

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОСАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И МАГНИТНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ТОНКИХ ПЛЕНОК ^{57}Fe , СИНТЕЗИРОВАННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ИОННО-СТИМУЛИРОВАННОГО ОСАЖДЕНИЯ*

**Р.Р. Абдуллин¹, Н.М. Лядов^{2*}, Ф.Г. Вагизов¹, А.И. Гумаров¹, Ш.З. Ибрагимов¹,
Д.М. Кузина¹, И.А. Файзрахманов², Р.И. Хайбуллин², В.А. Шустов²**

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет;

²Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского РАН
nik061287@mail.ru

Аннотация. Тонкие пленки ^{57}Fe (50–300 нм) были синтезированы методом ионно-стимулированного осаждения (ИСО) на подложках из кварцевого стекла (SiO_2) и монокристаллического NaCl со скоростью осаждения 3,2, 10 и 20 нм/мин. Методами сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионного элементного микроанализа, рентгеновской дифракции, мессбауэровской спектроскопии и вибрационной магнитометрии было исследовано влияние режимов осаждения пленок ^{57}Fe на их структуру, магнитно-фазовый состав и перпендикулярную магнитную анизотропию (ПМА). Показано, что источником возникновения ПМА в пленках железа является оксидная фаза железа, которая приводит к возникновению микронапряжений. Максимальная величина микронапряжений наблюдается при низкой скорости осаждения (3,2 нм/мин). С увеличением скорости осаждения (до 20 нм/мин) величина микронапряжений и значение ПМА уменьшаются.

Ключевые слова: ионно-стимулированное осаждение, пленки железа, перпендикулярная магнитная анизотропия.

Введение

Тонкие пленки ферромагнитных металлов и сплавов на их основе, в которых наблюдается ПМА, представляют научный и прикладной интерес в области спинтроники [1] и стрейнтроники [2]. Механизм возникновения ПМА является ключевым моментом, который требует комплексного исследования структуры и магнитных свойств ферромагнитных пленок (ФП). Очевидно, что ПМА будет зависеть от типа подложки, толщины пленки, структуры, магнитно-фазового состава и различного рода напряжений. При выборе методики осаждения ФП важнейшим критерием является контролируемость параметров осаждения (энергия ионов, плотность тока, вакуум и т. д.). Среди широкого круга ионно-плазменных методов осаждения пленок ИСО является наиболее контролируемым и чистым.

Ранее нами сообщались результаты исследований особенностей структуры и магнитных свойств тонких пленок железа с толщиной ~ 120 нм, полученных методом ИСО. Было установлено, что пленки железа имеют «транскритическую» форму петли магнитного гистерезиса [3], что указывает на ПМА в исследуемых пленках. Однако механизм возникновения ПМА нами установлен не был.

Таким образом, в данной работе детально исследовано влияние режимов (скорости) осаждения, толщины пленок и типа подложки на структуру и магнитные свой-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-32-00203).

ства тонких пленок для установления корреляций между величиной ПМА и структурными особенностями пленок железа.

Методика экспериментов

Пленки ^{57}Fe осаждались на подложки из кварцевого стекла и монокристаллы NaCl методом ИСО [4]. В качестве рабочего газа использовался химически чистый Хе с чистотой 99,99 %. Энергия Xe^+ и плотность ионного тока составляли 1–1,5 кэВ и 100–200 мкА/см², соответственно. Распыляемая мишень представляла собой металлическую фольгу из ^{57}Fe диаметром 65 мм. Морфология поверхности, толщина пленок и, соответственно, скорость осаждения определялись с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) “Zeiss evo 50 xvp”. Элементный состав исследовался с использованием ЭДС спектрометра “Inca Energy-350”, встроенного в вакуумную камеру микроскопа. Исследования кристаллической структуры и магнитно-фазового состава проводились методом рентгеновской дифракции (Дрон-7, CuK α 0,15406 нм) и мессбауэровской спектроскопии конверсионных электронов (МСКЭ). Магнитные свойства исследовались на экспериментальном магнитометре [5].

Результаты и их обсуждение

Наблюдение сильной ПМА является основным прикладным и научным интересом в представленных пленках железа. В результате проведенных магнитных исследований, было обнаружено, что ПМА в пленках железа не зависит от типа подложки и толщины пленки. Пленки, полученные на SiO₂ и NaCl, имеют одинаковые «транскритические» петли магнитного гистерезиса. Кроме того, после растворения подложки NaCl в дистиллированной воде пленка железа, свободная от подложки, проявляет такие же магнитные свойства. На рис. 1 представлены петли магнитного гистерезиса пленок ^{57}Fe , полученных при скорости осаждения 3,2, 10 и 20 нм/мин.

Пленки, полученные при низкой скорости осаждения (3,2 нм/мин), имеют характерную форму «транскритической» петли магнитного гистерезиса [3], с полем анизотропии $B_A = 250$ мТл. С увеличением скорости осаждения до 10 нм/мин величина ПМА уменьшается до 16 мТл и исчезает при скорости осаждения 20 нм/мин.

