

УДК 537.623

## ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ БИСТРУКТУРИРОВАННОГО “ЗАКРЕПЛЕННОГО” СЛОЯ В ПЛЕНКАХ ТИПА FeMn/FeNi

© 2019 г. В. О. Васьковский<sup>1, 2</sup>, А. Н. Горьковенко<sup>1, \*</sup>, Н. А. Кулеш<sup>1</sup>, П. А. Панченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина”, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

\*E-mail: a.n.gorkovenko@urfu.ru

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.

После доработки 31.01.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2019 г.

Исследован эффект обменного смещения в слоях пермаллоя, содержащих прослойку Co–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Установлены закономерности изменения константы обменной связи при варьировании состава и толщины прослойки. Показано, что такого рода структурирование можно использовать для регулирования функциональных свойств сред с обменным смещением.

DOI: 10.1134/S0367676519070421

### ВВЕДЕНИЕ

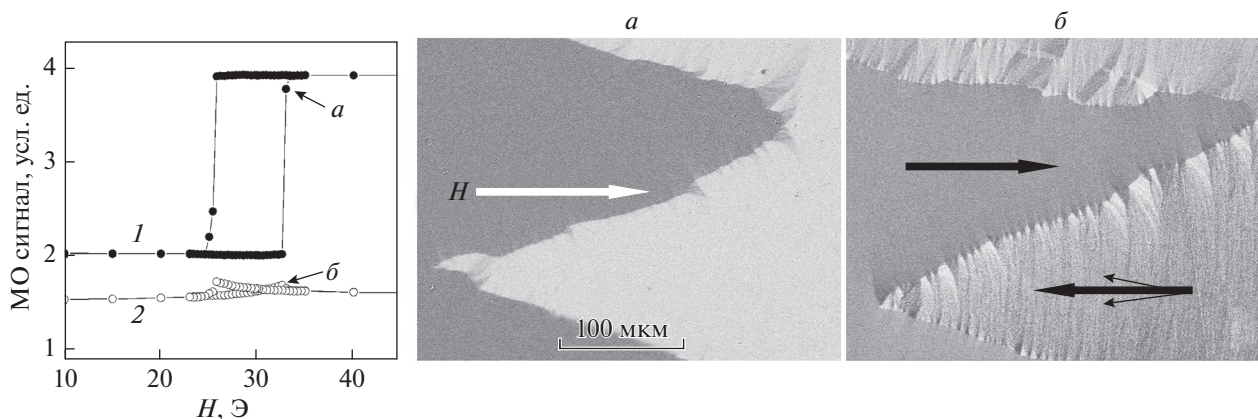
Обменное смещение относится к числу важных функциональных свойств современных материалов для магнитомикроэлектроники и спинтроники [1, 2]. Для слоистых пленочных структур оно формально состоит в сдвиге петли гистерезиса ферромагнитного (“закрепленного”) слоя по оси магнитного поля. Как правило, его причиной является обменная связь ферромагнитного слоя с антиферромагнитным (“закрепляющим”) слоем, а количественной характеристикой – поле сдвига центра петли гистерезиса (поле обменного смещения  $H_{ex}$ ). К числу основных факторов, влияющих на  $H_{ex}$ , относятся эффективность обменной связи и величина магнитного момента “закрепленного” слоя. Однако использование их для целенаправленного регулирования  $H_{ex}$  далеко не всегда эффективно из-за недостаточной изученности механизмов межслойного обменного взаимодействия и ограничений на свойства и толщину “закрепленного” слоя. В данной статье представлены результаты изучения альтернативного способа регулирования гистерезисных свойств “закрепленного” слоя, основанного на введении в него композиционной прослойки типа Co–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с повышенным уровнем удельного электросопротивления.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Объектами исследования в данной работе являлись многослойные пленки SiO<sub>2</sub>/Ta(5)/FeNi(5)/FeMn(20)/FeNi(40)Ta(5). Они были получены пу-

