

№ 4 (60) ИЮЛЬ-АВГУСТ 2011 г.

ИНТЕГРАЛ

Научно-практический межотраслевой журнал

Наш мир – мир новых идей и высоких технологий





ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ СТРУКТУР И ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СПИНТРОНИКИ НА ИХ ОСНОВЕ

*Трушин О. С., Наумов В. В., Бочкарев В. Ф., Ярославский филиал физико-технологического института РАН,
Рудый А. С., Ярославский филиал физико-технологического института РАН,
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Метлицкая А. В., Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Орликовский А. А., Физико-технологический институт РАН, Москва*

Представлен обзор физических принципов создания элементов спинтроники на основе эффекта гигантского магнетосопротивления. Рассмотрен технологический маршрут получения многослойных магниторезистивных структур и формирования датчиков магнитного поля на их основе. Представлены основные этапы этого маршрута и методики измерения функциональных характеристик получаемого продукта.

Review of basic physical principles for spintronics elements creation based on Giant Magneto Resistivity effect is presented. Technology for magneto resistive structures deposition and manufacturing of magnetic field sensors is considered. Main stages of the technology and methods for sample characterization are described.

Ключевые слова: магнетосопротивление, спинтроника, ГМС эффект, спиновый вентиль, тонкие пленки, вакуумное напыление, нанотехнологии.

Keywords: magnetoresitivity, spintronics, GMR effect, spinvalve, thin films, vacuum deposition, nanotechnology.

Спинтроника – это новое, быстро растущее направление в науке и технологии, которое, возможно, окажет значительное влияние на будущее развитие электроники. Современная электроника основана на использовании заряда электрона в качестве основного агента функционирования устройств. Попытки использовать другое фундаментальное свойство электрона – его спин – положили начало новой, быстро развивающейся области науки, получившей название «спинтроника» (сокращенное наименование от электроники спинового транспорта). Первоначально в рамках этого направления велись работы по созданию нового поколения магнитной памяти и сенсоров. Затем в него добавились исследования в области спинового транспорта в полупроводниках в надежде на создание новой парадигмы в полупроводниковой электронике, основанной на использовании спиновой степени свободы электрона. Исследование спин-поляризованного транспорта в объемных и низкоразмерных полупроводниковых структурах сулит перспективы создания гибридных устройств, которые будут соединять магнитное хранение информации и транзистор на спиновой памяти.

Магнитные материалы и магнитные устройства занимали значительное место в науке и технологии на протяжении всего XX века и сыграли очень важную роль в

создании и последующем развитии компьютерной техники, обеспечив надежное хранение информации на магнитных носителях. Новое направление в интеграции магнитных устройств в компьютерную технологию начало развиваться в связи с открытием эффекта гигантского магнетосопротивления (ГМС). Открытие ГМС эффекта в Co/Cu гетероструктуре при комнатной температуре и в низких магнитных полях и последующее совершенствование межслойного интерфейса привели к достижению больших значений ГМС эффекта в очень малых полях. Эти результаты сделали спинтроннику технологической реальностью [1]. В настоящее время ГМС эффект широко используется при создании магнитных головок в современных жестких дисках.

Развитие в этой новой области происходило быстрыми темпами, и первые технологии появились довольно скоро. Первым значительным ГМР устройством был спиновый вентиль – простая трехслойная структура, состоящая из магнитомягкого слоя, прослойки из немагнитного металла (обычно медь) и слоя магнито жесткого металла. Магнитомягкий слой реагирует на наличие магнитного поля, магнито жесткий нет. Когда магнитные моменты двух ферромагнитных слоев сонаправлены, сопротивление структуры минимально, в случае, когда они направлены противоположно, сопротивление максимально. На этом эффекте может

быть основана работа датчика магнитного поля. Однако ГМС эффект в спин-вентильной структуре не достигает более 20%, поэтому в дальнейшем была предложена спин-туннельная структура. В простейшем варианте спин-туннельной структуры вместо металлической прослойки, разделяющей два ферромагнитных слоя, используется тонкий слой диэлектрика (обычно Al₂O₃ или MgO). В настоящее время для такой структуры достигнут максимальный ГМС эффект 350%. Другим преимуществом данной структуры является ее высокое сопротивление, что позволяет ее эффективную интеграцию с управляющими CMOS полупроводниковыми структурами [6].

