

# Сенсоры магнитного поля нового поколения



**Сергей Демьянов,**

заведомо криогенных исследований НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, доктор физико-математических наук



**Николай Каланда,**

ведущий научный сотрудник НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, кандидат физико-математических наук



**Егор Канюков,**

младший научный сотрудник НПЦ НАН Беларуси по материаловедению

Наноструктурированные материалы имеют особые, не характерные для материалов с макроскопическими размерами свойства. Благодаря этому они широко используются в различных областях – биомедицине, химии, физике, электронике, материаловедении.

Особый интерес представляет применение наноматериалов для создания структур, чувствительных к изменениям магнитных полей, поскольку на данном эффекте основана работа многих электронных устройств. Например, в медицине – в качестве измерителей магнитных полей биологических объектов, для контроля магнитобиологических реакций, электрических сигналов сердца, скелет-

ных мышц, глаз, фоновой и вызванной активности мозга. Невозможно обойтись без сенсоров (датчиков) при диагностике методом магнитно-резонансной томографии. В охранных системах они могут использоваться как датчики движения, в автомобилестроении – в системах АБС и управления двигателем, в робототехнике – для контроля угловых и линейных перемещений и определения положения вращающихся компонентов, в электронике – в новых типах систем хранения информации, в измерительной технике – в магнитометрах и приборах для измерения характеристик магнитного поля и магнитных свойств материалов. Перспективно применение в таких сферах, как гео-

логоразведка, сейсмология, археология, астрофизика, в приборах навигации на море, в космосе и авиации.

Принцип работы магниточувствительных элементов базируется на четырехконтактном методе измерения эффекта Холла. Более перспективны сенсоры, в основу которых положена зависимость электросопротивления от магнитного поля – магнетосопротивление. Несмотря на кажущуюся простоту, это явление по своей природе очень многообразно и зависит от фазового состава, кристаллической и магнитной структуры рабочего элемента сенсора магнитного поля, а также внешних факторов – температуры, индукции и ориентации магнитного поля.

Рассмотрим два оригинальных физических принципа получения сенсоров магнитного поля, работы над которыми ведутся в отделе криогенных исследований НПЦ НАН Беларуси по материаловедению в рамках выполнения заданий по научно-технической программе Союзного государства «Разработка нанотехнологий создания материалов, устройств и систем космической техники и их адаптация к другим отраслям техники и массовому производству». Один из них предполагает создание наноструктур Si/SiO<sub>2</sub>/металл по технологии треков быстрых тяжелых ионов. В основу положен принцип формирования наноразмерных систем с использованием пористых матриц, в которых можно получать нанокomпозиции с задан-

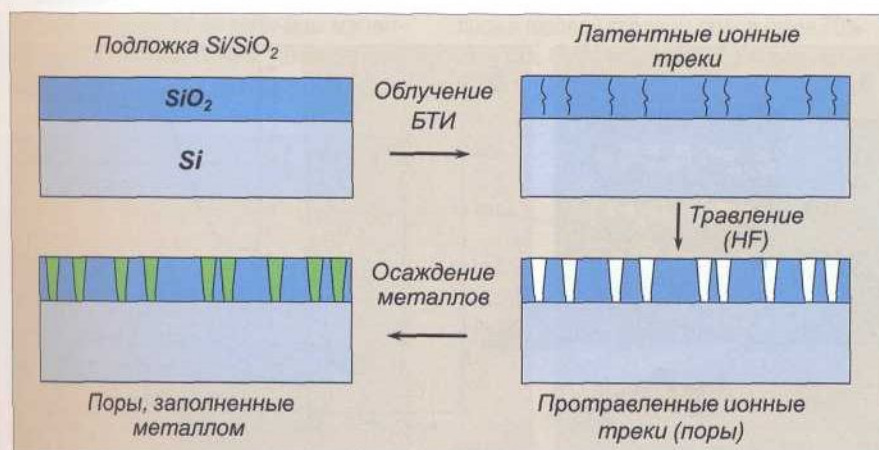


Рис. 1. Технологическая схема создания структур Si/SiO<sub>2</sub>/металл с использованием ионно-трековой технологии

