

Магнитные модификации в тонких пленках Fe-Al под действием облучения ионными пучками

И. Ю. Пашенькин¹, Д. А. Татарский^{1,2}, А. Н. Нечай¹, С. А. Чуринов¹, П. А. Юнин^{1,2},
М. В. Сапожников^{1,2}, Е. С. Демидов², В. К. Васильев², Д. С. Королев², В. А. Скуратов³,
А. А. Фраерман¹, Н. И. Полушкин^{1,*}

¹Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, 7, д. Афонино, Кстовский р-н, Нижегородская обл., 603087

²Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Физический факультет, Нижний Новгород, 603950

³Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980

*nir@ipmras.ru

Исследуются магнитные свойства тонкопленочных сплавов Fe_xAl_{1-x} ($x = 0,5-0,7$), облучаемых быстрыми тяжелыми ионами. В проведенных экспериментах использовались ионы Xe с энергиями в диапазонах сотен кило- и мегаэлектронвольт. Обнаружено сравнительно большое усиление ферромагнетизма в слое $Fe_{0,55}Al_{0,45}$ толщиной 50 нм при его облучении ионами с энергией 150 кэВ и флюенсом один ион на 10 нм^2 , что может быть вызвано локализованным композиционным разупорядочением в сплаве при взаимодействии таких ионов с решеткой атомов.

Введение

Представляет как фундаментальный, так и прикладной интерес сформировать и исследовать свойства парамагнитной (намагничиваемой) матрицы вблизи ее температуры Кюри T_C с ферромагнитными наноразмерными включениями [1, 2]. Одна из возможностей в создании таких систем реализуется при локальных магнитных трансформациях в результате облучения парамагнетика ионными пучками [3]. Демонстрировалось, в частности [3], что при облучении тонкой пленки немагнитного ($T_C = 0$) соединения Co_2Y ионами U с энергией $E = 1 \text{ ГэВ}$ и флюенсом один ион на 100 нм^2 в ней появляется ферромагнетизм с остаточной намагниченностью в магнитном поле, приложенном по нормали к плоскости пленки. Это свидетельствует о формировании магнитных нитей вдоль траекторий ионов, которые локально аморфизуют предварительно закристаллизованный материал, так что размер аморфной зоны (диаметр ионного трека) составляет не более нескольких нанометров

[3]. В литературе [4] обосновывается, что достаточно тяжелые (с массой больше 10 масс нуклона) быстрые ($E > 1 \text{ МэВ/нуклон}$) ионы воздействуют на облучаемый материал в основном через возбуждение электронной подсистемы, так что электроны в результате передают полученную энергию решетке через электрон-фононное взаимодействие, и происходит нагрев облучаемого материала. В зависимости от уровня передаваемой энергии, который может достигать десятков килоэлектронвольт на нанометр, в целом ряде материалов температура в области ионной траектории может превосходить температуру плавления и даже температуру испарения. Последующее быстрое остывание перегретой области может сопровождаться фазовым переходом, например, из кристаллической в аморфную фазу и формированием протяженных радиационных дефектов, так называемых латентных треков.

Эта концепция исследуется в нашей работе на примере двойных сплавов Fe-Al с концентрацией Fe в диапазоне от 50 до 70 ат.%. Аллюминиды железа характеризуются термически индуцированными переходами из композиционно-упорядоченного состояния с низкой T_C в неупорядоченное состояние с высокой

T_C [5, 6]. Можно ожидать, что такой изначально парамагнитный ($T > T_C$) сплав, подвергнутый закалке в результате ионного облучения, окажется в ферромагнитном состоянии ($T < T_C$). Если появляется магнитный сигнал (или происходит усиление ферромагнетизма) при флюенсе $< 1 \text{ ион/нм}^2$, то есть основания предположить возможность формирования наноразмерных ферромагнитных включений (нитей).

Результаты

На рис. 1 иллюстрируются результаты исследования тонкопленочного (50 нм) образца $Fe_{0,55}Al_{0,45}$ на подложке Si с помощью магнитооптического эффекта Керра (МОКЕ), детектируемого при комнатной температуре. Кривые намагничивания показаны для исходного парамагнитного образца, приготовленного методом магнетронного распыления с последующим отжигом в вакуумной камере при температуре $400 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение двух часов, а также после облучения этого образца ионами Xe с $E = 150 \text{ кэВ}$ (a, b) и $E = 160 \text{ МэВ}$

(с). Флюенс варьировался от одного иона на 100 до одного иона на 2 нм^2 , так что можно ожидать формирования локализованных разупорядоченных ферромагнитных областей вокруг треков ионов при соответственно низком флюенсе.

Обращает на себя внимание сравнительно сильное увеличение намагниченности при облучении ионами с $E = 150 \text{ кэВ}$ и флюенсе один ион на 10 нм^2 (a, b). Эта магнитная модификация может объясняться локализованным атомным разупорядочением в сплаве при ионном облучении [5, 6], что выявляется, в частности, по спектрам высокоугловой рентгеновской дифракции от исходного (парамагнитного) и облученного образцов. Интересно также, что кривая намагничивания в плоскости облученного образца является безгистерезисной (b), тогда как величина магнитооптического сигнала уже характерна для ферромагнетика. Наблюдаемое поведение дает основания нам предполагать, что при используемых достаточно низких флюенсах образуется неоднородная магнитная среда в виде системы пространственно разделенных областей с разными магнитными свойствами, как, например, намагниченность и температура Кюри.

