

05;12

## **Прямое измерение коэрцитивности и обменного смещения полей перемагничивания электропроводящих магнитных пленок наноразмерной толщины с использованием анизотропного магниторезистивного эффекта**

© А.В. Медведь, Р.Г. Крышталь, А.И. Крикунов, С.И. Касаткин

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино

E-mail: avm@ms.ire.rssi.ru

Институт проблем управления РАН, Москва

E-mail: serkasat@ipu.rssi.ru

Поступило в Редакцию 17 мая 2005 г.

Использован эффект анизотропного магнетосопротивления для прямого измерения коэрцитивной силы и обменного смещения поля перемагничивания в электропроводящих ферромагнитных пленках наноразмерной толщины и слоистых структурах, содержащих такие пленки и применяемые при изготовлении спин-туннельных переходов с гигантским магнетосопротивлением. В качестве примера выполнены измерения в пленках пермаллоя (Py) толщиной 25 nm, изготовленных магнетронным методом на подложке из окисленного кремния и в многослойных структурах FeMn(15 nm)–Py(10 nm)–SiC(1.5 nm)–Py(10 nm) на ситалловой подложке. Получено удовлетворительное согласие с результатами измерений, выполненных индукционным методом.

Важными характеристиками наноразмерных магнитных пленок, которые используются при изготовлении спин-туннельных магниторезистивных элементов [1,2], являются коэрцитивность и величина смещения поля перемагничивания, возникающего за счет обменного взаимодействия в структурах с ферромагнитной пленкой и антиферромагнитными закрепляющими слоями [3]. Пленки в этих элементах обычно имеют форму узких полосок. Для пленочных структур, выращенных в виде дисков и прямоугольников сравнительно больших размеров, эти

характеристики могут быть получены из измерений намагничивания пленки во внешнем магнитном поле с помощью специальных приборов (см., например, [4,5]), которые не всегда приспособлены для измерения структур сравнительно малых планарных размеров. Известны также методики [6,7], использующие анизотропный магниторезистивный эффект. Этот эффект заключается в изменении электрического сопротивления пленки при изменении направления ее вектора намагниченности внешним магнитным полем [6]:

$$R = R_0 + \Delta R_{AMR} \cos^2 \theta, \quad (1)$$

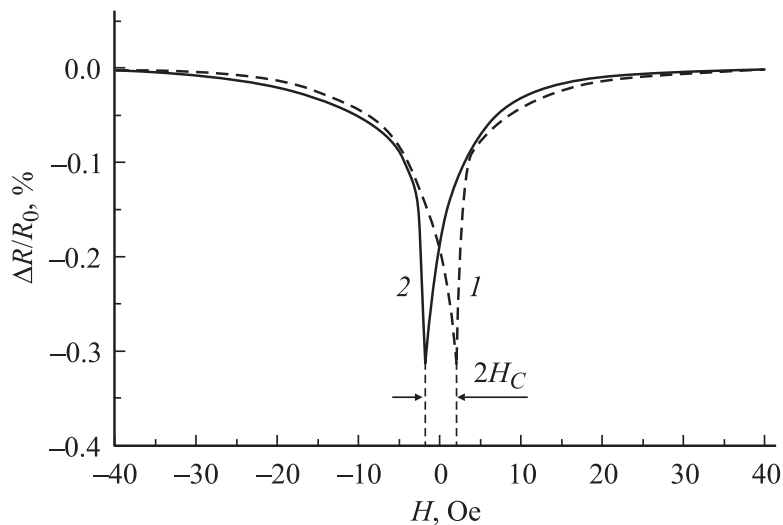
где  $\theta$  — угол между направлением электрического тока и вектором намагниченности в образце,  $R_0$  — сопротивление образца при  $\theta = \pi/2$ ,  $\Delta R_{AMR}$  — максимальное изменение сопротивления под действием магнитного поля, достигаемое в образце. Однако в [6,7] использовались структуры со сравнительно большими планарными размерами, либо образцы для обеспечения достаточной чувствительности при измерениях вырезались из „широкой“ пленки таким образом, чтобы ось анизотропии составляла с направлением тока в образце угол  $\theta_a = 45^\circ$ . На практике при изготовлении спин-туннельных магниторезистивных структур ось анизотропии обычно направлена вдоль длинной оси пленки (угол  $\theta_a = 0$ ). Интересующие величины вычислялись по формулам, выведенным на основе тех или иных теоретических моделей, с использованием измеренных угловых зависимостей магнетосопротивления.

