

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ /
PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY**

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2024. Т. 27, № 1. С. 66—74.

DOI: 10.17073/1609-3577j.met202310.559

УДК 621.315

**Синтез тонкопленочных магнитных структур
для спин–орбитроники****© 2024 г. А. В. Телегин¹✉, Ж. Ж. Намсараев², В. Д. Бессонов¹,
В. С. Теплов¹, А. В. Огнев^{2,3}**

¹ *Институт физики металлов имени М.Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Софьи Ковалевской, д. 18, Екатеринбург, 620108, Российская Федерация*

² *Дальневосточный федеральный университет,
п. Аякс, д. 10, о. Русский, Владивосток, 690922, Российская Федерация*

³ *Сахалинский государственный университет,
Коммунистический просп., д. 33, Южно-Сахалинск, 693000, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: telegin@imp.uran.ru

Аннотация. Многослойные металлические наноструктуры перспективны не только для создания спиновых клапанов на основе эффекта гигантского магнетосопротивления, но и для исследования природы топологического магнетизма с целью создания новых наноразмерных устройств хранения и передачи данных, например, на основе магнитных скирмионов. Актуальной проблемой остается разработка методов синтеза и конфигурации тонкопленочных наноструктур и контроля над спиновыми текстурами в них при воздействии электрического и спиновых токов, возникающих вследствие спинового эффекта Холла, при приложении внешних полей. Методом магнетронного распыления получены металлические тонкопленочные наноструктуры типа ферромагнетик/тяжелый металл: Ru(10 нм)/Co(0,8)/Ru(2), Ru(10)/Co(0,8)/Ru(2)/W(4), Pt(5)/Co(0,8)/MgO(2)/Pt(2), Pt(15)/Co(0,8)/MgO(2)/Pt(2). На полученных образцах с помощью электронно–лучевой литографии и фотолитографии изготовлены электрические контакты и холловские структуры с разной шириной токопроводящего мостика. На основе экспериментальных данных, полученных с вибрационного магнетометра, рассчитаны магнитные параметры каждого образца: намагниченность насыщения, энергия и поле магнитной анизотропии, коэрцитивная сила — в зависимости от типа ферромагнитного слоя и слоя тяжелого металла. Из данных Керр–микроскопии определена доменная структура образцов. Проведено моделирование электро-сопротивления и сделаны оценки критической величины тока и максимальной плотности тока в наноструктурах. Показано, что все полученные образцы пленок обладают перпендикулярной магнитной анизотропией и могут быть использованы для изучения токоиндуцированных явлений и процессов переноса спинового момента в наноструктурах.

Ключевые слова: магнетронное распыление, наноструктуры, фотолитография, Керр–микроскопия, спинтроника, перпендикулярная магнитная анизотропия, металлические пленки.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21–72–20160 (<https://rscf.ru/en/project/21-72-20160>). Авторы также выражают благодарность Центру коллективного пользования Дальневосточного федерального университета.

Для цитирования: Телегин А.В., Намсараев Ж.Ж., Бессонов В.Д., Теплов В.С., Огнев А.В. Синтез тонкопленочных магнитных структур для спин–орбитроники. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2024; 27(1): 66—74. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202310.559>

Synthesis of thin–film magnetic structures for spin–orbitronics

A. V. Telegin¹✉, Zh. Zh. Namsaraev², V. D. Bessonov¹,
V. S. Teplov¹, A. V. Ognev^{2,3}

¹ *M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
18 Sofia Kovalevskay Str., Ekaterinburg 620108, Russian Federation*

² *Far Eastern Federal University,
10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok 690922, Russian Federation*

³ *Sakhalin State University,
33 Kommunisticheskoy Ave., Yuzhno-Sakhalinsk 693000, Russian Federation*

✉ Corresponding author: telegin@imp.uran.ru

Abstract. Multilayer metallic nanostructures are promising not only for the creation of spin valves based on the giant magnetoresistance effect, but also for studying the nature of topological magnetism aiming to creation, for example, new nanoscale devices for storing and transmitting data based on magnetic skyrmions. Actual problem remains the development of methods for the synthesis and configuration of thin-film nanostructures and control over spin textures in them under the influence of electric and spin currents arising due to the spin Hall effect, with external fields applied. In this work the metallic thin film nanostructures of the ferromagnetic/heavy metal type were obtained by the magnetron sputtering method: Ru(10 nm)/Co(0.8)/Ru(2), Ru(10)/Co(0.8)/Ru(2)/W(4), Pt(5)/Co(0.8)/MgO(2)/Pt(2), Pt(15)/Co(0.8)/MgO(2)/Pt(2). Electrical contacts and Hall structures with different widths of the current-carrying bridge were fabricated on the obtained samples using electron beam and photolithography. Based on experimental data obtained from a vibrating magnetometer, the magnetic parameters of each sample were calculated, including saturation magnetization, energy and field of magnetic anisotropy, and coercive force, depending on the type of ferromagnetic layer and heavy metal layer. The domain structure of the samples was determined using Kerr microscopy. Electrical resistance modeling was performed, and critical current values and maximum current density in nanostructures were estimated. It was shown that all obtained thin–film samples have perpendicular magnetic anisotropy and can be used to study current–induced phenomena and spin transfer processes in nanostructures.

Keywords: magnetron sputtering, nanostructures, photolithography, Kerr microscopy, spintronics, perpendicular magnetic anisotropy, metal films

Acknowledgments: The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 21–72–20160 (<https://rscf.ru/en/project/21–72–20160>). The authors also express their gratitude to the FEFU Center for Common Use.

