

Л. В. КИРЕНСКИЙ, Т. П. ИЗОТОВА, Н. М. САЛАНСКИЙ
и М. К. САВЧЕНКО

МНОГОСЛОЙНЫЕ ТОНКИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫЕ ПЛЕНКИ

В настоящее время известно небольшое количество работ, посвященных теоретическому и экспериментальному изучению магнитных свойств многослойных пленок, а также их практическому применению [1—12]. В ряде случаев многослойные пленки имеют преимущество перед однослойными (лучшие импульсные характеристики пленок [8, 9], возможность построения элементов памяти с неразрушающим считыванием [10, 11]). К числу интересных вопросов, связанных с изучением свойств многослойных пленок, можно отнести изучение влияния состава, толщины слоев и условий напыления на величину коэрцитивной силы, форму петли гистерезиса и так далее.

В настоящей работе описаны технология получения многослойных, в основном двухслойных, магнитных пленок, а также их некоторые свойства. Измерение коэрцитивной силы магнитных пленок проводилось по петлям гистерезиса, получаемым осциллографированием с помощью съемных катушек. Толщины пленок измерялись на универсальном монохроматоре УМ-2.

1. Влияние состава и условий напыления на величину H_c слоев

Пленки получались термическим распылением вещества в вакууме 5×10^{-5} мм рт. ст. Для создания в пленках анизотропии во время их напыления накладывалось магнитное поле 100 э. Толщина напыляемого слоя регулировалась количеством вещества в тигле. Магнитные слои разделялись слоем кварца или стекла. Температура подложки при напылении всех магнитных слоев трехслойной пленки была 300°C . При изготовлении трехслойных пленок использовались сплавы Fe—Ni—Mo: 43% Fe, 50% Ni, 7% Mo; 17% Fe, 79% Ni, 4% Mo и Co. Таким образом, получались пленки Fe—Ni—Mo|SiO₂|Co|SiO₂|Fe—Ni—Mo (слои записаны в последовательности их напыления). Направления легких осей в слоях совпадают. Трехслойная пленка имеет ступенчатую петлю гистерезиса, характерную для неоднородных пленочных систем. В зависимости от величины перемагничивающего поля трехслойная пленка может использоваться как система с более чем двумя магнитными состояниями. Петля каждого слоя имеет неплохую прямоугольность.

Основной комплекс исследований проводился на двухслойных ферромагнитных пленках, разделенных слоем кварца. При изготовлении двухслойных пленок использовались сплавы Fe—Ni—Co (30% Fe, 45% Ni, 25% Co) — относительно высококоэрцитивный (ВК), и Fe—Ni 80% Ni—20% Fe) — низкокоэрцитивный (НК). Эти материалы легко распыляются термически и имеют различную величину коэрцитивной силы. В качестве низкокоэрцитивных материалов можно использовать сплавы

Fe—Ni—Mo (17% Fe, 79% Ni, 4% Mo), (16% Fe, 84% Ni). ВК-слой напылялся, как правило, первым при температуре подложки 300°С, а НК-слой напылялся при температуре подложки 200°С. Более низкая температура подложки при напылении второго слоя создавалась для того, чтобы избежать термоманнитного отжига первого слоя, что существенно, так как в одной партии напыления получались пленки Fe—Ni—Co|SiO₂|Fe—Ni как с параллельной, так и со взаимно перпендикулярной ориентацией легких осей.

Существенное влияние на магнитные свойства пленок оказывает режим их охлаждения в вакууме после напыления. Пленки, полностью охлажденные в вакууме, имеют коэрцитивную силу, значительно большую по величине коэрцитивной силы таких же пленок, охлажденных в вакууме до 100°. Кроме того, разброс H_c по величине от пленки к пленке при полном охлаждении получается больше, чем при их частичном охлаждении.

