогичный классическому эффекту Эйнштейна-де Гааза в ферромагнитных материалах. Показано, что для микронных чешуек антиферромагнитных материалов Ван-дер-Ваальса, имеющих недиагональный тензор магнитоэлектрического эффекта, величина электроиндуцированного эффекта Эйнштейна-де Гааза достаточна для обнаружения с помощью обычной оптической системы атомно-силового микроскопа.*

***Ключевые слова:** антиферромагнетизм, гиромагнитный эффект, ван-дер-Ваальсовы материалы*

On the Einstein–de Haase effect in microelectromechanical quasi-two-dimensional systems

Koliushenkov M.A.

Student, department of physics of oscillations, faculty of physics, M.V. Lomonosov Moscow State University

Pyatakov A.P.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of the Department of physics of oscillations, faculty of physics, M.V. Lomonosov Moscow State University

***Annotation.** — The electrically induced gyromagnetic effect in antiferromagnetic 2D films, analogous to the classical Einstein-de Haas effect in ferromagnetic materials, is considered. It is shown that for the micrometer-sized flakes of antiferromagnetic van der Waals materials having a non-diagonal tensor of the magnetoelectric effect, the magnitude of the electrically induced Einstein–de Haas effect is sufficient to be detected with the conventional optical lever approach of an atomic force microscope.*

***Keywords:** antiferromagnetism, gyromagnetic effect, van der Waals materials*

Открытие эффекта Эйнштейна-де Гааза, связавшего угловой момент спинов электронов с вращением макроскопического тела, стало важнейшим шагом в развитии квантовой механики. В наши дни этот эффект рассматривали на масштабе десятков и единиц

нанометров [1] (вплоть до предела одной молекулы [2]) и временном масштабе долей пикосекунд [3].

Открытие магнитов Ван-дер-Ваальса (vdW) с магнитным порядком в двух измерениях позволяет пересмотреть эффект Эйнштейна-де Гааза с точки зрения 2D-геометрии: благоприятствует ли предельно малая толщина образцов vdW и их магнитное состояние проявлению гиромангнитных явлений?

В данной работе рассмотрен электроиндуцированный гиромангнитный эффект в антиферромагнитных 2D-пленках, аналогичный классическому эффекту Эйнштейна-де Гааза в ферромагнитных материалах.

Антисимметричное расположение магнитных подрешеток в антиферромагнетиках, позволяет вызывать декомпенсацию магнитных моментов, связанных с ионами противоположных магнитных подрешеток, приложением внешнего электрического поля E за счет обратного магнитоэлектрического (МЭ) эффекта. Таким образом, образец приобретает ненулевую намагниченность, пропорциональную электрическому полю и, следовательно, дополнительный механический угловой момент.

Рассмотрим механическую колебательную систему (см. рис. 1), представляющую собой тонкую плёнку (толщиной в несколько атомарных бислоев) антиферромагнетика, зажатую между двумя графеновыми электродами. Приложение электрического поля к этим электродам вызывает появление индуцированной намагниченности в слое антиферромагнетика, что в свою очередь вызывает механические колебания системы в соответствии с эффектом Эйнштейна-де Гааза. Наибольший эффект будет наблюдаться при совпадении частоты внешнего воздействия с собственной частотой колебаний такой системы, которую можно найти по формуле:

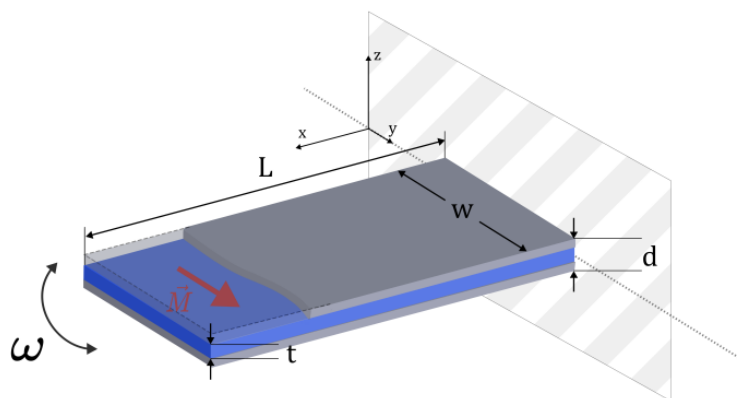


Рис. 1. Рассматриваемая система: консоль толщиной d , изготовленная из тонкой антиферромагнитной пленки (синяя) толщиной t , зажатая между двумя графеновыми электродами (серые). M — вектор декомпенсированной намагниченности, вызывающий вибрацию кантилевера

$$\omega_0 = \frac{(1.8751)^2 d}{L^2} \sqrt{\frac{Y}{12\rho}}$$

Где Y, ρ – модуль юнга и плотность материала соответственно, а d и L его толщина и длина (см. рис. 1). Амплитуда резонансных колебаний такой системы будет определяться индуцированной намагниченностью M , добротностью Q , гиромангнитным отношением γ , а также плотностью, собственной частотой и геометрическими размерами колебательной системы:

$$\phi_{max} \approx \frac{3Q}{\gamma} \frac{M}{\rho \omega_0 L^2} \left(\frac{t}{d}\right)$$

Намагниченность, индуцированная приложением электрического поля за счет магнитоэлектрического эффекта, имеет характерные значения не превышающие 10^3 А/м, что

примерно на 3 порядка меньше, чем намагниченность в ферромагнетиках (как в классическом опыте Эйнштейна-де Гааза), поэтому экспериментальная регистрация данного эффекта – достаточно сложная задача. Для оценки характерных значений амплитуды колебаний рассматриваемой системы рассмотрим потери, которые имеют место в данной системе:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{air}} + \frac{1}{Q_{clamp}} + \frac{1}{Q_{TED}} + \dots$$

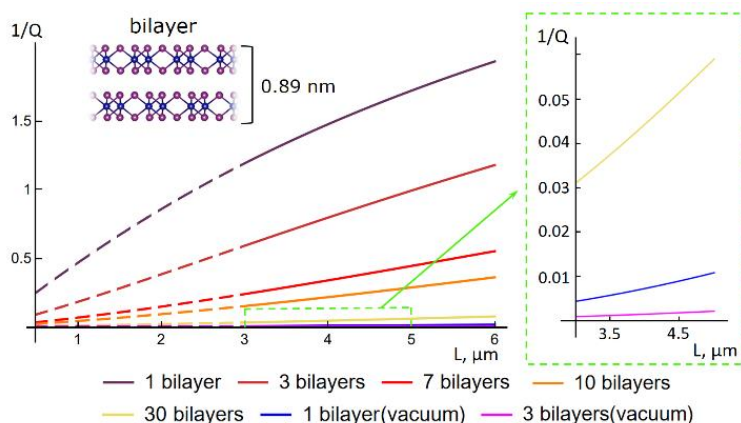


Рис. 2. Зависимость потерь в системе от длины образца при различной толщине (ширина чешуйки $w=3 \mu\text{m}$) в нормальных условиях и в вакууме

Основные источники потерь: вязкое трение в среде ($1/Q_{air}$), потери в месте закрепления ($1/Q_{clamp}$), термоупругое демпфирование ($1/Q_{TED}$) и др. Для рассматриваемой системы при нормальных условиях $Q_{TED} \gg Q_{clamp} \gg Q_{air}$. Наибольший вклад в потери вносит вязкое трение, так как рассматриваемый эффект достаточно слабый, то, для его наблюдения, потери необходимо значительно снизить, для этого возможно создать низкий вакуум, что позволит повысить добротность системы на 2-3 порядка; также целесообразно использовать

образцы, представляющие собой не один, а несколько атомарных бислоев антиферромагнетика, что поможет значительно усилить рассматриваемый эффект (см. рис. 2). Расчеты показывают, что для образца толщиной более 10 атомарных бислоев в вакууме возможно достичь амплитуды колебаний $\sim 10^{-4}$ рад, при этом эффект будет превышать уровень тепловых флуктуаций, а значит его можно экспериментально зарегистрировать.

Проведенные расчеты показывают, что геометрия vdW материалов, по-видимому, неблагоприятна для обнаружения эффекта, однако при использовании многослойных квази-vdW консольных структур в резонансных условиях, эффект имеет достаточную величину, чтобы быть экспериментально обнаруженным с помощью схемы оптического рычага, широко используемой в атомно-силовой микроскопии.

Список использованной литературы:

1. Wallis T. M., Moreland J., Kabos P. Einstein–de Haas effect in a NiFe film deposited on a microcantilever //Applied physics letters. – 2006. – Т. 89. – №. 12.
2. Ganzhorn M. et al. Quantum Einstein-de haas effect //Nature Communications. – 2016. – Т. 7. – №. 1. – С. 11443.
3. Dornes C. et al. The ultrafast Einstein–de Haas effect //Nature. – 2019. – Т. 565. – №. 7738. – С. 209-212.

УДК 537.634

Исследование процессов перемагничивания шестиугольного элемента в спин-туннельной гетероструктуре**Шевцов В.С.**

к.ф.-м.н., ассистент, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет

Поляков П.А.

д.ф.-м.н., профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», физический факультет, Москва, Россия

Касаткин С.И.

д.т.н., г.н.с., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук»

к.т.н., начальник отдела **Амеличев В.В.**,к.т.н., начальник лаборатории **Костюк Д.В.**, н.с. **Васильев Д.В.**

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-производственный комплекс «Технологический центр», Москва, Россия

***Аннотация.** В работе выполнено теоретическое исследование процессов перемагничивания спин-туннельных гетероструктур во внешнем магнитном поле в случае вытянутого шестиугольного элемента. Микромагнитное моделирование производилось путем решения уравнения Ландау – Лифшица – Гильберта с использованием программного пакета ООММФ. Было показано, что теоретический расчет перемагничивания может приводить к возникновению полосовой доменной структуры. При уменьшении размера дискретизации полосовые домены при аналогичных расчетах не возникают.*

***Ключевые слова:** гигантское магнитосопротивление, спин-туннельные магниторезистивные элементы*

Study of magnetization reversal processes of a hexagonal element in a spin-tunnel heterostructureCandidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant **Shevtsov V.S.**,Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor **Polyakov P.A.**Federal State Budget Educational Institution of Higher Education M.V. Lomonosov
Moscow State University, Moscow, Russia.Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher **Kasatkin S.I.**V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russia.Candidate of Technical Sciences, department head **Amelichev V.V.**, Candidate of Technical
Sciences, laboratory head **Kostyuk D.V.**, scientist researcher **Vasil'ev D.V.**

Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre», Moscow, Russia.

Annotation. *In this work, a theoretical study of the processes of magnetization reversal of spin-tunnel heterostructures in an external magnetic field in the case of an elongated hexagonal element was carried out. Micromagnetic modeling was carried out by solving the Landau – Lifshitz – Gilbert equation using the OOMMF software package. It was shown that theoretical calculations of magnetization reversal can lead to the appearance of a stripe domain structure. When the sampling size is reduced, stripe domains do not appear in similar calculations.*

Keywords: *giant magnetoresistance, spin-tunnel magnetoresistive elements.*

В настоящее время широкое применение в спинтронике находят спин-туннельные гетероструктуры [1-3]. Как правило, при теоретическом анализе зависимости изменения ГМР сопротивления в таких структурах при их перемагничивании используют модель когерентного вращения вектора намагниченности свободного слоя в рамках теории Стокера – Вольфарта [4]. В этой работе производится численный расчет в случае некогерентного изменения вектора намагниченности в свободном слое.

В работе исследуется ГМР сопротивление спин-туннельной магниторезистивной (СТМР) наноструктуры следующей конфигурации: Ta(10 нм)/CoFe(2 нм)/CoFeB(3 нм)/MgO(3,5 нм)/CoFeB(3 нм)/Ru(0,85 нм)/CoFe(2 нм)/FeMn(10 нм)/Ta(10 нм). Данный СТМР элемент содержит так называемую синтетическую антиферромагнитную структуру, состоящую из двух противоположно намагниченных слоев (CoFe и CoFeB), связанных косвенным антиферромагнитным взаимодействием через слой рутения (Ru). Это позволяет исключить (или существенно уменьшить) влияние магнитостатического поля фиксирующего магнитного слоя на свободный слой СТМР элемента.

Нанослой СТМР элемента имеют форму шестиугольников с углами 90° и 135° . Длина и ширина полоски равны соответственно $a = 18$ мкм и $b = 5$ мкм (рис. 1). Ось обменной (однаправленной) анизотропии (ООА) между антиферромагнитным слоем (FeMn) и ферромагнитным слоем (CoFe) и ось легкого намагничивания (ОЛН) свободного слоя CoFeB направлены вдоль большей стороны a шестиугольника. Вдоль ОЛН прикладывается внешнее магнитное поле \vec{H} , которое изменяет ориентацию вектора намагниченности \vec{M} свободного слоя, в результате чего возникает неоднородное распределение намагниченности.

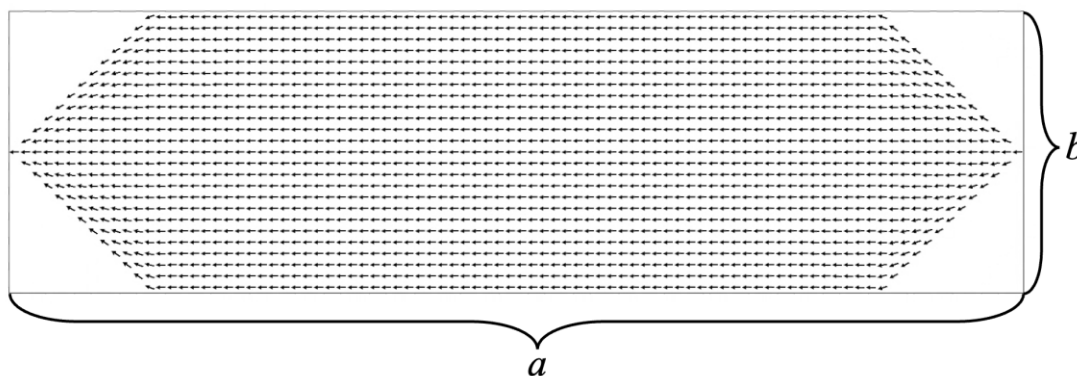


Рис. 1. Неоднородное распределение намагниченности в свободном слое при $H = 0$.

Микромагнитное моделирование процессов перемагничивания в свободном слое спин-туннельного элемента производилось при помощи программного пакета OOMMF [5], который широко используется в мире для решения аналогичных задач. Основной проблемой подобных расчетов является то, что для исследуемого образца, размеры которого существенно превосходят 1 мкм, требуется огромное количество вычислительных ресурсов. Для оценки размера ячейки при решении дискретного набора уравнений Ландау – Лифшица – Гильберта обычно используется параметр обменной длины [6]. Для исследуемого образца константа обменного взаимодействия $A = 10^{-6}$ эрг/см, намагниченность насыщения $M_s = 800$ Гс, тогда:

$$l_{ex} = \sqrt{\frac{A}{2\pi M_S^2}} \approx 5 \text{ нм.}$$

В пределах l_{ex} распределение намагниченности будет практически однородным, следовательно размер ячейки при численном решении уравнения Ландау – Лифшица – Гильберта следует выбрать порядка 5 нм. Однако для исследуемого образца такой выбор размера ячейки приводит к тому, что количество ячеек $\approx 3 \cdot 10^6$. Расчет полной петли перемагничивания во внешнем магнитном поле в таком случае с использованием персонального компьютера занимает огромное время и не представляется возможным.

Тем не менее, для данного размера ячейки 5 нм удалось провести расчет установившегося распределения намагниченности при отключении внешнего магнитного поля, начальное значение которого равнялось 300 Э и было направлено вдоль оси ОЛН. Результаты расчетов показывает, что в таком случае не происходит возникновения сложных доменных структур, а распределение намагниченности близко к однородному, за исключением относительно небольших областей вблизи углов (рис. 1).

Как было сказано выше, расчет процесса перемагничивания во внешнем магнитном поле практически невозможен при размере ячейки 5 нм на персональном компьютере, поэтому для проведения расчетов размер ячейки был увеличен до 100 нм, 50 нм и 20 нм (в последнем случае время вычислений составило более суток). Результаты, показывающие зависимость относительного изменения сопротивления ГМР-элемента от внешнего магнитного поля в относительных единицах показано на рис. 2.

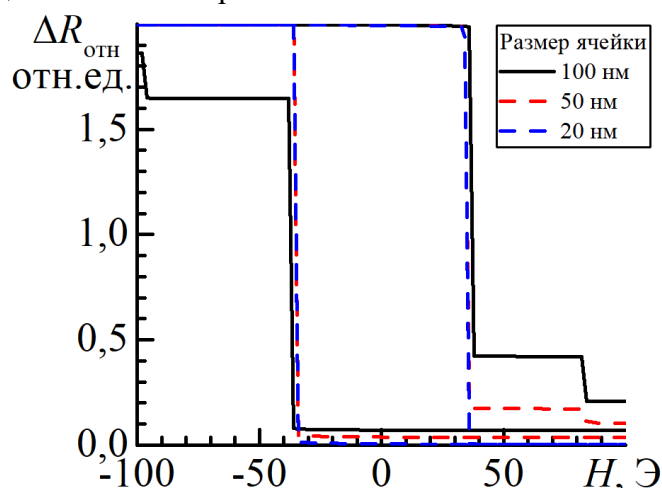


Рис. 2. Зависимости относительного изменения ГМР сопротивления $\Delta R_{отн}$ СТМР элемента от величины внешнего магнитного поля H для различных размеров ячейки: 100 нм, 50 нм, и 20 нм.

Обратим внимание на тот факт, что при размере ячейки 100 нм график имеет ступенчатый вид. Это обусловлено тем, что процесс перемагничивания не является когерентным. В случае размера ячейки 100 нм при поле $H = 50$ Э в расчетах возникают полосовые области с противоположным направлением намагниченности (домены, рис. 3). Однако при более мелких размерах ячейки 50 нм и 20 нм такая «ступенчатость» постепенно пропадает, и график имеет прямоугольный вид.

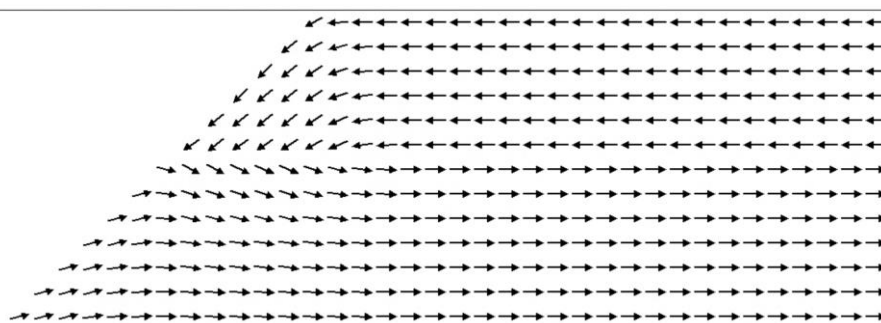


Рис. 3. Неоднородное распределение намагниченности вблизи тупого угла с образованием полосового домена в свободном слое при $H = 50$ Э. Размер ячейки 100 нм.

Отметим, что величина ячейки 100 нм сильно превышает обменную длину $l_{ex} = 5$ нм. По всей видимости, возникновение неоднородностей в виде полосовых доменов связано с неверным учетом энергии обменного взаимодействия, обусловленным слишком большим размером ячейки. Было проведено сравнение величины полной энергии обменного взаимодействия E_{ex} по всему объему исследуемой пленки в случае нулевого внешнего магнитного поля $H = 0$ при разных размерах ячейки. При размере ячейки 5 нм энергия $E_{ex} = 9,8 \cdot 10^{-12}$ эрг, а при размере ячейки 50 нм $E_{ex} = 4,2 \cdot 10^{-12}$ эрг, что более чем в 2 раза меньше. Это говорит о том, что при больших размерах ячейки учет энергии обменного взаимодействия происходит неверно.

Таким образом можно сделать вывод о том, что возникновение полосовых доменов при расчете перемагничивания элемента скорее всего является вычислительным дефектом, связанным с неверным учетом вклада обменного взаимодействия в эффективное поле. Однако исключить вероятность возникновения сложных доменных структур нельзя, так как вычисления с размером ячейки $l_{ex} = 5$ нм невозможны на персональном компьютере. Тем не менее, учет занижения энергии обменного взаимодействия при больших размерах ячейки может быть использован для проведения более быстрых и эффективных численных расчетов с увеличенной эффективной константой обменного взаимодействия для случаев, когда в образце заведомо не возникают сложные микромагнитные структуры.