For citation: Telegin A.V., Namsaraev Zh.Zh., Bessonov V.D., Teplov V.S., Ognev A.V. Synthesis of thin–film magnetic structures for spin–orbitronics. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2024; 27(1): 66–74. <https://doi.org/10.17073/1609–3577j.met202310.559>

Введение

Мультислойные пленки с ультратонкими слоями ферромагнитного металла обладают уникальными магнитными и транспортными свойствами и давно привлекают внимание исследователей в связи с перспективой создания на их основе сен-

сорных устройств для магнитных полей [1–3]. Для создания магнитных наноструктур необходимо понимать происходящие в них процессы и фундаментальные причины, обуславливающие то или иное магнитное поведение, а также обладать развитой технологической базой с отработанными методиками, позволяющими получать образцы

с заданными функциональными характеристиками. Так, контролируя процесс роста наноструктур, их геометрические параметры, количество и толщину слоев, характеристики подложки, можно управлять их магнитостатической энергией и эффективной магнитной анизотропией, изменять ориентацию осей легкого и трудного намагничивания [4—10], что в итоге отражается на их микромагнитной конфигурации и магнитном поведении в целом. Изучение доменной структуры и механизмов перемагничивания магнитных наноструктур представляет интерес и с прикладной точки зрения. Например, на основе эффекта перемещения доменных границ в наноматериалах активно разрабатываются новые типы энергонезависимой магнитной памяти и логических устройств [11, 12], исследования на стыке топологического магнетизма и спинтроники (спин–орбитроника и скирмионика) открывают технологические возможности создания сверхбыстрых наноразмерных устройств передачи и обработки данных с управляемыми потерями и шумами, функционирующих на СВЧ- и ТГц-частотах [13—15]. Таким образом, фундаментальной задачей спинтроники и ее нового подраздела спин–орбитроники является исследование природы топологического магнетизма в коллинеарных и неколлинеарных спиновых системах с сильной спин–орбитальной связью в связи с открытием магнитных скирмионов, стабилизированных в ферромагнитных средах при комнатных температурах. Наиболее интересные результаты были получены для металлических наноструктур типа «тяжелый металл (ТМ = Pt, W, Ta и др.)/ферромагнетик (ФМ = Co, CoFe и др.)» с перпендикулярной анизотропией и сильным взаимодействием Дзялошинского–Мории [16—21]. Актуальной проблемой спинтроники является разработка методов контроля над спиновыми текстурами в тонкопленочных наноструктурах типа ТМ/ФМ при воздействии поляризованных и чистых спиновых токов, возникающих вследствие спинового эффекта Холла в слое ТМ, и внешних электрических полей (например, СВЧ-поле) для целенаправленного создания как отдельных статических, так и динамических магнитных скирмионов [19—24]. Однако несмотря на большое количество публикаций по данной теме все еще до конца неясно, какие материалы или структуры являются наиболее оптимальными для практических целей. Кроме того, для исследований транспортных свойств и процессов переноса спинового момента в металлических наноструктурах необходимо иметь образцы сложной геометрии с токовыми контактами разного профиля, например холловским мостиком, что накладывает ограничения на возможности исследователей.

Ниже рассмотрена разработанная нами методика синтеза, а также результаты исследования

полученных и аттестованных тонкопленочных магнитных наноструктур «ТМ (Ru,Pt,W)/ФМ (Co)» с холловскими контактами. Из данных Керр-микроскопии, магнитных и электрофизических измерений оценена намагниченность насыщения, энергия перпендикулярной магнитной анизотропии, доменная структура и значение критического тока в пленках. Показано, что полученные образцы могут быть использованы для изучения спин-транспортных эффектов.

Образцы и методы исследования

Поликристаллические пленки были получены на односторонне полированных подложках термически оксидированного кремния Si(675 мкм)/SiO₂(500 нм) (компания Si-mat, Республика Корея) с помощью сверхвысоковакуумного комплекса Omicron (рис. 1, а), укомплектованного четырьмя источниками магнетронного распыления. Ниже приведены состав пленок и толщина слоев.

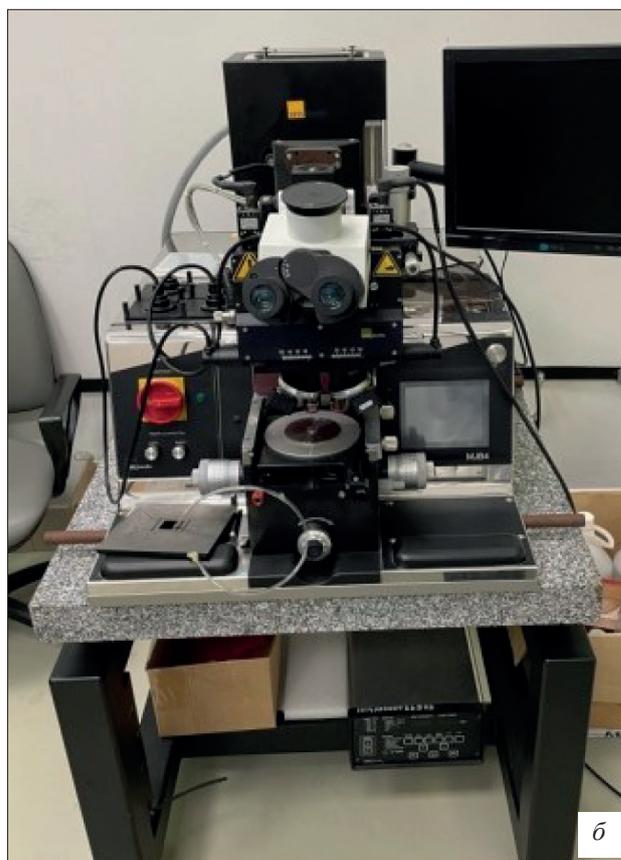
Номер образца	Состав
1	Ru(10 нм)/Co(0,8 нм)/Ru(2 нм)
2	Ru(10 нм)/Co(0,8 нм)/Ru(2 нм)/W(4 нм)
3	Pt(5 нм)/Co(0,8 нм)/MgO(2 нм)/Pt(2 нм)
4	Pt(15 нм)/Co(0,8 нм)/MgO(2 нм)/Pt(2 нм)

