

05;11;12

Магниторезистивная среда Fe₁₉Ni₈₁/Tb-Co с внутренним магнитным смещением

© В.О. Васьковский, К.Г. Балымов, А.А. Ювченко, А.В. Свалов, А.Н. Сорокин, Н.А. Кулеш

Уральский государственный университет им. А.М. Горького,
620086 Екатеринбург, Россия
e-mail: Vladimir.Vaskovskiy@usu.ru

(Поступило в Редакцию 24 сентября 2010 г. В окончательной редакции 10 декабря 2010 г.)

Исследованы особенности перемагничивания и магнитосопротивления двухслойных обменносвязанных пленок типа Fe₁₉Ni₈₁/Tb-Co. Установлено, что аморфные слои Tb_xCo_{100-x} при $30 < x < 35$ обладают одноосной магнитной анизотропией и достаточно высокой коэрцитивной силой, что обеспечивает магнитное смещение прилегающих слоев пермаллоя. Наряду с этим в слоях пермаллоя, подвергнутых селективному отжигу, реализуются значительная анизотропия магнитосопротивления и низкий магнитный гистерезис. Совокупность указанных свойств позволяет рассматривать разработанную пленочную структуру как эффективную магниторезистивную среду. С ее использованием получены образцы магнитных сенсоров, обладающих нечетной функцией преобразования в отсутствие внешнего подмагничивания.

Введение

Магнитоэлектрические эффекты относятся к разряду физических явлений, нашедших широкое применение в сфере магнитной сенсорики [1–3]. Важное место среди них занимает магнитосопротивление, т.е. зависимость электросопротивления от величины и ориентации магнитного поля. В последнее время главное внимание исследователей и разработчиков новой техники было сосредоточено на так называемом гигантском магнитосопротивлении (ГМС) [4]. Основным функциональным преимуществом сред с ГМС является большая величина эффекта, которая обусловила их успешное использование в цифровой технике. В то же время для создания аналоговых чувствительных элементов, пригодных для высокоточных измерений, более важной особенностью среды является низкий магнитный гистерезис. Такому требованию достаточно хорошо удовлетворяют пленки пермаллоя, в которых имеет место иное магниторезистивное явление — анизотропия магнитосопротивления (АМС) [3].

Наряду с низким гистерезисом аналоговые сенсоры должны обладать нечетной и линейной функцией преобразования, связывающей полезный сигнал с измеряемым магнитным полем. Указанные характеристики могут быть реализованы в пленочной структуре с элементами в форме наклонных меандров, которые объединены в мостовую электрическую схему. Работоспособность такой сенсор приобретает в условиях внешнего подмагничивания (магнитного смещения) [5] или при наличии специфической системы немагнитных шунтирующих проводников (barber-структуры) [6]. Однако более технологичным решением при разработке АМС-сенсоров представляется использование магниточувствительной среды, сочетающей анизотропию магнитосопротивления с внутренним магнитным смещением. Результаты исследования, направленного на создание подобной среды, представлены в данной работе.

Методика

Известно, что внутреннее магнитное смещение, или однонаправленная анизотропия, может реализовываться в магнитомягком слое двухслойной пленочной структуры, связанном обменным взаимодействием с прилегающим антиферромагнитным или магнитотвердым слоями [7]. Именно на последний вариант среды ориентирована данная работа. При этом в качестве материалов магнитомягкого и магнитотвердого слоев были выбраны соответственно пермаллой — Fe₁₉Ni₈₁, имеющий относительно высокую анизотропию магнитосопротивления, и ферримагнитная система Tb-Co, которая в тонкопленочном аморфном состоянии обнаруживает достаточно высокую коэрцитивную силу. Образцы для исследований были получены методом ионного распыления сплавной мишени Fe₁₉Ni₈₁ и мозаичной мишени Tb-Co. Подложками служили стекла „Corning“. Формирование пленок проходило в присутствии однородного магнитного поля напряженностью 150 Ое. Оно было ориентировано параллельно плоскости подложек и задавало ось магнитного смещения (ОМС). Для предотвращения окисления магнитной пленочной структуры на ее поверхность, а в ряде случаев и на поверхность подложки наносились слои Ti. Измерения магнитных свойств пленок выполнены на вибромагнитометре и SQUID-магнитометре, магнитосопротивления — четырехзондовым методом в катушках Гельмгольца.