Список использованной литературы:

1. Scheike T., Xiang Q., Wen Z. et al. Exceeding 400% tunnel magnetoresistance at room temperature in epitaxial Fe/MgO/Fe(001) spin-valve-type magnetic tunnel junctions / Applied Physics Letters. 2021. Vol. 118. Iss. 4. P. 042411.
2. Limeira V.P.C., Nagamine L.C.C.M., Geshev J. et al. Misaligned anisotropies in spin-valve films studied through magnetoresistance and magnetization measurements / Journal of Physics: Condensed Matter. 2019. Vol. 31, No. 26. P. 265802.
3. Luong V.S., Nguyena A.T., Hoang Q.K. et al. Magnetoresistive performances in exchange-biased spin valves and their roles in low-field magnetic sensing applications / Journal of Science: Advanced Materials and Devices. 2018. Vol. 3, Iss. 4. P. 399-405.
4. Stoner E.C., Wohlfarth E.P. A mechanism of magnetic hysteresis in heterogeneous alloys. Philosophical Transactions of the Royal Society A. 1948. Vol. 240. Iss. 826. P. 599-642.
5. The Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF). <https://math.nist.gov/oommf/>
6. Dubovica M.N., Zverev V.V., Filippov B.N. Nonlinear Rearrangement of the Structure of Domain Walls in a Thin Magnetic Film with a Uniaxial In-Plane Anisotropy / The Physics of Metals and Metallography. 2014. Vol. 115, No. 11, P. 1160-1177.

УДК 537.622

Кристаллическая структура и магнитные свойства тонких пленок Co/Pd**Калентьева И.Л.**

к.ф.-м.н., научный сотрудник, Научно-исследовательский физико-технический институт
ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Дорохин М.В.

д.ф.-м.н., заведующий лабораторией, Научно-исследовательский физико-технический
институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Здоровейцев А.В.

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Научно-исследовательский физико-технический
институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Татарский Д.А.

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

Темиряева М.П.

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

***Аннотация.** Работа посвящена исследованию тонких многослойных ферромагнитных пленок вида $[Co(0.3 \times t \text{ нм})/Pd(0.5 \times t \text{ нм})]_{10}$. Методами рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии было показано, что полученные пленки представляют собой сильноперемешанные сплавы с модуляцией состава. Зафиксировано возникновение различных топологических магнитных состояний: скирмионы, 360° -доменные стенки и скирмиониумы, а также комбинация двух последних. Обнаружено, что тип и плотность микромагнитных особенностей сильно зависят от настроечного коэффициента t .*

***Ключевые слова:** магнитные пленки и многослойные структуры, микромагнитная структура, скирмионы, скирмиониумы*

Crystal structure and magnetic properties of thin Co/Pd films**Kalentyeva I.L.**

Ph.D., researcher, Scientific Research Institute of Physics and Technology, Lobachevsky
State University of Nizhny Novgorod

Dorokhin M.V.

Dr. Sc., head of laboratory, Scientific Research Institute of Physics and Technology,
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Zdoroveyshchev A.V.

Ph.D., senior researcher, Scientific Research Institute of Physics and Technology,
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Tatarskiy D.A.

Ph.D., senior researcher, Institute for Physics of Microstructures RAS

Temiryazeva M.P.

Ph.D., leading researcher, Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Fryazino Branch) RAS

Annotation. *The work is devoted to the study of thin multilayer ferromagnetic films of the type $[Co(0.3 \times t \text{ nm})/Pd(0.5 \times t \text{ nm})]_{10}$. Using X-ray diffraction analysis and transmission electron microscopy, it was shown that the resulting films are highly mixed alloys with composition modulation. The emergence of various topological magnetic states has been recorded: skyrmions, 360° -domain walls and skyrmions, as well as a combination of the latter two. It was found that the type and density of micromagnetic features strongly depend on the tuning coefficient t .*

Keywords: *magnetic films and multilayers, micromagnetic structure, skyrmions, skyrmioniums*

Формирование топологических магнитных состояний в тонких многослойных пленках ферромагнетик/тяжелый металл и сплавах с перпендикулярной магнитной анизотропией представляет повышенный интерес для следующего поколения магнитной памяти, логических интегральных схем и датчиков. Важным фактором, определяющим возможность практического применения таких материалов, является формирование устойчивых при комнатной температуре магнитных состояний, таких как доменные стенки или скирмионы с пространственными размерами нанометрового масштаба. Хорошим примером таких материалов являются тонкие пленки Co/Pd, которые демонстрируют сильное взаимодействие Дзялошинского-Мория (ВДМ).

Исследованные образцы представляли собой тонкие пленки Co/Pd, полученные методом электронно-лучевого испарения при 300°C . В качестве подложек использовались Si, GaAs и мембраны Si_3N_4 . Диэлектрический слой Al_2O_3 толщиной 2 нм служил диффузионным барьером. Для формирования пленки поочередно наносились слои Pd ($0,5 \times t$ нм) и Co ($0,3 \times t$ нм) с десятикратным повтором [1]. Точное значение толщины задавалось настроечным коэффициентом t , который варьировался от 0,9 до 1,3. Выбор толщин слоев и значений t был основан на наших более ранних результатах, посвященных многослойным пленкам Co/Pt и Co/Pd [1,2].

Намагниченность $M(H)$ измерялась с использованием магнитометра с переменным градиентом поля. Кристаллическая структура пленок была исследована методами рентгеновской дифракции и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Для диагностики магнитных свойств предоставленных образцов использовались магнитно-силовая микроскопия (МСМ) и лоренцевая просвечивающая электронная микроскопия (Л-ПЭМ) на микроскопе CarlZeiss LIBRA 200 MC. Проведены оценки величины энергии взаимодействия Дзялошинского-Мория (ВДМ) с использованием Мандельштам-бриллюэновской спектроскопии.

На рис. 1а представлено ПЭМ-изображение структуры с наибольшим настроечным коэффициентом $t = 1,3$, выращенной на подложке Si. Видно, что подложка Si имеет атомно-упорядоченные слои, что позволяет подтвердить высокое разрешение ПЭМ. Исследуемая пленка представляет собой последовательность неразделенных слоев Co и Pd, контраст между разными слоями неразрешим. Пленка содержит как поликристаллические области, так и области, которые можно интерпретировать как аморфные. Перекрытие разориентированных кристаллических блоков приводит к появлению муарового контраста.

На рис. 1б приведены профили концентрации элементов, полученные с помощью метода РФЭС для образцов с самым высоким и самым низким настроечным коэффициентами. На рисунке видно четкую периодичность концентрации Co и Pd, при этом период образца с $t = 1,3$ примерно в 1,5 раза больше периода образца с $t = 0,9$. Амплитуда модуляции не превышает 5 %, что свидетельствует о высокой степени перемешивания слоев. При этом на спектрах рентгеновской дифракции всех исследованных образцов наблюдается доминирующий широкий пик, который можно интерпретировать как сплав Co-Pd неоднородного состава.

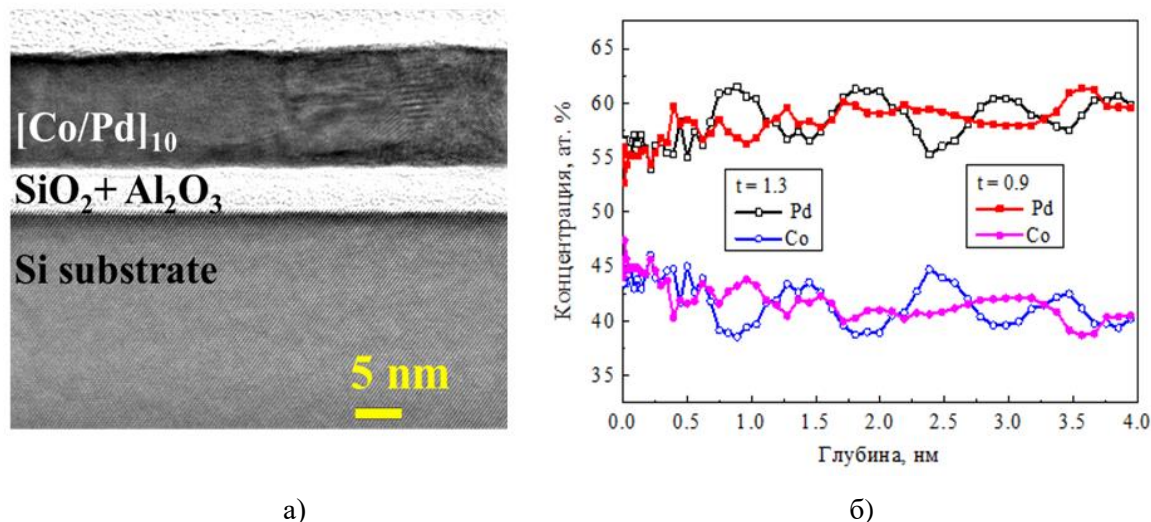


Рис. 1. (а) (б) Зависимость концентраций Co и Pd от расстояния от поверхности образца, полученная методом РФЭС.

Магнитолевые зависимости намагниченности всех исследуемых пленок имеют форму петли гистерезиса, при этом для всех образцов значение намагниченности насыщения равно значению остаточной намагниченности, из чего следует, что ось легкого намагничивания расположена перпендикулярно плоскости образца.

МСМ-изображение ненамагниченного образца, имеет лабиринтную доменную структуру, типичную для многослойных пленок типа ферромагнетик/тяжелый металл. При приложении магнитного поля кантилевера или внешнего источника доменная структура трансформируется. Мы полагаем, что величина внешнего поля насыщения в методе Л-ПЭМ сравнима с магнитным полем кантилевера, используемого для МСМ. Поэтому эволюция микромагнитной структуры при намагничивании данными методами аналогична, что позволило более уверенно интерпретировать микромагнитные артефакты.

При намагничивании МСМ-изображение трансформируется в набор микромагнитных артефактов различной формы и размера, тип и плотность которых сильно зависят от коэффициента t . Наличие данных артефактов дополнительно подтверждается путем сравнения МСМ-изображений с изображениями Л-ПЭМ, полученных при наклоне 30° относительно нормали. Намагничивание почти до насыщения в поле 790 Э также приводит к значительной эволюции микромагнитной структуры: появлению микромагнитных артефактов, часть из которых сохраняется после уменьшения магнитного поля от насыщения до нуля.

Рассмотрим подробнее каждый тип из обнаруженных артефактов. Первым является магнитный домен круглой формы размером ~ 200 нм, который обычно интерпретируется как скирмион (рис.3а). Наибольшая плотность скирмионов выявлена в образце с $t = 1,3$ (рис. 2б). С уменьшением величины t до 1,2 микромагнитная картина изменяется и, помимо скирмионов,

обнаруживается наличие 360° -доменных стенок (рис. 2а). Длина и плотность доменных стенок зависят от величины коэффициента t .

В образцах с наименьшими значениями $t = 1$ и $0,9$ можно обнаружить еще два типа артефактов. Первые визуализируются как замкнутое кольцо с внешним диаметром ≥ 1 мкм (рис. 2в). Их можно интерпретировать как скирмиониумы, представляющие собой комбинацию двух скирмионов с противоположным топологическим зарядом. Скирмиониум является многообещающей топологической спиновой структурой для манипуляции намагниченностью, управляемой током, что обусловлено нулевым топологическим зарядом. Наконец, может быть выявлена комбинация артефакта 360° -доменной стенки и скирмиониума (рис. 2г).

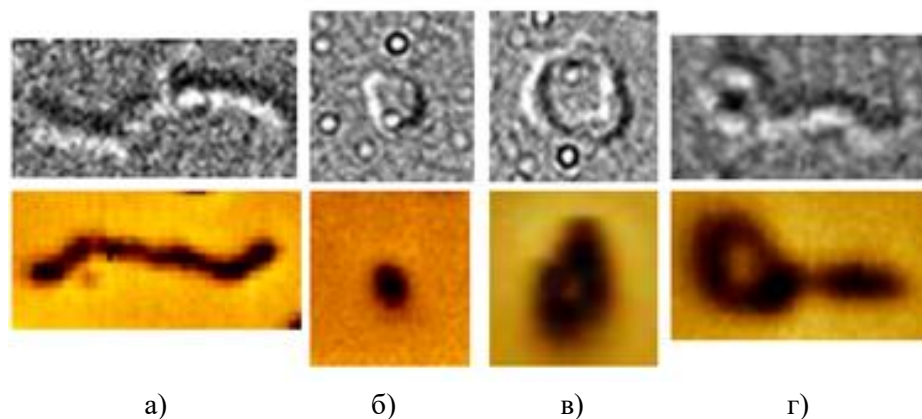


Рис. 2. Различные топологические магнитные состояния, обнаруженные в исследованных образцах: (а) 360° -доменная стенка, (б) скирмион, (в) скирмиониум, (г) комбинация 360° -доменной стенки и скирмиониума.

Установлено, что константа ВДМ немонотонно зависит от коэффициента t : наибольшее значение ($0,86 \pm 0,09$ мДж/м²) достигается для образца с почти наименьшим значением $t=1$ и, следовательно, с более высоким перемешиванием слоев. Немонотонная зависимость может свидетельствовать о различном вкладе объемного и межфазного ВДМ для разных пленок. Следует отметить, что наибольшее значение константы ВДМ характерно для образца с наибольшим разнообразием микромагнитных топологических состояний.

Работа выполнена при поддержке РФФ № 21-79-20186.

Список использованных источников:

1. M.V. Dorokhin. Manipulation of micromagnetic structure of thin Co/Pt multilayer films by precise variation of Co and Pt thicknesses // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – № 926. – P. 166956.
2. А.В. Здравейщев. Микромагнитные и магнитооптические свойства пленочных структур вида ферромагнетик/тяжелый металл // Физика твердого тела. – 2019. – № 61. – С. 1628–1633.

УДК 539.216

Магнетизм плёнок типа R-Co (R=Gd,Tb) с высокой концентрацией редкоземельных элементов**Васьковский В.О.**

д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой, Институт естественных наук и математики УрФУ,

Кудюков Е.В.

к.ф.-м.н., научный сотрудник, Институт естественных наук и математики УрФУ,

Горьковенко А.Н.

к.ф.-м.н., научный сотрудник, Институт естественных наук и математики УрФУ,

Низаев А.Н.

лаборант-исследователь, Институт естественных наук и математики УрФУ,

Свалов А.В.

д.-ф.м.н., старший научный сотрудник, Институт естественных наук и математики УрФУ,

Лепаловский В.Н.

к.-ф.м.н., старший научный сотрудник, Институт естественных наук и математики УрФУ,

Аннотация. В работе представлены результаты исследования магнитных свойств плёнок типа R-Co (R=Gd, Tb), содержащих до 50 ат. % кобальта. Установлено, что в области температур магнитного упорядочения им свойственно асперомагнитное состояние, важную роль в формировании которого играет дисперсия обменной связи между ионами редкоземельных элементов.

Ключевые слова: плёнки, редкоземельные элементы, структура, асперомагнетизм

Magnetism of R-Co type films (R=Gd,Tb) with a high concentration of rare earth elements**Vas'kovskiy V.O.**

Dr. Sc., professor, Head of the Department, Institute of Natural Sciences and Mathematics UrFU

Kudyukov E.V.

Ph.D, Researcher, Institute of Natural Sciences and Mathematics UrFU

Gorkovenko A.N.

Ph.D., Researcher, Institute of Natural Sciences and Mathematics UrFU

Nizaev A.N.

Assistant researcher, Institute of Natural Sciences and Mathematics UrFU

Svalov A.V.

Dr. Sc., Senior researcher, Institute of Natural Sciences and Mathematics UrFU

Lepalovskij V.N.

Ph.D., Senior researcher, Institute of Natural Sciences and Mathematics UrFU

Annotation. *The paper presents the results of a study of the magnetic properties of films of the R-Co type (R=Gd, Tb) containing up to 50 at. % cobalt. It has been established that in the field of magnetic ordering temperatures, they are characterized by an asperomagnetic state, an important role in the formation of which is played by the dispersion of the exchange coupling between ions of rare earth elements.*

Keywords: *films, rare earth elements, structure, asperomagnetism*

Плѐнки сплавов редкоземельных элементов (R) с металлами группы железа (T) находятся в поле зрения исследователей уже несколько десятилетий [1]. В большой мере это связано с уникальной возможностью реализации в них аморфного состояния и, соответственно, непрерывного ряда твѐрдых растворов элементов, несущих локализованный и коллективизированный типы магнетизма. Естественным образом основное внимание большого количества соответствующих работ сосредоточено на R-T композициях с высоким содержанием T-элементов, которые обладают магнитным упорядочением в области температур, включающих комнатную температуру. Однако в последние годы интерес к R-T плѐнкам возник и в связи с развитием кирального магнетизма, реализующегося в рамках неколлинерных магнитных структур, которыми богаты сами редкоземельные элементы и которые, вероятно, могут транслироваться в R-T твѐрдые растворы [2]. Таким образом, встаѐт задача более детального изучения магнетизма R-T плѐнок с высоким содержанием R компонентов. В рамках её решения данная работа выполнена на плѐнках $Gd_{100-x}Co_x$ и $Tb_{100-x}Co_x$ ($0 \leq x \leq 50$) и посвящена сравнительному изучению магнитных свойств бинарных систем, содержащих R элемент с разной конфигурацией 4f электронной подоболочки.

Эксперимент выполнен на плѐнках, полученных методом магнетронного распыления в атмосфере аргона на установке AJA Orion-8 в режиме сораспыления однокомпонентных мишеней. Толщина плѐнок составляла 100 нм. Все они имели защитное покрытие в форме поверхностного слоя Ta толщиной 5 нм. Состав образцов варьировался путѐм изменения соотношения скоростей осаждения разных металлов и контролировался рентгенофлуоресцентным анализатором Nanohunter. Аттестация структурного состояния выполнена на рентгеновском дифрактометре PANalytical Empyrean. Информация о магнитных свойствах получена с помощью опции VSM на измерительном комплексе PPMS DynaCool.

На рис.1,а для примера представлены дифрактограммы плѐнок $Tb_{100-x}Co_x$ нескольких составов. Их анализ показывает, что образцам чистого Tb свойственно нанокристаллическое состояние, а введение Co ведѐт к повышению дисперсности структуры и в конечном счѐте к аморфизации бинарной системы. Аналогичным образом изменяется структурное состояние плѐнок Gd-Co. Указанные особенности структуры отражаются и на магнетизме R-Co плѐнок. В частности, при отсутствии Co плѐнки имеют меньшую температуру Кюри T_C по сравнению с массивным состоянием соответствующих редкоземельных элементов. Это иллюстрируется температурными зависимостями спонтанной намагниченности для чистых плѐнок Gd и Tb (рис.1,b). Но более примечательным фактом является тенденция к снижению T_C в области относительно низких концентраций Co ($x < 20$). То и другое, по-видимому, является следствием обменной фрустрированности в системе магнитных моментов редкоземельных ионов, которая нарастает при аморфизации. В плѐнках с $x > 20$ тенденция меняется, и имеет место рост T_C , что можно связать с возрастанием поляризующего действия кобальтовой подсистемы.

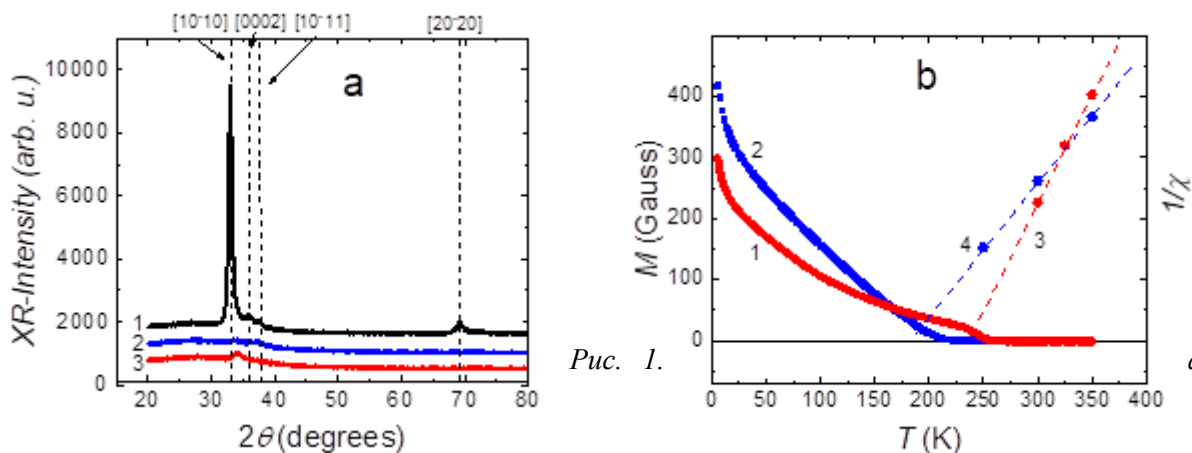


Рис. 1.

Дифрактограммы плёнок $Tb_{100-x}Co_x$ разного состава:

кривая 1 – 0; кривая 2 – 10; кривая 3 – 20 ат.% Co.

b – Температурные зависимости спонтанной намагниченности, измеренные в магнитном поле напряжённостью 100 Э, (кривые 1,2) и обратной магнитной восприимчивости (кривые 3,4) для плёнок Gd (кривые 1,3) и Tb (кривые 2,4).

