

## Особенности анизотропии в пленке пермаллоя, индуцированные неоднородным магнитным полем

© Б.А. Беляев, В.П. Кононов, С.Г. Овчинников

Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук, 660036 Красноярск, Россия

(Поступила в Редакцию 8 января 1998 г.)

Впервые наблюдались неоднородности магнитной структуры тонкой пленки пермаллоя, индуцированные сильно неоднородным магнитным полем, приложенным в плоскости подложки при изготовлении образцов. Пленки получались методом вакуумного напыления на установке молекулярно-лучевой эпитаксии. Неоднородное поле на подложке создавалось четырьмя самарий-кобальтовыми магнитами. Анизотропия локальных участков образцов измерялась сканирующим спектрометром ферромагнитного резонанса. Обнаружена сильная корреляция распределения величины и направления локальной магнитной анизотропии пленки с распределением магнитного поля в плоскости подложки.

Наличие одноосной магнитной анизотропии в поликристаллических пленках пермаллоя, напыленных во внешнем магнитном поле, — известный факт. При этом однородность приложенного поля во многом определяет не только дисперсию угла направления оси, но и величину анизотропии. Известно также, что одноосная анизотропия в пленках возникает и в отсутствие магнитного поля при наклонном падении потока атомов на подложку [1]. В этом случае ось анизотропии ориентируется в плоскости пленки перпендикулярно направлению потока атомов, а величина анизотропии в основном определяется углом падения атомов и температурой подложки при напылении.

Пермаллоевые пленки, исследованные в настоящей работе, напылялись в сильно неоднородном магнитном поле при сравнительно небольшом среднем угле отклонения потока атомов от нормали к подложке  $\varphi \approx 20^\circ$ . Цель работы — проследить корреляцию распределения магнитной анизотропии в плоскости получившихся

образцов с неоднородностями приложенного магнитного поля на фоне одноосной анизотропии наклонного напыления.

Исследовались пленки толщиной  $d = 6.5 \text{ nm}$ , полученные методом вакуумного испарения на установке молекулярно-лучевой эпитаксии "Ангара", специально модернизированной для напыления магнитных материалов [2]. Пермаллой состава  $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$  испарялся из тигля и осаждался на стеклянную подложку размером  $50 \times 20 \times 0.5 \text{ mm}$ , подогретую до  $473 \text{ K}$ . Тигель находился на расстоянии  $\sim 200 \text{ mm}$  от центра подложки. При этом поток атомов падал под углом  $\psi \sim 65^\circ$  к длинной стороне подложки. Скорость напыления пленки составляла  $\sim 0.03 \text{ nm/s}$ .

Подложка размещалась в сильно неоднородном магнитном поле, создаваемом двумя парами самарий-кобальтовых магнитов прямоугольной формы размером  $20 \times 5 \times 5 \text{ mm}$  и  $10 \times 5 \times 5 \text{ mm}$ . Магниты закреплялись

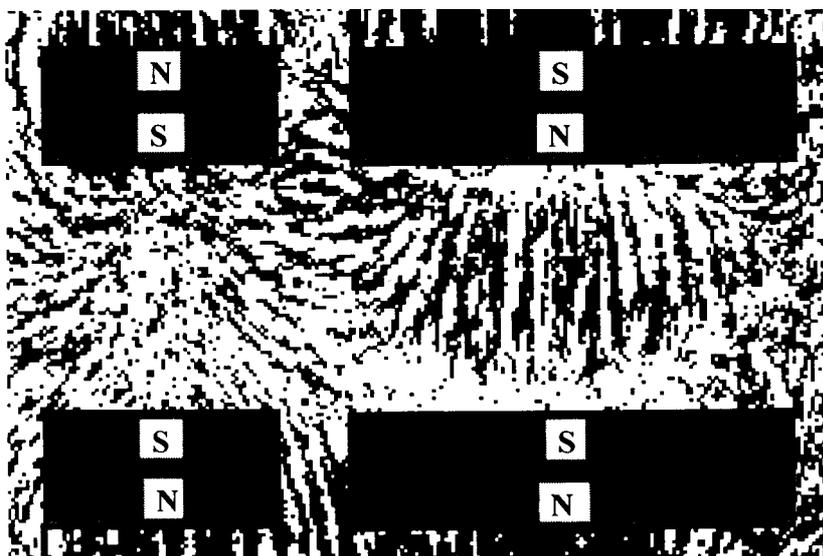


Рис. 1. Картина силовых линий магнитного поля от четырех самарий-кобальтовых магнитов, расположенных вдоль длинных сторон подложки.