Образец помещали на вращающийся держатель ТМ для формирования в процессе осаждения однородной изотропной по толщине и составу пленки. Базовое давление в камере составляло $1,33 \cdot 10^{-6}$ Па. Металлические слои (Pt, W, Co, Ru) распыляли в режиме постоянного тока DC при давлении Ar 0,4 Па и мощности 22 Вт. Скорость осаждения различных слоев, контролируемая с помощью кварцевого измерителя толщин, составляла: $V_{Pt} = 0,05$ нм/с, $V_{Co} = 0,02$ нм/с, $V_W = 0,015$ нм/с, $V_{Ru} = 0,018$ нм/с. Распыление диэлектрического слоя MgO проводили при давлении Ar 0,16 Па и мощности 100 Вт, что обеспечивало скорость осаждения $V_{MgO} = 0,008$ нм/с. Затем на пленки был нанесен слой фоторезиста, из которого методом электронно-лучевой литографии был сформирован защитный трафарет структур Холла (см. далее). Калибровку скорости распыления осуществляли с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) NTEGRA Aura. Для этого напыляли однослойную пленку каждого используемого материала толщиной порядка 50 нм. Часть пленки напыляли на слабоадгезионный подслоя от бытового спиртового маркера и затем механически удаляли с подложки так, чтобы получилась ступенька, и далее проводили точное измерение толщины пленки. Также для каждого состава была оценена среднеквадратичная шероховатость поверхности, которая составила $\sim 0,3$ нм.



Рис. 1. Экспериментальный комплекс для синтеза наноструктур:
 а — сверхвысоковакуумный комплекс Omicron с четырьмя источниками магнетронного распыления;
 б — установка контактной фотолитографии Suss Microtec MJB4

Fig. 1. Experimental complex for the synthesis of nanostructures: (a) Omicron ultra-high vacuum complex with four magnetron sputtering sources, (b) installation of contact photolithography Suss Microtec MJB4



Структурные исследования образцов выполняли методом рентгенодифракционного анализа с помощью рентгеновского дифрактометра D8 Advance (используемое излучение: $\text{CuK}\alpha$). Было установлено, что все полученные образцы являются поликристаллическими с небольшой долей аморфизации структуры.

Для проведения токоиндуцированных и спин-транспортных измерений на образцах необходимо было сформировать структуры типа холловского мостика с разной шириной (сужение). Ширина области сужения составляла 20, 5 и 0,7 мкм. Для этого использовали электронно-лучевую литографию на основе сканирующего электронного микроскопа Scios 2 DualBeam с приставкой Raith (ускоряющее напряжение 10 кВ, ток пучка 0,4 нА, диаметр пучка 30 нм). Процесс экспонирования проводили при увеличении $\times 180$, что соответствовало полю экспонирования $1 \times 1 \text{ мм}^2$, шаг экспонирования составлял 16 нм. Для экспонирования применяли фоторезист MicroChem PMMA A2 с дозой облучения 125 мкКл/см^2 . Для нанесения фоторезиста использовали частоту вращения 3000 об/мин и последующее запекание при 453,15 К в течение 1 мин. Толщина пленки фоторезиста составляла порядка 300 нм. Ионно-плазменное травление проводили с помощью установки Oxford PlasmaLab 80 Plus. Методом ионно-плазменного травления необработанная пленка была удалена по всей поверхности образца, кроме областей, защищенных

трафаретом фоторезиста. Базовое давление в камере составляло $1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$, давление Ar — 0,7 Па, мощность генератора плазмы — 400 Вт, длительность травления — 3 мин.

Для создания шаблонов под электрические контакты использовали установку контактной фотолитографии Suss Microtec MJB4 (рис. 1, б), а для экспонирования — позитивный фоторезист ФП-2514 компании ФРАСТ-М. Нанесение фоторезиста осуществляли с частотой вращения 3000 об/мин с последующим запеканием при 368,15 К в течение 1 мин. Толщина пленки фоторезиста составляла $\sim 1,5 \text{ мкм}$. После растворения фоторезиста в ацетоне на поверхности образца остались холловские структуры с длиной и шириной токовода 200 и 20 мкм соответственно. Для формирования электрических контактов на образцы был еще раз нанесен слой фоторезиста, в котором методом фотолитографии были сформированы площадки под электрические контакты. Далее для лучшей адгезии электрических микровыводов на самодельной установке термического напыления в площадках был нанесен слой Ti/Au. Ток порядка 30 А последовательно пропускаться через нагревательные спирали, в которых находилась навеска титана и золота. Напыление Ti проводили из твердой фазы в течение 20 с, при этом формировалась пленка толщиной порядка 5—15 нм, необходимая для улучшения адгезии слоя золота. Навеска Au расходовалась полностью: распыление 70 мг золо-

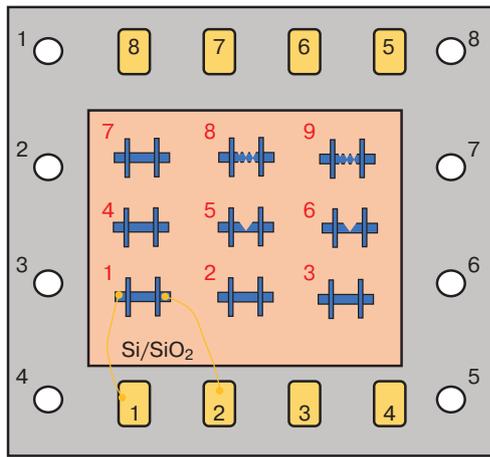


Рис. 2. Общая схема готового образца на чипе с девятью пленками с холловскими электрическими контактами
Fig. 2. General diagram of the finished sample on a chip with nine films with Hall electrical contacts

та соответствовало получению пленки толщиной порядка ~ 60 нм на поверхности образца. Камера распыления была оснащена вакуумным постом с турбомолекулярным насосом, обеспечивающим базовое давление $\sim 0,1 \cdot 10^{-3}$ Па.