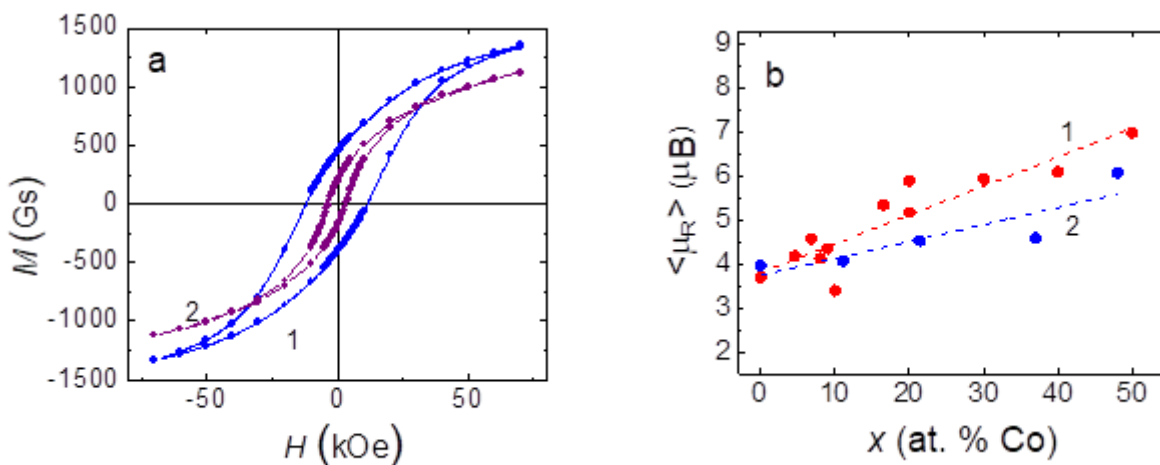


Рис.2. a – Петли гистерезиса плёнки Tb, измеренные при разных температурах: кривая 1 – 5; кривая 2 – 100 К.

b – Концентрационные зависимости среднего магнитного момента, приходящегося на атом разных редкоземельных элементов при температуре 5 К: кривая 1 – Gd; кривая 2 – Tb.

На рис.2,а показаны петли гистерезиса плёнок Tb, измеренные при разных температурах в области магнитного упорядочения. Их характерными особенностями являются высокая коэрцитивная сила, низкая остаточная намагниченность и относительно небольшая намагниченность, достигающаяся в магнитном поле напряжённостью 70 кЭ. Обычно всё это связывают с дисперсией локальных осей магнитной анизотропии, которую при наличии некоторого структурного беспорядка задают ионы Tb, обладающие большим орбитальным моментом [3]. Однако подобные результаты в части максимальной и остаточной намагниченностей получены и для плёнок Gd, который не имеет орбитального момента. Более наглядно подобие закономерностей формирования спонтанной намагниченности в плёнках, содержащих разные R, можно проследить на примере концентрационных зависимостей среднего магнитного момента $\langle \mu_R \rangle$, приходящегося на редкоземельный ион при 5 К (рис.2,б).

При этом для расчёта $\langle \mu_R \rangle$ использовались величины магнитного момента образцов, полученные путём линейной экстраполяции высокополевых участков петель гистерезиса на нулевое магнитное поле. Из рис. 2b можно заключить, что вне зависимости от уровня магнитной анизотропии редкоземельных ионов в плёнках Gd и Tb $\langle \mu_R \rangle$ практически вдвое меньше номинальных значений магнитных моментов этих атомов (7 μ_B и 9,3 μ_B соответственно). Отметим, что очень близкие значения атомных магнитных моментов получены нами из температурных зависимостей обратной магнитной восприимчивости $1/\chi$ в парамагнитной области (см. рис.1b). В совокупности приведённые результаты позволяют заключить, что в плёнках Gd и Tb присутствует выраженный асперомагнетизм, а его причиной является не столько дисперсия локальных осей анизотропии, сколько пространственные флуктуации параметров обмена. Они могут образовываться в рамках механизма РККИ при наличии структурной неоднородности свойственной R-T плёнкам.

Рис.2b также демонстрирует увеличение $\langle \mu_R \rangle$ при повышении содержания Co в плёнках обеих систем. Фактически это свидетельствует об уменьшении угла раствора конуса магнитных моментов в составе асперомагнитной структуры. В рассматриваемой области составов Co не даёт прямого вклада в спонтанную намагниченность. Однако он в силу гибридизации электронных структур, по-видимому, способствует более эффективной поляризации магнитных моментов R ионов. В плёнках Gd-Co это приводит к более резкому изменению $\langle \mu_R \rangle$, чем в плёнках Tb-Co. Естественно полагать, что в последнем случае свою стабилизирующую роль сыграла высокая магнитная анизотропия ионов Tb, которая из-за случайной ориентации локальных осей легкого намагничивания способствует поддержанию асперомагнитного состояния.

Авторы выражают благодарность Е.А. Кравцову и М.Е. Москалеву за помощь в структурной аттестации плёнок. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект №24-22-00173.

Список использованных источников:

1. Taylor R.C. and Gangulee A. Magnetization and magnetic anisotropy in evaporated GdCo amorphous films // J. Appl. Phys.-1976.-V. 47, N. 10.-P. 4666-4668
2. Антропов Н.О., Кравцов Е.А., Хайдуков Ю.Н., Рябухина М.В., Пролядо В.В., Вешке О., Устинов В.В. Когерентная веерная магнитная структура в сверхрешетках Dy/Gd // Письма в ЖЭТФ. – 2018. – № 108. – С. 361.
3. Uchiyama S. Magnetic properties of rare earth-cobalt amorphous films // Materials Chemistry and Physics.- 1995.-V. 42.-P. 38-443.

УДК 537.31, 537.635

Влияние концентрации металлического сплава на проводимость и параметры ФМР композитных плёнок (CoFeB+SiO₂) и (CoTaNb+MgO)

Котов Л.Н.

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

Уткин А.А.

Старший преподаватель кафедры радиофизики и электроники,
Сыктывкарский государственный университет

Гаврилюк С.И.

Аспирант кафедры радиофизики и электроники,
Сыктывкарский государственный университет

Ковалёв П.Д.

Магистр кафедры радиофизики и электроники,
Сыктывкарский государственный университет

Заварин 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.** Данное исследование посвящено изучению влияния концентрации металлических сплавов на проводимость и параметры ферромагнитного резонанса (ФМР) в металл-диэлектрических композитных плёнках (CoFeB+SiO₂) и (CoTaNb+MgO) при комнатной температуре. Анализ проведённых исследований показал, что рост концентрации металлического сплава x в плёнках приводит к уменьшению удельного сопротивления, резонансного поля и ширины линии ФМР. Ширина линии ФМР, как и удельное сопротивление в зависимости от концентрации x может иметь осцилляционный характер, что возможно связано со структурными изменениями в плёнках при их напылении. Полученные результаты представляют интерес для разработки новых функциональных материалов с улучшенными свойствами для различных технологических приложений.*

***Ключевые слова:** электрическое сопротивление, параметры ферромагнитного резонанса, композитные металл-диэлектрические плёнки, концентрация металлического сплава*

Influence of metal alloy concentration on conductivity and FMR parameters of composite films (CoFeB+SiO₂) and (CoTaNb+MgO)

Kotov L.N.

Dr. Sc., Professor, Head. Department of Radiophysics and Electronics, Syktyvkar State University

Utkin A.A.

Senior Lecturer at the Department of Radiophysics and Electronics, Syktyvkar State University

Gavrilyuk S.I.

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

Kovalev P.D.

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

Zavarin P.D.

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

Kalinin Yu.E.

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

Sitnikov A.V.

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

Annotation. *This study is devoted to studying the effect of metal alloy concentration on conductivity and ferromagnetic resonance (FMR) parameters in metal-dielectric composite films (CoFeB+SiO₂) and (CoTaNb+MgO) at room temperature. An analysis of the studies has shown that an increase in the concentration of the metal alloy x in the films leads to a decrease in the resistivity, resonance field and FMR linewidth. The width of the FMR line, as well as the resistivity, depending on the concentration x , can have an oscillatory character, which may be associated with structural changes in the films during deposition. The results obtained are of interest for the development of new functional materials with improved properties for various technological applications.*

Key words: *electrical resistance, ferromagnetic resonance parameters, composite metal-dielectric films, metal alloy concentration*

Исследование влияния концентрации металлического сплава на проводимость и параметры ферромагнитного резонанса (ФМР) в металл-диэлектрических композитных плёнках является актуальной задачей в области материаловедения и физики конденсированного состояния [1-3]. Этот вопрос становится все более значимым в контексте развития современных технологий, таких как микроэлектроника, нанотехнологии и специализированные функциональные покрытия. Металл-диэлектрические композитные плёнки представляют собой уникальный класс материалов, объединяющих в себе свойства металлов и диэлектриков. Их свойства и поведение определяются как химическим составом, так и структурой на микро- и наномасштабах [4]. Важно понимать, как изменение концентрации металлического сплава в таких плёнках влияет на их электрические и магнитные характеристики, включая проводимость и параметры ФМР. В данной работе исследованы проводящие и ФМР свойства плёнок (CoFeB+SiO₂) и (CoTaNb+MgO) от концентрации металлического сплава x при температуре 300 К.

Напыление плёнок осуществлялось на лавсановый лист с размерами 210×295 мм² методом ионной бомбардировки мишеней из металлических сплавов CoFeB, CoTaNb и

диэлектриков SiO_2 , MgO [1,2]. Измерения концентрации металлического сплава композитных плёнок проводились на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA3 LMH. Измерения электрического сопротивления плёнок проводились четырехзондовым методом при помощи мегаомметра Е6-24. ФМР характеристики плёнок были получены на основе анализа магнитных резонансных линий, полученных с использованием радиоспектрометра РЭ 1306 [2]. Во время эксперимента, постоянное и переменное магнитное поле с частотой 9.4 ГГц, лежали в плоскости плёнки и были взаимно перпендикулярно друг к другу [2].

Были построены зависимости удельного сопротивления от концентрации металлического сплава x в плёнках с составами $(\text{CoFeB}+\text{SiO}_2)$ и $(\text{CoTaNb}+\text{MgO})$ (рис. 1). Как и ожидалось для плёнок с разными металлами и диэлектриками наблюдается монотонный спад удельного сопротивления с ростом концентрации металлического сплава x . Для обеих серий плёнок наблюдается линейная зависимость удельного сопротивления до концентрации металлического сплава $x=0.70$. На примере плёнки $(\text{CoFeB}+\text{SiO}_2)$ видно, что при концентрации металлического сплава выше $x=0.70$ проводимость выходит на плато. На рис. 2 приведены графики зависимостей положения линии ФМР или резонансного поля H_0 и ширины линии ФМР ΔH от концентрации металлического сплава x . При увеличении концентрации металлического сплава x видно, что значение резонансного поля уменьшается. Это изменение может быть связано с изменением среднего размагничивающего фактора металлических гранул, форма которых эволюционирует от слабо вытянутой к сильно сплюснутой. Кроме того, увеличение атомной доли металлического сплава, начиная с $x=0.50$, приводит к упорядочиванию структуры. Это происходит за счет образования крупных агрегатов путем слияния мелких гранул (или частиц), что в свою очередь снижает вклад случайных полей размагничивания в ширину линии ферромагнитного резонанса.

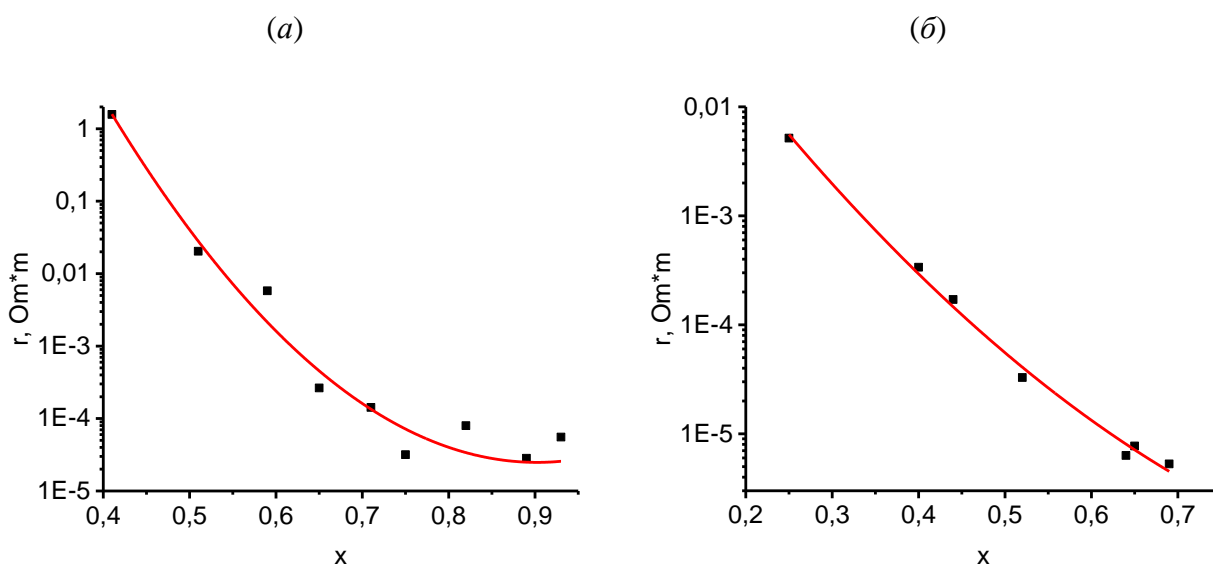


Рис. 1. Зависимости удельного сопротивления плёнок $(\text{CoFeB}+\text{SiO}_2)$ (а) и плёнок $(\text{CoTaNb}+\text{MgO})$ (б) от концентрации металлического сплава в них.

(a)

(б)

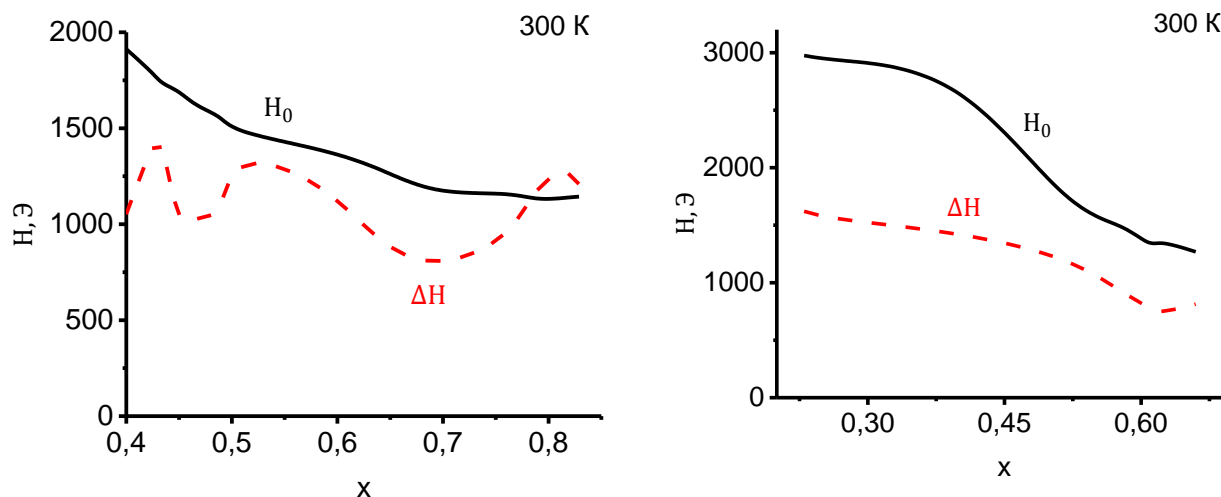


Рис. 2. Зависимость ширины линии ΔH и резонансного поля ФМР H_0 от концентрации металлического сплава x : (а) - (CoFeB+SiO₂), (б) - (CoTaNb+MgO).

Таким образом, в данном исследовании было изучено влияние концентрации металлических сплавов CoFeB, CoTaNb на проводимость и параметры ФМР металл-диэлектрических композитных пленок (CoFeB+SiO₂) и (CoTaNb+MgO) при температуре 300 К. Анализ проведенных исследований показал, что рост концентрации металлического сплава в пленках приводит к уменьшению удельного сопротивления, резонансного поля и ширины линии ФМР. Ширина линии ФМР, как и удельное сопротивление в зависимости от концентрации x может иметь осцилляционный характер, что возможно связано со структурными изменениями в пленках при их напылении.

Исследования выполнены за счёт гранта Российского научного фонда, проект № 21-72-20048.

Список использованных источников:

1. Котов Л.Н., Уткин А.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В. Магнитные, проводящие и магнитопроводящие свойства композитных плёнок (CoFeB+SiO₂+N₂) в интервале температур 2-400 К и магнитных полей 0, 1 и 5 Тл // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2023. – Т. 15, № 4. – С. 85-92.
2. Котов Л.Н., Ласёк М.П., Турков В.К., Холопов Д.М., Власов В.С., Калинин Ю.Е., Ситников А. В. Ферромагнитный резонанс в композитных пленках металл-диэлектрик и металл-углерод // Известия РАН. Серия Физическая, – 2020. – Т. 84, № 9. – С. 1255-1257.
3. Leonid Kotov, Vladimir Vlasov, Pavel Kovalev, Alexander Utkin, Yuri Kalinin, Alexander Sitnikov, Vladimir Ustyugov. 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/\$31.00 ©2023 IEEE.
4. Kotov L. N., Vlasov V. S., Ustyugov V. A. et al. Relief, magnetic structure and microwave properties of composite films // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 175. Art. No. 012021.

УДК 537.622

Свойства углеродных слоев, легированных атомами железа**Данилов Ю.А.**

к.ф.-м.н., в.н.с., Научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Ганьшина Е.А.

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

Здоровейщев Д.А.

студент, физический факультет ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Кравченко А.С.

студентка, физический факультет ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Крюков Р.Н.

к.ф.-м.н., доцент, физический факультет ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Лесников В.П.

н.с., Научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Нежданов А.В.

к.ф.-м.н., доцент, физический факультет ННГУ им. Н.И. Лобачевского

***Аннотация.** В работе изучены структура и свойства углеродных слоев, полученных методом импульсного лазерного нанесения в вакууме и легированных атомами Fe. Сформированы однородно легированные C:Fe слои, а также многослойные периодические структуры C/Fe. Магнитооптические и гальваномагнитные исследования свидетельствуют о ферромагнитных свойствах структур.*

***Ключевые слова:** импульсное лазерное нанесение, углеродные слои, легирование железом*

Properties of carbon layers doped with iron atoms**Danilov Yu.A.**

Ph.D., leading researcher, Physico-technical research institute, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Gan'shina E.A.

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

Zdoroveyshchev D.A.

student, Faculty of Physics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Kravchenko A.S.

student, Faculty of Physics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Kriukov R.N.

Ph.D., ass. prof., Faculty of Physics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Lesnikov V.P.

researcher, Physico-technical research institute, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Nezhdanov A.V.

Ph.D., ass. prof., Faculty of Physics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Annotation. *This work examines the structure and properties of carbon layers obtained by pulsed laser deposition in a vacuum and doped with Fe atoms. Uniformly doped C:Fe layers, as well as multilayer periodic C/Fe structures, were obtained. Magneto-optical and galvanomagnetic studies indicate the ferromagnetic properties of the structures.*

Keywords: *pulsed laser deposition, carbon layers, iron doping*

Углеродные пленки представляют значительный практический интерес. Они могут быть использованы как защитные покрытия различных изделий, а также применяться как материалы в приборах спиновой и оптической электроники. Важной является задача разработки методов нанесения углеродных слоев (С-слоев) на различные поверхности, а также их легирования. Метод импульсного лазерного нанесения (ИЛН) С-слоев, использованный в этом исследовании, представляет альтернативу распространенному методу CVD и, в отличие от него, позволяет наносить углеродные, в т.ч. легированные, наноструктуры непосредственно на поверхность полупроводников и диэлектриков.

Для распыления в вакууме источника атомов углерода – пластины пирографита – использован АИГ:Nd лазер (532 нм), с длительностью импульса 10 нс, частотой повторения 15 Гц и энергией в импульсе 250 мДж. Излучение сфокусировано на мишени в пятно площадью $\approx 1.5 \text{ мм}^2$. Поток образующейся лазерной плазмы попадает на подложку, которая обычно нагревается до $T_g=200\text{--}500 \text{ }^\circ\text{C}$. Скорость нанесения С-слоев $\approx 0.2 \text{ нм/с}$. Использование дополнительной мишени (металлическое железо) позволяет получить легированные С:Fe слои; содержание примеси зависит от времени распыления компонентов. В качестве подложки использованы пластины Si, а также структуры SiO₂/Si.

Для изучения состава С-слоев использован метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) в сочетании с послойным травлением. Оптические свойства слоев изучены методом комбинационного рассеяния света (КРС), а магнитооптические измерения выполнены методом экваториального эффекта Керра [1]. Гальваномагнитные свойства слоев С:Fe изучены методом измерения эффекта Холла.

Изготовлены и исследованы две серии образцов. Для получения первой серии использовали распыление составной мишени пирографит/Fe, в которой пирографит занимает сектор 90° окружности, описываемой лазерным лучом на мишени. Принимая во внимание низкую скорость распыления Fe (менее 3 нм/с) и скорость вращения мишени $\sim 20 \text{ об./мин}$, можно предположить почти однородное легирование растущего С-слоя железом. Величина T_g составляла 500 °С, а время нанесения 13 мин. Обозначение этой серии С:Fe-09-08. Вторая серия образцов представляла собой периодические структуры С/Fe, включающие 5 повторений С(50 с)/Fe(90 с) с покровным С-слоем (50 с). Температура T_g составляла 200 °С (структура С/Fe-10-20) и 400 °С (структура С/Fe-09-13). В качестве контрольной структуры (С-09-23) был выращен нелегированный С-слой при 400 °С в течение 5 мин.

