

P14-2010-55

В. К. Семина

**МОДИФИКАЦИЯ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ
И СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЛУЧЕНИЯ
ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ**

Направлено в оргкомитет конференции «Радиационная физика твердого тела», г. Севастополь, июль 2010 г.

* E-mail: semina@cv.jinr.ru

Семина В. К. P14-2010-55
Модификация магнитной структуры
и свойств металлических сплавов
с использованием облучения тяжелыми ионами

На основе экспериментальных и литературных данных по изменению магнитной структуры и свойств металлических сплавов под действием облучения тяжелыми ионами показана возможность создания заданных слоистых и двухмерных магнитных структур.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2010

Semina V. K. P14-2010-55
Modification of Magnetic Structure and
Properties of Metallic Alloys Using Heavy Ion Irradiation

Based on own experimental and published data on modification of magnetic structure and properties of metallic alloys under heavy ion irradiation the possibility was shown to create defined laminated and two-dimensional magnetic structures.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2010

В наших прежних работах [1–3] методом мёссбауэровской спектроскопии было исследовано влияние облучения тяжелыми ионами высоких энергий на аморфные сплавы на основе Fe. Было показано, что такое облучение вызывает переориентацию магнитных моментов атомов и происходит переход от преобладающего направления спина вдоль направления прокатки ленты к направлению поперек ленты, совпадающему с направлением ионного пучка. При этом угол поворота направления магнитных моментов атомов увеличивается с флюенсом облучения и зависит от типа иона. Так, для одинаковых флюенсов облучения $4 \cdot 10^{12}$ см⁻² ионами аргона (155 МэВ), криптона (253 МэВ), ксенона (372 МэВ) и висмута (710 МэВ) значения Θ (угол между направлением магнитного момента и нормалью к плоскости ленты) равны соответственно $65,0 \pm 1,7^\circ$, $50,3 \pm 1,2^\circ$, $47,0 \pm 1,1^\circ$ и $41,0 \pm 0,9^\circ$, т. е. уменьшаются с увеличением порядкового номера (массы) Z иона, приближаясь к направлению нормали к плоскости ленты. Увеличение флюенса также вызывает уменьшение угла Θ . Было показано, что максимальная переориентация магнитного момента происходит на глубине, соответствующей длине свободного пробега иона.

Таким образом, подбирая условия облучения (тип иона, флюенс), можно создавать градиентную по толщине магнитную структуру на базе аморфного сплава с заданным углом магнитной переориентации на заданной глубине. Предполагаем, что, используя облучение через маски, например клиновидной формы или с отверстиями, можно управлять ориентацией магнитного момента и в плоскости ленты.

Полученные результаты подтверждаются рядом работ других авторов, выполненных в то же время, по облучению аморфных металлических сплавов ионами малых энергий. Рассмотрим некоторые из них.

Аморфную пленку магнитно-мягкого сплава $\text{Fe}_{70}\text{Co}_8\text{B}_{10}\text{Si}_{12}$ толщиной 30 нм, осажденную на кремниевую подложку, облучали ионами Со с энергией 300 кэВ до флюенса $1 \cdot 10^{15}$ ион/см² через полимерную маску с периодическими отверстиями, нанесенными методом фотолитографии [4, 5]. Показали, что облученные области перемангничиваются и создается принудительная магнитная доменная структура. Получаются структуры «нарисованной анизотропии» при облучении в условиях ортогонального поля. Таким образом, создали периодические магнитные структуры, состоящие из областей с изменяющейся осью анизотропии. В них границы доменов не совпадают с границами напечатанной структуры. Доменная структура оказывается сложной (рис. 1).