В результате были подготовлены монослойные пленки и пленочные структуры с контактами. Итоговые образцы пленочных структур, размером 4×4 мм², были размещены на кремниевом чипе (подложке) и разварены с помощью ультразвуковой сварки по методу «клин–клин» алюминиевой проволокой диаметром ~ 20 мкм. Диаметр сварного контакта составил ~ 60 мкм. Таким образом, на одном образце на чипе было расположено девять структур Холла с разной шириной токопроводя-

щего контакта (Тип 1 — 20 мкм, Тип 2 — 5 мкм, Тип 3 — 2 мкм). Каждая структура Холла обладала шестью контактами: два по краям токовода и четыре поперечных для измерения продольной и поперечной разности потенциалов при пропускании тока. Для удобства подключения к выводам чипа были припаяны тонкие медные проволоки (рис. 2).

Результаты и их обсуждение

Исследование магнитных свойств (намагниченности насыщения, коэрцитивной силы, энергии магнитной анизотропии и т.п.) проводили на сплошных пленках с помощью вибрационного магнетометра LakeShore 7401 VSM в полях до 3 Тл в диапазоне температур 78—800 К. Держатель магнетометра позволял изменять ориентацию образца относительно направления магнитного поля. Для каждой пленки снималась петля гистерезиса в направлении оси легкого намагничивания (**ОЛН**): во всех рассмотренных случаях — перпендикулярно к плоскости пленки; а также вдоль трудного направления — в плоскости пленки. Первую зависимость использовали для определения намагниченности насыщения и значения коэрцитивной силы, вторую — для определения энергии магнитной анизотропии.

На рис. 3, а приведена типичная петля магнитного гистерезиса, полученная для сплошной пленки при приложении поля вдоль оси легкого намагничивания — перпендикулярно к пленке. На этой зависимости можно отметить четыре характерных значения: положительное и отрицательное значение магнитной индукции B_c , при ко-

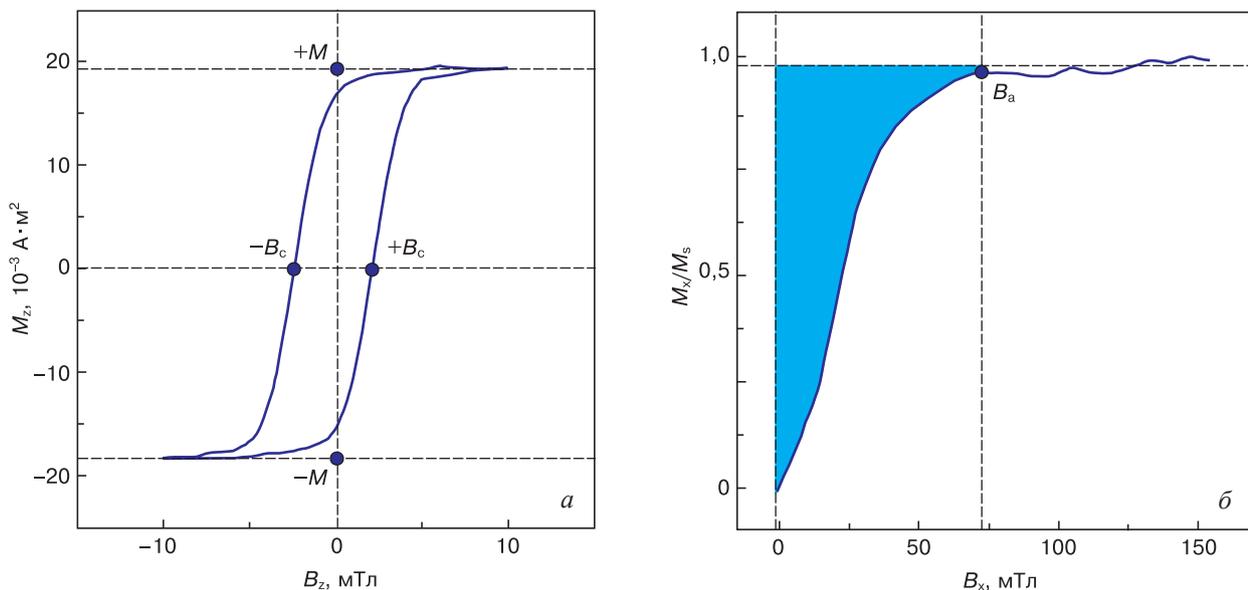


Рис. 3. Петля магнитного гистерезиса, полученная со сплошной пленки при ориентации магнитного поля перпендикулярно к плоскости пленки (а) и половина петли гистерезиса, полученная со сплошной пленки при ориентации поля в плоскости пленки (б)
Fig. 3. Magnetic hysteresis loop obtained from a continuous film with the magnetic field oriented perpendicular to the film plane (a) and half of the hysteresis loop obtained from a continuous film with the field oriented in the film plane (b)