В настоящей работе впервые описываются экспериментальные результаты прямого (без использования теоретических моделей) определения обменного смещения поля перемангничивания и коэрцитивности в наноразмерных электропроводящих магнитных пленках и структурах, у которых направление оси анизотропии совпадает с направлением тока и направлением внешнего магнитного поля, а планарные размеры образцов такие же, как у пленочных элементов, применяемых для изготовления спин-туннельных структур. В наших экспериментах измеряется зависимость сопротивления образца от величины магнитного поля, направление которого в процессе измерения зафиксировано вдоль оси анизотропии. На первый взгляд, из-за того, что направление оси анизотропии совпадает с направлением тока и направлением внешнего магнитного поля (1), сопротивление образца не должно изменяться

с изменением магнитного поля, так как угол между внешним магнитным полем (следовательно, и намагниченностью) и направлением тока не изменяется. Как показали наши эксперименты, сопротивление образцов изменяется при перемагничивании из-за движения доменных границ, в которых происходит изменение направления вектора намагниченности, а объем этих доменных границ в образце может быть достаточно большим. При полях, близких к величине коэрцитивной силы магнитных пленок, когда в образце резко возрастает объем доменных границ, эффективное значение угла  $\theta$  отклоняется от нулевого значения, и сопротивление образца уменьшается. Измерение величины внешних магнитных полей, при которых в образце находится максимальный объем доменных границ, позволяет непосредственно измерять коэрцитивную силу и обменное смещение поля перемагничивания.

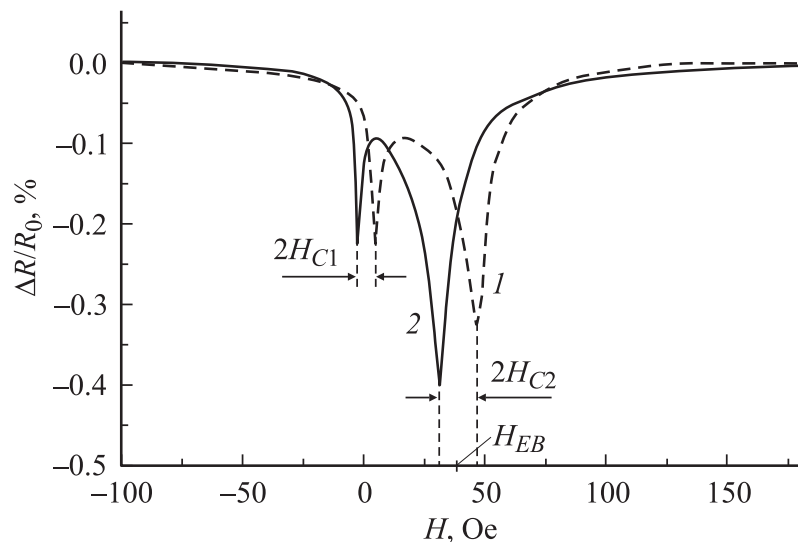
В качестве образцов электропроводящих магнитных пленок с одноосной анизотропией использовались пленки пермаллоя (Py), изготовленные методом магнетронного распыления на подложках из окисленного кремния. В качестве образцов с обменным смещением поля перемагничивания использовались многослойные структуры FeMn(15 nm)–Py(10 nm)–SiC(1.5 nm)–Py(10 nm), выращенные на ситалловой подложке методом магнетронного распыления. Образцы имели планарные размеры  $100 \times 70\,000 \mu\text{m}$ . Направление осей магнитной анизотропии в образцах обоих типов задавалось магнитным полем в процессе роста пленок.