Результаты и их обсуждение

Предварительные исследования показали, что пленки Tb_xCo_{100-x} в широкой области составов ($x = 10–40$) рентгеноаморфны, а их спонтанная намагниченность достаточно хорошо описывается в модели сперримагнетизма. Данная модель предполагает коллинеарное магнитное упорядочение в подсистеме Co и веероподобную

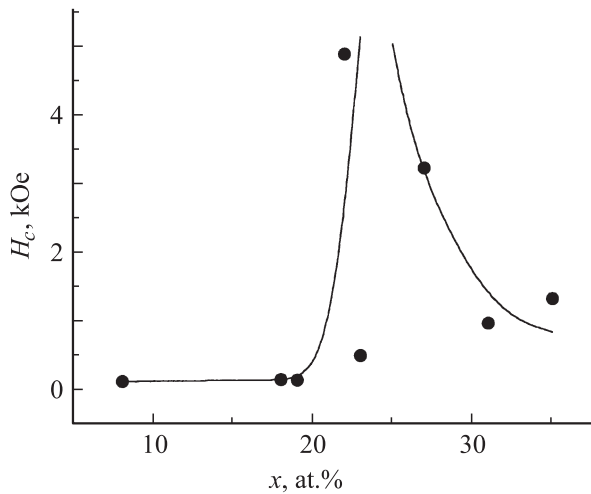


Рис. 1. Зависимость коэрцитивной силы пленок Tb_xCo_{100-x} от состава.

магнитную структуру в подсистеме Tb, результирующая намагниченность которой антипараллельна намагниченности кобальтовой составляющей. Такая структура во многих отношениях ведет себя как ферромагнитная, и при $x \approx 22$ вблизи комнатной температуры для нее свойственна магнитная компенсация. Это задает немотонный характер зависимости коэрцитивной силы H_c от содержания Tb, показанной на рис. 1. При построении зависимости $H_c(x)$ элементный состав пленок определен методом химического анализа с погрешностью 0.5 at.%, значения H_c найдены из петель гистерезиса, измеренных на образцах толщиной 100 nm вдоль ОМС. Из рис. 1 видно, что около компенсационного состава имеет место максимум H_c . Однако этой области составов присущи резкая температурная нестабильность коэрцитивной силы и вероятность образования в пленках так называемой перпендикулярной магнитной анизотропии [8]. Последняя затрудняет создание однонаправленной анизотропии в прилегающих слоях и повышает их магнитный гистерезис. Поэтому для решения поставленной задачи более приемлем диапазон $30 < x < 35$ at.%. Пленки соответствующего состава отличаются несколько меньшим магнитным гистерезисом, но большей стабильностью магнитных свойств.

На рис. 2 и рис. 3 показаны петли гистерезиса $j(H)$ пленочной структуры $SiO_2/Ti(50)/Tb_{31}Co_{69}(100)/Fe_{19}Ni_{81}(40)/Ti(50)$. Здесь и далее косые линии символизируют деление пленки на слои; цифры в скобках обозначают толщину слоев в нанометрах. Зависимости $j(H)$ измерены в плоскости пленки вдоль и перпендикулярно ОМС при разной амплитуде магнитного поля. Приведенная намагниченность j получена путем нормирования текущих значений намагниченности $M(H)$ на максимальную величину намагниченности в каждом эксперименте.

Ступенчатый вид петли гистерезиса на рис. 2, *a* указывает на послойное перемагничивание образца. Причем

„перехлест“ ветвей петли в центральной части отражает „отрицательную“ связь между магнитными слоями. Последнее означает, что в отсутствие внешнего магнитного поля равновесной является антипараллельная ориентация магнитных моментов слоев. Она возникает благодаря обменно-взаимодействию ферромагнитного слоя пермаллоя с аморфным ферромагнитным слоем, в котором превалирует немагнитность тербиевого подсистемы. В итоге слой пермаллоя приобретает магнитное смещение. Это, в частности, демонстрирует рис. 3, *a*, на котором показана частная петля гистерезиса, измеренная на данном образце в максимальном поле, меньшем коэрцитивной силы магнитотвердого слоя. Как видно, имеет место сдвиг петли по оси полей на величину поля смещения $H_e \approx 200$ Oe.