торых намагниченность равна нулю; положительное и отрицательное значение намагниченности M . Среднее значение B_c определяет коэрцитивную силу, среднее значение магнитного момента M_0 — намагниченность насыщения. Для расчета намагниченности насыщения M_s — магнитного момента, приходящегося на единицу объема, — по фотографии образца на миллиметровой бумаге определяли точную площадь пленки S . Зная толщину магнитного слоя St_F , можно рассчитать намагниченность M_s по формуле

$$M_s = \frac{M_0 \cdot 10^{-3}}{St_F}. \quad (1)$$

На рис. 3, б приведена характерная кривая намагничивания сплошной пленки при изменении поля поперек ОЛН — в плоскости пленки. Так как определение магнитного момента точнее при перемагничивании вдоль ОЛН, то кривая была нормирована на единицу M_n , а значение M_s для расчета брали из предыдущего измерения. Площадь между осью ординат и кривой намагничивания пропорциональна энергии магнитной анизотропии, которая может быть рассчитана по следующей формуле [25, с. 778—780, 918]:

$$K_u = M_s \int_0^1 B_x dM_n. \quad (2)$$

При этом поле, при котором намагниченность насыщается в плоскости, считалось полем анизотропии B_a . В дальнейшем эта величина использовалась для анализа магнитной анизотропии в пленке.

Для всех образцов была получена ОЛН в направлении, перпендикулярном к плоскости пленки, т. е. образцы обладают перпендикулярной магнитной анизотропией, что соответствует поставленным задачам. Ширина петли, величина коэрцитив-

ной силы, полей анизотропии и намагниченности определяются параметрами структуры: в первую очередь толщиной и набором слоев. Минимальная ширина петли гистерезиса и значение коэрцитивной силы получены для образцов Ru/Co — образцы 1 и 2 (см. табл. 1). В структурах Pt/Co (образцы 3 и 4) эти величины больше почти на порядок, при этом петля практически прямоугольная. Добавление верхнего слоя немагнитного металла W в пленку Ru/Co не влияет на намагниченность насыщения и коэрцитивную силу образца 2, однако, приводит к заметному падению поля анизотропии и энергии магнитной анизотропии (рис. 4).

Для визуализации процессов перемагничивания и оценки размера доменов в образцах сплошных пленок и пленок с контактами использовали данные, полученные на Керр-микроскопе Evico Magnetics. Установка позволяет визуализировать переключение намагниченности в объектах (доменах) размером до 800 нм. Держатель образца Керр-микроскопа укомплектован двумя электромагнитами, позволяющими одновременно создавать магнитное поле в плоскости (± 400 мТл) и перпендикулярно к плоскости образца (± 120 мТл). На рис. 5 приведены изображения, иллюстрирующие магнитную структуру пленки в размагниченном состоянии и пленок со структурой Холла в случае воздействия магнитного поля или без поля.

Удельное электрическое сопротивление исследованных наноструктур с контактами составило $\sim 10^{-7}$ Ом·м (см. табл. 1). Максимальное значение тока в структурах составляло от 0,5 до 60 мА. Разница в полученных значениях электрического сопротивления и критического тока (выше которой холловский мост разрушается) для пленок с холловскими контактами связана, помимо разного состава и конфигурации наноструктур, с тем, что ток

Таблица 1 / Table 1

Магнитные и электрические характеристики образцов наноструктур ТМ/ФМ
 Magnetic and electrical characteristics of heavy metal/ferromagnetic nanostructure samples

Параметр	Номер образца (состав)			
	№ 1 (Ru/Co/Ru)	№ 2 (Ru/Co/Ru/W)	№ 3 (Pt(5)/Co/MgO/Pt)	№ 4 (Pt(15)/Co/MgO/Pt)
$M_s, 10^6$ А/м	0,51	0,49	0,80	0,87
H_a , мТл	450	150	600	590
$K_u, 10^5$ Дж/м ³	0,43	0,13	1,67	1,77
H_c , мТл	2,9	2,2	74	75
$\rho, 10^{-7}$ Ом·м	5,1	12,0	4,7	4,6
I , мА (для различных структур):				
Тип 1	25	25	22	60
Тип 2	5	5	4	12
Тип 3	0,5	0,5	0,3	0,6

Обозначения: H_a — поле анизотропии; H_c — коэрцитивная сила; ρ — удельное электрическое сопротивление; I — максимальный ток для структур Холла разного типа.