Образцы помещались в магнитное поле, лежащее в плоскости образца, и измерялась зависимость из сопротивления при фиксированном направлении поля от величины магнитного поля при монотонном его возрастании и при убывании от 400 до  $-400$  Oe. Измерения проводились в режиме постоянного тока, протекающего через образец. Величина тока в пределах  $1\text{--}100 \mu\text{A}$  существенного влияния на результаты измерений не оказывала. Измерения проводились при комнатной температуре. На рис. 1 представлены измеренные зависимости относительного изменения сопротивления образца с единственной пленкой пермаллоя как функции магнитного поля, направленного вдоль длинной оси образца. Из рисунка видно, что величина  $\Delta R/R \leq 0$  при всех значениях поля. При полях, соответствующих коэрцитивной силе,  $\Delta R/R$  стремится к минимуму — узкие провалы на соответствующих кривых. Коэрцитивная сила отдельной пленки Py, как следует



**Рис. 1.** Зависимость относительного изменения сопротивления пленки пермаллоя  $\Delta R/R_0$  от приложенного магнитного поля  $H$ , направленного вдоль длинной оси образца. 1 — измерения при возрастающем поле, 2 — при убывающем.  $H_C$  — величина коэрцитивной силы.

из экспериментальных зависимостей,  $H_C = 1.5$  Oe, что удовлетворительно согласуется с результатами измерений, выполненных другими известными методами. На рис. 2 представлены результаты измерения сопротивления в многослойной структуре в зависимости от величины магнитного поля, направленного вдоль длинной оси образца. Из рисунка видно, что каждая кривая имеет по два узких минимума. Один минимум соответствует полю перемагничивания пленки  $Pu$ , не граничащей с антиферромагнитным слоем  $FeMn$ , а второй соответствует полю перемагничивания второй пленки  $Pu$ , в которой имеется смещение поля перемагничивания из-за обменного взаимодействия со слоем  $FeMn$ . Минимумы, измеренные при возрастающем и убывающем поле, оказываются смещенными относительно друг друга из-за коэрцитивности в магнитных пленках. Из этих кривых следует, что  $H_{C1} = 4$  Oe,  $H_{C2} = 7.5$  Oe,  $H_{EB} = 39$  Oe. Измерения коэрцитивной силы



**Рис. 2.** Зависимость относительного изменения сопротивления  $\Delta R/R_0$  многослойной структуры „FeMn–Ru–SiC–Ru“ от приложенного магнитного поля  $H$ , направленного вдоль длинной оси образца. 1 — измерения при возрастающем поле, 2 — при убывающем.  $H_{EB}$  и  $H_{C2}$  — величина обменного смещения и коэрцитивная сила для ферромагнитной пленки Ru, граничащей с антиферромагнитной пленкой FeMn,  $H_{C1}$  — коэрцитивная сила для пленки Ru, не граничащей с пленкой FeMn.

и обменного смещения поля перемангничивания в многослойных структурах, до формирования из них образцов в виде полосок, проводились также и индукционным методом [5]. С учетом размагничивающего фактора формы образцов и закрепления зигзагообразных доменных границ на краях полосок получено удовлетворительное согласие результатов.

Авторы выражают благодарность П.Е. Зильберману и Э.М. Эпштейну за плодотворные дискуссии.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ офи–№ 04–02–08248.

## Список литературы

- [1] Борисов В.И., Крикунов А.И., Чмилъ А.И. и др. // РЭ. 2004. Т. 49. № 1. С. 84–90.
- [2] Dexin Wang, Cathy Nordman, James M. Daughton et al. // IEEE Trans. on Magnetics. 2004. V. 40. N 4. P. 2269–2271.
- [3] Tong Zhao, Kunliang Zhang, Hideo Fujiwara. // JAP. 2002. V. 91. N 10. P. 6890–6892.
- [4] Franco V., Ramos-Martos J., Conde A. // Rev. Sci. Instrum. 1996. V. 67. N 12. P. 4167–4170.
- [5] Муравьев А.М., Касаткин С.И., Попадинец Ф.Ф. // Заводская лаборатория. 2001. № 7. С. 23–26.
- [6] Miller B.H., Dan Dahlberg E. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69(25). P. 3932–3934.
- [7] Kai-Uwe Burholz, Roland Mattheis // IEEE Trans. on Magnetics. 2002. V. 38. N 5. P. 2767–2769.