Магнитное смещение является важным, но не единственным условием того, чтобы магниторезистивный отклик среды мог формироваться на основе обратимого вращения намагниченности, т.е. с минимальным гистерезисом. Существенное значение имеет наличие в материале устойчивой одноосной магнитной анизотропии. На рис. 2, *b* приведена петля гистерезиса, изме-

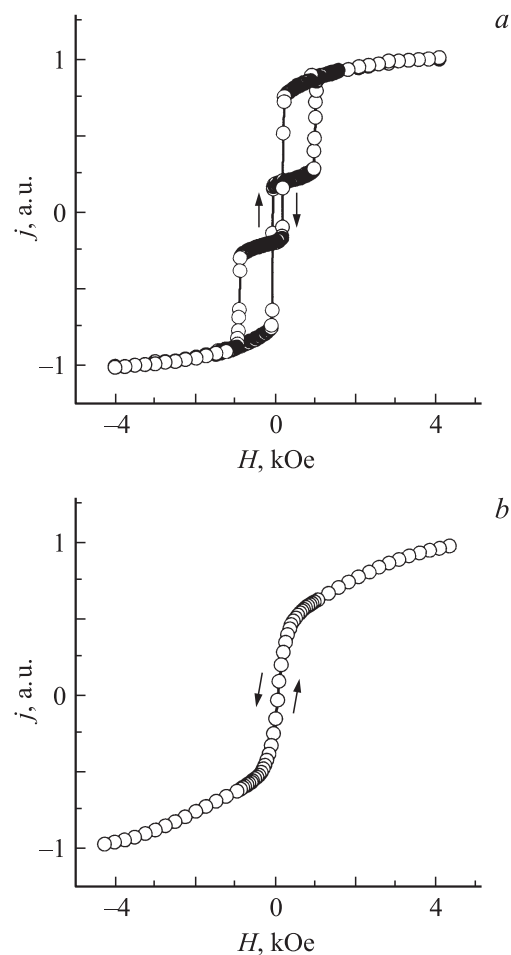


Рис. 2. Петли гистерезиса пленки $SiO_2/Tb_{31}Co_{69}(100)/Fe_{19}Ni_{81}(40)/Ti(50)$, измеренные в плоскости образца вдоль (*a*) и перпендикулярно (*b*) ОЛН в максимальном поле $H_m = 4$ kOe.

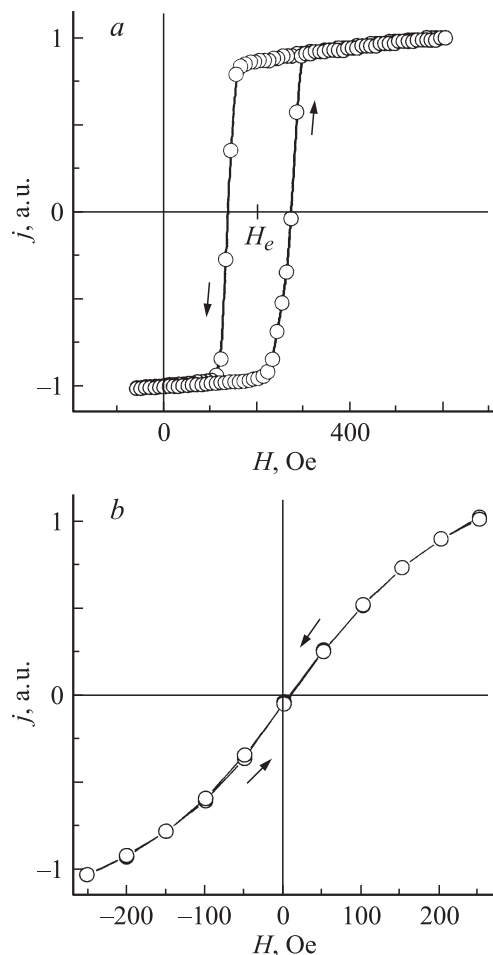


Рис. 3. Петли гистерезиса пленки $\text{SiO}_2/\text{Tb}_{31}\text{Co}_{69}(100)/\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}(40)/\text{Ti}(50)$, измеренные в плоскости образца вдоль (а) и перпендикулярно (б) ОЛН в максимальном поле $H_m < 600$ Ое.