На рис.1 показаны спектры КРС, полученные на установке NTEGRA SPECTRA (NT-MDT) при 300 К в геометрии обратного рассеяния с использованием лазера с длиной волны 473 нм. Нелегированный С-слой (структура С-09-23) имеет в спектре КРС характерные для графеноподобных структур [2] пики D (вблизи волнового числа 1407 см^{-1}) и G ($\sim 1592\text{ см}^{-1}$). Наблюдаются также слившиеся при 2888 см^{-1} линии 2D и D+D'. Плохое разрешение этих пиков, очевидно, связано с недостаточно высокой температурой синтеза С-слоя ($400\text{ }^\circ\text{C}$). Исследование спектра позволяет идентифицировать С-слой как пленку, состоящую из графеновых зерен. Расчет по [2] дает число слоев графена ~ 3 , а размер зерна $\sim 3\text{ нм}$.

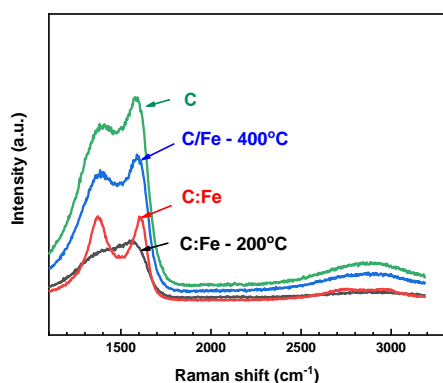


Рис.1 – Спектры КРС для углеродных структур: С–нелегированный С-слой (С-09-23); С:Fe – однородно легированный слой (С:Fe- 09-08) и периодические структуры, выращенные при 200 и $400\text{ }^\circ\text{C}$ (С/Fe-10-20 и С/Fe-09-13).

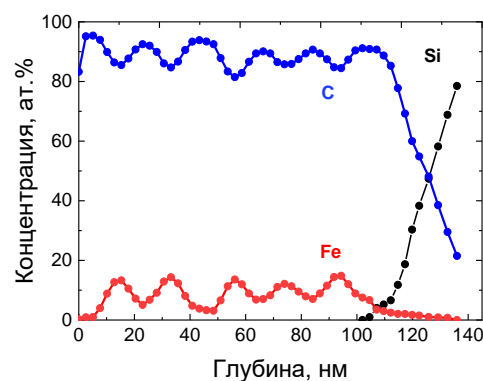


Рис.2. Профили распределений элементов в периодической структуре С/Fe-09-13, полученные методом РФЭС.

Однородно легированный железом С-слой (С:Fe-09-08), выращенный при $500\text{ }^\circ\text{C}$, показывает узкие пики G (1601 см^{-1}) и D (1382 см^{-1}), а также хорошо разрешимые пики 2D (2754 см^{-1}) и D+D' (2976 см^{-1}). Для этой структуры расчетное значение числа графеновых слоев в зерне равно 4–5, а размер зерна составляет 7 нм. В то же время снижение T_g до $200\text{ }^\circ\text{C}$ привело для периодической структуры С/Fe-10-20 к уширению пиков G и D практически в 2 раза и их значительному перекрытию, что свидетельствует об ухудшении структуры С-слоя. Введение железа при нанесении периодической структуры С/Fe-09-13 при $400\text{ }^\circ\text{C}$ не привело к ухудшению структуры по сравнению с нелегированным С-слоем (рис.1).

На рис.2 показаны профили компонентов периодической структуры С/Fe-09-13, нанесенной при $400\text{ }^\circ\text{C}$ на Si-подложку. Видна модуляция состава структуры в соответствии с технологическими условиями. Период составляет примерно 20 нм, а концентрация Fe в максимуме в среднем равна $\sim 13\text{ ат.}\%$. Отметим, однако, что в минимуме концентрация Fe не падает до 0 (составляет около 5 ат.%), а также до нуля не падает концентрация углерода в минимуме его распределения. Это, по-видимому, свидетельствует о диффузионных процессах при нанесении структуры. Возможен также вклад ионного перемешивания при травлении структуры пучком ионов Ar^+ (1 кэВ). Аналогичный вид имеет профиль элементов в периодической структуре С/Fe, нанесенной при $200\text{ }^\circ\text{C}$.

Магнитооптические свойства структур изучались в геометрии экваториального эффекта Керра (ТКЕ — transversal Kerr effect), состоящего в изменении интенсивности линейно-поляризованного света, отраженного от образца при его перемагничивании. Изменения ТКЕ проводились на магнитооптическом спектрометре динамическим методом в

диапазоне энергии квантов света от 0.5 до 3.5 эВ. На рис.3 приведен спектр ТКЕ для образца C:Fe-09-13 (периодическая структура, выращенная при 400 °С).

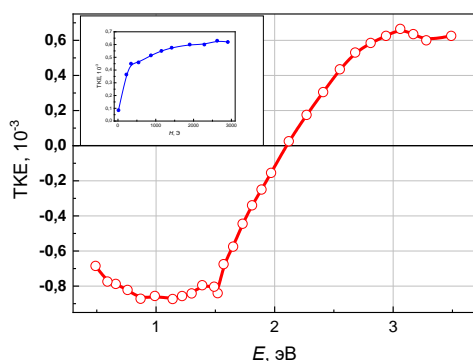


Рис.3. Спектральная и полевая при 3.17 эВ (вставка) зависимости ТКЕ для C:Fe-09-13. Температура = 300 К, поле $H = 3000$ Э.

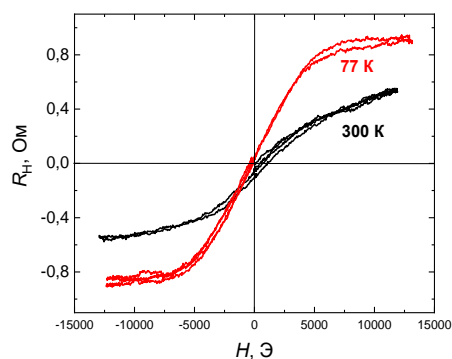


Рис.4. Магнитополевая зависимость R_H для C/Fe-09-13. Магнитное поле приложено перпендикулярно плоскости образцов.

При энергиях кванта 0.5 – 2 эВ величина ТКЕ – отрицательная, а при $E > 2$ эВ переходит в положительную область с максимумом около 3 эВ. Вклада от чистого Fe не наблюдается. В целом спектр ТКЕ структуры C:Fe-09-13 подобен спектру системы Co-C [1] при содержании кобальта порядка 55 %. Магнитополевая зависимость ТКЕ для образца C:Fe-09-13 (вставка на рис.3) также подобна зависимости для ферромагнитной системы Co-C. Спектр ТКЕ для структуры C:Fe-09-08, выращенной при 500 °С, подобен приведенному на рис.3. Спектр ТКЕ и магнитополевая зависимость для периодической структуры C/Fe, выращенной при 200 °С, значительно отличается от данных, приведенных на рис.3, наводя на предположение, что при 200 °С растет аморфная, или близкая к аморфной, структура.

На рис.4 приведена магнитополевая зависимость коэффициента Холла для периодической структуры C:Fe-09-13. Видно, что эффект Холла является аномальным, причем выход на линейный участок (на насыщение намагниченности) происходит при полях 7–8 кЭ. Разница в магнитополевых зависимостях ТКЕ (вставка на рис.3) и сопротивления Холла, вероятнее всего, обусловлена отличием в геометрии приложенного магнитного поля (в измерениях ТКЕ поле приложено вдоль поверхности). Намагниченность лежит в плоскости периодической структуры C/Fe и большая напряженность магнитного поля требуется для насыщения в эффекте Холла, а после снятия поля структура возвращается в исходное состояние без гистерезиса. Можем полагать, что легированные железом углеродные структуры, выращенные при температурах 400 – 500 °С являются ферромагнитными. Механизм магнетизма в структурах C/Fe требует дальнейшего исследования в связи с перспективами их применения в системах записи информации.

Список использованных источников:

1. Gan'shina E. et al. Magneto-optical properties of nanocomposites ferromagnetic-carbon // J. Magn. Magn. Mater. – 2019. – V.470. – P.135-138.
2. Ferrari A.C. Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron-photon coupling, doping and nonadiabatic effects // Sol. St. Comm. – 2007. – V.143, n.1-2. – P.47-57.

УДК 538.955

Влияние подслоя WTe_x на магнитные параметры пленок Pt/Co/MgO**Козлов А.Г.**

к.ф.-м. н., Доцент Департамента общей и экспериментальной физики ИНТиПМ ДВФУ

Намсараев Ж.Ж.

Младший научный сотрудник Лаборатории пленочных технологий ИНТиПМ ДВФУ

Шишелов А.Ф.

Инженер-исследователь Лаборатории пленочных технологий ИНТиПМ ДВФУ

Кузнецова М.А.

Инженер-исследователь Лаборатории пленочных технологий ИНТиПМ ДВФУ

Турпак А.А.

Инженер-исследователь Лаборатории пленочных технологий ИНТиПМ ДВФУ

Приходченко А.В.

Инженер-исследователь Лаборатории пленочных технологий ИНТиПМ ДВФУ

Огнев А.В.

д.ф.-м. н., Профессор Департамента общей и экспериментальной физики ИНТиПМ ДВФУ

Ванг И

Профессор Лаборатории спиновых квантовых материалов и устройств, Даляньский технологический университет

Аннотация. Поиск новых топологических материалов и исследование их влияния на магнитные и транспортные свойства магнитных наносистем, является одной из наиболее важных задач современной спинтроники и спинорбитроники. Теллурид вольфрама являясь полуметаллом Вейля II типа, используемый в качестве подслоя в многослойных пленочных системах структурах может стать одним из наиболее интересных материалов для существенного улучшения магнитотранспортных свойств ультратонких магнитных пленок. В частности, за счет особенностей электронной структуры и сильного спин-орбитального взаимодействия, от него ожидается многократное увеличение показателей эффективности передачи спин-орбитального углового момента (*spin-orbit torque*, SOT-эффект), который является одним из наиболее мощных инструментов для бесполевого управления намагниченностью. В данной работе изучалось влияние подслоя WTe_x на магнитные характеристики тонких поликристаллических пленок Pt/Co/MgO.

Ключевые слова: перпендикулярная магнитная анизотропия, спин-орбитальное взаимодействие, токоиндуцированное перемангничивание, полуметалл Вейля

Effect of WTe_x underlayer on the magnetic parameters of spectra of Pt/Co/MgO thin films**Kozlov A.G.**

Ph.D in Physics, Associate Professor of the Department of General and Experimental Physics, Far Eastern Federal University

Namsaraev Zh.

Junior researcher of the Laboratory of thin film technologies, Far Eastern Federal University

Shishelov A.F.

Research Engineer of the Laboratory of thin film technologies, Far Eastern Federal University

Kuznetsova M.A.

Research Engineer of the Laboratory of thin film technologies, Far Eastern Federal University

Turpak A.A.

Research Engineer of the Laboratory of thin film technologies, Far Eastern Federal University

Prihodchenko A.V.

Research Engineer of the Laboratory of thin film technologies, Far Eastern Federal University

Ognev A.V.

Doctor of Physics, Professor of the Department of General and Experimental Physics, Far Eastern Federal University

Wang Yi

Professor, Laboratory of Spin Quantum Materials and Devices, Dalian University of Technology

Annotation. *The search for new topological materials and the study of their influence on magnetic and transport properties of magnetic nanosystems is one of the most important tasks of modern spintronics and spinorbitronics. Tungsten telluride, being a Weyl type II half-metal used as a underlayer in multilayer film systems, can become one of the most interesting materials for significant improvement of magnetotransport properties of ultrathin magnetic films. Particularly due to the peculiarities of its electronic structure and strong spin-orbit interaction, it is expected to increase many times the spin-orbit angular momentum transfer efficiency (spin-orbit torque, SOT effect), which is one of the most powerful tools for field-free control of magnetization. In this work, the effect of the WTex sublayer on the magnetic characteristics of thin polycrystalline Pt/Co/MgO films was studied.*

Keywords: *Perpendicular magnetic anisotropy, spin-orbit interaction, current-induced magnetization switching, Weyl semimetals*

Исследование топологических материалов и их влияния на физические свойства наноструктур, является одной из наиболее важных задач современной спинтроники. Полуметаллы Вейля относятся к одному из наиболее перспективных типов топологических материалов, поскольку обладает сильной спин-орбитальной связью и нетривиальной зонной структурой с большой спиновой поляризацией, защищенной симметрией обращения времени как в поверхностном, так и в объемном состояниях. Все вышеуказанные свойства существенно

вливают на увеличение эффективности токоиндуцированного перемагничивания за счет SOT-эффекта [1 - 3].

Работа посвящена исследованию влияния подслоя полуметалла Вейля WTe_x на структурные, магнитные и магнитотранспортные свойства пленок Pt/Co/MgO для выявления наиболее оптимального состава для разработки устройств спинтроники. Экспериментальные образцы пленок были получены методом магнетронного распыления, с последующим отжигом при $T = 300^\circ\text{C}$ в течении 30 мин. Было получено две серии образцов со следующим составом функциональных слоев:

$\text{SiO}_2/\text{Pt}(2-10 \text{ нм})/\text{Co}(0,9 \text{ нм})/\text{MgO}(2 \text{ нм})/\text{SiO}_2(4 \text{ нм})$ и

$\text{SiO}_2/WTe_x(7 \text{ нм})/\text{Pt}(0-10 \text{ нм})/\text{Co}(0,9 \text{ нм})/\text{MgO}(2 \text{ нм})/\text{SiO}_2(4 \text{ нм})$.

Структура интерфейсов оценивалась методом рентгеновской рефлектометрии. В результате анализа рефлектометрических кривых были определены шероховатость интерфейсов и плотность материала. Элементный анализ методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии проводился с целью установления точного состава теллурида. Исследование магнитных свойств проводилось при помощи магнитооптического эффекта Керра, а также на основании петель магнитного гистерезиса, измеренных на вибромагнетометре. Все образцы демонстрируют сильную перпендикулярную анизотропию, энергия которой сильно зависит от прослойки Pt. Токовые измерения для исследования эффективности SOT проводились на Холл-структурах, сформированных методом фотолитографии. Эффективность SOT определялась по смещению петли аномального эффекта Холла, а также по исследованию второй гармоники.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда - Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований международными научными коллективами (проект № 23-42-00076)

Список использованной литературы:

1. Wang Y., Deorani P., Banerjee K., Koirala N., Brahlek M., Oh S., and Yang H. Topological Surface States Originated Spin-Orbit Torques in Bi_2Se_3 // *Physical Review Letters*, 2015. – № 114. – С. 257202.
2. MacNeill, D.; Stiehl, G. M.; Guimaraes, M. H. D.; Buhrman, R. A.; Park, J.; Ralph, D. C. Control of spin-orbit torques through crystal symmetry in WTe_2 /ferromagnet bilayers // *Nature Physics*, 2017. – № 13. – С. 300-305.
3. Xie, Q., Lin, W., Yang, B. Giant Enhancements of Perpendicular Magnetic Anisotropy and Spin-Orbit Torque by a MoS_2 Layer // *Advanced Materials*. – 2019. - № 31. – 21. – С.1900776.

УДК 537.622

Исследование влияния температуры отжига на взаимодействие Дзялошинского-Мории в ферримагнитной структуре Pt/CoGd/W**Намсараев Ж.Ж.**

Инженер-исследователь, Лаборатория пленочных технологий, ИНТИПМ, ДВФУ

Летушев М.Е.

Инженер-исследователь, Лаборатория пленочных технологий, ИНТИПМ, ДВФУ

Базров М.А.

Инженер-исследователь, Лаборатория пленочных технологий, ИНТИПМ, ДВФУ

Турпак А.А.

Инженер-исследователь, Лаборатория пленочных технологий, ИНТИПМ, ДВФУ

Антонов В.А.

Инженер-исследователь, Лаборатория пленочных технологий, ИНТИПМ, ДВФУ

Огнев А.В.

Доктор физико-математических наук, профессор департамента общей и экспериментальной физики, ИНТИПМ, ДВФУ

Самардак А.С.

Доктор физико-математических наук, профессор департамента общей и экспериментальной физики, ИНТИПМ, ДВФУ

Стеблий М.Е.

Кандидат физико-математических наук, доцент департамента общей и экспериментальной физики, ИНТИПМ, ДВФУ

***Аннотация.** Тонкослойные системы на основе ферримагнитных аморфных сплавов характеризуются наличием объемной перпендикулярной магнитной анизотропии и взаимодействия Дзялошинского-Мория (ВДМ). Такой набор свойств в сочетании с возможностью изменения результирующей намагниченности посредством изменения состава или температура, а также высокой восприимчивостью к воздействию спин-поляризованного тока, делает ферримагнитные среды подходящими для реализации устройств спинтроники. В данной работе проведено экспериментальное исследование полей ВДМ в структурах Pt/CoGd/W, в зависимости от температуры отжига. Показано, что величина поля может быть увеличена в два раза, по сравнению с неотожжённым образцом, что связано с миграцией ионов Gd к границе раздела с W.*

***Ключевые слова:** взаимодействие Дзялошинского-Мории, ферримагнетизм, состояние компенсации, токоиндуцированное переключение намагниченности*

Investigation of the effect of annealing temperature on the Dzyaloshinsky-Moriya interaction in the Pt/CoGd/W ferrimagnetic structure**Namsaraev Zh.Zh.**

Research Engineer, Thin Film Laboratory, ИТТМ, FEFU

Letushev M.E.

Research Engineer, Thin Film Laboratory, ИТТМ, FEFU

Bazrov M.A.

Research Engineer, Thin Film Laboratory, ИИТАМ, ФЕФУ

Turpak A.A.

Research Engineer, Thin Film Laboratory, ИИТАМ, ФЕФУ

Antonov V.A.

Research Engineer, Thin Film Laboratory, ИИТАМ, ФЕФУ

Ognev A.V.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of the Department of General and Experimental Physics, ИИТАМ, ФЕФУ

Samardak A.S.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of the Department of General and Experimental Physics, ИИТАМ, ФЕФУ

Stebliy M.E.

PhD in Physics and Mathematics, Associate professor of the Department of General and Experimental Physics, ИИТАМ, ФЕФУ

Annotation. *Thin-layer systems based on ferrimagnetic amorphous alloys are characterized by the presence of volumetric perpendicular magnetic anisotropy and the Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI). This set of properties, combined with the possibility of changing the resulting magnetization by changing the composition or temperature, as well as high susceptibility to the effects of spin-polarized current, makes ferrimagnetic media suitable for the implementation of spintronics devices. In this paper, an experimental study of DMI fields in Pt/CoGd/W structures, depending on the annealing temperature, is carried out. It is shown that the field value can be doubled compared to the unburned sample, which is associated with the migration of Gd ions to the interface with W.*

Keywords: *Dzyaloshinskii-Moriya interaction, ferrimagnetism, compensation state, current-induced magnetization switching*

В работе было изучено влияние температуры отжига на взаимодействие Дзялошинского-Мории в ферримагнитной структуре Pt(4 нм)/Co_{46%}Gd_{54%}(4 нм)/W(8 нм). Образец получен методом магнетронного распыления при комнатной температуре на окисленные кремниевые подложки Si/SiO₂ и обладает перпендикулярной магнитной анизотропией. Отжиг производился в вакууме в течение одной минуты для каждой температуры. Эффективное поле H_{DMI} , индуцируемое ВДМ, оценивалось по методу, основанному на изменении энергии доменных стенок в цилиндрических доменах [1]. Петли гистерезиса регистрировались путем разворачивания внешнего магнитного поля при различных углах наклона к нормали образца от 0° до 89° для определения коэрцитивной силы H_c . Таким образом внешнее магнитное поле можно представить как H_x – проекцию плоскостной компоненты внешнего поля, и как H_z – проекцию перпендикулярной компоненты внешнего поля. Для зарожденной доменной стенки с намагниченностью в направлении внешнего магнитного поля, сдвиг доменной стенки происходит при уменьшении энергии доменной стенки. На энергию доменной стенки может влиять деформация доменной стенки в области закрепления. Малые поля, приложенные к цилиндрическому домену, не могут преодолеть H_{DMI} , поэтому доменная стенка сохраняется. Когда плоскостная компонента внешнего магнитного поля H_x больше H_{DMI} – уменьшается энергия доменной стенки [1]. Таким образом, H_{DMI} можно извлечь из корреляции между энергией доменной стенки и H_x . Квадрат энергии доменной стенки линейно пропорционален полю зарождения H_n для этого измерения [2]. Чтобы оценить H_{DMI} , H_n строится как функция H_x , как показано на рис. 1.