На рис. 1 представлены интегральные кривые распределения числа скачков Баркгаузена по полю в пленках Fe—Ni—Co толщиной 1200 Å. Как видно из рисунка, пленки, полученные при полном охлаждении в вакууме, перемангничиваются большим числом скачков Баркгаузена (1). Распределение скачков Баркгаузена по полю очень неоднородно. Подобные пленки, охлажденные в вакууме до 100°, перемангничиваются, как правило, двумя-тремя большими скачками Баркгаузена, и кривая значительно смещена в область малых полей. Увеличение скачков Баркгаузена при перемангничивании пленок, полученных при различных режимах охлаждения, вероятно, связано с увеличением неоднородностей в пленках. На увеличе-

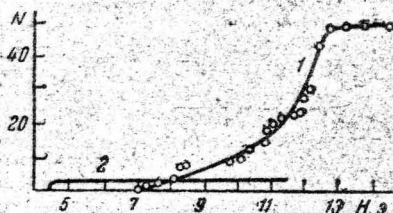


Рис. 1. Интегральные кривые распределения скачков Баркгаузена по полю в ВК-пленке: 1 — полное охлаждение пленок в вакууме, 2 — охлаждение в вакууме до 100°С

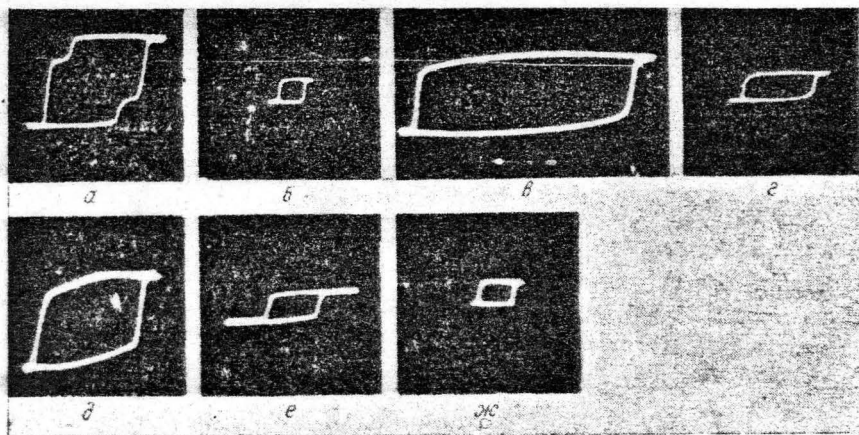


Рис. 2. Петли гистерезиса двухслойных и однослойных пленок: I — а, б) Fe—Ni—Co|SiO₂|Fe—Ni, $H = 4,1$ э; в) Fe—Ni—Co, $H = 11$ э; г) Fe—Ni, $H = 3,2$ э; II — д, ж) Fe—Ni—Co|SiO₂|Fe—Ni, $H = 4,1$; 4,1; 1 э

ние неоднородностей в пленках, полученных при полном охлаждении их в вакууме, могут влиять остаточные пары в вакуумной камере, которые портят пленку. Поэтому охлаждение пленок в вакууме проводилось до 100°, после чего в камеру, впускали воздух. В остальном условия получе-

ния двухслойных ферромагнитных пленок были такими же, как при получении трехслойных.

На рис. 2 представлены петли гистерезиса двухслойных и однослойных пленок, идентичных по составу двухслойным. Направления легких осей в слоях в снимках первого ряда параллельны, а в снимках второго ряда взаимно перпендикулярны. Как видно из этого рисунка, ширина петель гистерезиса слоистой системы значительно уже петель гистерезиса соответствующих однослойных пленок. При уменьшении поля до ± 1 э перемат-

Таблица 1

Состав	Поле насыщения, э	$(H_c)_I$, э	$(H_c)_{II}$, э	Толщина слоев, А	
				d_I	d_{II}
$I_I \parallel I_{II}$					
Fe—Ni—Co SiO ₂ Fe—Ni	4,1	3,40	0,42	1200	500
$I_I \perp I_{II}$					
Fe—Ni—Co SiO ₂ Fe—Ni	4,1	3,38	0,45	1200	500
Fe—Ni—Co	11	8,8		1200	
Fe—Ni	3,2		2,2	500	

Примечание. I и II в индексах означает первый (ВК) и второй (НК) слой соответственно. Слой кварца во всех случаях имел толщину 2000 А.