ренная в плоскости исследуемого образца перпендикулярно ОМС. Ее безгистерезисный характер говорит о том, что ОМС для данного объекта фактически является осью легкого намагничивания (ОЛН). В то же время специфика двухслойной обменносвязанной структуры задает двухстадийный характер процесса намагничивания. В области относительно малых полей (≤ 200 Ое) в основном происходит поворот магнитного момента слоя пермаллоя, затруднение которого практически целиком обеспечивается обменной межслойной связью. Намагничивание в более сильном поле осуществляется за счет поворота магнитного момента аморфного слоя. При этом поле анизотропии достигает 4 кОе. Отсюда можно заключить, что магнитная анизотропия пленочной системы в целом задается одноосной магнитной анизотропией аморфного слоя. Она формируется на стадии получения пленок и, вероятно, имеет магнитоупругую природу. В поле меньшей амплитуды (рис. 3, б) петля гистерезиса становится похожа на обычную зависимость $j(H)$, наблюдающуюся при намагничивании одноосных магнетиков вдоль оси трудного намагничивания.

В целом представленные результаты показывают, что по магнитным свойствам двухслойные пленки на основе аморфной системы Tb-Co и пермаллоя обладают потенциалом обсуждаемого практического применения. Магнитные слои имеют большое различие в коэрцитивной силе, сильную межслойную связь и одноосную магнитную анизотропию, обуславливающие эффективное магнитное смещение и низкий магнитный гистерезис слоя пермаллоя. Однако магниторезистивные характеристики такой пленочной структуры оказались низкими. В частности, эффект анизотропии магнитосопротивления в магнитном поле до 100 Ое не превысил 0.2%. Главные причины этого состоят в характерной (нанокристаллической) структуре пермаллоя, которая реализуется при получении пленок методом ионного распыления и блокирует магниторезистивный эффект [9], и в излишне сильном магнитном смещении и шунтирующем действии слоев Tb-Co и Ti.

Эффективным способом повышения анизотропии магнитосопротивления поликристаллических сплавов является термообработка [9]. Однако в данном случае отжиг полностью сформированной пленочной структуры неприемлем, в частности из-за весьма вероятной кристаллизации и радикального изменения магнитных свойств аморфного слоя. Необходим селективный отжиг слоя пермаллоя, который предполагает изменение порядка осаждения магнитных слоев по отношению к варианту, рассмотренному выше. Эксперимент показал, что свойства пленочной структуры при этом практически не изменяются. В итоге была принята следующая последовательность технологических операций. Непосредственно на подложку наносился слой пермаллоя, выполнялся его вакуумный отжиг в течение 1 часа, затем осаждались аморфный слой и защитное покрытие Ti. Кроме того, были уменьшены толщины слоев Tb-Co и Ti.

На рис. 4 показаны частные петли гистерезиса и магниторезистивные петли пленочной структуры $\text{SiO}_2/\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}(40)/\text{Tb}_{31}\text{Co}_{69}(50)/\text{Ti}(10)$, в которой слой пермаллоя отожжен при температуре 350°C. Зависимости $j(H)$, измеренные вдоль и перпендикулярно ОЛН (рис. 4, а), как и в случае, рассмотренном выше, демонстрируют наличие в данном образце магнитного смещения и одноосной магнитной анизотропии. Изменения, и достаточно сильные, обнаружили в количественных параметрах процесса намагничивания вдоль ОЛН: поле смещения и коэрцитивная сила уменьшились с 200 до 60 Ое и с 60 до 0.2 Ое соответственно. Наблюдающееся уменьшение величины H_e может быть связано с модификацией поверхности слоя пермаллоя при отжиге, например из-за адсорбирования на ней остаточных газов. В свою очередь, ослабление межслойного взаимодействия может быть причиной уменьшения коэрцитивной силы из-за исключения из процесса перемагничивания элементов межслойного интерфейса, которые, вероятно, имеют повышенный магнитный гистерезис.