Одним из важнейших практических применений эффекта гигантского магнетосопротивления является изготовление датчиков магнитного поля для различных областей науки и техники [5]. Такие датчики могут, например, использоваться в головках чтения компьютерных жестких дисков, при создании автомобилей, для анализа подлинности банкнот, для определения границ геомагнитных аномалий, для создания приборов электронной навигации, а также в микробиологии и медицине для индикации маркированных магнитными примесями макромолекул [2].

В настоящее время производство таких датчиков превратилось в многомиллионный бизнес. Использование магнитных датчиков



в нашей стране сдерживается в силу практического отсутствия их массового производства и необходимости дорогостоящих закупок по импорту. Технология производства современных датчиков входит в состав



Рис. 1. Установка магнетронного распыления TETRA SCR-650: а) внешний вид установки, б) вид карусели мишеней

коммерческого ноу-хау, что препятствует развитию отечественного производства. Поэтому актуальными являются исследования и разработки в этой области, проводимые отечественными исследовательскими группами. В данной статье представлен обзор современных исследований магниторезистивных структур в Ярославском филиале Физико-технологического института РАН.

Технология получения многослойных магниторезистивных структур и приборных структур на их основе

Для получения магниторезистивных структур необходимо последовательно нанести тонкие пленки магнитных и немагнитных материалов в вакууме. На основе полученных таким образом многослойных структур формируются требуемые приборные структуры (магнитные сенсоры и матрицы магнитной памяти). На каждом этапе этого технологического маршрута необходимо контролировать качество промежуточных продуктов. Таким образом, для проведения этих работ необходимо сформировать целый комплекс технологических установок и измерительных стендов.

В Ярославском филиале ФТИАН на протяжении ряда лет проводятся экспериментальные исследования магниторезистивных структур. За прошедший период создана необходимая инфраструктура для получения и комплексного исследования таких структур и формирования на их основе приборных элементов. Далее кратко рассмотрим основные компоненты такой инфраструктуры.

Одним из важных методов получения многослойных магнитных структур является плазменное распыление. В ЯФ ФТИАН в качестве основного инструмента получения магниторезистивных структур используется установка магнетронного распыления TETRA SCR-650 (Франция). Внешний вид данной установки представлен на рис. 1а.

Напыление пленок в такой установке осуществляется путем распыления в вакууме, в плазме ВЧ разряда в среде Ar требуемого материала мишени. В большинстве структур, рассматриваемых в данной работе, число различных материалов, используемых для формирования магнитных и немагнитных слоев, варьировалось в пределах 4–6. Данная установка позволяет проводить распыление в одном вакуумном цикле до 4 мишеней (рис. 1б). Таким образом, имеющееся оборудование позволяет получать многослойные магниторезистивные структуры достаточно высокого качества для последующих исследований и формирования элементов спинтроники на их основе.

Важной проблемой получения многослойных магнитных пленочных структур для спинтроники является контроль толщин получаемых слоев. Требуемый диапазон толщин пленочных слоев 1–10 нм предъявляет особые требования к выбору метода измерений. Столь тонкие пленки металла являются вполне прозрачными для видимого света, поэтому имеется возможность применения стандартных оптических методов. Для решения задачи экспрессного определения толщины сверхтонких металлических пленок нами был выбран метод отражательной спектрофотометрии.

Этот метод основан на анализе картины интерференции света, отраженного от поверхностей пленки. В качестве образца сравнения используется подложка без пленки. Неполяризованный белый свет направляется на поверхность образца, и проводится измерение интенсивности отраженного света как функции длины волны (типичный спектральный диапазон длин волн, используемый для измерений, 400–800 нм). Результирующий спектр отраженного света зависит как от характеристик оптического тракта прибора, так и от отражательных свойств материала подложки. Эти влия-

ния корректируются путем деления полученной интенсивности на интенсивность пленки света, отраженного от подложки без пленки. Таким образом, вычисленная величина описывает относительную спектральную отражательную способность пленочного покрытия. Для определения толщины пленки экспериментальная зависимость сравнивается с теоретической. Используя данную методику, можно определять толщины прозрачных пленок в диапазоне от 5 нм до 50 нм с точностью до 1 нм [4]. Данный метод предполагает знание показателя преломления исследуемого покрытия как функции длины волны.