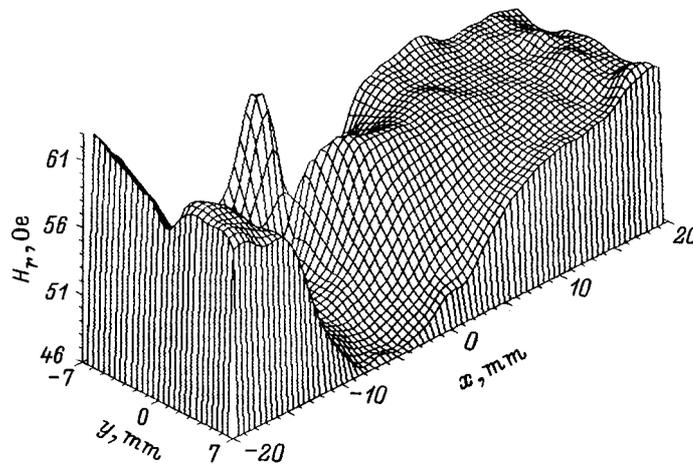


Рис. 2. Распределение поля ферромагнитного резонанса по площади пленки.

на держателе по два вдоль длинных сторон подложки и размещались попарно напротив друг друга (рис. 1). При этом пара магнитов больших размеров ориентировалась разноименными полюсами друг к другу, а меньших размеров — одноименными. В результате плоскостная компонента магнитного поля на подложке изменялась не только по величине от 0 до 2.0 кОе, но и по направлению. Картина, отражающая распределение силовых линий магнитного поля на подложке, полученная порошковым методом, показана на рис. 1.

Распределение магнитных неоднородностей в плоскости исследуемых образцов измерялось с помощью разработанного и изготовленного в Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН сканирующего спектрометра ферромагнитного резонанса (ФМР) [3]. Отличительной особенностью спектрометра является возможность записи сигналов ФМР в широком диапазоне частот 0.1–5.0 GHz благодаря набору сменных СВЧ-головок. Площадь измеряемой локальной области определяется диаметром отверстия в экране микрополоскового резонатора головки. В данном эксперименте использовалась головка с диаметром отверстия 1 mm и частотой накачки  $f = 2.2$  GHz. На этой частоте все исследованные образцы имели среднюю ширину линии ФМР  $\Delta H \approx 8$  Oe, изменяющуюся от точки к точке по площади пленки в пределах  $\pm 10\%$ .

Распределение по плоскости пленки резонансного поля  $H_r$ , направленного в эксперименте вдоль длинной стороны подложки, показано на рис. 2. Ориентация подложки соответствует рис. 1, т.е. участок пленки с отрицательными значениями координаты  $x$  при напылении находился в поле расталкивающих магнитов. Чтобы исключить краевые эффекты, измерения проводились лишь в центральной области образца размером  $14 \times 40$  mm. Видно, что резонансное поле неоднородно и изменяется по площади пленки почти на 20 Oe.

Отметим, что для контрольного образца, напыленного в отсутствие магнитов, резонансное поле монотонно падает с увеличением координат  $x$  и  $y$ , изменяясь при этом

всего на 5 Oe. В результате совокупность измеренных значений  $H_r(x, y)$  образует поверхность, напоминающую наклонную плоскость. Наблюдаемая небольшая неоднородность резонансных полей в плоскости контрольного образца, является следствием соизмеримости размеров подложки и расстояния от подложки до тигля при напылении пленок. В такой геометрии, очевидно, имеет место заметное изменение углов падения потока атомов на плоскость подложки в различных ее точках, приводящее к соответствующему отклонению как направления оси анизотропии, так и ее величины.

Величина поля анизотропии  $H_k$  на локальных участках образцов, а также ориентация осей легкого намагничивания  $\alpha_k$ , определялись из зависимостей  $H_r$  от угла направления магнитного поля  $\alpha$ , отсчитываемого относительно длинной стороны подложки. На рис. 3 представлены угловые зависимости резонансного поля для пяти участков исследуемого образца, расположенных

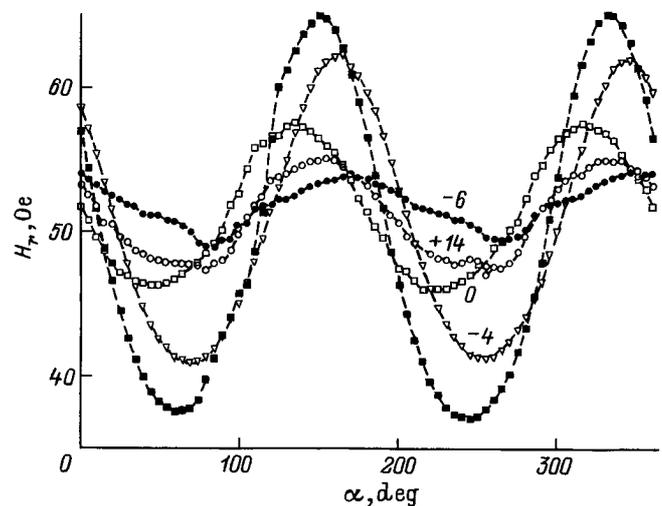


Рис. 3. Угловые зависимости резонансного поля, снятые в пяти точках образца вдоль линии  $y = -7$  mm. Цифры на кривых соответствуют координате по оси  $x$ .