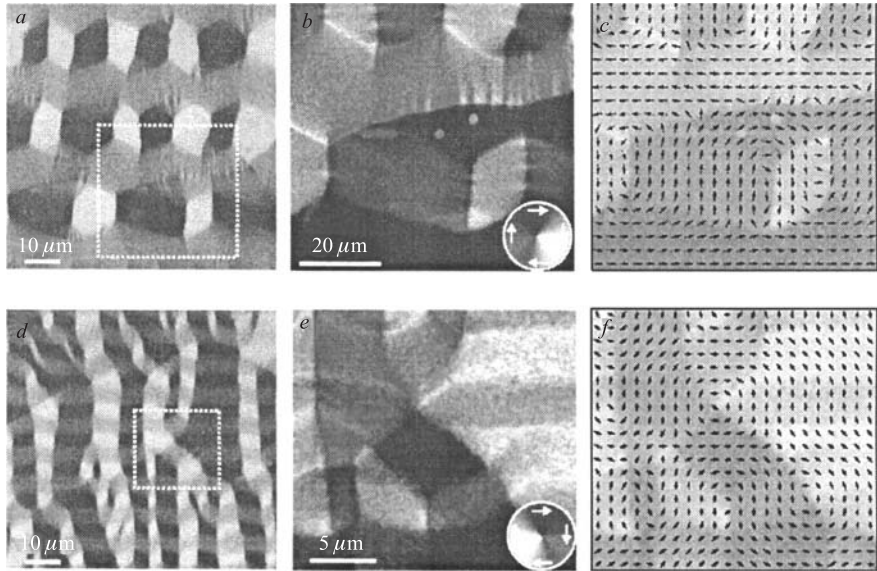


Рис. 1. Изображение в микроскопе Керра лент FeCoBSi, обладающих ортогональной анизотропной структурой, шириной 20 мкм (вверху) и 6 мкм (внизу) после облучения ионами Co флюенсом $1 \cdot 10^{15}$ ион/см²; на средних рисунках показан выделенный участок с большим увеличением, на правых рисунках векторами представлено вычисленное угловое распределение намагниченности [4]

Методом магнитно-оптического эффекта Керра высокого разрешения измерили петли гистерезиса в различных областях образца, облученного ионами через маску с квадратными «окнами», усредненных на площади $\approx 5 \times 5$ мкм (рис. 2). При приложении поля, перпендикулярного начальной оси анизотропии, петля гистерезиса легкой оси внутри квадратов появляется, согласно локальному повороту анизотропии, в облученных областях. Анизотропия поворачивается на 90° в непокрытых областях. Измерили петли гистерезиса в различных областях образцов, даже обладающих одним направлением анизотропии. Получили неправильные формы петель тяжелой оси. Форма петли сильно зависит от окружающих областей анизотропии относительно направления приложенного поля.

В общем, ионное облучение можно использовать, чтобы контролировать ось магнитной анизотропии в образцах полностью аморфных пленок. С помощью метода ионного облучения через маску с отверстиями регулировали анизотропию локально и записали новые картины магнитных доменов непосредственно в структурах тонкой магнитной пленки. Генерировали периодические доменные картины. Установили, что минимальный размер маг-

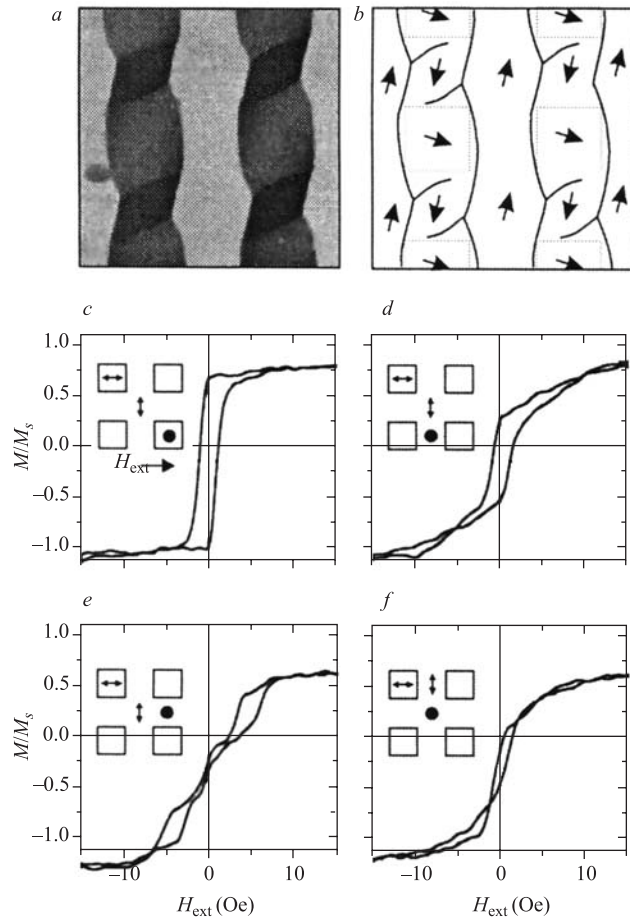


Рис. 2. Конфигурация намагниченности аморфной пленки, облученной через маску с квадратными отверстиями, в магнитном поле, направленном параллельно начальной оси анизотропии (a) (сверху вниз); схема доменной структуры (b); локальные петли гистерезиса в указанных точках (c–f). Магнитное поле ориентировано горизонтально [5]

нитной особенности ограничен магнитной анизотропией, например шириной доменной стенки и внутренними размерами замыкающего домена в магнитных структурах. В структурах, которые меньше этих масштабов длины, невозможно сконструировать материалы с магнитными свойствами в магнитно-гомогенных пленках.

Надо сказать, что в работе [4] приводятся примеры создания подобных магнитных «картин» с использованием ионного облучения на различных

пленках, в том числе многослойных, традиционно используемых для магнитной записи.

Кроме того, ионное облучение изменяет такие магнитные характеристики материала, как коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, температура Кюри.