Типичное время одного измерения – несколько секунд. Внешний вид прибора показан на рис. 2а.

Для проверки применимости данной методики для контроля толщины сверхтонких пленок металла был проведено измерение серии образцов пленок никеля различ-

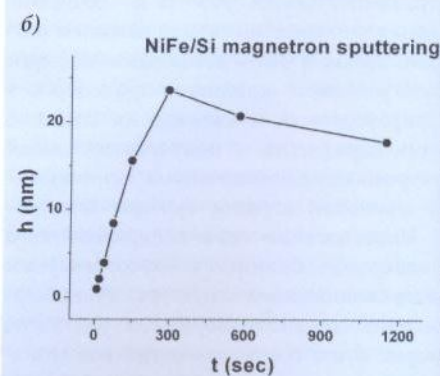
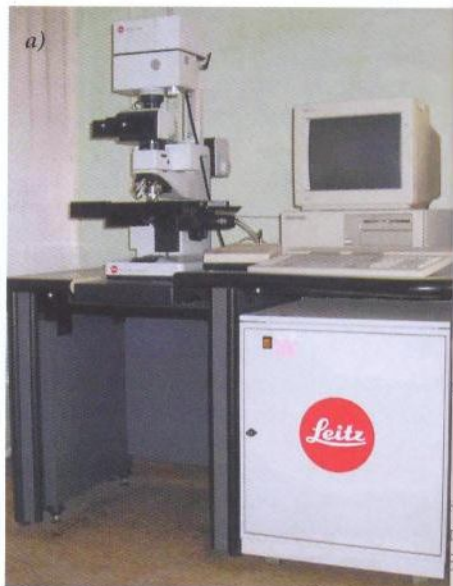


Рис. 2. Измерение толщины сверхтонких пленок методом отражательной спектрофотометрии: а) внешний вид спектрофотометра Leitz, б) зависимость толщины пленки по данным спектрофотометрии от времени напыления

а) Фотометр
Универсальный
Генератор Гр-28
б) Mx (r.u)
100000
50000

Рис. 3. К...
а) схема и...
Керра, б) ...
для...
наблюдает...
гатов изм...
Это дает во...
диапазон д...
металличес...
ной калибр...
ение данн...
татами нез...
Проведени...
нетворител...
ения толщ...
и отражат...
Для нера...
ых характ...
структур и...
экваториал...
товки прив...
Поляриза...
волна) пад...
равен 60° (у...
ью к пове...
излучение п...
выхода ко...



ной толщины. Предполагается, что толщина пленки прямо пропорциональна времени напыления. На рис. 26 представлена зависимость толщины пленки, полученной с помощью спектрофотометра, от времени напыления пленки. Из приведенной зависимости видно, что при малых толщинах (1–15 нм)

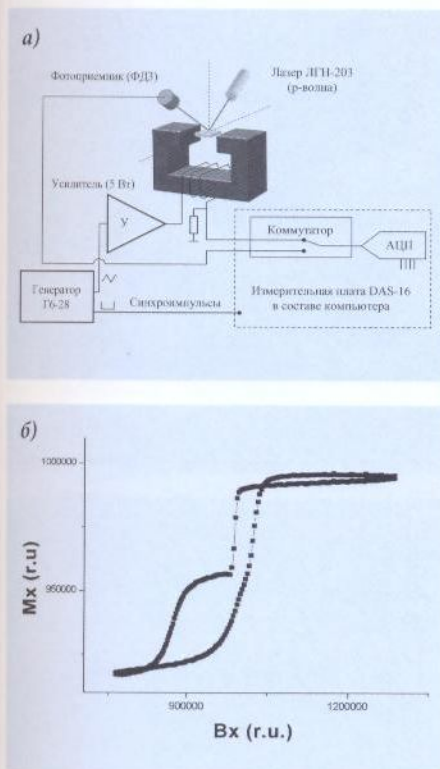


Рис. 3. Контроль магнитных характеристик пленочных структур магнитооптическим методом: а) схема измерения экваториального эффекта Керра, б) типичный пример петли гистерезиса для спин-вентильной структуры

наблюдается линейная зависимость результатов измерений от времени напыления. Это дает возможность использовать данный диапазон для экспресс-контроля толщины металлических пленок. Для дополнительной калибровки метода необходимо сравнение данных спектрофотометрии с результатами независимых измерений толщины. Проведенное тестирование показало удовлетворительное согласие результатов измерения толщины другими методами с данными отражательной спектрофотометрии.