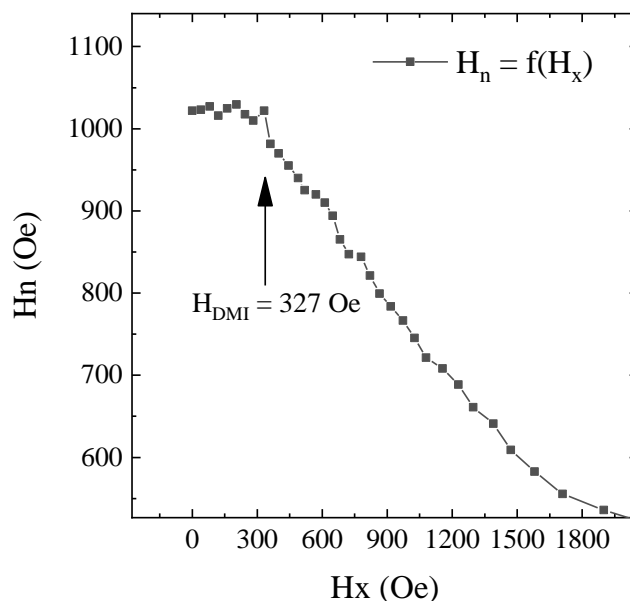


Рисунок 1. Поле зарождения H_n , от плоскостной компоненты H_x внешнего поля. H_{DMI} определяется из порога H_x , обозначенного черной стрелкой

Между 140 и 150 °С предполагаем асимптотическое стремление к бесконечности H_{DMI} и H_n и соответственно наличие состояния компенсации магнитных подрешёток ферримагнитного слоя. Это подтверждается изменением хиральности петель гистерезиса – черные закругленные стрелки – в исходном состоянии при комнатной температуре и до точки компенсации плёнка находится в состоянии Gd-rich, а после переходит в состояние Co-rich, когда в магнитных свойствах сплава CoGd начинает доминировать подрешетка Co. Еще одним подтверждением могут выступить исследования спин-орбитального крутящего момента в ферримагнитных сплавах CoTb [3]. Co имел аналогичную хиральность при доминировании в сплаве с учётом того, что для данного исследования, образец в перпендикулярном положении смотрел в противоположном положении, конфигурация измерительной системы была изменена для возможности использования метода измерения H_{DMI} .

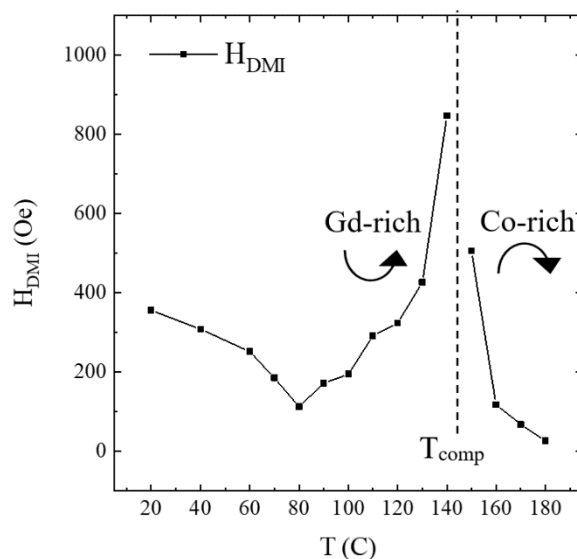


Рисунок 2. Зависимость эффективного поля H_{DMI} генерируемого ВДМ от температуры отжига T . Хиральность петель указывает на состояние Gd-rich – против часовой стрелки, и Co-rich – по часовой стрелке. T_{comp} – температура отжига, после которой наблюдается состояние магнитной компенсации.

Экспериментально показано, что для образца Pt(4)/Co₄₆Gd₅₄(4)/W(8) существует состояние компенсации с выравниванием магнитных подрешеток Co и Gd при некоторой температуре в диапазоне от 140 °С до 150 °С. H_{DMI} постепенно понижается, пока не достигает минимума при 80 °С, а затем увеличивается вплоть до точки компенсации. Вблизи точки компенсации в Gd-rich диапазоне, достигается максимальная величина H_{DMI}. А в Co-rich диапазоне вблизи точки компенсации значение H_{DMI} меньше и падает с дальнейшим повышением температуры отжига. При этом образец Pt(4)/Co₄₆Gd₅₄(4)/Pt(8) не реагирует на отжиг. Реакция на отжиг в случае образца Pt(4)/Co₄₆Gd₅₄(4)/W(8) может быть связана с миграцией атомов Gd к границе раздела ферромагнитного слоя с W. Также была определена эффективная сила D взаимодействия Дзялошинского-Мории. $D = 32,8 \text{ pJ/m}^2$ для исходного состояния образца.

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России по государственному заданию (проект № FZNS-2023-0012)

Список использованной литературы:

1. Kim S., Jang P.-H., Magnetic droplet nucleation with a homochiral Néel domain wall// Phys. Rev. B – 2017 – v.95 – p. 220402
2. S. Pizzini, J. Vogel, S. Rohart, et al, Chirality-Induced Asymmetric Magnetic Nucleation in Pt/Co/AlOx Ultrathin Microstructures// Phys. Rev. Lett. – 2014 – v.113, – p. 047203.
3. Steblyy M. E. Bazrov M.A., Namsaraev Zh. Zh. et al, Nonuniform Current-Driven Formation and Displacement of the Magnetic Compensation Point in Variable-Width Nanoscale Ferrimagnets// ACS Appl. Mater. Interfaces – 2023 – v. 15 – 34 –p. 40792–40798

УДК 537.8

Влияние технических условий синтеза на магнетосопротивление плёнок Cd_3As_2 при температурах подложки от 300 до 450 К**Нечушкин Ю.Б.**

аспирант кафедры ТМЭ НИТУ МИСИС

Маренкин С.Ф.

д.х.н, гл. науч. сотр. ИОНХ РАН

***Аннотация.** Арсенид кадмия Cd_3As_2 является перспективным материалом для оборудований электроники и, в частности, спинтроники, ввиду аномально высокой подвижности заряда, наличия сверхпроводимости и уникального инвертированного энергетического спектра. Такие свойства дают возможность использования тонких плёнок полуметалла Cd_3As_2 в качестве датчиков магнитного поля, которые используются в различных областях, начиная от машиностроения, заканчивая медициной и военно-оборонного комплекса. Поэтому исследование свойств тонких кристаллических плёнок Cd_3As_2 является актуальной задачей в наши дни. И исследование электромагнитных свойств плёнок путём изменения технологических условий синтеза является темой данной работы.*

***Ключевые слова:** Cd_3As_2 , магнетосопротивление, тонкие плёнки*

Effect of technical conditions of synthesis on magnetoresistance of Cd_3As_2 films at substrate temperatures from 300 to 450 K**Nechushkin Yu.B.,**

PhD student of the Department of Technology of Electronic Materials, National University of Science and Technology MISIS

Marenkin S.F.

Doctor of chemical Sciences, Principal Researcher, Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of Russian Academy of Sciences

***Annotation.** Cadmium arsenide Cd_3As_2 is a promising material for electronics devices and, especially spintronics, due to its abnormally high charge mobility, superconductivity, and unique inverted energy spectrum. Such properties make it possible to use thin films of semimetal Cd_3As_2 as magnetic field sensors, which are used in various fields ranging from automotive industry to medicine and military-industrial complex. Therefore, the study of the properties of Cd_3As_2 thin crystalline films is an urgent task nowadays. And the study of electromagnetic properties of films by changing the technological conditions of synthesis is the subject of this work.*

***Keywords:** Cd_3As_2 , magnetoresistance, thin films*

Дираковский и Вейлеровский полуметалл Cd_3As_2 , несмотря на долгую историю исследований, продолжает привлекать внимание ученых всего мира. Причиной этому служит наличие у Cd_3As_2 таких полезных свойств как аномально высокая подвижность заряда, наличие сверхпроводимости и инвертированного энергетического спектра. [1,2] Это делает арсенид кадмия одним из перспективных материалов, которые используются в быстроразвивающейся современной области науки и техники – спинтроники. Ввиду своих уникальных свойств арсенид кадмия может быть использован как датчик магнитного поля.

[3,4] Исследование электромагнитных свойств в зависимости от температуры подложек во время синтеза является темой данной работы.

Из высокочистых элементов Cd и As в стехиометрической пропорции был получен поликристалл Cd_3As_2 . Затем методом химических транспортных реакций полученный материал был трижды пересублимирован, что позволило эффективно удалить примеси [5]. Далее полученный монокристалл арсенида кадмия был измельчен и использовался как материал для напыления плёнок. Предварительно был произведен расчет толщин плёнок. Тонкие пленки арсенида кадмия синтезированы методом вакуумно-термического напыления. Напыление было произведено при температурах кремниевых подложек 25, 75, 125 и 175 °С.

Идентификацию образцов (рис.1а) осуществляли методом РФА и СЭМ. Установлено, что увеличение температуры подложки приводит к повышению кристалличности плёнок и отражается на их электромагнитных характеристиках (рис.1б). Рост размера кристаллитов при увеличении температуры подложек был подтверждён методом АСМ.

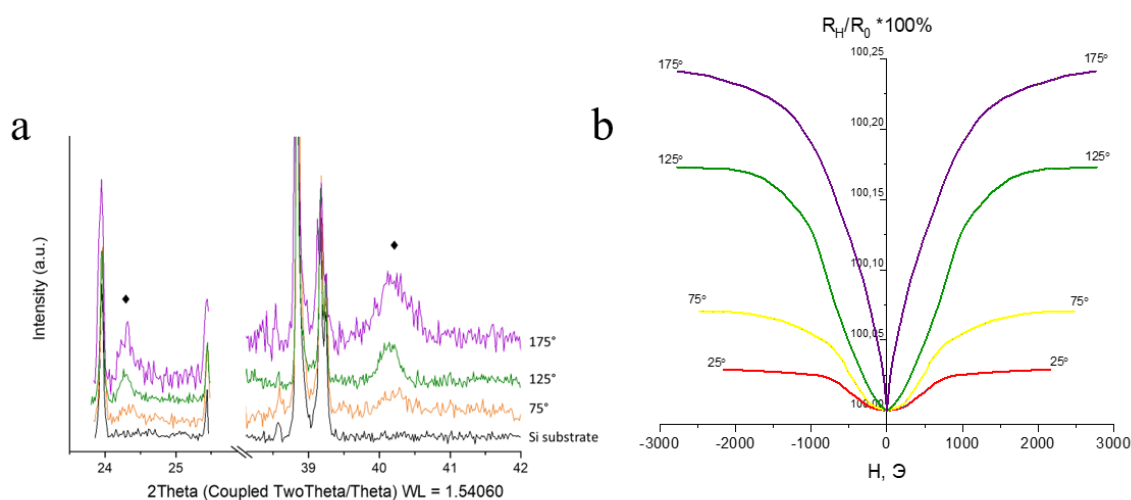


Рис. 1. а) Рентгенограмма плёнок Cd_3As_2 на подложках при разных температурах (75, 125 и 175 °С); б) влияние величины магнитного поля на сопротивление плёнок Cd_3As_2

Работа была выполнена благодаря финансовой поддержке РФФ № 21-73-20220.

Список использованной литературы:

1. Ril A.I., Marenkin S.F., Magnetometric Studies of Composite Alloys of the Cd_3As_2 -MnAs System// Russian Journal of Inorganic Chemistry – 2021– 66(10), – 1544–1548.
2. Suslov A.V., Davydov A.B., Oveshnikov L.N., et al, Observation of subkelvin superconductivity in Cd_3As_2 thin films. //Physical ReviewB – 2019 – 99(9) – 094512
3. Ril' A.I., Marenkin S.F. Cadmium arsenides: structure, synthesis of bulk and film crystals, magnetic and electrical properties (Review). //Russian Journal of Inorganic Chemistry, – 2021– 66(14), – p.2005–2016.
4. Sankar, R., Neupane, M., Xu, S., et al, Large single crystal growth, transport property and spectroscopic characterizations of three-dimensional Dirac semimetal Cd_3As_2 . //Scientific Reports, –2015 – 5(1). – 12966
5. Binnewies M., Glaum R., Schmidt M., Schmidt P. Chemical Vapor Transport Reactions – A historical review. //Zeitschrift Für Anorganische Und Allgemeine Chemie, – 2013– 639(2), – p.219–229.

УДК 537.611.4

Влияние типа интеркаляции на образование спинового стекла в семействе политипов Fe-допированного TaS₂ (Se₂)

Овчинников А.С.

д.ф.м.н., профессор, Институт естественных наук и математики,
Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Бострем И.Г.

к.ф.м.н., доцент, Институт естественных наук и математики,
Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Синицын Вл.Е.

к.ф.м.н., доцент, Институт естественных наук и математики,
Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Носова Н.М.

м.н.с., Институт естественных наук и математики,
Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Баранов Н.В.

д.ф.м.н., профессор, Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург,
Россия

***Аннотация.** Мы предлагаем объяснение на основе модели Блюма-Капеля, почему некоторые слоистые соединения дихалькогенидов переходных металлов TaS₂(Se₂) интеркалированных железом демонстрируют поведение спинового стекла, в то время как другая группа этого семейства проявляет парамагнетизм при низких температурах. В этих материалах, примесные атомы железа либо замещают атомы тантала, теряя свои магнитные моменты, либо располагается между слоями TaS₂(Se₂), сохраняя магнитные моменты. Модель Блюма-Капеля позволяет ввести химический потенциал, контролирующий баланс интеркалированных элементов обоих типов. Теория Гатака-Шеррингтона спин-стеклового поведения этой модели предсказывает существование трехкритической точки, означающей, что существует пороговая концентрация ионов железа, сохраняющих свои магнитные моменты, выше которой происходит спин-стеклоное упорядочение, а ниже данного порога ионы железа ведут себя как независимые парамагнитные центры. Построены зависимости магнитной восприимчивости от температуры и намагниченности от поля, чтобы выявить особенности модели, связанные с переменным содержанием ионов железа в высокоспиновом состоянии. Специфическая кристаллическая структура слоистых дихалькогенидов переходных металлов дает возможность увеличить концентрацию ионов с ненулевыми магнитными моментами путем коинтеркаляции некрамеровских 3d-ионов в ван-дер-ваальсовы щели. Этот процесс может вызвать спин-стеклоное упорядочение в изначально парамагнитном политипе TaS₂(Se₂) допированным железом.*

Ключевые слова: спиновые стекла, дихалькогениды переходных металлов

Influence of the type of intercalation on spin-glass formation in the Fe-doped TaS₂ (Se₂) polytype family

Ovchinnikov A.S.

Dr. Sci., professor, Institute of Natural Sciences and Mathematics,
Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Bostrem I.G.

PhD., associate professor, Institute of Natural Sciences and Mathematics,
Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Sinitsyn V.I.

PhD., associate professor, Institute of Natural Sciences and Mathematics,
Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Nosova N.M.

Junior researcher, Institute of Natural Sciences and Mathematics,
Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Baranov N.V.

Dr. Sci., professor, N.M. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Division,
Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Annotation. We suggest an explanation based on the Blume-Capel model of why some layered compounds of the iron-intercalated transition metal dichalcogenides $TaS_2(Se_2)$ exhibit spin-glass behavior, while another group of this family demonstrates low-temperature paramagnetism. In these materials, the doped Fe atoms either substitute the Ta atoms with losing their magnetic moments or sit between the $TaS_2(Se_2)$ layers keeping their spin states. The Blume-Capel model allows us to introduce a chemical potential to control a balance of the intercalated elements of both types. The Ghatak-Sherrington theory of spin-glass behavior of this model predicts an existence of a tricritical point that means that there is a concentration threshold of Fe ions retaining their magnetic moments, above which spin-glass ordering occurs. Below the threshold, Fe ions behave as independent paramagnetic centers. We build temperature dependencies of magnetic susceptibility and field dependencies of magnetization to highlight specific features of the model related with a variable content of Fe ions in the high-spin state. A specific crystal structure of the layered transition metal dichalcogenides gives an opportunity to increase the concentration of ions with nonzero magnetic moments by co-intercalating non-Kramers 3d ions into the van der Waals gaps. This process may trigger spin-glass ordering in the initially paramagnetic Fe-doped $TaS_2(Se_2)$.

Keywords: spin glasses, transition metal dichalcogenides

Синтез, оптические, электрические и магнитные свойства трехмерных слоистых дихалькогенидов переходных металлов широко исследовались в течение нескольких десятилетий [1]. Интеркалаты переходных металлов первого ряда M_xTX_2 ($M = V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni$) представляют особый интерес, поскольку при определенных концентрациях (в основном, при $x > 0.20$), локализованные моменты интеркалированных 3d-ионов, могут проявлять различные типы магнитного упорядочения. Однако, при низких концентрациях 3d-ионов многие трехмерные дихалькогениды переходных металлов проявляют поведение спинового стекла или кластерного стекла. Примерами M_xTX_2 материалов, в которых достаточно четко проявляются эффекты спинового стекла, являются интеркалированные железом TiS_2 и $TiSe_2$. Поведение спинового стекла объясняется наличием неупорядоченных

межслойных ионов Fe^{2+} , связанных через механизм осциллирующего РККИ-обмена. В отличие от титановых комплексов, где интеркаляция происходит исключительно за счет внедрения Fe-ионов в щель между слоями, ситуация для $TaS_2(Se_2)$ не такая однозначная, поскольку ионы железа могут быть случайным образом распределены либо на позициях Ta, либо между слоями $TaS_2(Se_2)$ (рис. 1).

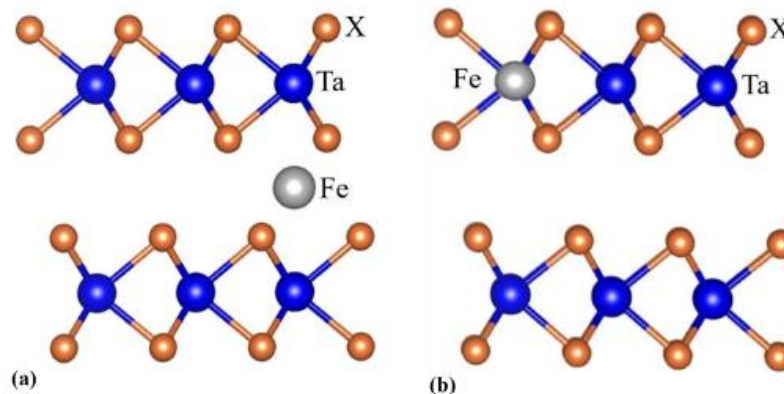


Рис. 1. Типы интеркаляции железа в слоистую систему TaX_2 ($X=S, Se$): (a) внедрение; (b) замещение.

В частности, было обнаружено поведение спинового стекла в некоторых политипах, а именно, $2H-Fe_xTaSe_2$ и $4Hb-Fe_xTaS_2$, однако их аналоги, $2H-Fe_xTaS_2$ и $4Hb-Fe_xTaSe_2$, не демонстрируют такого поведения [2].

Традиционно, спин-стекольные явления в дихалькогенидах переходных металлов объясняются с помощью теории с фиксированным количеством внедренных примесей. Однако, такой подход оставляет открытым вопрос, почему та часть ионов железа, которые внедрены между слоями в немагнитных материалах $TaS_2(Se_2)$ и сохраняют свои магнитные моменты, не формируют спинового стекла, а ведут себя как набор независимых магнитных примесей, восприимчивость которых следует парамагнитному закону Кюри.

В нашем исследовании мы обращаемся к этим вопросам в рамках модели Блюма-Капеля (BC), которая активно рассматривалась в 1960-х годах [3], и обобщение которой для спиновых стекол впервые было дано Гатаком и Шеррингтоном (GS) [4]. Мы предлагаем интерпретировать член гамильтониана BC-модели, который в GS-теории был отнесен к расщеплению состояний примесного иона кристаллическим полем, как действие химического потенциала, управляющего балансом между интеркалированными ионами железа с магнитным моментом и без него [5]. Особенной чертой BC-модели является наличие фазового перехода первого рода. В GS-теории это проявляется в виде существования трикритической точки, в которой линия фазовых переходов второго рода в состояние спинового стекла обрывается, когда расщепление кристаллического поля превышает некоторое пороговое значение, и появляется "низкотемпературный парамагнетизм" (синглетная фаза). В нашем случае это означает, что существует порог концентрации интеркалированных ионов железа, сохраняющих свои моменты, выше которого оказывается выгодным спин-стекольный порядок (рис. 2).

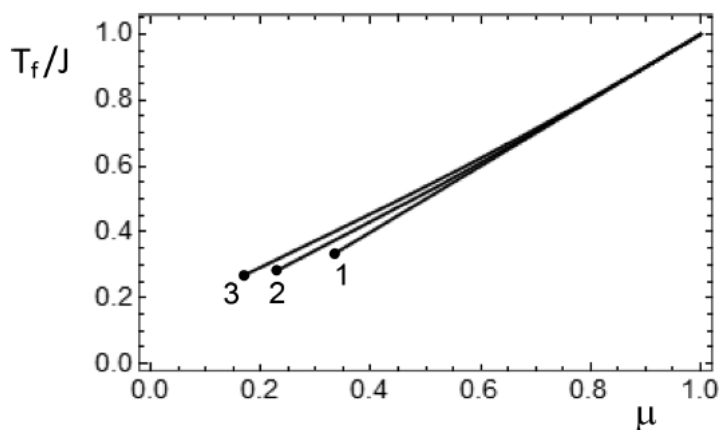


Рис. 2. Граница, разделяющая фазу спинового стекла и синглетную парамагнитную фазу в нулевом магнитном поле, как функция средней концентрации интеркалированных ионов μ , сохраняющих свои магнитные моменты. Рассматриваются случаи различного среднеквадратичного отклонения химического потенциала, связанные с нестехиометрией соединения: (1) 0.0; (2) 0.3; (3) 0.5. Черные кружки обозначают трикритические точки. Температура спин-стеклового перехода T_f определена в единицах среднеквадратичного отклонения обменного интеграла J .