В [6] сравнили влияние облучения протонами (H^+), дейтронами (D^+) и гелием (He^+) с энергией 2 МэВ и термического отжига на температуру Кюри для аморфного сплава $Fe_{20}Ni_{60}P_{14}B_6$. При всех облучениях закаленных образцов температура Кюри повышается. Повышение температуры Кюри ΔT_C для облучения протонами достигает значения насыщения $15,4 \pm 0,8$ °С; выше флюенса $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ T_C не изменяется. С увеличением флюенса облучения дейтерием ΔT_C увеличивается и достигает значения насыщения $4,6 \pm 0,4$ °С. ΔT_C увеличивается с флюенсом гелия вплоть до $1 \cdot 10^{15} \text{ He}^+/\text{см}^2$. Максимальное достигнутое ΔT_C — $3,6 \pm 0,4$ °С; дальнейшее облучение снижает ΔT_C до значения $1,9 \pm 0,2$ °С. Следовательно, при повышении флюенса облучения значение ΔT_C достигает насыщения и это значение зависит от типа облучения.

Кроме того, было показано, что область с измененными характеристиками совпадает с областью пробега соответствующего иона и в случае последовательного облучения протонами и ионами He^+ получается материал, показывающий два значения температуры Кюри, соответствующие использованным ионам. Считаем, что этот результат имеет практическое значение для построения ионно-модифицированных магнитных структур.

Природа повышения ΔT_C в результате облучения пока неясна. В [6] ее связывают с локальным нестационарным разогревом вблизи трека иона, согласно модели термического пика. Эту гипотезу подтверждают результаты по мгновенному отжигу. Считаем, что в результате возникновения радиационно-усиленной диффузии происходит перестройка атомов с формированием локальных структур, более устойчивых по сравнению с «замороженными» в результате быстрой закалки. Изменение локальных атомных конфигураций вызывает изменение обменных взаимодействий, проявляющихся в изменении значения T_C .

В работе [7] обнаружили, что облучение аморфной пленки Finemet ($Fe_{73,9}Cu_{0,9}Nb_{3,1}Si_{13,2}B_{8,9}$) ионами Ag^+ с энергией 120 МэВ вызывает значительное уменьшение коэрцитивной силы. Это связано с повышением гладкости поверхности и возможной релаксацией случайных напряжений. Таким образом, облучение быстрыми тяжелыми ионами можно эффективно использовать для улучшения магнитно-мягких свойств тонких пленок.

В результате краткого обзора работ можно сделать вывод, что ионное облучение можно использовать для повышения магнитных характеристик аморфных магнитных пленок в результате релаксации напряжений и для

создания одномерных (т. е. изменяющихся по толщине), двухмерных (т. е. в плоскости пленки при использовании масок) и, вероятно, трехмерных (при комбинации обоих методов) магнитных структур при условии сохранения аморфной структуры пленки и некоторого улучшения ее свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Novakova A. A., Semina V. K., Kiseleva T. Yu., Revokatov P. O., Golubok D. S., Didyk A. Yu.* Irradiation Effects in Amorphous Alloy Fe–Ni–Si–B // *Metastable, Mechanically Alloyed and Nanocrystalline Materials*. 2003. V. 15. P. 451–456.
2. *Голубок Д. С., Новакова А. А., Семина В. К., Дидык А. Ю.* Структурные изменения в аморфном сплаве $\text{Fe}_{77}\text{Ni}_2\text{Si}_{14}\text{B}_7$ после облучения высокоэнергетическими ионами Ag и Kг и нейтронами сравнительные исследования // *Труды XV Международного совещания «Радиационная физика твердого тела»*, Севастополь, 4–9 июля 2005 г. С. 49–57.
3. *Голубок Д. С., Дидык А. Ю., Иванов Л. И., Новакова А. А., Семина В. К., Хофман А.* Расчет дозы повреждений в аморфном сплаве $\text{Fe}_{77}\text{Ni}_2\text{Si}_{14}\text{B}_7$, облученном на импульсном реакторе быстрых нейтронов ИБР-2 // *Труды XVII Международного совещания «Радиационная физика твердого тела»*, Севастополь, 9–14 июля 2007 г. С. 73–82.
4. *Fassbender J., McCord J.* Magnetic Patterning by Means of Ion Irradiation and Implantation // *J. Magn. and Magn. Mater.* 2008. V. 320. P. 579–596.
5. *McCord J., Gemming T., Schultz L., Fassbender J., Liedke M. O., Frommberger M., Quandt E.* Magnetic Anisotropy and Domain Patterning of Amorphous Films by He-Ion Irradiation // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 86. P. 162502-1–162502-3.
6. *Fisher D. G., Murray R. B., Swann C. P.* Changes in Curie Temperature Due to Irradiation and Thermal Annealing in Amorphous $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{60}\text{P}_{14}\text{B}_6$ // *J. Appl. Phys.* 1985. V. 58. P. 460.
7. *Sharma P., Gupta A.* Ion Beam Sputtered Thin Films of Finemet Alloy for Soft Magnetic Applications // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*. 2006. V. 244. P. 105–109.

Получено 4 мая 2010 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 03.08.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,57. Тираж 280 экз. Заказ № 57057

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/