ничивается только один слой двухслойной пленки. На петле гистерезиса, полученной с двухслойной пленки с параллельной ориентацией легких осей, имеется хорошо выраженная прямоугольность каждой ступеньки (рис. 2, а). Пленки со взаимно перпендикулярной ориентацией легких осей такой петли не имеют. Поворачивая такую пленку в магнитном поле на

Таблица 2

Состав	Поле насыщения, э	$(H_c)_{II}$, э	Толщина слоев, А	
			d_I	d_{II}
Fe—Ni—Co SiO ₂ Fe—Ni	1	0,45; 0,42; 0,45	1200	500
Fe—Ni	3,7	2,3; 1,84	500	
Fe—Ni SiO ₂ Fe—Ni—Co	1,84	1,12; 1,07; 1,07	1200	500
Fe—Ni	3,7	2,5; 1,89	500	

угол 90°, можно получить петлю гистерезиса легкого направления для ВК-или НК-слоев (рис. 2, е и 2, з). Эффект уменьшения H_c магнитных слоев в этом случае получается таким же, как в случае с параллельной ориентацией легких осей.

В табл. 1 представлены значения H_c магнитных пленок в зависимости от направлений легких осей слоев двухслойной системы, а также H_c однослойных пленок.

Как видно из табл. 1, значения H_c магнитных слоев, образующих двухслойную систему, получились значительно меньше величины коэрцитивной силы соответствующих однослойных пленок.

Наибольшее уменьшение величины коэрцитивной силы НК-слоя получается тогда, когда этот слой напыляется последним. В табл. 2 представлены значения перемагничивающего поля и H_c НК-слоя двухслойных и однослойных пленок в зависимости от последовательности напыления НК-слоя.

На уменьшение величины H_c НК-слоя влияет угол наклона молекулярного пучка к подложке. Были напылены двухслойные пленки, одинаковые по составу и толщине соответствующих слоев, с той лишь разницей, что в одном случае все слои напылялись нормально к подложке, а во втором случае ВК-слой и слой кварца напылялись под углом 17° к подложке. НК-слой, как и в первом случае, напылялся нормально.

Для оценки влияния угла наклона на уменьшение H_c НК-слоя взято относительное уменьшение коэрцитивной силы, равное отношению коэрцитивной силы НК-слоя в слоистой пленке к значению коэрцитивной силы такой же по составу однослойной пленки. Результаты опыта представлены в табл. 3.

Таблица 3

α , град *	Состав	Относительное уменьшение H_c	Толщина	
			d_I	d_{II}
0	Fe—Ni—Co SiO ₂ Fe—Ni	0,241; 0,241; 0,241	1200	500
17	Fe—Ni—Co SiO ₂ Fe—Ni	0,117; 0,162; 0,170	500	1200

* α — угол напыления.

Как видно из данных табл. 3, угол падения молекулярного пучка на подложку эффективно влияет на уменьшение величины H_c НК-слоя, но разброс величины H_c от пленки к пленке в этом случае больше, чем при нормальном напылении.

Величина H_c НК-слоя очень зависит от толщины магнитных слоев, составляющих двухслойную пленку. Изучение такой зависимости может оказаться интересным для выяснения величины и характера магнитного взаимодействия между слоями, а также для практического использования двухслойных пленок.

2. Коэрцитивная сила НК-слоя в зависимости от толщины магнитных слоев двухслойной пленки

Зависимость величины H_c пленок Fe—Ni от их толщины изучалась Берндтом и Маддоксом [13], Неелем [14]. Колл с сотрудниками [3] изучали зависимость H_c от толщины слоев двухслойных ферромагнитных пленок, напыленных непосредственно слой на слой. Они получили, что при некотором соотношении толщин напыленных слоев H_c слоистой пленки может оказаться меньше H_c каждого слоя в отдельности. Петли гистерезиса не имели ступеньки, характерной для неоднородных слоев.

Представляет интерес возможность получения пленок с малыми значениями H_c , имеющих ступенчатую петлю гистерезиса.

Изученные пленки имели состав Fe—Ni—Co|SiO₂|Fe—Ni. Fe—Ni—Co — ВК-слой. Слои записаны в последовательности их напыления. На рис. 3 представлен график зависимости H_c постоянного по толщине НК-слоя от толщины ВК-слоя. Как видно из рисунка, с ростом толщины ВК-слоя H_c НК-слоя уменьшается, достигая минимального значения при толщине ВК-слоя 1000—1200 Å, после чего H_c начинает увели-

чиваться. Начиная с толщины 1800 Å H_c НК-слоя не зависит от толщины ВК-слоя. Для всех рассмотренных толщин ВК-слоя величина коэрцитивной силы НК-слоя остается меньше H_c однослойной пленки.