тем магнетронного распыления сплавных мишеней соответствующих составов на установке Orion-8 в присутствии однородного технологического магнитного поля. Это поле имело напряженность 250 Э и было ориентировано параллельно плоскости подложек. Процесс распыления осуществлялся в аргоне при давлении 10<sup>-3</sup> мм. рт. ст. Давление остаточных газов в вакуумной камере составляло 10<sup>-7</sup> мм рт. ст. Подложками служили стекла Corning. В приведенной выше структурной формуле в скобках указаны толщины слоев в нанометрах, а обозначение FeNi используется для слоев пермаллоя Fe<sub>20</sub>Ni<sub>80</sub>. Отметим, что слой Ta, прилегающий к подложке (SiO<sub>2</sub>), и следующий за ним тонкий (5 нм) слой пермаллоя присутствуют в пленочной структуре как вспомогательные элементы. С их помощью в слое FeMn формировались кристаллическая ГЦК-структура, проявляющая антиферромагнитное упорядочение, и кристаллическая текстура типа (111). Тем самым обеспечивалось устойчиво воспроизводимое обменное смещение (“закрепление”) во внешнем слое пермаллоя толщиной 40 нм.

В ходе эксперимента в середину внешнего слоя FeNi вводились композиционные прослойки Co<sub>x</sub>(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>100-x</sub> с варьируемым составом ( $x = 0$ ; 11; 40%) и толщиной (0–8 нм), т.е. осуществлялось его структурирование. Формирование композиций разного состава проводилось путем сораспыления мишеней Co и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с регулируемым соотношением скоростей осаждения материалов. Толщины прослоек, как и основных слоев, зада-



**Рис. 1.** Петли гистерезиса и доменная структура слоя FeNi в продольной (1; а) и поперечной (2; б) магнитооптических модах. Фотографии а и б отражают доменную структуру в соответствующих точках петель гистерезиса. Стрелками показаны ориентации векторов: магнитного поля (светлая стрелка); средней намагниченности в доменах (толстые темные стрелки); локальной намагниченности в магнитогетерогенной фазе (тонкие стрелки).

вались по времени распыления соответствующих материалов. Химический состав был определен в ходе вспомогательного эксперимента на однослойных пленках использованных материалов с помощью флуоресцентного спектрометра NanoHunter. Гистерезисные свойства и доменная структура “закрепленного” ферромагнитного слоя изучались с помощью Керровского магнитометра Evico Magnetics.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

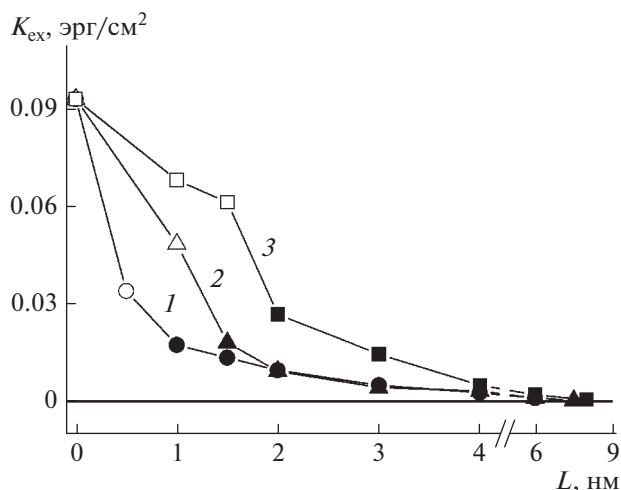
На рис. 1 представлены магнитооптические петли гистерезиса слоя пермаллоя в отсутствие прослойки. Обе они измерены в магнитном поле, параллельном оси анизотропии, выделенной технологическим магнитным полем при получении образцов, но при различной ориентации светового потока (продольная и поперечная магнитооптические моды). Это дает возможность анализировать изменение как продольной (петля 1), так и поперечной (петля 2) компонент намагниченности по отношению к магнитному полю. Сравнение петель позволяет заключить, что исследуемый слой FeNi имеет достаточно сильное обменное смещение ( $H_e = 30$  Э) и перемагничивается в две стадии. Одна из них состоит в слабом изменении намагниченности и распространяется на значительный интервал полей, другая дает большое и резкое изменение намагниченности. Анализ доменной структуры (рис. 1а, 1б) показывает, что указанные стадии можно соотнести с плавным и небольшим поворотом намагниченности или быстропотекающим смещением зигзагообразных доменных границ соответственно. При этом состояние, формирующееся на стадии поворота намагниченности, характеризуется мелкокомасштабной дисперсией намагниченности. В

силу малых отклонений намагниченности от оси анизотропии она выявляется только в поперечной магнитооптической моде, подобно тому, как это наблюдалось ранее в [3].