Это может объяснить экспериментально наблюдаемое разделение $\text{TaS}_2(\text{Se}_2)$ комплексов на немагнитные с внедренными парамагнитными примесями и спин-стеклоподобные системы. Кроме того, мы обсуждаем способ активации спин-стеклоподобного поведения путем добавления некрамеровских 3d-ионов (например, Cr^{3+} , Mn^{2+} , Co^{2+}) в межслоевую ван-дер-ваальсову щель. Их совместная интеркаляция с ионами железа может вызвать спин-стеклоподобный порядок в изначально немагнитных соединениях, что подтвердило бы правильность ВС-модели для политипных комплексов $\text{Fe}_x\text{TaS}_2(\text{Se}_2)$.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (грант № 22-13-00158).

Список использованных источников:

1. Wilson J.A., Yoffe A.D. The transition metal dichalcogenides discussion and interpretation of the observed optical, electrical and structural properties // *Advances in Physics*. – 1969. – Vol. 18. Iss. 73. – P. 193–335.
2. Hillenius S.J., Coleman R.V., Domb E.R., and Sellmyer D.J. Magnetic properties of iron-doped layer-structure dichalcogenides // *Physical Review B*. – 1979. – Vol. 19. – P. 4711–4722.
3. Capel H.W. On the possibility of first-order phase transitions in Ising systems of triplet ions with zero-field splitting // *Physica* – 1966. – Vol. 32. – P. 966–988.
4. Ghatak S.K., Sherrington D. Crystal field effects in a general S Ising spin glass // *Journal of Physics C* – 1977. – Vol. 10. – P. 3149–3156.
5. Ovchinnikov A.S., Bostrem I.G., Sinitsyn V.I.E., Nosova N.M., Baranov N.V. Influence of the type of intercalation on spin-glass formation in the Fe-doped $\text{TaS}_2(\text{Se}_2)$ polytype family // *Physical Review B*. – 2024. – Vol. 109. – Id. 054403.

УДК 533.924; 538.955; 538.975

**Влияние метода обработки поверхности на характеристики
эпитаксиальных плёнок феррит-гранатов****Сыров А.А.**

аспирант, ФТИ ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»

Томилин С.В.

к.ф.-м.н., доцент, ФТИ ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»

Семук Е.Ю.

к.ф.-м.н., младший научный сотрудник, ФТИ ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»

Османов С.В.

аспирант, ФТИ ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»

Бержанский В.Н.

д.ф.-м.н., профессор, ФТИ ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»

***Аннотация.** В работе представлены экспериментальные результаты исследования влияния постростовой обработки тонких монокристаллических плёнок катион-замещённых феррит-гранатов на их структурные и магнитные характеристики. Показано, что кислотное травление поверхности монокристаллических гранатов по ряду показателей уступает в качестве обработки поверхности методу ионно-плазменного травления. При исследовании морфологии поверхностного слоя и спектров ферромагнитного резонанса в эпитаксиальной плёнке феррит-граната показано, что использование в качестве травителя ортофосфорной кислоты приводит к снижению шероховатости поверхности несколько хуже, чем травление ускоренными ионами аргона. При этом кислотное травление не обеспечивает качественное сохранение магнитных характеристик по сравнению с ионно-плазменным методом обработки.*

***Ключевые слова:** ионное травление, кислотное травление, феррит-гранат, ферромагнитный резонанс, профиль края, маскирование*

**The influence of the surface treatment method on characteristics of epitaxial
iron-garnet films****Syrov A.A.**PhD student, Institute of Physics and Technology, V.I. Vernadsky Crimean Federal
University**Tomilin S.V.**

PhD, Institute of Physics and Technology, V.I. Vernadsky Crimean Federal University

Semuk E.Yu.

PhD, Institute of Physics and Technology, V.I. Vernadsky Crimean Federal University

Osmanov S.V.PhD student, Institute of Physics and Technology, V.I. Vernadsky Crimean Federal
University

Berzhansky V.N.

PhD Professor, Institute of Physics and Technology, V.I. Vernadsky Crimean Federal University

Annotation. *The paper presents experimental results of investigation the effect of post-groving etching on structural and magnetic characteristics of thin single-crystal cation-substituted iron-garnet films. It is shown that acid etching of the surface of single-crystal garnets is inferior in the quality of surface treatment to the ion-plasma etching method at some parameters. The study of surface layer morphology and ferromagnetic resonance spectra in the iron-garnet epitaxial film shows that the use of orthophosphoric acid as an etchant leads to a decrease in surface roughness some worse, than the etching by accelerated ions. In this case the acid etching, does not ensure qualitative preservation of magnetic characteristics in comparison with the ion-plasma treatment method.*

Keywords: *ion etching, acid etching, iron-garnet, ferromagnetic resonance, edge profile, masking*

Эпитаксиальные плёнки феррит-гранатов (ЭПФГ), при добавлении редкоземельных компонентов, сравнительно давно и успешно широко применяются при разработке и изготовлении различных технических устройств. В последние десятилетия большой научный интерес направлен на применение ЭПФГ при создании высокочувствительных датчиков магнитного поля [1–3]. В том числе гранатовые плёнки хорошо себя зарекомендовали при изготовлении устройств и элементов на их основе для термомагнитной записи информации [1], при топографировании области и магнитооптической визуализации неоднородных магнитных полей [2].

Чрезвычайно важная прикладная задача магнитооптики и магнитной сенсорики – это повышение эффективности использования ЭПФГ, поэтому одним из направлений решения данной проблемы является поверхностная обработка синтезируемых плёнок. Это может быть необходимо как в качестве постростовой обработки (удаление загрязнений, адсорбированных поверхностью примесей и слоёв с иными свойствами), так и для формирования заданного профиля (снижение краевых напряжений, форм-фактор и т.д.) [4, 5]. Также возможно применение методики последовательного травливания слоёв эпитаксиальной плёнки для исследования внутренней структуры и размерных зависимостей магнитных эффектов. Соответственно большой интерес представляет изучение влияния методов постростовой обработки на свойства таких плёнок, а следовательно, при проведении комплексных исследований для отработки технологических возможностей изготовления эпитаксиальных пленок с заданными свойствами требуется выбор оптимального метода обработки поверхности.

В роли объекта исследования выступают плёнки ЭПФГ толщиной 2.1 мкм, выращенные на монокристаллических подложках гадолиний-галлиевого граната $Gd_3Ga_5O_{12}$ (ГГГ), толщиной 500 мкм с ориентацией поверхности (111). Монокристаллические плёнки феррит-граната состава $(YLa)_3(FeGaAl)_5O_{12}$ были получены с применение технологии эпитаксиальной кристаллизации из пересыщенного раствор-расплава, содержащего гранатообразующие, легирующие и согласующие элементы в легкоплавком растворителе $PbO-Ba_2O_3$. В качестве постростовой обработки для удаления поверхностных слоёв синтезированных плёнок, а также для формирования структур с определённой планарной конфигурацией и пространственным профилем (например, для уменьшения шумов ферромагнитного резонанса возникающих с образованием магнитоэлектронных волн и наличием краевых дефектов) применялась ионно-плазменная и кислотная обработка поверхности ЭПФГ.

Поскольку качество поверхности и структурное совершенство ЭПФГ, в том числе сформированное в процессе постростовой обработки, в значительной степени оказывает влияние на эффективность их практического применения, было исследовано влияние кислотного и ионного травления на структуру поверхности плёнок. Анализ морфологии ЭПФГ осуществлялся при помощи сканирования атомно-силовым микроскопом при послойном травлении поверхности. Сравнение полученных результатов проводилось по нескольким параметрам, а именно: максимальный разброс рельефа по высоте A_{max} и среднеквадратичное отклонения от среднего значения RMS (по сути, средняя шероховатость). На рис. 1 показано изменение параметров шероховатости поверхности ЭПФГ при послойном травлении различными методами. По оси абсцисс показана толщина удалённого слоя (глубина травления).

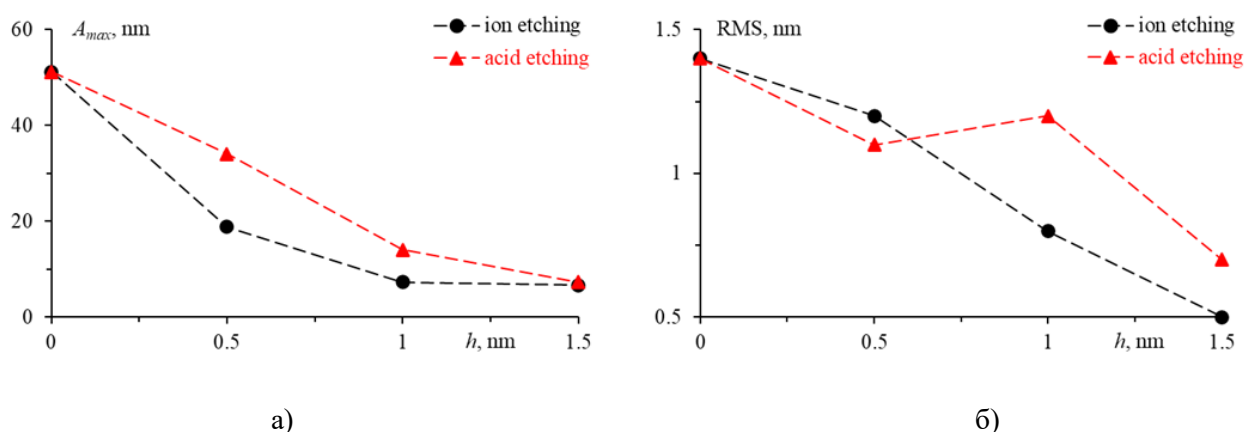


Рис. 1. Изменение параметров шероховатости поверхности ЭПФГ при послойном травлении различными методами: а – параметр A_{max} ; б – параметр RMS.

Таким образом, видно, что при послойном ионном травлении эпитаксиальной плёнки наблюдается значительное уменьшение параметров шероховатости поверхности. При этом метод ионного травления даёт в среднем меньшее значение параметров шероховатости, по сравнению с методом кислотного травления.

Для анализа влияния травления на магнитные свойства ЭПФГ были выполнены исследования особенностей ферромагнитного резонанса (ФМР). На рис. 2 представлены ФМР спектры при направлении внешнего поля параллельно нормали к плёнке (перпендикулярный резонанс).

При изменении планарной геометрии образца ЭПФГ, как по форме (с квадрата на диск), так и по размеру (диаметр диска), в спектре ФМР наблюдаются изменения, вызванные эффективностью возбуждения магнитостатических волн по сравнению с основной модой. При травлении через маску метод постростовой обработки несущественно влияет на вид спектра, поскольку форма и профиль получаемых структур практически одинаковы как для ионного, так и для кислотного травления.

При послойном удалении материала ЭПФГ применение ионно-плазменного травления даёт возможность существенно снизить зашумление резонансных сигналов ФМР по сравнению с использованием кислотного метода травления, что обусловлено параметрами шероховатости поверхности.

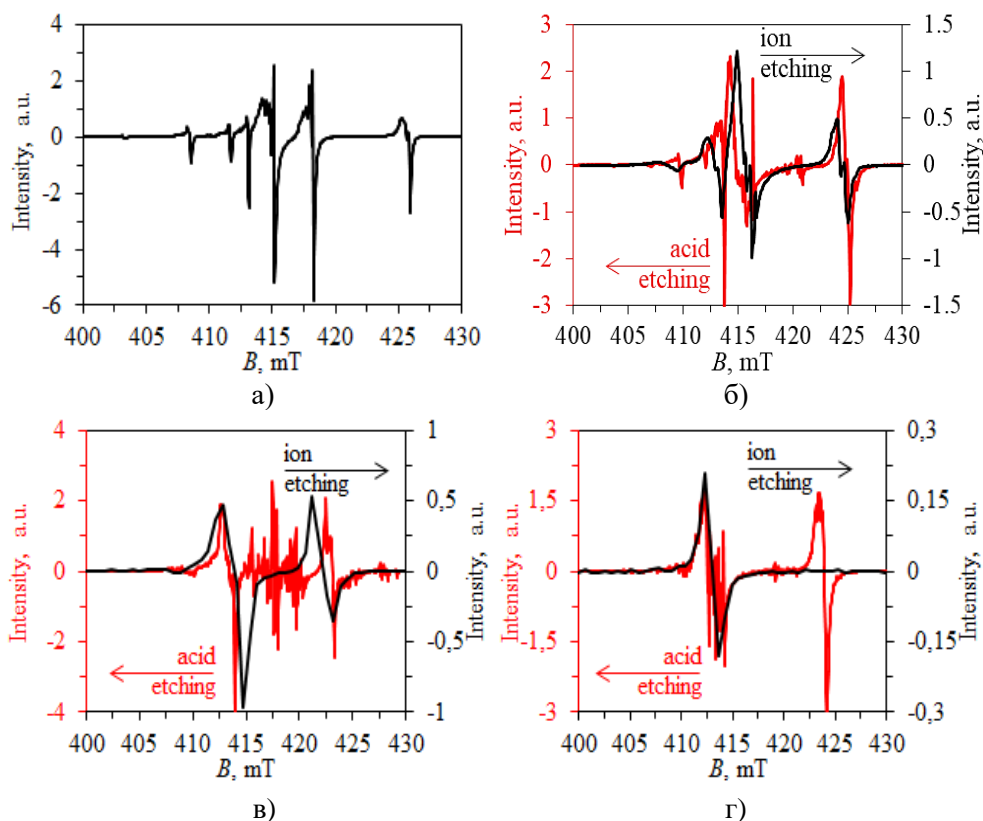


Рис. 2. Резонансные кривые ФМР (плёнка $(\text{BiY})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$, $h = 2.1$ мкм) для перпендикулярного резонанса (красная линия – кислотное травление, чёрная линия – ионное травление): а – до обработки; б – $h = 1.6$ мкм; в – $h = 1.1$ мкм; г – $h = 0.6$ мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 19-72-20154, <https://rscf.ru/project/19-72-20154/>

Список использованных источников:

1. Вишневикий В.Г., Михерский Р.М., Дубинко С.В. Отображение неоднородных магнитных полей пленками феррит-гранатов // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72. – № 2. – С. 96–98.
2. Ветошко П.М., Гусев Н.А., Чепурнова Д.А., Самойлова Е.В., Звездин А.К., Коротаева А.А., Белотелов В.И. Магнитомодуляционный сенсор магнитного поля на базе пленок феррита-граната для магнитокардиографических исследований // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42. – № 16. – С. 64–71.
3. С.В. Левый, Агалиди Ю.С., Вишневикий В.Г. Магнитооптические средства технической защиты информации // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 1998. – Т. 41. – № 8. – С. 74–80.
4. Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах / Справочник / под ред. Н.Н.Евтихиева, Б.Н.Наумова. – М.: Радио и связь, 1987. – 488 с.
5. Лисовский Ф.В. Физика цилиндрических магнитных доменов. – М.: Сов. радио, 1979. – 192 с.

УДК 537.622.5

Механизмы сложного температурного поведения обменного смещения в поликристаллических плёнках Ni-Mn/Fe₂₀Ni₈₀**Москалев М.Е.**

к.ф.-м.н., научный сотрудник, институт естественных наук и математики УрФУ

Кудюков Е.В.

к.ф.-м.н., научный сотрудник, институт естественных наук и математики УрФУ

Кравцов Е.А.д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО
РАН**Горьковенко А.Н.**

к.ф.-м.н., научный сотрудник, институт естественных наук и математики УрФУ

Девятериков Д.И.

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

Макарова М.В.к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО
РАН**Степанова Е.А.**

к.ф.-м.н., заведующий сектором, институт естественных наук и математики УрФУ

Лепаловский В.Н.

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, институт естественных наук и математики УрФУ

Васьковский В.О.

д.ф.-м.н., научный сотрудник, институт естественных наук и математики УрФУ

***Аннотация.** В работе дан подробный анализ физических механизмов, ответственных за немонотонное температурное поведение поля обменного смещения и коэрцитивной силы в тонких поликристаллических плёнках с антиферромагнитным слоем Ni-Mn и ферромагнитным слоем Fe₂₀Ni₈₀.*

***Ключевые слова:** антиферромагнетик, спиновое стекло, структурное преобразование, температура блокировки*

Mechanisms of the complex temperature behavior of exchange bias in polycrystalline Ni-Mn/Fe₂₀Ni₈₀ films**Moskalev M.E.**PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural
Federal University**Kudyukov E.V.**

PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural

Federal University

Kravtsov E.A.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Gorkovenko A.N.

PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University

Devyaterikov D.I.

PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Makarova M.V.

PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Stepanova E.A.

PhD in Physics and Mathematics, Head of Sector, Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University

Lepalovskij V.N.

PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University

Vaskovskiy V.O.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University

Annotation. *The paper provides a detailed analysis of the physical mechanisms responsible for the non-monotonic temperature behavior of the exchange displacement field and coercive force in thin polycrystalline films with the antiferromagnetic Ni-Mn layer and the ferromagnetic Fe₂₀Ni₈₀ layer.*

Keywords: *antiferromagnet, blocking temperature, spin glass, structural transformation*

Спустя шестьдесят восемь лет после своего открытия эффект обменного смещения остается одной из неразгаданных загадок магнетизма, поскольку ни одна модель не может успешно объяснить все его особенности [1,2]. Эффект, широко используемый в микроэлектронике, от датчиков до устройств магнитной памяти, проявляется в сдвиге петли гистерезиса ферромагнитного слоя пленки ферромагнетик/антиферромагнетик на величину поля обменного смещения H_{EX} . Существующие модели, описывающие обменное смещение, включают модель спинового стекла, предполагающую существование спин-стекольной фазы на межслойном интерфейсе для объяснения существенного увеличения H_{EX} при низких температурах [3,4], и поликристаллическую модель, объясняющую плавное уменьшение H_{EX} с ростом температуры вследствие существования распределения по размеру кристаллитов в антиферромагнитном слое [5]. В данной работе, комбинируя современные модели эффекта обменного смещения с методами магнитометрии и рентгеновской дифрактометрии, даётся объяснение сложного температурного поведения данного эффекта в поликристаллических

плёнках Ni-Mn/Fe₂₀Ni₈₀, полученных методом магнетронного распыления.

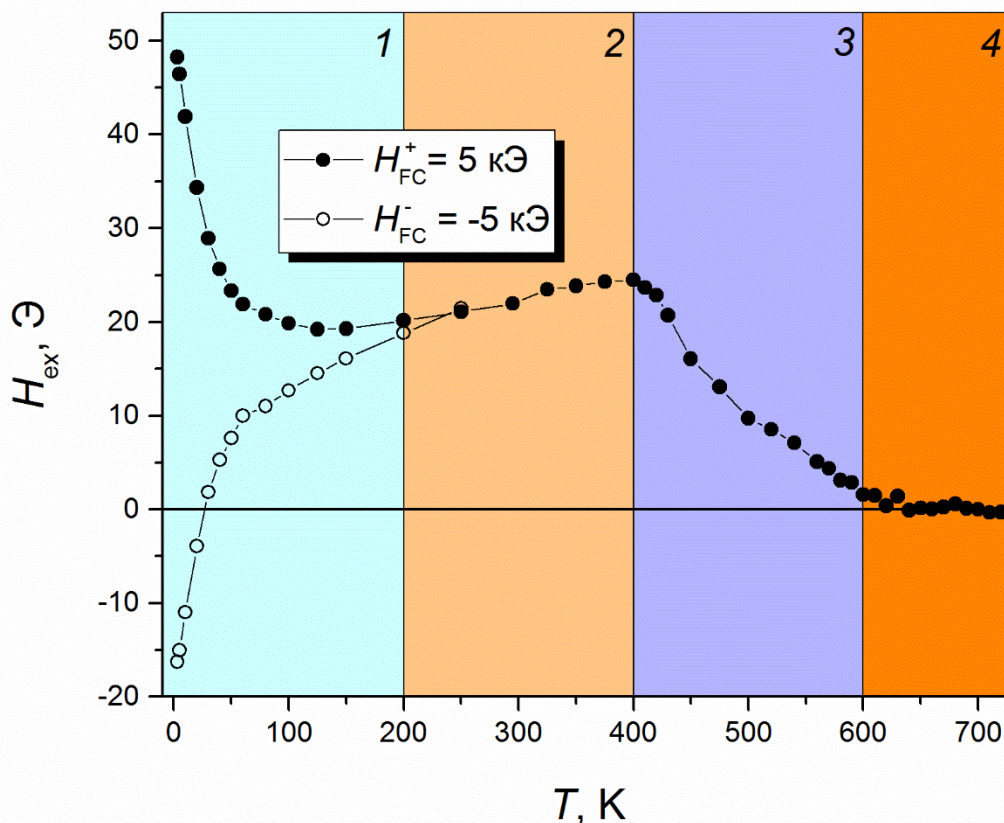


Рис. 1. Температурная зависимость поля обменного смещения H_{ex} образца Ni₂₉Mn₇₁ (20 нм)/Fe₂₀Ni₈₀ (40 нм), отожжённого при 570 К в течение 1 ч. На графике присутствуют две кривые, характеризующие зависимость $H_{ex}(T)$ ниже комнатной температуры, полученные при охлаждении образца до температуры $T = 3$ К в поле $H_{FC}^+ = 5$ кЭ и $H_{FC}^- = -5$ кЭ. Цифрами 1 – 4 обозначены участки, характеризующиеся различными доминирующими механизмами, ответственными за наблюдаемое поведение эффекта обменного смещения

На рис. 1 представлена температурная зависимость H_{EX} образца Ni-Mn (20 нм)/Fe-Ni (40 нм) в температурном диапазоне от 3 К до 5 К. Плёнки подвергались отжигу в течение 1 ч при температуре 570 К с целью образованию антиферромагнитной фазы θ -NiMn [6]. Установлено, что в каждом диапазоне температур, обозначенном цифрой, за наблюдаемую картину ответственны различные механизмы или их комбинации. Первоначальный спад H_{EX} при температурах ниже 100 К (1) обусловлен существованием низкотемпературной спин-стекольной межслойной фазы, существование которой подтверждается различием температурных зависимостей, полученных при охлаждении в положительном и отрицательном магнитных полях (рис. 1). Следующий затем рост H_{EX} в диапазоне температур от 150 К до 400 К (2) является результатом роста эффективной константы анизотропии антиферромагнитного θ -NiMn, а последующее снижение H_{EX} (3) обусловлено поликристаллической природой антиферромагнитного слоя. Наконец, необратимое исчезновение эффекта обменного смещения в образцах с закрепляющим слоем Ni-Mn при температурах ≈ 600 К (4) является следствием декомпозиции фазы θ -NiMn, что

подтверждается данными дифрактометрического *in situ* эксперимента.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 24-22-20070, <https://rscf.ru/project/24-22-20070/>.