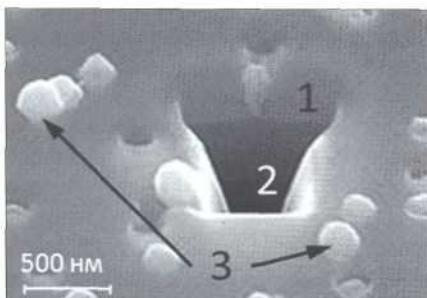


Рис. 2. Изображения структуры Si/SiO<sub>2</sub>/металл: 1 – слой оксида кремния, 2 – подложка кремния, 3 – металл, осажденный в поры оксида кремния

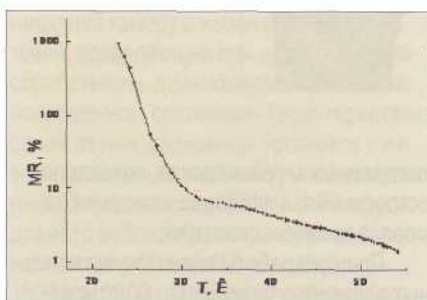


Рис. 3. Температурная зависимость магнетосопротивления Si/SiO<sub>2</sub>/Ni в поле 12 Тл

ными свойствами. Особый интерес представляют диэлектрические матрицы на полупроводниковой подложке, позволяющие адаптировать получаемые наноструктуры к стандартной кремниевой технологии. На первом этапе их создания диэлектрический слой оксида кремния на подложке промышленно выпускаемых монокристаллических пластин кремния марки КЭФ 4,5 облучали быстрыми тяжелыми ионами на линейном ускорителе с энергией до 350 Мэв. В результате в оксидном слое формировались высокодефектные области (латентные треки). Последующее их химическое травление до подложки кремния и заполнение металлами методом селективного электрохимического осаждения (рис. 1) завершало процесс создания структуры Si/SiO<sub>2</sub>/металл как рабочего элемента сенсора.

Изображение сформированной структуры, полученное методом сканирующей электронной микроскопии, показано на рис. 2.

Результаты исследований магнетосопротивления структур Si/SiO<sub>2</sub> с порами, заполненными никелем, в широком температурном интервале (4–300 К) в попереч-

ных магнитных полях до 12 Тл показали, что при понижении температуры наблюдается уменьшение проводимости системы Si/SiO<sub>2</sub>/Ni. С точки зрения сенсорных возможностей наибольший интерес представляет низкотемпературный промежуток: при T < 50 К начинает проявляться магниторезистивный эффект, достигающий при T < 25 К значения 1000% (рис. 3). Такая его величина свидетельствует о перспективе использования данных структур в приборах и аппаратах космического применения, функционирующих при температурах жидководородного охлаждения.

Для расширения температурного интервала существования магниторезистивного эффекта работы со структурами Si/SiO<sub>2</sub>/металл были нацелены на создание чередующихся ферромагнитных (никель) и немагнитных (медь) слоев металлов в порах оксида кремния (рис. 4а). В этой конфигурации магниторезистивный эффект начинает проявляться при комнатных температурах, достигая значений ~30 % (рис. 4б) и свидетельствуя о перспективности использования структур Si/SiO<sub>2</sub> с чередующимися слоями металлов в порах в качестве чувствительного к магнитному полю элемента сенсорных устройств, функционирующих как в климатическом диапазоне, так и в области низких температур.

Использование многослойных структур в порах оксида кремния на кремнии позволило расширить температурный диапазон существования магниторезистивного эффекта, однако промежуточный

интервал (50–200 К) остался незадействованным. Для ликвидации «температурного пробела» была применена технология TEMPOS (рис. 5 а). TEMPOS-структуры проявляют свойства, схожие с характеристиками электронных устройств типа МОП-структур. В то же время TEMPOS-структуры имеют дополнительные свободные параметры, такие как форма и плотность протравленных треков, положение, высота, диаметр и тип материала, внедренного в треки. Это дает более широкие возможности для создания микро- и нанoeлектронных устройств.