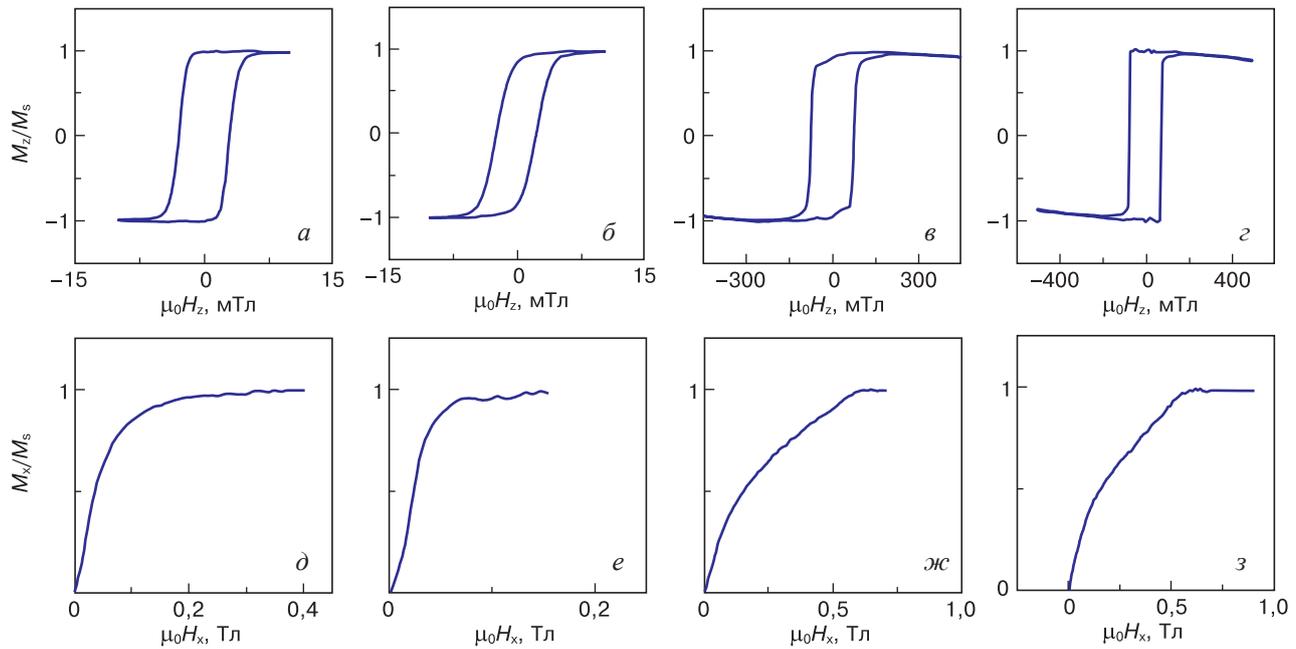


Рис. 4. Петля магнитного гистерезиса, полученная при ориентации магнитного поля перпендикулярно (а–г) и вдоль (д–з) плоскости пленок: а, д — Ru/Co/Ru; б, е — Ru/Co/Ru/W; в, ж — Pt(5)/Co/MgO/Pt; г, з — Pt(15)/Co/MgO/Pt

Fig. 4. Magnetic hysteresis loop obtained when the magnetic field is oriented perpendicularly (a–г) and along (д–з) the plane of the films: (a, д) Ru/Co/Ru, (б, е) Ru/Co/Ru/W, (в, ж) Pt(5)/Co/MgO/Pt, (г, з) Pt(15)/Co/MgO/Pt

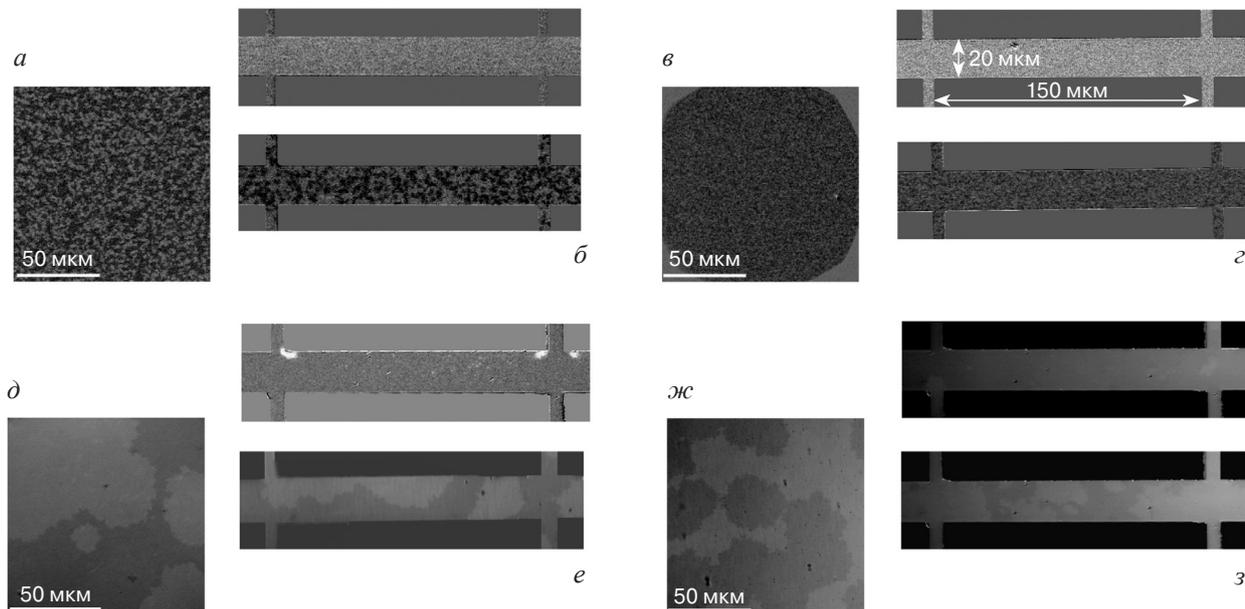


Рис. 5. Данные магнитооптической Керр-микроскопии: а, б — Ru/Co/Ru; в, г — Ru/Co/Ru/W; д, е — Pt(5)/Co/MgO/Pt; ж, з — Pt(15)/Co/MgO/Pt (а, в, д, ж — сплошные пленки в размагниченном состоянии; б, г, е, з — пленки со структурой Холла под действием поля и без поля)

Fig. 5. Magneto-optical Kerr microscopy data: (а, б) Ru/Co/Ru, (в, г) Ru/Co/Ru/W, (д, е) Pt(5)/Co/MgO/Pt, (ж, з) Pt(15)/Co/MgO/Pt. (а, в, д, ж) continuous film in a demagnetized state, (б, г, е, з) at the bottom is a film with a Hall structure under the influence of a field and without a field

в таких объектах течет не только через слой ТМ, но также и через ФМ и другие вспомогательные слои. Таким образом, процесс шунтирования необходимо учитывать при проектировании структур и изучении различных токоиндуцированных процессов. Тем не менее простые оценки по правилу Кирхгофа дают максимальное значение плотности

тока в зауженной части структур $\sim 10^{11}$ А/м². Это позволяет предположить достижение необходимой величины токоиндуцированного воздействия (полей Эрстеда) на магнитную структуру ферромагнетика [26, 27] и возможность применения данных образцов для экспериментов в области наноспинтроники и спин-орбитроники.