Список использованных источников:

1. W. H. Meiklejohn, C. P. Bean New magnetic anisotropy // *Physical Review*. – 1956. – Vol. 102, №. 5. – P. 1413.
2. F. Radu, H. Zabel, Exchange bias effect of ferro-/antiferromagnetic heterostructures // *Magnetic Heterostructures* / Berlin: Springer-Verlag, 2008. – Chap. 3. – P. 97-184.
3. J. McCord, S. Mangin, Separation of low-and high-temperature contributions to the exchange bias in Ni 81 Fe 19-NiO thin films // *Physical Review B*. – 2013. – Vol. 88, №. 1. – P. 014416.
4. V. Baltz, B. Rodmacq, A. Zarefy, et al., Bimodal distribution of blocking temperature in exchange-biased ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers // *Physical Review B*. – 2010. – Vol. 81, №. 5. – P. 052404.
5. O’Grady K., A new paradigm for exchange bias in polycrystalline thin films [Text] / K. O’Grady, L. E. Fernandez-Outon, G. Vallejo-Fernandez // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2010. – Vol. 322, №. 8. – P. 883-899.
6. V. O. Vas’kovskiy, M. E. Moskalev, V. N. Lepalovskij, et al.// Crystal structure and exchange bias of Ni-Mn-based films // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – Vol. 777. – P. 264-270.

УДК 53.082.78

Измерение эффективности экранирования постоянных магнитных полей многослойными плёночными экранами на пластмассовых корпусах

Муравьев-Смирнов С.С.

старший преподаватель кафедры общей физики, ИОПП НИЯУ МИФИ

Дмитренко В.В.

д.ф.-м.н., профессор, НИЯУ МИФИ

Власик К.Ф.

к.ф.-м.н., инженер, НИЯУ МИФИ

Грачев В.М.

к.ф.-м.н., доцент, НИЯУ МИФИ

Улин С.Е.

д.ф.-м.н., профессор, НИЯУ МИФИ

Утешев З.М.

к.ф.-м.н., инженер, НИЯУ МИФИ

***Аннотация.** В статье рассматриваются многослойные пленочные экраны на пластмассовых корпусах цилиндрической формы и их эффективность экранирования для исследований влияния постоянного магнитного поля на рабочие характеристики и работоспособность высокочувствительных приборов таких как фотоэлектронный умножитель.*

***Ключевые слова:** многослойные структуры, коэффициент экранирования, катушки Гельмгольца*

Measuring shielding effectiveness permanent magnetic fields with multilayer film screens on plastic cases

Muravyev-Smirnov S.S.

Senior lecturer,
Department of General Physics, Institute of General Professional Training,
National Research Nuclear University MEPHI

Dmitrenko V.V.

Ph.D, professor, National Research Nuclear University MEPHI

Vlasik K.F.

Ph.D, engineer, National Research Nuclear University MEPHI

Grachev V.M.

Ph.D, associated professor, National Research Nuclear University MEPHI

Ulin S.E.

Ph.D, professor, National Research Nuclear University MEPHI

Uteshev Z.M.

Ph.D., engineer, National Research Nuclear University MEPHI

Annotation. *The paper deals with multilayer film screens on plastic cases of cylindrical shape and their shielding efficiency for investigations of the influence of a permanent magnetic field on the operating characteristics and performance of highly sensitive devices such as photomultiplier tubes.*

Keywords: *multilayer structures, shielding properties, Helmholtz Coil*

Наиболее часто для экранирования используют кристаллические магнитомягкие материалы, например пермаллой. Полезные магнитные свойства (высокая магнитная проницаемость, малая коэрцитивная сила, близкая к нулю магнитострикция) лучше проявляются в сплавах с соотношением никеля - 80 % и железа - 20 % [1]. Известно, что применение многослойных пленочных экранов, целесообразно, и показывает хорошие результаты [2-3]. Альтернативным вариантом металлических экранов являются многослойные структуры (МЭ), осажденные на пластиковых корпусах. Такие экраны гораздо легче (130 г) и дешевле, чем те, которые имеют металлический корпус.

Измерения коэффициента экранирования [4] постоянного магнитного поля с помощью пластмассовых корпусов для фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) проводились с помощью пары катушек Гельмгольца и координатного датчика Холла. Определялись коэффициенты экранирования постоянного магнитного поля с помощью пластмассовых корпусов для фотоэлектронного умножителя и сравнивались с соответствующими значениями для штатных экранов с эксперимента ЛНСб для полей до 8 мТл (80 Гс).

Установлено, что МЭ показывают высокие значения коэффициентов экранирования в диапазоне напряженностей ~ до 3 мТл (30 Гс). Для более высоких напряженностей штатные экраны эффективнее. Но, поскольку, в реальных экспериментах напряженность магнитного поля, в котором находятся ФЭУ, в основном, не превышает значения 30 Гс, то более практичным и эффективным будет использование МПЭ на основе пластмассовых корпусов.

Список использованных источников:

1. Elmen G.W.; Arnold H.D. Permalloy, A New Magnetic Material of Very High Permeability // Bell System Tech. J., 2: 3. July 1923 pp 101-111.
2. Батищев А.Г., Власик К.Ф., Грабчиков С.С. [и др.]. Фотоэлектронные умножители с многослойными пленочными экранами для защиты от воздействия внешних постоянных магнитных полей // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1(4). – С. 16-23.
3. Дмитренко В.В., Власик К.Ф., Грачев В.М. [и др.]. Перспективы использования многослойных пленочных экранов для защиты космической аппаратуры от постоянных магнитных полей // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2015. – Т. 42, № 5. – С. 43-48.
4. Шапиро Д. Н. Электромагнитное экранирование: монография – Долгопрудный: Издат. дом «Интеллект», 2010. – 120 с.

УДК 537.622.4

Влияние наноразмерного рельефа поверхности на магнитные свойства тонких магнитных плёнок

Рогачев К.А.

ассистент департамента общей и экспериментальной физики ИНТиПМ ДВФУ

Самардак А.Ю.

к.ф.-м. н., старший преподаватель департамента общей и экспериментальной физики
ИНТиПМ ДВФУ

Базров М.А.

инженер-исследователь лаборатории плёночных технологий ИНТиПМ ДВФУ

Шिशелов 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.** Магнитные свойства нанобъектов с толщиной, сравнимой с атомными размерами, значительно отличаются от свойств объёмных материалов благодаря усиленному влиянию квантовых и поверхностных эффектов, а также появлению анизотропии формы. Как правило, тонкие магнитные плёнки обладают плоскостной анизотропией, при которой ось лёгкого намагничивания лежит в плоскости плёнки, однако при достижении определённой толщины плёнки и поверхностных условий возникает перпендикулярная магнитная анизотропия, при которой ось лёгкого намагничивания направлена не в плоскости плёнки, а перпендикулярно ей. Комбинация такой анизотропии и нетривиального рельефа поверхности может приводить к новым эффектам, ранее не наблюдавшимся в магнитных плёнках на плоских подложках. В данной работе мы использовали пористые матрицы оксида алюминия для получения рельефной поверхности подложки, для исследования влияния этого рельефа на магнитные свойства тонких плёнок, и изучили их изменение в зависимости от условий получения подложек.*

***Ключевые слова:** тонкие магнитные плёнки, перпендикулярная магнитная анизотропия, нанорельеф поверхности, матрицы анодированного оксида алюминия*

Influence of nanoscale surface relief on the magnetic properties of thin magnetic films

Rogachev K.A.

Assistant Lecturer, Department of General and Experimental Physics, INTaAM, Far Eastern
Federal University

Samardak A.Yu.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Lecturer, Department of General and Experimental Physics, IHTaAM, Far Eastern Federal University

Bazrov M.A.

Research Engineer, Laboratory of 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. *The magnetic properties of nanoobjects with a thickness comparable to atomic sizes differ significantly from the properties of bulk materials due to the enhanced influence of quantum and surface effects, as well as the appearance of shape anisotropy. As a rule, thin magnetic films have in-plane anisotropy, in which the axis of easy magnetization lies in the plane of the film, but when a certain film thickness and surface conditions are reached, perpendicular magnetic anisotropy occurs, in which the axis of easy magnetization is directed not in the plane of the film, but perpendicular to it. The combination of such anisotropy and nontrivial surface relief can lead to new effects that have not previously been observed in magnetic films on flat substrates. In this work, we used porous aluminum oxide matrices to obtain a relief surface of the substrate, to study the influence of this relief on the magnetic properties of thin films and studied their changes depending on the conditions for obtaining the substrates.*

Keywords: *thin magnetic films, perpendicular magnetic anisotropy, surface nanorelief, anodized aluminum oxide matrices*

В современном мире существует постоянный спрос на более высокую плотность, более быстрое время доступа и более низкое энергопотребление устройств памяти. Магнитные материалы с сильной перпендикулярной магнитной анизотропией (ПМА), обладают превосходными качествами по сравнению с материалами с плоской анизотропией для жестких дисков и устройств магниторезистивной оперативной памяти и успешно коммерциализируются в последнее десятилетие [1]. Недавно было показано, что такие структуры могут быть эффективно использованы в устройствах памяти, основанной на переносе спинового момента (STT-MRAM) [2], что повысило интерес к разработке новых материалов для таких систем.

Эффект перпендикулярной магнитной анизотропии зависит от шероховатости поверхности [3], однако влияние нанорельефа изучено слабо. Нами было принято решение изучить влияние наноразмерного рельефа на проявление эффекта ПМА.

В качестве метода модуляции рельефа поверхности были выбраны матрицы анодированного оксида алюминия, при синтезе которых можно добиться двух типов поверхностей: нанокуполов и нанократеров, а при варьировании параметров синтеза (напряжения и среды анодирования) можно добиться изменения диаметров и перепада высот полученного рельефа. Схематическое изображение структуры представлено на рисунке 1.

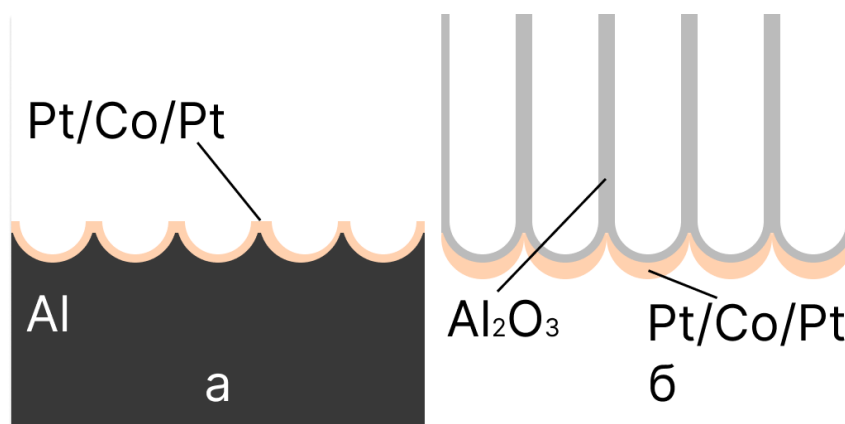


Рис. 1. Схематическое изображение структуры на а) нанократерах, б) нанокуполах

В ходе нашего исследования была подготовлена серия образцов тонких плёнок состава Pt(40)/Co(7)/Pt(20) методом магнетронного распыления (Omicron). В качестве подложек были использованы нанокупола и нанократеры различных диаметров и высот, подготовленных методом электрохимического анодирования алюминия. Помимо этого, был подготовлен референсный образец того же состава на поверхности подложки оксидированного кремния.

Морфология поверхности была изучена методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, ThermalScientific SCIOS 2) и атомно-силовой микроскопии (АСМ, NT-MDT NTEGRA Aura). Магнитные свойства образцов определялись методом вибрационной магнитометрии (ВММ, LakeShore VSM 7410). Для визуализации магнитной конфигурации была использована магнито-силовая микроскопия (АСМ, NT-MDT NTEGRA Aura). Помимо этого, было проведено микромагнитное моделирование процессов перемагничивания в программном пакете MuMax3.

По результатам исследования было выявлено значительное влияние диаметров и высот нанокуполов и нанократеров на магнитные свойства образцов.

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России по государственному заданию (проект № FZNS-2023-0012).

Список использованной литературы:

1. B. Tudu, A. Tiwari Recent Developments in Perpendicular Magnetic Anisotropy Thin Films for Data Storage Applications // Vacuum. - 2017. - 146. -p. 329–341.
2. S. Wasef and H. Fariborzi Theoretical Study of Field-Free Switching in PMA-MTJ Using Combined Injection of STT and SOT Currents // Micromachines. - 2021. - 12. - 1345.
3. M.T. Johnson, R. Jungblut, P.J. Kelly, F.J.A. den Breeder Perpendicular magnetic anisotropy of multilayers: recent insights // J. Magn. Magn. Mater. - 1995. - 148. -p. 118–124.

УДК 539.216.2:537.624

Влияние температуры на магнитные свойства пленок Dy-Co/FeNi с обменным смещением**Русалина А.С.**аспирант, Институт естественных наук и математики,
Уральский федеральный университет**Лепаловский В.Н.**к. ф.-м. н., старший научный сотрудник, Институт естественных наук и математики,
Уральский федеральный университет**Степанова Е.А.**к. ф.-м. н., доцент, Институт естественных наук и математики,
Уральский федеральный университет**Васьковский В.О.**д. ф.-м. н., профессор, Институт естественных наук и математики,
Уральский федеральный университет**Курляндская Г.В.**д. ф.-м. н., профессор-исследователь, Институт естественных наук и математики, Уральский
федеральный университет**Свалов А.В.**д. ф.-м. н., старший научный сотрудник, Институт естественных наук и математики,
Уральский федеральный университет

***Аннотация.** Работа посвящена исследованию магнитных свойств обменно-связанных плёнок Dy-Co/FeNi в широком интервале температур. Температурная зависимость спонтанной намагниченности ферромагнитного слоя является причиной смены порядка перематничивания слоев при изменении температуры. Эффективность межслойного обменного взаимодействия слабо изменяется с температурой.*

***Ключевые слова:** многослойные пленки, ферромагнетизм, магнитная компенсация, межслойное обменное взаимодействие, обменное смещение*

Influence of temperature on magnetic properties of Dy-Co/FeNi films with exchange bias**Rusalina A.S.**

Ph.D. student, Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University

Lepalovskij V.N.Ph.D., Senior Researcher, Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal
University**Stepanova E.A.**Ph.D., assistant Professor, Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal
University**Vas'kovskiy V.O.**

Dr.Sc., Professor, Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University

Kurlyandskaya G.V.

Dr.Sc., Professor, Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University

Svalov A.V.

Dr.Sc., Senior Researcher, Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University

Annotation. *The work is devoted to the study of the magnetic properties of exchange-coupled Dy-Co/FeNi films in a wide temperature range. The temperature dependence of the spontaneous magnetization of the ferrimagnetic layer is the reason for the change in the order of magnetization reversal of the layers with a change in temperature. The efficiency of interlayer exchange interaction varies slightly with temperature.*

Keywords: *multilayer films, ferrimagnetism, magnetic compensation, interlayer exchange interaction, exchange bias*

Контроль ориентации магнитного момента в тонкопленочных элементах спинтроники является одним из ключевых моментов работы таких устройств. В частности, в спиновых клапанах для этого ферромагнитный слой связывают обменным взаимодействием с соседним антиферромагнитным слоем, синтетическим многослойным антиферромагнетиком или слоем, обладающим большой коэрцитивной силой. Пути оптимизации функциональных свойств указанных слоёв с учётом особенностей конкретных устройств и условий их применения продолжают [1-3]. Среди перспективных материалов рассматриваются плёнки сплавов тяжелых редкоземельных элементов с железом и кобальтом, в частности, аморфные ферримагнитные плёнки Dy-Co [4,5]. В настоящей работе проведено исследование магнитных свойств обменно-связанных плёночных структур Dy-Co/FeNi в широком интервале температур, включающем температуру компенсации ферримагнитного слоя Dy-Co.

Плёнки Dy₂₀Co₈₀, Fe₂₀Ni₈₀ и обменно-связанные бислои Dy-Co(20 нм)/FeNi(40 нм) были получены ионно-плазменным напылением в атмосфере аргона. Осаждение на стеклянные подложки происходило в присутствии постоянного магнитного поля напряженностью 250 Э, ориентированного в плоскости подложки. Все образцы были защищены от окисления буферным и покрывающим слоями Ta толщиной 5 нм. Магнитные свойства исследовались с помощью измерительного комплекса MPMS-7XL в температурном интервале от 5 К до 300 К.

Характерные минимум на температурной зависимости намагниченности $M(T)$ и максимум на зависимости коэрцитивной силы $H_c(T)$ свидетельствуют о ферримагнитной природе плёнки Dy₂₀Co₈₀. Температура магнитной компенсации T_{comp} составила примерно 220 К. Плёнки Dy-Co, FeNi и двухслойные плёнки Dy-Co/FeNi обладали наведённой одноосной магнитной анизотропией в плоскости образца, ось легкого намагничивания (ОЛН) которой совпадает с направлением магнитного поля, присутствовавшего во время напыления.

На рис. 1 показаны петли гистерезиса, измеренные вдоль ОЛН на плёнке Dy-Co/FeNi при разных температурах. Особенности перемагничивания плёнки определяются балансом энергий Зеемана, магнитной анизотропии и межслойного обмена, который ориентирует параллельно магнитные моменты слоя FeNi и магнитной подрешётки Co слоя Dy-Co. При $T = 5$ К в суммарном магнитном моменте слоя Dy-Co доминирует момент Dy, следовательно, в отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты слоёв Dy-Co и FeNi упорядочены антипараллельно. При этом поведение пленки Dy-Co/FeNi во многом аналогично поведению «обменной» или «спиновой пружины». Одним из таких признаков является смещенная безгистерезисная частная петля перемагничивания магнитомягкого слоя (вставка на рис. 1,а). Сильное внешнее поле выстраивает магнитные моменты слоев параллельно друг другу, что сопровождается возникновением и сжатием межслойной магнитной неоднородности типа

доменной границы. Уменьшение поля сопровождается разворотом магнитного момента слоя FeNi и исчезновением межслойной магнитной границы (рис. 1,а). Энергию границы можно оценить, используя известное выражение:

$$\sigma_w = 4(AK_u)^{1/2}, \quad (1)$$

где A – константа обменного взаимодействия, K_u – константа анизотропии. Подставляя в данное выражение соответствующие значения A и K_u для FeNi и Dy-Co получаем $\sigma_w = 0.2 \text{ erg/cm}^2$, если граница формируется в слое FeNi, и $\sigma_w = 2.1 \text{ erg/cm}^2$, если граница формируется в слое Dy-Co. Сравнение двух величин σ_w заставляет предположить, что граница формируется в слое FeNi.