Приложение напряжения смещения порядка 10 В к управляющему электроду TEMPOS-структуры позволило добиться проявления магниторезистивного эффекта в интервале от комнатных до жидководородных температур (рис. 5 б). Исследование магнетосопротивления при разных напряжениях смещения показали возможность управления величиной магниторезистивного эффекта.

При создании второго типа сенсоров применили сложные металлооксидные соединения с высокой степенью спиновой поляризации.

Спиновая электроника (спинтроника) базируется на новых технологиях наноразмерного масштаба, основанных на фундаментальных принципах квантовой физики. Традиционная электроника использует движение носителей заряда в электрическом поле, тогда как в спинтронике оно должно осуществляться с определенной ориентацией спина. Наиболее

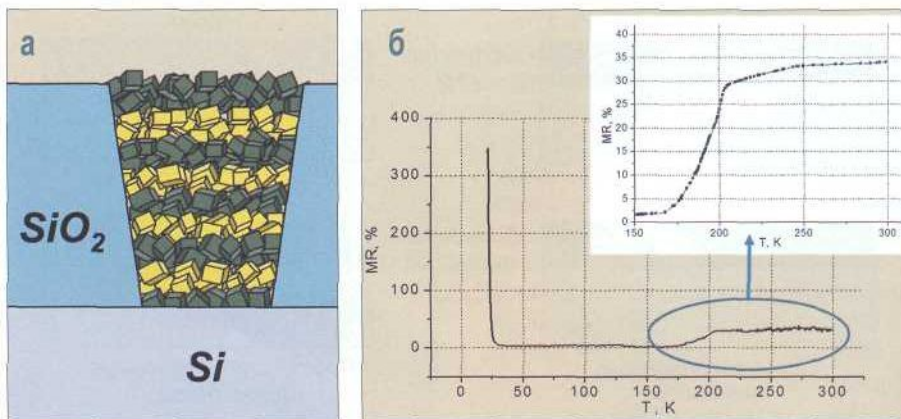


Рис. 4. Схематическое изображение структуры Si/SiO<sub>2</sub> с чередующимися слоями кластеров меди и никеля (а); зависимость магнетосопротивления от температуры структуры Si/SiO<sub>2</sub>/(Cu-Ni) (б)

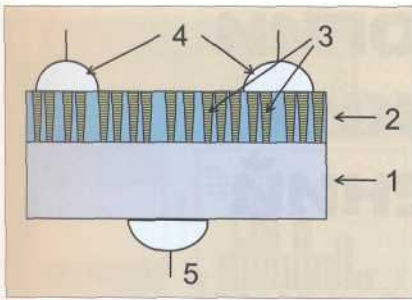


Рис. 5 а. Схематическое изображение TEMPOS-структур: 1 – полупроводниковая подложка, 2 – диэлектрический слой, 3 – узкие каналы в диэлектрическом слое, заполненные металлом или слоями металлов, 4 – электрические контакты на поверхности SiO<sub>2</sub>, 5 – управляющий контакт

перспективны здесь магнитные полупроводники Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6±δ</sub> со структурой двойного перовскита, обладающие высокими значениями температуры Кюри (T<sub>c</sub>~420 К) и высокой степенью (~100%) спиновой поляризации. Такие свойства наиболее интересны при использовании совершенных наноразмерных пленок, формирующихся в многослойные структуры, принцип действия которых основан на эффекте туннельного магнетосопротивления. Последний может быть получен на структурах, подобных спиновому вентиллю, где место проводящей немагнитной прослойки занимает тонкий слой изолятора. Сопротивление такой структуры зависит от относительного направления намагниченности слоев благодаря различным вероятностям прохождения носителей с противоположными ориентациями спина через туннельный барьер.