Для неразрушающего контроля магнитных характеристик получаемых пленочных структур используется магнитооптический экваториальный эффект Керра. Схема установки приведена на рис. 3а.

Поляризованное лазерное излучение (р-волна) падает на образец. Угол падения равен 60° (угол между лучом света и нормалью к поверхности образца). Отраженное излучение попадает в фотоприемник, сигнал с выхода которого поступает на коммутатор

измерительной платы. Туда же поступает сигнал измерения тока электромагнита. Синхроимпульс, поступающий с генератора, запускает последовательность чередующегося измерения тока электромагнита и переменной составляющей интенсивности отраженного света. Процесс измерения одной петли включает в себя снятие 500 значений обеих величин за период изменения тока электромагнита и повторение этого процесса 500 раз с последующим усреднением. Для исключения систематических искажений сигнала процесс измерения проводился с подложкой кремния без пленки. Полученная зависимость (наклонная прямая) вычиталась из петли гистерезиса образца. Значение поля (масштаб по оси x) устанавливалось из сравнения с данными измерения магнетосопротивления. Данная методика позволяет проводить неразрушающий контроль магнитных характеристик многослойных пленочных структур на всех технологических этапах.

Другой важной функциональной характеристикой магниторезистивных структур является величина магнетосопротивления. Для измерения этого параметра используется специальный автоматизированный стенд. Такой стенд позволяет проводить экспрессдиагностику пленочных структур на всех этапах технологического маршрута. В современной литературе описан целый ряд различных конструкций специализированных стендов для измерения магнетосопротивления пленочных образцов [7], однако при этом используются, как правило, радиочастотные методы выделения полезного сигнала. Недостатком такого подхода является отсутствие возможности исследовать динамику медленных процессов в пленке, кроме того, работа на высоких частотах предполагает дополнительные усилия по борьбе с шумом. В настоящей работе описана методика экспрессного измерения магнетосопротивления в медленно меняющемся магнитном поле с использованием автоматизированного стенда на базе персонального компьютера.

Схема измерительного стенда представлена на рис. 4а. Для создания однородного магнитного поля используется катушка Гельмгольца с диаметром намотки 10 см. Данная катушка обеспечивает создание магнитного поля с индукцией до 100 Ое. Пещоль внутри катушки используется для помещения исследуемого образца.

На рис. 4а представлена блок-схема стенда. На этой схеме показаны держатель образца, катушки Гельмгольца, генератор сигналов специальной формы Г6-37, усилитель напряжения на основе операционного усилителя LM675, плата ввода величины магнитного

поля через последовательный интерфейс GP3, цифровой мультиметр на PCI шине NI4065, персональный компьютер.

Стандартный образец представляет собой кусок кремниевой подложки прямоугольной формы размером 10×12 мм с нанесенной магниторезистивной структурой. Чувствительные магниторезистивные элементы сформированы в виде узких полосок с напыленными медными контактами по краям. Для создания надежного контакта образец помещается в специальный контейнер из оргстекла с серией пружинных контактов. Снаряженный контейнер с образцом помещается внутрь катушки Гельмгольца. Плавное изменение магнитного поля обеспечивается путем подачи на катушку пилообразного напряжения питания с использованием генератора сиг-