Измерение магниторезистивных петель $R(H)$ выполнялось на образцах в форме полосок размера

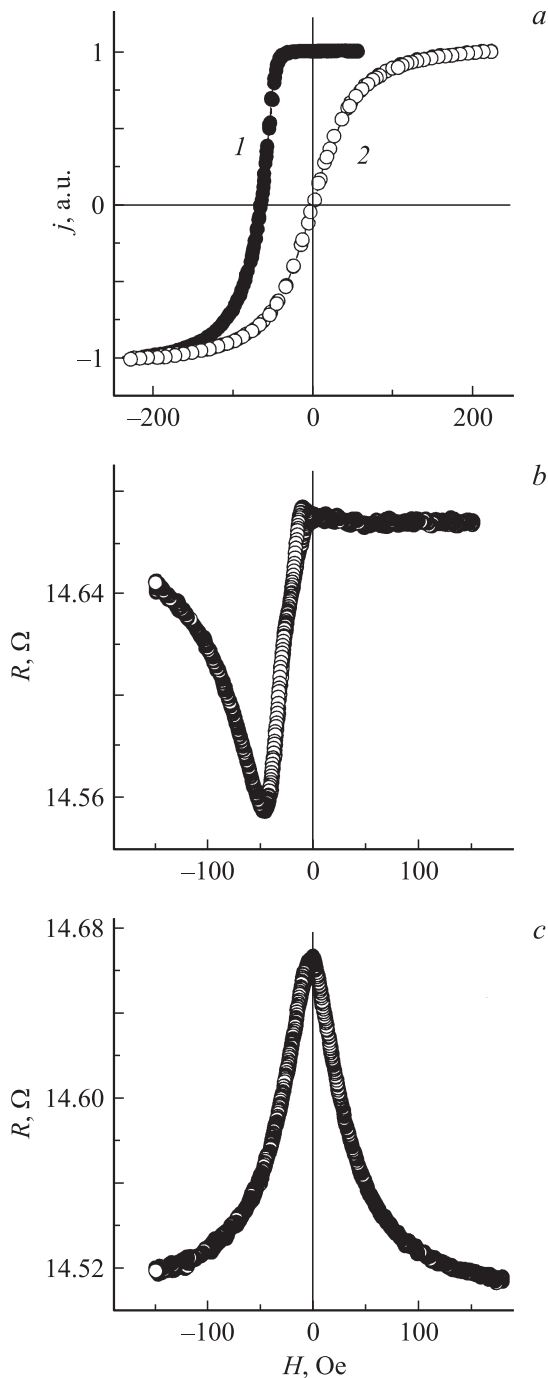


Рис. 4. Магнитные (а) и магниторезистивные (b, c) петли гистерезиса пленки $\text{SiO}_2/\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}(40)/\text{Tb}_{31}\text{Co}_{69}(50)/\text{Ti}(10)$ в состоянии после селективного отжига слоя пермаллоя, измеренные вдоль (а — кривая 1; б) и перпендикулярно (а — кривая 2; в) ОЛН.

ми 2×10 mm. Ток пропусклся вдоль ОЛН, ориентация которой совпадала с длинной стороной полосок. На рис. 4, b показана зависимость $R(H)$ для случая перемагничивания образца вдоль ОЛН. В отсутствие внешнего поля намагниченность параллельна оси протекания тока, что определяет максимальную величину R .

В области положительных полей ориентация намагниченности не изменяется, соответственно сохраняется и величина R . В поле противоположного знака имеет место немонотонное изменение электросопротивления, которое отражает постепенный поворот намагниченности. На начальной стадии происходит отклонение намагниченности от оси тока, что ведет к уменьшению R . В большем поле имеет место обратная закономерность: намагниченность поворачивается к оси тока и R возрастает. Однако в этом случае изменение R происходит менее резко, что обусловлено формированием на межслойной границе магнитной неоднородности, обеспечивающей пространственно распределенный переход между магнитными системами разных слоев. Перемагничивание перпендикулярно ОЛН (рис. 4, c) дает зависимость $R(H)$, типичную для материалов с анизотропией магнитосопротивления. Она показывает, что в исследуемом образце при очень низком гистерезисе относительное изменение электросопротивления в поле до 100 Oe составляет около 1%. Путем варьирования температуры отжига и толщин слоев в пленочной структуре величину магниторезистивного эффекта удалось поднять до 2.6%. Это позволило провести практическое испытание разработанной магниторезистивной среды.