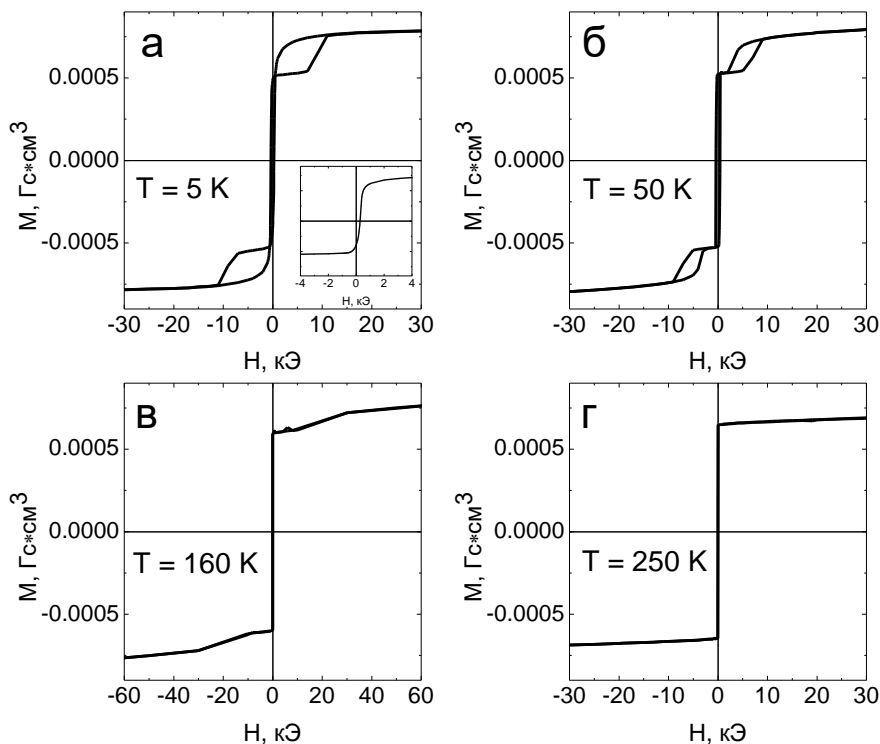


Рис. 1. Петли гистерезиса для пленок Dy-Co/FeNi, измеренные при разных температурах

Увеличение температуры образца сопровождается уменьшением момента слоя Dy-Co и его энергии во внешнем поле. Это приводит к смене последовательности перемангничивания слоев: при уменьшении поля сначала перемангничивается слой Dy-Co, и магнитные моменты слоев выстраиваются антипараллельно (рис. 1,б,в). Увеличение температуры приводит и к исчезновению гистерезиса на петле слоя Dy-Co (рис. 1,в). Скорее всего, это связано с уменьшением K_u слоя Dy-Co и частичным перемещением межслойной магнитной границы в этот слой.

На рис. 2 показана температурная зависимость поля смещения H_{eb} , определённого как координата центра смещённой петли гистерезиса. Резкий скачок величины H_{eb} при $T = 50 \text{ K}$ обусловлен тем, что изменилась последовательность перемангничивания слоёв. Последующий рост H_{eb} связан с уменьшением магнитного момента слоя Dy-Co при приближении к T_{comp} . Эффективность межслойного обменного взаимодействия характеризуется величиной константы j , которую можно оценить, используя известное выражение:

$$H_{eb} = j/M_b t_b, \quad (2)$$

где M_b и t_b – намагниченность и толщина слоя, который характеризуется смещенной петлей.

Результаты вычислений j приведены на рис. 2,б. Полагая, что межслойная связь в плёнках Dy-Co/FeNi в основном определяется обменным взаимодействием моментов слоя FeNi и подрешетки Co слоя Dy-Co, можно было ожидать температурной независимости j . Наблюдаемый разброс величин j , скорее всего, отражает тот факт, что величина $H_{\text{еб}}$ определяется особенностями формирования межслойной магнитной границы, а они изменяются при изменении температуры.

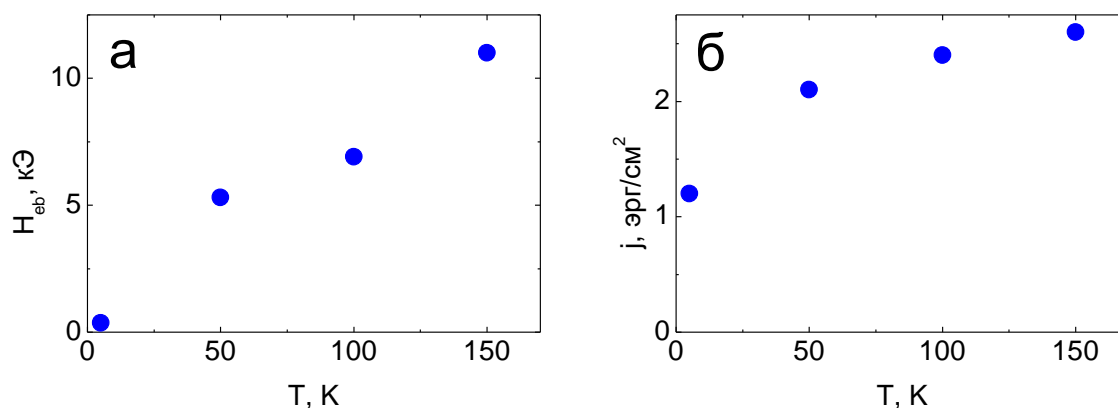


Рис. 2. Температурные зависимости поля смещения (а) и константы поверхностного межслойного взаимодействия (б) в плёнке Dy-Co/FeNi

При $T > T_{\text{сomp}}$ магнитные моменты слоев Dy-Co и FeNi оказываются упорядочены ферромагнитно, в магнитном поле плёнка Dy-Co/FeNi ведёт себя как единое целое (рис. 1,г).

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FEUZ-2023–0020.

Список использованных источников:

1. Гермизина А.А., Наумова Л.И., Миляев М.А. и др. Формирование обменного смещения и анизотропия формы в микрообъектах на основе спиновых клапанов // ФТТ – 2023. –Т. 65, вып. 8. – С. 1348–1354.
2. Феценко А.А., Москалев М.Е., Северова С.В. и др. Влияние структурно-композиционных факторов на реализацию эффекта обменного смещения в пленках (Cr–Mn)/Fe₂₀Ni₈₀ // ФММ – 2023. –Т. 124, вып. 9. –С. 830–837.
3. Svalov A.V., Lepalovskij V.N., Gorkovenko A.N., et al. Spin reorientation transition and exchange bias in hard/soft Tb–Co/FeNi films // IEEE Trans. Magn. – 2022. –V. 58. – P. 2100605-5.
4. Исхаков Р.С., Середкин В.А., Столяр С.В. и др. Эффекты обменного взаимодействия в двухслойных пленках Dy_xCo_{1-x}/NiFe вблизи компенсационных составов аморфных сплавов DyCo // Письма в ЖЭТФ – 2004. –Т. 80, вып. 10. – С. 743–747.
5. Chen K., Philippi-Kobs A., Lauter V., et al. Observation of a chirality-induced exchange-bias effect // Phys. Rev. Appl. – 2019. –V. 12. – P. 024047-10.

УДК 537.622

Влияние температуры на преобразование доменной структуры в гетероструктуре Co/Pd/Co

Шашков И.В.

к.ф.-м.н., доцент, ИПТИП РТУ МИРЭА

Кабанов Ю.П.

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

Горнаков В.С.

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

Аннотация. Работа посвящена изучению влияния температуры на процесс перемагничивания двух ферромагнитных слоев кобальта, разделенных немагнитным слоем палладия. Показано, что при определенных толщинах слоя Pd происходит переход от независимого движения доменных границ в ферромагнитных слоях к связанному. Понижение температуры приводит к смещению области перехода в сторону больших толщин прослойки Pd, что указывает на усиление обменной связи между слоями кобальта.

Ключевые слова: межслоевое обменное взаимодействие; ферромагнитные гетероструктуры; перпендикулярная магнитная анизотропия; доменные стенки; Керр-микроскопия

Temperature effect on the transformation of domain structure Co/Pd/Co heterostructure

Shashkov I.V.Ph.D., associate professor, Institute of advanced Technologies and industrial Programming
MIREA – Russian Technological University**Kabanov Yu.P.**Ph.D., senior researcher, Institute of Solid State Physics A.Yu. Osipyan Russian Academy
of Sciences**Gornakov V.S.**Dr.Sc., head researcher, Institute of Solid State Physics A.Yu. Osipyan Russian Academy of
Sciences

Annotation. The work is devoted to studying the influence of temperature on the process of magnetization reversal of two ferromagnetic cobalt layers separated by a non-magnetic palladium layer. It is shown that at certain thicknesses of the Pd layer, a transition occurs from independent motion of domain walls in ferromagnetic layers to coupled motion. A decrease in temperature leads to a shift of the transition region towards larger thicknesses of the Pd interlayer, which indicates an increase in the exchange coupling between the cobalt layers.

Keywords: interlayer exchange coupling; ferromagnetic heterostructure; perpendicular magnetic anisotropy; domain wall; Kerr microscopy

Введение

Тонкослойные магнитные гетероструктуры с перпендикулярной магнитной анизотропией являются объектом фундаментальных и прикладных исследований на протяжении долгого времени [1]. На сегодняшний день установлено, что процесс перемагничивания ферромагнитных слоев определяется не только их магнитными свойствами данного слоя, но и

характером взаимодействия этих слоев между собой. Это межслоевое взаимодействие обусловлено несколькими механизмами [2]: прямым обменом через точечные отверстия в немагнитной прослойке, магнитостатикой, вызванной шероховатостью интерфейсов и полями рассеяния, создаваемыми доменной структурой, обменом, обусловленным поляризацией прослойки из немагнитного металла, обладающего сильным спин-орбитальным взаимодействием, и косвенным обменом через электроны проводимости (РККИ взаимодействие). В последнем случае межслоевое взаимодействие может меняться от ферромагнитного к антиферромагнитному и наоборот в зависимости от толщины прослойки, при этом амплитуда таких осцилляций убывает с ростом толщины этой прослойки [3]. Связь между слоями также может изменяться под влиянием температуры [4,5]. В настоящей работе изучалась кинетика перемагничивания трехслойной структуры при различных толщинах немагнитной прослойки Pd в широком диапазоне температур. Получена зависимость перехода от несвязанного к связанному движению доменных границ в ферромагнитных слоях Co от температуры и толщины слоя Pd.

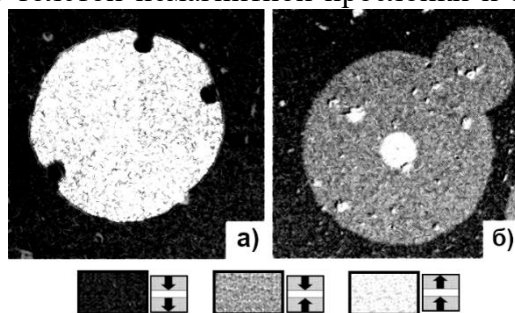
Описание эксперимента

В работе исследовалось перемагничивание гетероструктуры Ta(2 нм)/Pd(1 нм)/Co(0.4 нм)/Pd(t)/Co(0.4 нм)/Pd(1 нм)/Ta(2 нм) нанесенной магнетронным напылением на окисленную кремниевую подложку площадью 50x5 мм² при комнатной температуре. Толщина прослойки из палладия t линейно возрастала вдоль длинной стороны образца от 0 нм до 10 нм. После выращивания структуры ее разрезали на 10 равных частей по 5 мм длиной. Визуализация доменной структуры и перемагничивание образцов исследовались с помощью полярного магнитооптического (МО) эффекта Керра. Измерения проводились в широком диапазоне температур от 150 К до 300 К. Магнитное поле перпендикулярное к плоскости плёнки амплитудой до 2500 Э создавалось соленоидом. Домены в нижнем и верхнем слое идентифицировали по различному магнитооптическому контрасту, обусловленному различной величиной отраженного света от нижнего и верхнего ферромагнитных слоев.

Результаты и обсуждение

Исследуемая гетероструктура имела сильную перпендикулярную магнитную анизотропию для всех толщин немагнитной прослойки Pd. На рис.1 а и б представлены МО изображения доменной структуры для двух противоположных краев образца, отличающихся толщиной прослойки палладия. Как и в [6] при перемагничивании слоев Co при толщине палладия меньше некоторой критической t_{CR} наблюдается только два уровня интенсивности: темный, когда намагниченности в обоих слоях направлены вниз, и светлый, когда намагниченности в слоях направлены вверх. В данной области из-за сильной ферромагнитной связи между слоями Co их перемагничивание возможно только одновременно в поле $H \geq H_{C2} = 170$ Э. Если толщина прослойки палладия больше t_{CR} , то при перемагничивании наблюдается три уровня МО интенсивности: светлый (намагниченности направлены вверх), темный (намагниченности направлены вниз) и промежуточный (намагниченности в слоях направлены навстречу друг другу). Из анализа уровней интенсивностей было установлено, что в этом случае сначала перемагничивание идет в верхнем слое в поле $H \geq H_{C1} = 40$ Э, а затем в нижнем слое при приложении поля $H \geq H_{C2} = 170$ Э. Процесс перемагничивания начинается с зарождения доменов новой фазы на структурных дефектах пленки или её краях, затем продолжается за

счет движения доменных границ. Стоит отметить, что подвижность границ верхнего слоя больше в области более толстой немагнитной прослойки и заметно больше подвижности в



области связанного движения границ.

Рис. 1. Примеры доменной структуры в области сильной (а – толщина прослойки около 3 нм) и слабой (б – толщина прослойки около 5 нм) межслоевой связи. Внизу стрелками показано направление намагниченности в слоях в зависимости от интенсивности света.

Для определения координаты перехода между этими областями был использован метод предложенный в [5]. А именно, доменную границу в верхнем слое с помощью серии коротких импульсов магнитного поля двигали от толстого края клина к тонкому. Постепенно граница замедлялась и останавливалась, когда поле было недостаточно велико для дальнейшего продвижения. На рис. 2а приведена зависимость координаты остановки границы от амплитуды импульсов внешнего поля при комнатной температуре. Видно, что граница при увеличении поля смещается от положения с координатой $x = 1,6$ мм, которой соответствует толщина Pd $t = 4,7$ нм в сторону координаты $x = 2,8$ мм с $t = 4,4$ нм. Координата $x = 2,7$ мм соответствует положению стабилизации границы с $t = t_{CR}$, после которого независимое движение границ невозможно. Данная зависимость при обращении намагниченности в слоях и изменении полярности продвигающего поля не меняется. При выключении продвигающего поля наблюдается релаксация доменной границы в область с более толстой прослойкой палладия, как следует из рис. 2б. Из анализа поведения границы после приложения поля и его снятия следует, что связь между слоями ферромагнитная. Принимая в расчет коэрцитивность верхнего слоя оценена зависимость эффективного поля и энергии межслоевого обменного взаимодействия от толщины прослойки Pd.

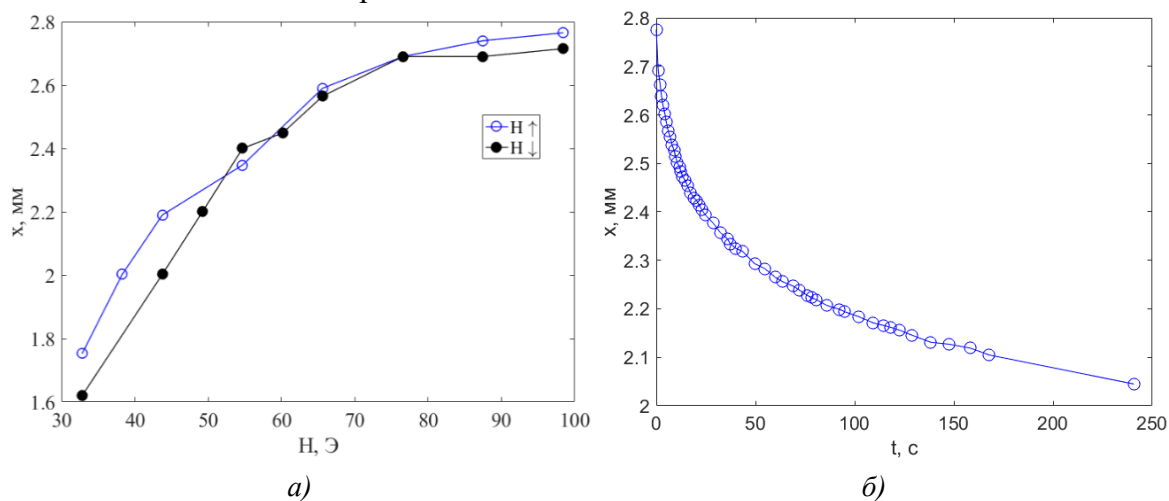


Рис. 2. а) Положение остановки границы в верхнем слое от величины внешнего поля. б) Релаксация границы в верхнем слое после снятия внешнего поля.

При охлаждении образца были получены аналогичные зависимости координаты остановки границы от поля, как представлено на рис. 3а. Видно, что вид зависимостей при понижении

температуры сохраняется, только координата остановки смещается в область более толстых значений прослойки Pd. На рис. 3б приведена зависимость координаты стабилизации (x_{CR}) границы в верхнем слое от температуры. Координата $x = 0$ мм соответствует месту стыковки двух соседних кусков образца с толщиной прослойки палладия $t = 5$ нм.

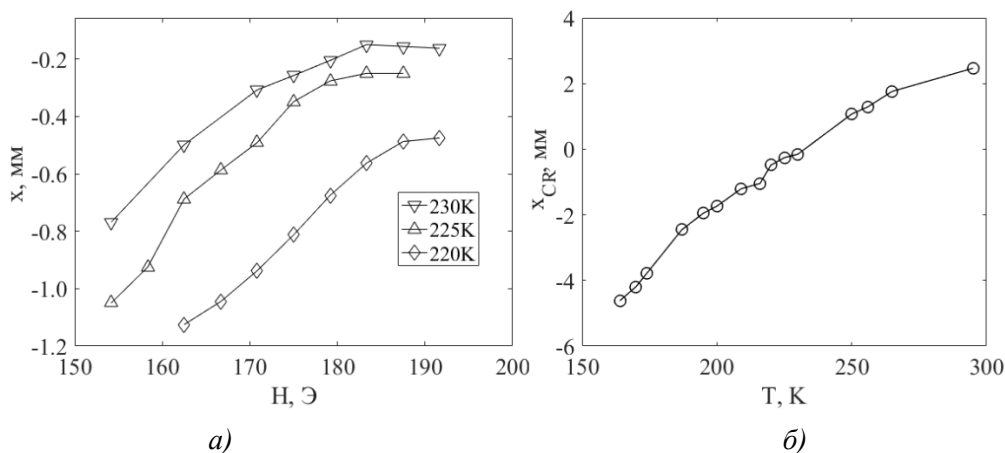


Рис. 3. а) Положение остановки границы в верхнем слое от величины внешнего поля для трех температур. б) Положение стабилизации границы в верхнем слое от температуры образца.

Полученные результаты показывают, что наблюдаемое положение x_{CR} стабилизации доменной стенки, как и поле коэрцитивности H_{C1} , в верхнем слое сильно зависит от температуры.

Таким образом, с помощью магнитооптической микроскопии Керра проведено экспериментальное изучение эволюции доменной структуры в магнитной гетероструктуре Co/Pd/Co. Получены и проанализированы зависимости положения стабилизации границы в слое Co от температуры, которые позволили выявить влияние температуры на магнитные свойства гетероструктуры при различных толщинах прослойки Pd между слоями Co. Установлено, что обменное взаимодействие между слоями усиливается с понижением температуры, что приводит к формированию сильно связанного состояния доменов в слоях при более толстых прослойках палладия.

Список использованных источников:

1. Lu B., Klemmer T., Wierman K., Ju G.P., Weller D., Roy A.G., Laughlin D.E., Chang C.H., and Ranjan R., Study of stacking faults in Co-alloy perpendicular media // J. Appl. Phys. – 2002. – V. 91. – P. 8025.
2. Matczak M., Schäfer R., Urbaniak M., Kuświk P., Szymański B., M. Schmidt M., Aleksiejew J., Stobiecki F., Influence of domain structure induced coupling on magnetization reversal of Co/Pt/Co film with perpendicular anisotropy // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2017. – V. 422. – P. 465.
3. Robinson M., Au Y., Knepper J.W., Yang F.Y., Sooryakumar R., Magnetic imaging of layer-by-layer reversal in Co Pt multilayers with perpendicular anisotropy // Phys. Rev. B. – 2006. – V. 73. – P. 224422.
4. Xie X. P., Zhao X. W., Knepper J. W., Yang F. Y., and Sooryakumar R., Evolution of magnetic domain reversal with temperature in Co/Pt multilayers observed by magneto-optical Kerr imaging // Phys. Rev. B. – 2007. – V. 76. – P. 184433.
5. Gornakov V. S., Shashkov I.V., Tikhomirov O. A., Kabanov Yu. P., Spacer Thickness and Temperature Dependences of the Interlayer Exchange Coupling in a Co/Pt/Co Three-Layer Structure // Magnetochemistry. – 2023. – V. 9. – P. 176.
6. Shull R. D., Iunin Y. L., Kabanov Y.P., Nikitenko V.I, Skryabina O.V. et al. Influence of Pt spacer thickness on the domain nucleation in ultrathin Co/Pt/Co trilayers // J. Appl. Phys. – 2013. – V. 113. – P. 17C101.