На рис. 2 приведены рентгенограммы исследуемой серии пленок. На всех рентгенограммах присутствует только один уширенный рефлекс от плоскости (110), что свидетельствует о текстурированности пленки железа и нанометровом размере кристаллитов (~10 нм). Кроме того, результаты исследований в скользящей геометрии свидетельствуют об отсутствии макронапряжений в пленках железа.

Постоянная решетка полученных пленок железа значительно превышает (~3 %) справочные данные для $\alpha\text{-Fe}$, что хорошо видно из представленных рентгенограмм (рис. 2). Мы полагаем, что наночастицы железа однородно деформированы как в плоскости пленки, так и в перпендикулярном направлении. Величина деформации превышает предел упругой деформации твердых тел на порядок (~0,1 %). Из рис. 2а и 2б видно, что дифракционный пик имеет несимметричную форму. Мы разложили

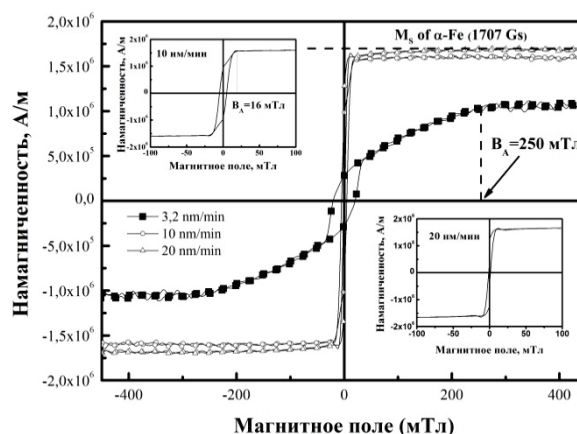


Рис. 1. Петли магнитного гистерезиса плёнок ^{57}Fe , полученных при скорости осаждения 3,2, 10 и 20 нм/мин. На вставках показаны петли гистерезиса (10 и 20 нм/мин) с развёрткой поля до 100 мТл

этот пик на три компоненты, которые можно отнести к нанокристаллическому α -Fe, аморфному железу и оксидной фазе железа FeO. Из проведенного анализа следует, что имеется четкая корреляция между скоростью осаждения, содержанием оксидной фазы и величиной ПМА. Данные МСКЭ также свидетельствуют о неоднородном магнитно-фазовом составе всех исследованных пленок (рис. 3).

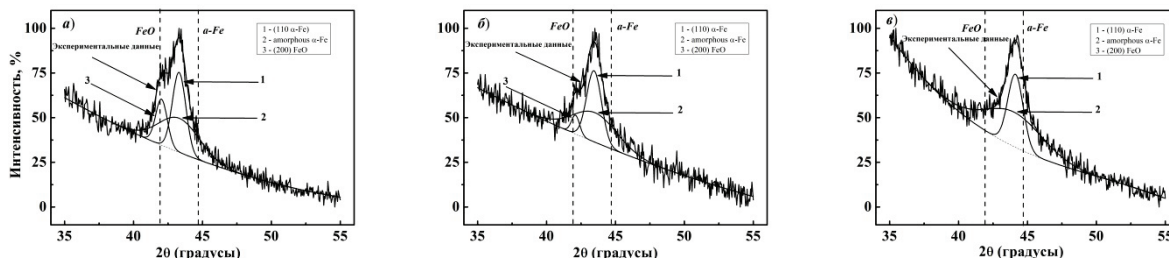


Рис. 2. Рентгенограммы тонких пленок ^{57}Fe , полученных при скорости осаждения: а) 3,2; б) 10 и в) 20 нм/мин, и компоненты разложения рефлекса (110), где 1 – нанокристаллическая фаза α -Fe, 2 – аморфная фаза α -Fe, 3 – FeO