В реальности туннельное магнетосопротивление зависит от величины магнитного поля и его ориентации, температуры, материала и толщины диэлектрического

слоя, а также множества других параметров. В качестве материала изолирующего слоя оптимален оксид алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Его слой не должен быть более 5–10 нм, так как вероятность туннелирования электрона через потенциальный барьер зависит от толщины и взаимной ориентации векторов намагниченности. Изменение магнетосопротивления в многослойных структурах с перпендикулярной геометрией дает больший эффект (рис. 6 а). Это связано с тем, что все носители испытывают спин-зависимое рассеивание при пересечении границы раздела между слоями и устраняется шунтирующий эффект тока, проходящего через промежуточные немагнитные слои. Такие многослойные магниторезистивные элементы могут достигать значений туннельного магнетосопротивления до 30% при комнатной температуре.

Один из эффективных способов формирования структурно-совершенных пленок Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6±δ</sub> – ионно-лучевой метод. С его помощью можно контролировать скорость напыления, температурные режимы отжига пленки, энергию распыляемых катионов, управляя таким образом их фазовым составом, структурным совершенством и, соответственно, физико-химическими свойствами.

Напыление нижней пленки Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6±δ</sub> толщиной 1 мкм проводилось в инертной среде аргона со скоростью при температуре подложки 930 К. Напыление пленки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной ~7 нм на поверхность слоя Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6±δ</sub> проводилось в газовой среде из смеси газов 70% Ag + 30% O<sub>2</sub> со скоростью 7 ± 0,5 нм/мин и температуре подложки 930 К. Верхняя

пленка Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6±δ</sub> толщиной 1 мкм на поверхность слоя Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> напылялась при режимах, аналогичных нижней. Микроструктура полученной композиции показана на рис. 6 б.

При изучении сенсорной чувствительности структуры к магнитному полю обнаружено, что с увеличением индукции последнего величина электрического сопротивления уменьшается, то есть наблюдается отрицательное магнетосопротивление. Максимальное изменение значений магнетосопротивления имеет место в полях до 0,3 Тл с последующим выходом на насыщение.

При протекании спинполяризованного тока вероятность туннелирования электронов, термически активированных выше энергетического барьера между слоями Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6±δ</sub>, зависит от взаимной ориентации магнитных моментов зерен. В отсутствие магнитного поля они ориентированы случайным образом, и, согласно модели Слончевского, туннельный ток минимален, то есть реализуется состояние с высоким электросопротивлением. Во внешнем магнитном поле формируется коллинеарная магнитная структура, что приводит к увеличению спин-поляризованного тока.

Данные структуры довольно привлекательны для использования в качестве чувствительных к магнитному полю элементов сенсорных устройств, функционирующих в области как слабых, так и сильных магнитных полей в широком диапазоне температур. В пользу их применения говорит то, что данные структуры строятся на подложках, органично адаптируя магнетизм к стандартной кремниевой технологии. ■

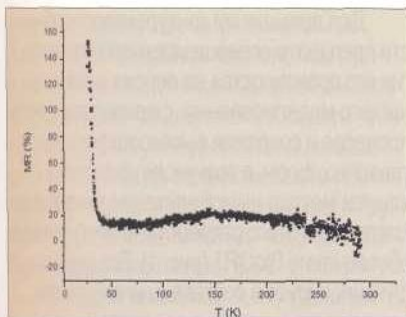


Рис. 5 б. Зависимость магнетосопротивления от температуры TEMPOS-структуры

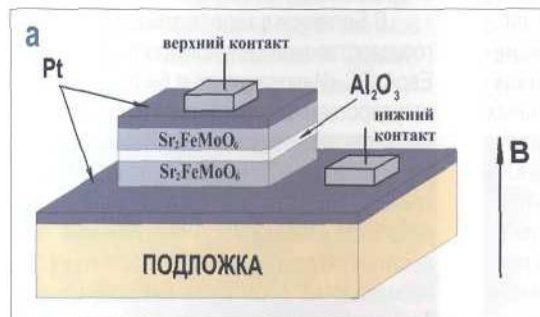


Рис. 6. Схематическое изображение (а) и микроструктура мультислойной пленочной структуры Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6±δ</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6±δ</sub> (б)