Заключение

Методом магнетронного распыления синтезированы многослойные поликристаллические металлические наноструктуры ТМ/ФМ: Ru(10)/Co(0,8)/Ru(2), Ru(10)/Co(0,8)/Ru(2)/W(4), Pt(5)/Co(0,8)/MgO(2)/Pt(2), Pt(15)/Co(0,8)/MgO(2)/Pt(2). Анализ магнитных свойств показал, что все полученные образцы обладают перпендикулярной магнитной анизотропией и демонстрируют переключение доменной структуры в малых полях. С использованием литографических методов

получены структуры разного профиля с холловскими контактами с шириной мостика 0,7—2 мкм. Сделаны оценки предельной величины тока в структурах и максимальной плотности тока. Полученные образцы могут использоваться для анализа токоиндуцированного воздействия на магнитную структуру ферромагнетика и формирование различных топологических спиновых текстур, а также электрического управления спинами в наноструктурах ТМ/ФМ. Результаты необходимы для совершенствования методов синтеза металлических наноструктур с сильным спин-орбитальным взаимодействием.

Библиографический список / References

1. Tumanski S. Thin film magnetoresistive sensors. Bristol; Philadelphia: Inst. of physics publ., Cop; 2001. 433 p. <https://doi.org/10.1887/0750307021>
2. Fert A. Nobel lecture: Origin, development, and future of spintronics. *Reviews of Modern Physics*. 2008; 80: 1517. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.80.1517>
3. Наумова Л.И., Мильяев М.А., Заворницын Р.С., Павлова А.Ю., Максимова И.К., Криницина Т.П., Чернышова Т.А., Проглядо В.В., Устинов В.В. Высококочувствительные сенсорные элементы на основе спиновых клапанов с антиферромагнитным межслойным взаимодействием. *Физика металлов и металловедение*. 2019; 120(7): 710—716. <https://doi.org/10.1134/S0015323019070076>
4. Naumova L.I., Milyaev M.A., Zavornitsin R.S., Pavlova A.Y., Maksimova I.K., Krinitsina T.P., Chernyshova T.A., Proglyado V.V., Ustinov V.V. High-sensitive sensing elements based on spin valves with antiferromagnetic interlayer coupling. *The Physics of Metals and Metallography*. 2019; 120: 653—659. <https://doi.org/10.1134/S0031918X1907007X>
5. Cardoso S., Leitao D.C., Dias T.M., Valadeiro J., Silva M.D., Chicharo A., Silverio V., Gaspar J., Freitas P.P. Challenges and trends in magnetic sensor integration with microfluidics for biomedical applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2017; 50(21): 213001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa66ec>
6. Epitaxial growth of complex metal oxides. Koster G., Huijben M., Rijnders G. (eds). Elsevier; 2015. 479 p. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-02659-6>
7. Scheunert G., Heinonen O., Hardeman R., Lapicki A., Gubbins M., Bowman R.M. A review of high magnetic moment thin films for microscale and nanotechnology applications. *Applied Physics Reviews*. 2016; 3: 011301. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4941311>
8. Чернышова Т.А., Мильяев М.А., Наумова Л.И., Проглядо В.В., Банникова Н.С., Максимова И.К., Петров И.А., Устинов В.В. Магниторезистивная чувствительность и одноосная анизотропия микрополосок спиновых клапанов с синтетическим антиферромагнетиком. *Физика металлов и металловедение*. 2017; 118(5): 439—445. <https://doi.org/10.7868/S0015323017050047>
9. Chernyshova T.A., Milyaev M.A., Naumova L.I., Proglyado V.V., Bannikova N.S., Maksimova I.K., Petrov I.A., Ustinov V.V. Magnetoresistive sensitivity and uniaxial anisotropy of microstrips of spin valves with a synthetic antiferromagnet. *Physics of Metals and Metallography*. 2017; 118: 415—420. <https://doi.org/10.1134/S0031918X17050040>
10. Fukuzawa H., Iwasaki H., Koi K., Sashiki M. Soft magnetic characteristics of an ultrathin CoFeNi free layer in spin-valve films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2006; 298(1): 65—71. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2005.03.010>
11. Svalov A.V., Sorokin A.N., Savin P.A., Garcia-Arribas A., Fernández A., Vas'kovskiy V.O., Kurlyandskaya G.V. Co/Cu/Co pseudo spin-valve system prepared by magnetron sputtering with different argon pressure. *Key Engineering Materials*. 2015; 644: 211—214. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.644.211>
12. Lau J.W., Shaw J.M. Magnetic nanostructures for advanced technologies: fabrication, metrology and challenges. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2011; 44(30): 303001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/30/303001>
13. Parkin S., Hayashi M., Thomas L. Magnetic domain-wall racetrack memory. *Science*. 2008; 320(5873): 190—194. <https://doi.org/10.1126/science.1145799>
14. Ummelen F., Swagten H., Koopmans B. Racetrack memory based on inplane-field controlled domain-wall pinning. *Scientific Reports*. 2017; 7(1): 833. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00837-x>
15. Jungfleisch M.B., Zhang W., Hoffmann A. Perspectives of antiferromagnetic spintronics. *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*. 2018; 382(13): 865—871. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2018.01.008>
16. Wang F., Bürgler D.E., Adam R., Parlak U., Cao D., Greb C., Heidtfeld S., Schneider C.M. Magnetization relaxation dynamics in [Co/Pt]₃ multilayers on pico- and nanosecond timescales. *Physical Review Research*. 2021; 3(3): 033061. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.033061>
17. Rinkevich A.B., Perov D.V., Kuznetsov E.A., Milyaev M.A., Romashev L.N., Ustinov V.V. Microwave penetration through (Fe_{0.82}Ni_{0.18})/V superlattices. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020; 493: 165700. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165700>
18. Manchon A., Belabbes A. Chapter One – Spin-orbitronics at transition metal interfaces. *Solid State Physics*. 2017; 68: 1—89. <https://doi.org/10.1016/bs.ssp.2017.07.001>
19. Bogdanov A.N., Yablonskii D.A. Thermodynamically stable “vortices” in magnetically ordered crystals. The mixed state of magnets. *Zhurnal éksperimental'noï i teoreticheskoi fiziki = The Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1989; 95(1): 178.
20. Fert A., Reyren N., Cros V. Magnetic skyrmions: advances in physics and potential applications. *Nature Re-*