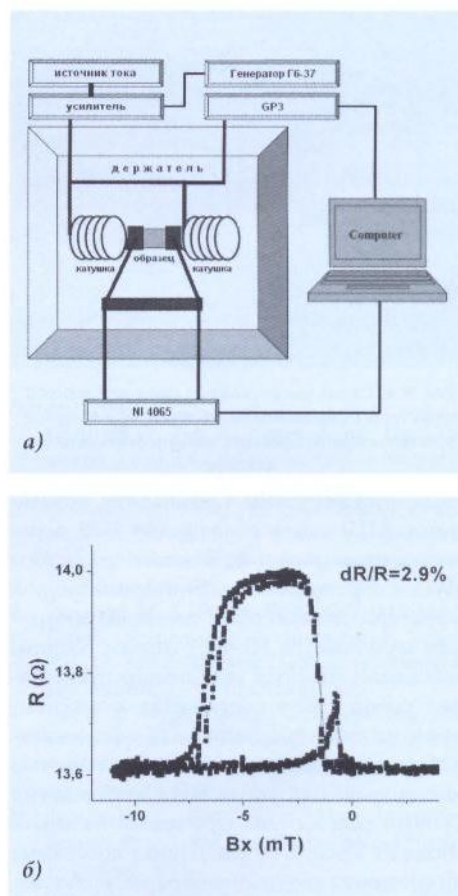


Рис. 4. Контроль транспортных характеристик магниторезистивных структур: а) блок-схема стенда для измерения магнетосопротивления, б) типичная зависимость сопротивления спин-вентильной структуры от внешнего магнитного поля

налов специальной формы Г6-37 и усилителя напряжения на основе операционного усилителя LM675. Использование внешнего генератора сигналов позволяет варьировать закон изменения напряжения на катушке (от пилообразного до синуса) и скорость скани-



рования по полю в широких пределах (от 0,001 Гц до 10 Гц). Медленное сканирование по полю позволяет избежать высокочастотных помех и исследовать медленные релаксационные процессы в пленке. Величина магнитного поля в катушке вычисляется по напряжению на катушке Гельмгольца. Для

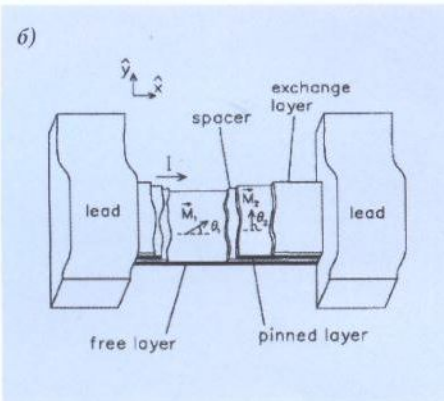
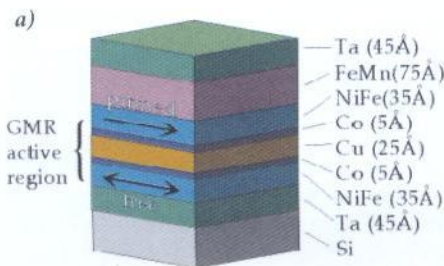


Рис. 5. а) Схема многослойной спин-вентильной структуры с обменным смещением, б) топология чувствительного элемента магниторезистивного сенсора

ввода этой величины в компьютер используется АЦП плата сопряжения GP3 через последовательный порт компьютера фирмы AWC. Сопротивление магниторезистивной структуры измеряется с помощью цифрового мультиметра NI-4065 фирмы National Instruments. Данный мультиметр представляет собой плату сопряжения с компьютером на базе PCI шины. Он обеспечивает измерение сопротивления с точностью до 6 знаков. Для управления этими двумя платами разработана программа на языке Microsoft Visual C++ 6.0. Данная программа обеспечивает удобный интерфейс пользователя и вывод на экран и в файл исследуемых зависимостей.

Таким образом, данный стенд позволяет проводить экспресс-диагностику транспортных характеристик магниторезистивных структур с достаточной точностью [8].

Формирование чувствительных элементов магнитных сенсоров на основе магниторезистивной структуры

В качестве практического примера реализации всей технологической цепочки рассмотрим получение и исследование магнит-

ных сенсоров на основе эффекта гигантского магнетосопротивления (ГМС). Такие датчики находят широкое применение в современной технике [5]. Благодаря высокой чувствительности в слабых полях и низкой стоимости эти сенсоры обладают значительными конкурентными преимуществами на рынке. Наиболее популярная конструкция такого датчика основана на использовании многослойной магнитной спин-вентильной структуры [2, 5]. Современные исследования в этой области науки направлены на улучшение функциональных характеристик получаемых сенсоров, оптимизацию технологии их производства.

В данной работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований спин-вентильных структур с обменным смещением [2]. Типичная схема такой структуры состоит из нескольких металлических слоев на диэлектрической подложке: «свободный» (FREE), или «сенсорный», слой из материала с низкой коэрцитивностью ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ – пермаллой), немагнитная прослойка (Cu – медь) и «закрепленный» (PINNED) магнитный слой, состоящий из комбинации ферромагнитного и антиферромагнитного ($\text{Fe}_{80}\text{Ni}_{20}/\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{50}$) слоев. Контакт ферромагнитного и антиферромагнитного слоев приводит к появлению «обменного смещения», что позволяет жестко фиксировать намагниченность закрепленного слоя в заданном направлении. Толщины отдельных слоев составляют несколько нанометров, что позволяет отнести данный материал к категории наноструктур (рис. 5а).