Биструктурирование слоя FeNi композитной прослойкой приводит к значительным изменениям его гистерезисных свойств, которые в количественном отношении зависят как от толщины  $L$ , так и от состава прослойки. Но при этом выделяются два качественно различных варианта перемагничивания [4]. Для относительно малых  $L$  целостность в перемагничивании слоя FeNi не нарушается, но имеет место снижение величины  $H_{ex}$  и возрастание  $H_c$ . При достижении некоторого критического значения толщины прослойки  $L_{кр}$  структурированный слой разбивается на два субслоя, перемагничивающихся по индивидуальным петлям гистерезиса. С ростом  $L$  наблюдается постепенное увеличение  $H_{ex}$  и  $H_c$  внутреннего субслоя, непосредственно прилегающего к слою FeNi и монотонное уменьшение  $H_{ex}$  внешнего субслоя при резком снижении его  $H_c$ . Величина  $L_{кр}$  в зависимости от состава прослойки варьируется в пределах 0.5–1.5 нм. Все эти данные получены в рамках магнитооптической методики, которая позволяла уверенно регистрировать свойства как внешнего, так и внутреннего субслоев.

Для сравнения эффективности действия прослоек различного состава на рис. 2 показаны зависимости константы обменной связи  $K_{ex}$  слоя пермаллоя как целого ( $L \leq L_{кр}$ ), т.е. на интерфейсе FeMn/FeNi или его внешней части ( $L > L_{кр}$ ), взаимодействующей с нижележащим субслоем пермаллоя. Значения этой константы определялись по формуле:

$$K_{ex} = M_s L_{FeNi} H_{ex},$$



**Рис. 2.** Зависимости константы обменной связи на интерфейсе FeNi/FeMn (светлые точки) или между субслоями FeNi (темные точки) от толщины прослоек различного состава:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – кривая 1;  $\text{Co}_{11}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{89}$  – кривая 2;  $\text{Co}_{40}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{60}$  – кривая 3.

где  $M_s$  – намагниченность насыщения пермаллоя (800 Гс);  $H_{ex}$  и  $L_{\text{FeNi}}$  – поле обменной связи и толщина основного слоя FeNi при его перемагничивании как целого или соответствующие характеристики внешнего субслоя при раздельном перемагничивании субслоев. Различие в зависимостях  $K_{ex}(L)$ , по всей вероятности, связано с гранулированным характером микроструктуры композитов типа  $\text{Co}-\text{Al}_2\text{O}_3$ . Согласно данным [5]  $\text{Co}$  присутствует в них в основном в виде частиц (гранул) нанометрового масштаба, и увеличение содержания  $\text{Co}$  приводит, в первую очередь, к росту концен-

трации таких гранул. Применительно к случаю прослойки повышение концентрации гранул  $\text{Co}$ , по-видимому, способствует обеспечению прямого обменного контакта между субслоями пермаллоя, в частности, увеличивает  $L_{\text{кр}}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты показывают, что структурирование слоев пермаллоя с помощью гранулированной прослойки  $\text{Co}-\text{Al}_2\text{O}_3$  является эффективным способом управления его гистерезисными свойствами. Варьирование состава и толщины прослойки позволяет достаточно прецизионно подбирать величину поля обменного смещения при пониженном уровне коэрцитивной силы.

Представленные в работе результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России 3.6121.2017/8.9.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fert A.* // УФН. 2008. Т. 178. № 12. С. 1336; *Fert A.* // Phys. Usp. 2008. V. 51. № 12. P. 1336.
2. *Чернышова Т.А., Миляев М.А., Наумова Л.И. и др.* // ФММ. 2017. Т. 118. № 5. С. 439; *Chernyshova T.A., Milyaev M.A., Naumova L.I. et al.* // Phys. Met. Metallogr. 2018. V. 119. P. 530.
3. *McCord J., Schafer R., Mattheis R. et al.* // J. Appl. Phys. 2003. V. 93. P. 5491.
4. *Горьковенко А.Н., Лепаловский В.Н., Васьковский В.О.* // ФММ. 2018. Т. 119. № 7. С. 662; *Gorkovenko A.N., Lepalovskij V.N., Vas'kovskiy V.O.* // Phys. Met. Metallogr. 2018. V. 119. P. 622.
5. *Gorkovenko A.N., Vas'kovskiy V.O., Lepalovskij V.N. et al.* // Sol. St. Phenom. 2012. V. 190. P. 474.