На рис. 5 представлена зависимость полезного сигнала U от напряженности внешнего магнитного поля, полученная на реальном сенсорном элементе, изготовленном в производственных условиях с использованием метода оптической фотолитографии. Элемент имел схему эклектического моста, каждое из плеч которого выполнено в форме наклонного меандра [6]. Как видно, она имеет нечеткий характер и дает величину чувствительности 1.5 мВ/Ое. Такой уровень свойств позволяет тестировать подобные сенсоры в составе более сложных измерительных устройств, но оставляет задачу повышения чувствительности магниторезистивной среды.

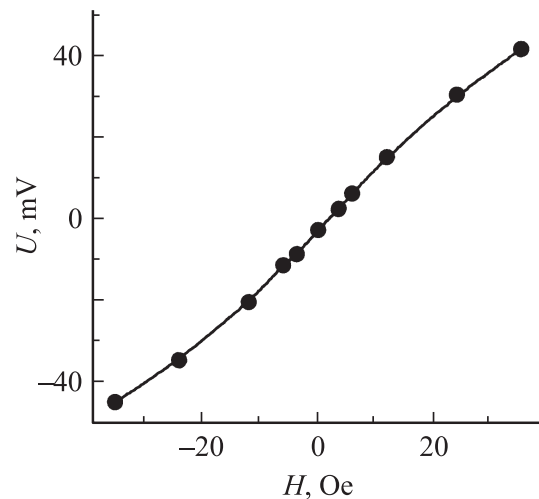


Рис. 5. Функция преобразования магниторезистивного сенсора (ток питания — 5 мА).

Заключение

Резюмируя описанные тенденции в изменении свойств магниторезистивной среды типа Fe₁₉Ni₈₁/Tb-Co, нужно констатировать следующее. С одной стороны, сильное магнитное смещение препятствует достижению высокой чувствительности среды к магнитному полю, но, с другой стороны, оно способствует реализации низкого магнитного гистерезиса. Поэтому при решении конкретных практических задач целесообразна соответствующая оптимизация параметров пленочной структуры, в том числе с использованием немагнитных прослоек [10].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-02-99063).

Список литературы

- [1] *Prinz G.A.* // J. Magn. Magn. Mater. 1999. Vol. 200. P. 57–68.
- [2] *Kurlyandskaya G.V., de Cos D., Volchkov S.O.* // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2009. Vol. 45. № 6. P. 377–398.
- [3] *Hauser H., Tondra M.* // Magnetic Sensors and Magnetometers. Boston–London: Artech House, 2000. P. 129–171.
- [4] *Coehorn R.* // Handbook of Magnetic Materials. Elsevier, 2003. Vol. 15. P. 1–197.
- [5] Патент 20849-12 РФ. Датчик магнитного поля / О.В. Анропов, В.О. Васьковский, В.П. Гогин, В.Г. Мухаметов, П.А. Савин, А.Н. Сорокин, Е.К. Станина. 1997. № 20.
- [6] *Dibbern U.* // Sensors and Actuators. 1983. Vol. 4. P. 221–227.
- [7] *Nogués J., Sort J., Langlais V., Skumryev V., Suriñach S., Muñoz J.S., Baró M.D.* // Phys. Rep. 2005. Vol. 422. P. 65–117.
- [8] *Фролов Г.И., Жигалов В.С.* Физические свойства и применение магнито пленочных нанокмпозитов. Новосибирск: Наука, 2006. 187 с.
- [9] *Лепаловский В.Н.* Магнитосопротивление и гистерезисные свойства пленок Fe-Co-Ni с варьируемой микроструктурой. Канд. дис. Екатеринбург, 2002. 199 с.
- [10] *Halloran S.T., da Silva F.C.S., Fardi H.Z., Pappas D.P.* // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 102. P. 033 904 1–3.