views *Materials*. 2017; 2(7): 17031. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.31>

19. Wiesendanger R. Nanoscale magnetic skyrmions in metallic films and multilayers: a new twist for spintronics. *Nature Reviews Materials*. 2016; 1(7): 16044. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.44>

20. Everschor-Sitte K., Masell J., Reeve R.M., Kläui M. Perspective: Magnetic skyrmions – Overview of recent progress in an active research field. *Journal of Applied Physics*. 2018; 124(24): 240901. <https://doi.org/10.1063/1.5048972>

21. Nagaosa N., Tokura Y. Topological properties and dynamics of magnetic skyrmions. *Nature Nanotech.* 2013; 8: 899–911. <https://doi.org/10.1038/nnano.2013.243>

22. Sinova J., Valenzuela S.O., Wunderlich J., Back C.H., Jungwirth T. Spin Hall effects. *Reviews of Modern Physics*. 2015; 87(4): 1213–1260. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.87.1213>

23. Heinonen O., Jiang W., Somailly H., Te Velthuis S.G., Hoffmann A. Generation of magnetic skyrmion bubbles by inhomogeneous spin Hall currents. *Physical Review B*. 2016; 93: 094407. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.094407>

24. Jiang W., Chen G., Liu K., Zang J., Te Velthuis S.G., Hoffmann, A. Skyrmions in magnetic multilayers. *Physics Reports*. 2017; 704: 1–49. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2017.08.001>

25. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука; 1971. 132 с.

Vonsovskii S.V. Magnetism. New York: J. Wiley; 1974. 1256 p.

26. Manchon A., Železný J., Miron I. M., Jungwirth T., Sinova J., Thiaville A., Garello K., Gambardella P. Current-induced spin-orbit torques in ferromagnetic and antiferromagnetic systems. *Reviews of Modern Physics*. 2019; 91(3): 035004. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.91.035004>

27. Stebliy M.E., Kolesnikov A.G., Ognev A.V., Davydenko A.V., Stebliy E.V., Wang X., Han X., Samardak A.S. Advanced Method for the reliable estimation of spin-orbit-torque efficiency in low-coercivity ferromagnetic multilayers. *Physical Review Applied*. 2019; 11(5): 054047. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.054047>

Информация об авторах / Information about the authors

Телегин Андрей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, ул. Софьи Ковалевской, д. 18, Екатеринбург, 620108, Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7209-4307>; e-mail: telegin@imp.uran.ru

Намсараев Жимба Жамбалдоржиевич — инженер-исследователь, Департамент общей и экспериментальной физики, Институт наукоемких технологий и передовых материалов, Дальневосточный федеральный университет, п. Аякс, д. 10, о. Русский, Владивосток, 690922, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1064-7948>

Бессонов Владимир Дмитриевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, ул. Софьи Ковалевской, д. 18, Екатеринбург, 620108, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7837-4366>

Теплов Валентин Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, ул. Софьи Ковалевской, д. 18, Екатеринбург, 620108, Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3986-4768>

Огнев Алексей Вячеславович — доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, лаборатория пленочных технологий, Департамент общей и экспериментальной физики, Институт наукоемких технологий и передовых материалов, Институт наукоемких технологий и передовых материалов, Дальневосточный федеральный университет, п. Аякс, д. 10, о. Русский, Владивосток, 690922, Российская Федерация; Сахалинский государственный университет, Коммунистический просп., д. 33, Южно-Сахалинск, 693000, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1619-3666>

Andrey V. Telegin — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Leading Researcher, Head of Laboratory, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 18 Sofia Kovalevskay Str., Ekaterinburg, 620108, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7209-4307>; e-mail: telegin@imp.uran.ru

Zhimba Zh. Namsaraev — Research Engineer, Department of General and Experimental Physics, Institute of High Technologies and Advanced Materials, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok 690922, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1064-7948>

Vladimir D. Bessonov — PhD (Phys.–Math.), Senior Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 18 Sofia Kovalevskay Str., Ekaterinburg, 620108, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7837-4366>

Valentin S. Teplov — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Junior Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 18 Sofia Kovalevskay Str., Ekaterinburg, 620108, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3986-4768>

Alexey V. Ognev — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Chief Researcher, Laboratory of Film Technologies, Department of General and Experimental Physics, Institute of High Technologies and Advanced Materials, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok 690922, Russian Federation; Sakhalin State University, 33 Kommunisticheskoy Ave., Yuzhno-Sakhalinsk 693000, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1619-3666>

Поступила в редакцию 06.10.2023; поступила после доработки 20.12.2023; принята к публикации 12.01.2024
Received 6 October 2023; Revised 20 December 2023; Accepted 12 January 2024