Углы  $\alpha_k$  и поля одноосной магнитной анизотропии в образце

y, mm	x, mm							
	-16		-6		0		14	
	$H_k, \text{Oe}$	$\alpha_k, ^\circ$						
-7	13.8	62.1	2.36	82.8	8.5	28.7	3.8	76.4
0	11.5	38.9	8.34	37.8	7.64	37.8	6.57	61.6
7	17.5	55.4	13.7	37.9	11.3	28.0	5.35	46.4

вдоль линии  $y = -7 \text{ mm}$  (см. рис. 2). Цифры на кривых соответствуют координате по оси  $x$  выбранного локального участка.

Видно, что все зависимости имеют два минимума и два максимума, характерных для одноосной магнитной анизотропии. Различие в положении минимумов на кривых  $\mathbf{H}_k(\alpha)$  свидетельствует об изменении направления оси легкого намагничивания от участка к участку пленки. Изменение же разности максимального и минимального значений резонансных полей на кривых указывает на неоднородность величины анизотропии. Установлено, что по площади исследуемого образца изменение ориентации оси анизотропии наблюдается в пределах  $60^\circ$ , а поле анизотропии меняется почти в 8 раз. В таблице приведены значения углов направления и величины поля одноосной магнитной анизотропии, измеренные для нескольких локальных участков по краям образца и в его центре.

У контрольного образца в середине пленки  $\mathbf{H}_k \approx 15 \text{ Oe}$ , а ось легкого намагничивания наклонена к длинной стороне подложки под углом  $\alpha_k \approx 45^\circ$  — в соответствии с углом падения потока атомов на этот участок при напылении. Небольшое отклонение угла падения атомов на другие участки подложки, связанное с условиями напыления, приводит к монотонному изменению ориентации оси анизотропии в пределах  $\pm 10^\circ$ . При этом поле анизотропии меняется по площади пленки также монотонно и всего в 2 раза.

Из анализа результатов измерений на образцах, напыленных в неоднородном магнитном поле, и на контрольных образцах хорошо прослеживается корреляция между распределением величины и направления одноосной анизотропии по плоскости пленки и распределением величины и направления приложенного магнитного поля. В частности, в области пленки  $x \geq 10 \text{ mm}$  (рис. 2), находящейся при напылении в наибольшем и сравнительно однородном магнитном поле, изменения направления оси анизотропии и ее величины по координатам  $x$  и  $y$  невелики, а главное — монотонны, почти как в контрольном образце. Однако по сравнению с контрольным образцом оси анизотропии на локальных участках повернулись почти на  $20^\circ$  в направлении ориентирующего магнитного поля, и существенно уменьшилась величина анизотропии (см. столбец  $x = 14 \text{ mm}$  в таблице).

На остальной части пленки, расположенной при напылении в неоднородном поле расталкивающихся магнитов (рис. 1), наблюдаются более сильные и к тому

же немонотонные изменения ориентации оси легкого намагничивания и величины анизотропии. В этой области образца угол отклонения оси анизотропии растет к краям подложки, имея хорошо выраженный минимум в центральной части пленки на линии  $y = 0$  (см. таблицу).

Как и следовало ожидать, параметры одноосной магнитной анизотропии исследованной пленки  $\mathbf{H}_k$  и  $\alpha_k$  мало отличаются от соответствующих параметров контрольного образца лишь на участках, находящихся при напылении в слабых магнитных полях. Это свидетельствует о том, что в описанном эксперименте формирование одноосной анизотропии на каждом участке пленки происходит в условиях жесткой конкуренции двух механизмов: механизма, связанного с наклонным падением потока атомов на подложку, и ориентационного, обусловленного внешним постоянным магнитным полем. Как показали измерения, магнитное поле способно не только отклонять направление оси анизотропии, сформированной наклонным напылением в процессе роста пленки, но и сильно уменьшать ее величину. Наиболее ярко обнаруженный эффект проявился на участке пленки с координатами  $(-6; -7)$  (см. рис. 2 и таблицу). Этот участок при напылении находился в сильном поле от разноименных полюсов двух магнитов, расположенных по одну сторону подложки (рис. 1).

Авторы выражают благодарность И.С. Эдельман и Р.С. Исхакову за плодотворное обсуждение результатов работы.

## Список литературы

- [1] Р. Суху. Магнитные тонкие пленки. Мир, М. (1967). 422 с.
- [2] Е.Г. Елисеева, В.П. Кононов, В.М. Попел, Е.В. Тепляков, А.Е. Худяков. ПТЭ, 2, 141 (1997).
- [3] Б.А. Беляев, А.А. Лексиков, И.Я. Макиевский, В.В. Тюрнев. ПТЭ, 3, 106 (1997).