Спин-вентильные структуры этого типа были получены методом высокочастотного (RF) магнетронного распыления. Полученные многослойные пленочные структуры далее подвергались экспресс-диагностике их магнитных характеристик путем измерения экваториального магнитооптического эффекта Керра и измерения магнетосопротивления в медленно меняющихся полях на установке собственной конструкции [8]. Анализ полученных зависимостей показал типичную картину переключения спин-вентильной структуры (рис. 3б).

Из рисунка 3б видно, что петля гистерезиса такой структуры разделяется на две части, отвечающие перемагничиванию двух слоев. Одна часть этой петли узкая (малая коэрцитивность свободного слоя), а вторая широкая (большая коэрцитивность закрепленного слоя). В результате экспериментальных исследований установлена минимальная толщина (9 нм) антиферромагнитного слоя, обеспечивающая надежную фиксацию закрепленного слоя.

Для контроля химического состава многослойных структур использовали последний анализ методом вторичной ионной масс-спектропии. Работы выполнялись на установке IONTOF SIMS⁵ Центра коллективного пользования научным оборудо-

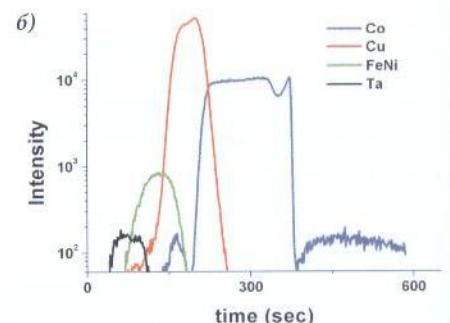


Рис. 6. Контроль химического состава многослойной структуры методом ВИМС: а) внешний вид установки IONTOF SIMS, б) пример результатов анализа для простой ассиметричной спин-вентильной структуры Co/Cu/FeNi/Ta/Si

ванием «Диагностика микро- и наноструктур». Пример результатов такого анализа представлен на рис. 6.

Полученные результаты показали наличие значительного перемешивания компонентов на границах интерфейсов за счет межслойной диффузии, что может быть обусловлено наличием сквозных отверстий в слоях.

Отработка технологического маршрута получения магниторезистивных структур предполагает контроль качества отдельных слоев. Важную информацию о структуре формируемых слоев можно получить методом просвечивающей электронной микроскопии. Одним из критических слоев многослойной магниторезистивной структуры является слой антиферромагнетика, используемый для обменного смещения магнитных слоев. В данной работе проведен анализ структуры пленки FeMn, напыленной ионно-плазменным методом на пленку соли NaCl, на подложке крем-



ния. После напыления этих пленок образец помещался в воду, где слой соли растворялся. Исследуемую пленку вылавливали из воды на медную сеточку для последующего анализа в колонне просвечивающего микроскопа. Для этих исследований использовался просвечивающий электронный микроскоп Tecnai G2 F20 U-TWIN Центра

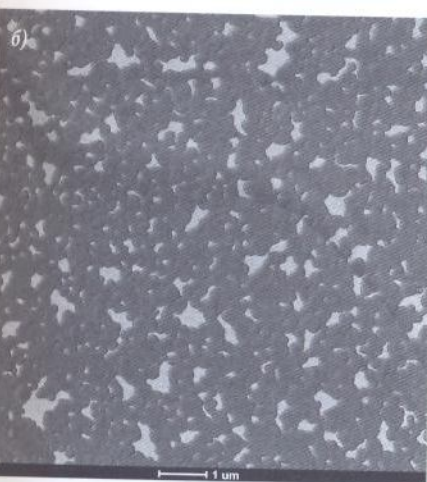


Рис. 7. Контроль качества отдельных слоев методом просвечивающей электронной микроскопии: а) внешний вид просвечивающего электронного микроскопа TECNAI, б) и в) изображения поверхности пленки FeMn, полученные с разным увеличением

коллективного пользования научным оборудованием «Диагностика микро- и наноструктур», показанный на рис. 7.