На рис. 4 представлены кривые зависимости H_c НК-слоя от изменения его толщины, при постоянных толщинах ВК-слоя, различных для каждой кривой. Кривая 1 этого рисунка представляет зависимость H_c НК-слоя от его толщины для однослойной пленки. Закон изменения H_c подобен закону,

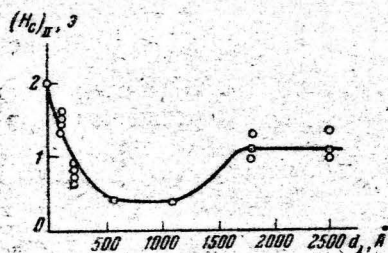


Рис. 3. Зависимость H_c НК-слоя от толщины ВК-слоя. Толщина H_c НК-слоя 500 Å

описанному в работах [13—15]. Кривая 2 соответствует изменению H_c НК-пленки при толщине ВК-слоя, равной 100 Å. Закон зависимости здесь значительно сложнее, чем для кривой 1. Для некоторых толщин НК-пленок, как видно из хода этой кривой, величина H_c НК-слоя может быть больше значения H_c отдельной пленки. При толщине НК-слоя 1000 Å величина его H_c имеет максимальное значение. С ростом толщины НК-слоя происходит быстрое уменьшение величины H_c . На кривой 3 представлена та же зависимость при толщине ВК-слоя 500 Å. Характер изменения H_c НК-слоя почти такой же, как и на кривой 2, однако максимум получается более сглаженным, а величина H_c становится значительно меньше для слоев тех же толщин, что и на кривой 2. Вероятно, можно выбрать такую толщину ВК-слоя, при которой этот максимум будет отсутствовать. Такое предположение возможно, так как при толщине ВК-слоя 1200 Å закон изменения H_c НК-слоя от его толщины совершенно изменился (кривая 4). Для интервала толщин НК-слоя, в котором на кривых 2 и 3 имеется увеличение H_c , в этом случае величина H_c очень мала и почти остается постоянной. Только начиная с толщины НК-слоя примерно 2000 Å, наблюдается рост значений H_c . При толщине ВК-слоя 2000 Å (кривая 5) величина H_c практически не зависит от толщины НК-слоя.

Последняя зависимость может оказаться интересной при изучении толстых пленок с малыми значениями коэрцитивной силы, так как коэрцитивная сила НК-пленки, напыленной в двухслойную систему, значительно меньше коэрцитивной силы такой же однослойной пленки.

Как видно из рис. 3 и 4, зависимость H_c НК-слоя получается довольно сложной. Такую зависимость нельзя объяснить изменениями энергии границ с изменением толщины пленок, упругими напряжениями, свойствами подложки и так далее. Перечисленными причинами, как обычно, объясняется зависимость величины коэрцитивной силы однослойных пленок от их толщины. Все эти факторы в какой-то мере будут сказываться на изменении H_c магнитных слоев многослойных пленок, но основная причина такого изменения величины НК-слоя от толщины слоев двухслойной пленки, вероятно, заключается в магнитном взаимодействии слоев. Как видно из хода кривых, это взаимодействие по характеру и величине должно быть зависимым от толщины магнитных слоев двухслойной пленки и от расстояния между ними.

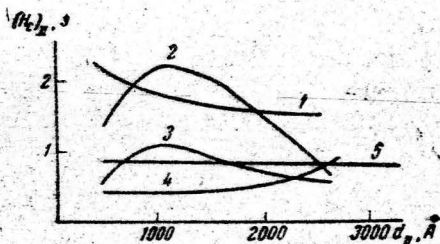


Рис. 4. Зависимость H_c НК-слоя от его толщины при постоянной толщине ВК-слоя: 1 — $d_1 = 0$, 2 — $d_1 = 100$ Å, 3 — $d_1 = 500$ Å, 4 — $d_1 = 1200$ Å, 5 — $d_1 = 2000$ Å