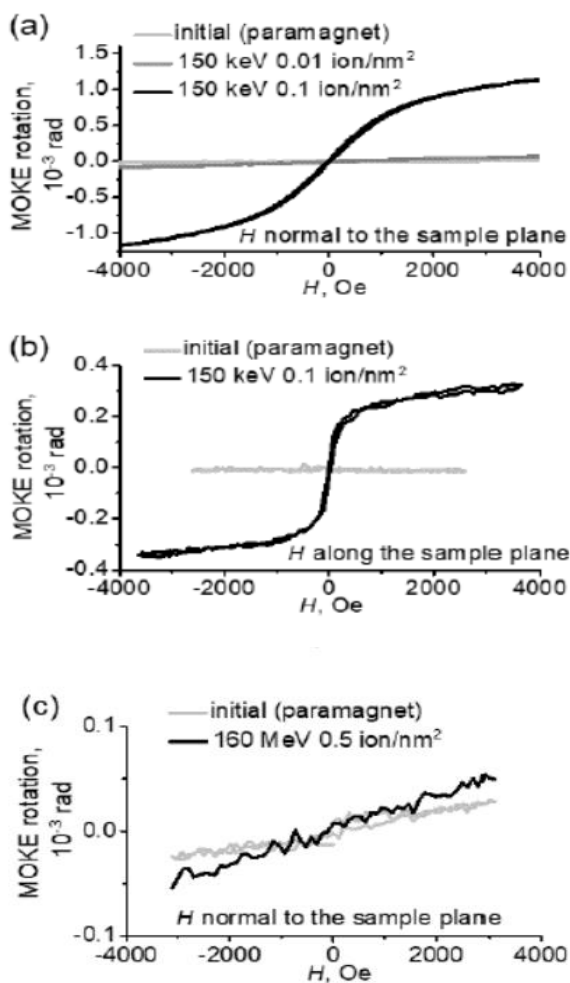


Рис. 1. Магнитооптические кривые намагничивания (МОКЕ) тонкопленочного (50 нм) образца $\text{Fe}_{0.55}\text{Al}_{0.45}$ на подложке Si в исходном парамагнитном состоянии и облученного ионами Хе с энергией $E = 150$ кэВ (a, b). Кривые на графиках (a) и (b) снимались в магнитном поле H , приложенном соответственно по нормали к плоскости образца и в плоскости образца. Магнитооптические кривые намагничивания в поле H , приложенном по нормали, снятые после облучения ионами Хе с $E = 160$ МэВ и флюенсом один нон на $2,0 \text{ нм}^2$ (c). Все измерения проводились при комнатной температуре

Чтобы выявить образование наноразмерных областей с модифицированными свойствами, планируется, в частности, исследовать изменения магнитной энтропии снятием кривых намагничивания при разных температурах вблизи T_C после облучения парамагнитной матрицы ионным пучком. Если система ферромагнитных наноразмерных включений формируется при ионном облучении парамагнитной (намагничиваемой) матрицы, то следует ожидать обменного усиления магнитокалорического эффекта [1]. Эти исследования потенциально ведут к созданию материалов с сильным магнитокалорическим эффектом в сравнительно слабых магнитных полях.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-22-00044. В работе использовано оборудование ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур» (ИФМ РАН).

Литература

1. A. A. Fraerman and I. A. Shereshevskii, Magnetocaloric effect in ferromagnet/paramagnet multilayer structures // JETP Letters. 2015. V. 101 (9). P. 618–621.
2. D. M. Polishchuk, Yu. O. Tykhonenko-Polishchuk, E. Holmgren, A. F. Kravets, A. I. Tovstolytkin, and V. Korovin. Giant magnetocaloric effect driven by indirect exchange in magnetic multilayers // Phys. Rev. Materials. 2018. V. 2. P. 114402.
3. J. P. Nozieres, M. Ghidini, N. M. Dempsey, B. Gervais, D. Givord, G. Suran, J. M. D. Coey. Swift heavy ions for magnetic nanostructures // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 1998. V. 146. P. 250–259.
4. A. Barbu, H. Dammak, A. Dunlop, and D. Lesueur. Ion tracks in metals and intermetallic compounds // MRS Bulletin. 1995. V. 20 (12). P. 29–34.
5. J. Ehrler, B. Sanyal, J. Grenzer, S. Zhou, R. Böttger, B. Eggert, H. Wende, J. Lindner, J. Fassbender, C. Leyens, K. Potzger, and R. Bali. Magneto-structural correlations in a systematically disordered B2 lattice // New J. Phys. 2020. V. 22. P. 073004.
6. J. Fassbender, M. O. Liedke, T. Strache, W. Möller, E. Menéndez, J. Sort, K. V. Rao, S. C. Deevi, J. Nogués, Ion mass dependence of irradiation-induced local creation of ferromagnetism in $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{40}$ alloys // Phys. Rev. B. 2008. V. 77. P. 174430.