Анализ приведенных изображений показывает, что в диапазоне сверхмалых толщин (несколько нанометров) пленка представляет собой перколяционную сетку, полученную в результате срастания отдельных островков. Таким образом, необходимы дальнейшие работы по улучшению качества получаемых слоев для достижения более высокой однородности слоя.

Магнитные сенсоры, имеющие форму прямоугольной полоски с варьируемыми латеральными размерами (рис. 5б), были получены на основе спин-вентильных структур методом ионной литографии. Контроль качества фотолитографии осуществляется с помощью сканирующего электронного микроскопа SUPRA 40 Центра коллективного пользования научным оборудованием «Диагностика микро- и наноструктур» (рис. 8).

Измерения ГМС эффекта в таких структурах (в СР геометрии) проводилось на стенде (рис. 4а) с квазистатическим (медленным) изменением магнитного поля. Типичный пример получаемых зависимостей представлен на рис. 4б. Средняя величина ГМС эффекта для таких сенсоров составляла 3% при комнатной температуре. Установлено, что уменьшение ширины сенсора при фиксированной длине (увеличение аспектного отношения) приводит к увеличению коэрцитивности обоих магнитных слоев (свободного и закрепленного). Для интерпретации полученных результатов проведено микромагнитное моделирование такой структуры с использованием популярного пакета OOMMF [3], а также программного комплекса собственной разработки. Результаты моделирования подтвердили общую тенденцию к увеличению коэрцитивности с уменьшением ширины сенсора, отмеченную в эксперименте. На основе результатов микромагнитной модели данный факт объясняется как следствие увеличения магнитостатической энергии (энергии размагничивающего поля) за счет увеличения анизотропии формы.

Таким образом, представлена технологическая цепочка получения и исследования магнитных сенсоров на основе спин-вентильных структур. Полученные структуры демонстрируют типичные характеристики переключения и могут быть использованы для производства датчиков слабых магнитных полей. Исследовано влияние различных технологических параметров в процессе роста пленочных структур, а также геометрии сенсора на его функциональные

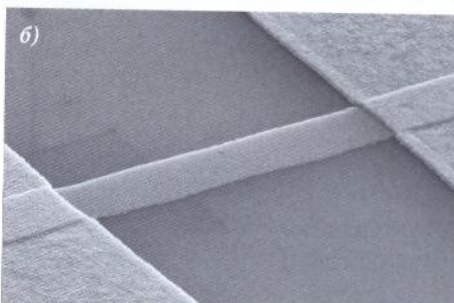


Рис. 8. Контроль топологии сенсора с помощью сканирующего электронного микроскопа SUPRA 40: а) внешний вид микроскопа, б) изображение магниторезистивного сенсора

Рис. 8. Контроль топологии сенсора с помощью сканирующего электронного микроскопа SUPRA 40: а) внешний вид микроскопа, б) изображение магниторезистивного сенсора

характеристики, что позволило оптимизировать технологический процесс и улучшить характеристики конечного продукта.

Литература

1. Chappert C., Fert A., Nguen F. Van Dau. The emergence of spin electronics in data storage // Nature Materials. 2007. Vol. 6. P. 813–823.
2. Coehorn R. Giant magnetoresistance and magnetic interactions in exchange-biased spin-valves // Handbook of magnetic materials. Vol. 15. Amsterdam: Elsevier Science, 2003.
3. Donahue M. J., Porter D. G. OOMMF User's Guide, Version 1.0 // Interagency Report NISTIR 6376, National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, 1999.
4. Eandi R. et al. Optical thick and thin film metrology on various substrates using a high resolution reflection spectrophotometer // SPIE. 1989. № 1087. P. 59.
5. Tumanski S. Thin Film Magnetoresistive Sensors. Bristol–Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2001.
6. Zhu J-G. Magnetoresistive Random Access Memory: The Path to Competitiveness and Scalability // Proceedings of the IEEE. 2008. Vol. 96. № 11. P. 1786–1798.
7. Ким П. Д., Халяпин Д. Л., Быкова Л. Е. // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 4. С. 126–128.
8. Трушин О. С. и др. Автоматизированный стенд для экспресс-диагностики магниторезистивных структур // Микроэлектроника. 2009. Т. 38. № 4. С. 280–283.

Рудый А. С.: rudy@uniyar.ac.ru