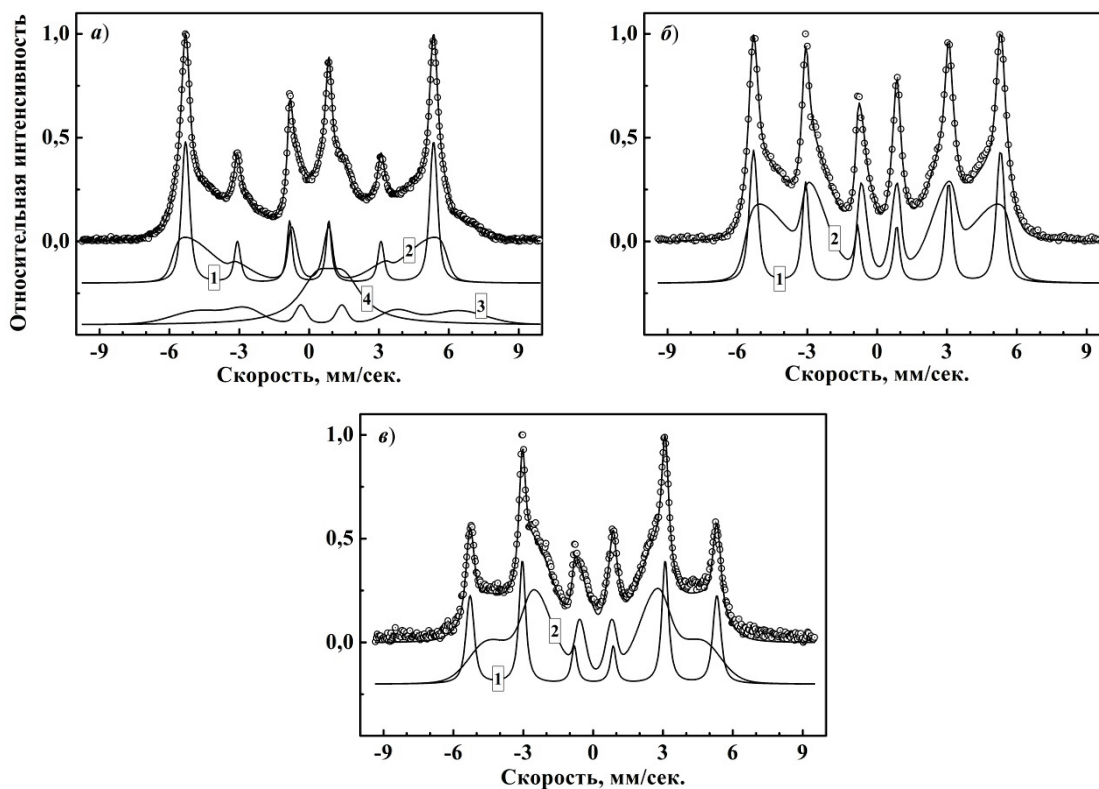


Рис. 3. Спектры МСКЭ для плёнок железа, полученных при скорости осаждения 3,2, 10 и 20 нм/мин

Видно, что во всех пленках присутствует 2 секстета (линии 1 и 2). Первый секстет относится к нанокристаллической фазе α -Fe ($B_s = 33$ Тл), а второй с широким распределением сверхтонкого поля на ядре ($B_s = 29,4$ Тл) – к аморфной фазе железа. Пленки, полученные с низкой скоростью осаждения (3,2 нм/мин), имеют еще один секстет и дублет (линии 3 и 4). Третий секстет (рис. 3а) имеет изомерный сдвиг $I_s = 0,69$ мм/сек, и его можно отнести к неупорядоченной мелкодисперсной фазе с магнетито-подобным локальным окружением ионов железа (Fe_3O_4). На рис. 3а наблюдается

также широкий дублет, который относится к оксиду железа (FeO). Стоит отметить, что по отношению интенсивностей (I) второй (пятой) линии секстета к третьей (четвертой) можно говорить о наличии в пленках ПМА. Если $I = 4$, то вектор намагниченности лежит в плоскости пленки. В нашем случае I увеличивается с увеличением скорости осаждения как 0,75, 1,94 и 3,6, что и следовало ожидать.

Выводы

Текстурированные нанокристаллические пленки ^{57}Fe были получены методом ИСО при трех скоростях осаждения: 3,2, 10 и 20 нм/мин – в условиях высокого вакуума. Магнитные свойства, структура и фазовый состав были исследованы с использованием широкого набора методов. Пленки имеют нанокристаллическую структуру со значительной долей разупорядоченной фазы и фазовым составом, существенно зависящим от скорости осаждения. Кроме того, пленки характеризуются большой величиной деформации кристаллической решетки (до 3 %), что связано с особенностями метода ИСО. Установлена корреляция между скоростью осаждения, фазовым составом пленок железа и величиной ПМА.

Литература

1. Wolf S.A. Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future / S.A. Wolf, D.D. Awschalom, R.A. Buhrman // Science. – 2001. – 294. P. 1488–1495.
2. Bukharaev A.A. Straintronics: a new trend in micro- and nanoelectronics and material science / A.A. Bukharaev, A.K. Zvezdin, A.P. Pyatakov, Yu.K. Fetisov // Phys.-Usp. – 2018. – № 61 (12). – P. 1175–1212.
3. Lyadov N.M. Structural and magnetic studies of thin Fe^{57} films formed by ion beam assisted deposition / N.M. Lyadov, V.V. Bazarov, F.G. Vagizov et al. // Applied Surface Science. – 2016. – 378. – P. 114–119.
4. Lyadov N.M. On the question of structure of ZnO thin films formed by IBA and subsequently implanted with silver ions / N.M. Lyadov, R.N. Kashapov, I.R. Vakhitov et al. // Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – 1058. – P. 012077.
5. Нургалиев Д.К. Коэрцитивный спектрометр / Д.К. Нургалиев, П.Г. Ясонов // Патент РФ на полезную модель № 81805. – 2009. – Бюл. № 9.