

УДК 669.1 : 539.216.2 : 538.249

## ОДНООСНАЯ МАГНИТНАЯ АНИЗОТРОПИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК Fe—Co СПЛАВОВ

*Л. В. Киренский, В. Г. Пынько и Н. Ш. Темченко*

Проведены измерения констант одноосной анизотропии  $K_u$  монокристаллических пленок Fe—Co, конденсированных в присутствии постоянного магнитного поля и без него. Наибольшие значения  $K_u$  (до  $10^5$  эрг/см<sup>3</sup>) обнаружены в пленках 70Fe—30Co. Измерены значения  $K_u$  после охлаждения пленок до «азотной» температуры в магнитном поле. Полученные результаты свидетельствуют о том, что причиной большой одноосной анизотропии пленок является направленное упорядочение сплава.

Измерения одноосной анизотропии монокристаллических пленок двойных сплавов системы Fe—Co—Ni показали, что особенно большими значениями константы  $K_u$  одноосной анизотропии могут обладать пленки, близкие по составу к 70Fe—30Co. У некоторых пленок сплава 70Fe—30Co  $K_u$  превышало  $10^5$  эрг/см<sup>3</sup>, тогда как у пленок остальных исследовавшихся сплавов значения  $K_u$  в редких случаях достигали  $5 \cdot 10^4$  эрг/см<sup>3</sup>.

Цель данной работы состояла в выяснении природы наиболее существенной по величине одноосной анизотропии, наблюдавшейся в монокристаллических пленках сплавов Fe—Co.

### ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Монокристаллические пленки сплавов получали методом вакуумной конденсации паров сплава на поверхностях монокристаллов LiF и MgO [1]. Часть пленок конденсировалась в присутствии магнитного поля. Постоянное магнитное поле  $\sim 150$  э в плоскости пленки создавалось подковообразным магнитом, помещавшимся в вакуумную камеру. Кристаллическое строение пленок исследовалось электронографически. Исследовавшиеся пленки (с содержанием Co до 70%) имели объемноцентрированную кубическую решетку. Плоскость пленок совпадала с кристаллографической плоскостью (001). Контроль за составом пленок осуществлялся методом рентгеноспектрального анализа.

Значения констант одноосной анизотропии вычисляли из кривых вращающих моментов, снимавшихся в поле 6 кэ. При определении для этой цели объема пленок (по методу Чиказуми [2]) намагниченность их принималась равной намагниченности соответствующих массивных кристаллов.

Погрешность измерения значений  $K_u$ , достигавших  $10^5$  эрг/см<sup>3</sup>, не превышала 5%.

### ОДНООСНАЯ АНИЗОТРОПИЯ ПЛЕНОК, КОНДЕНСИРОВАННЫХ В ОТСУТСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Диапазоны значений  $K_u$  монокристаллических пленок сплавов Fe—Co, выращенных на кристаллах LiF и MgO при температурах подложки  $T_p = 160$  и  $240^\circ\text{C}$ , приведены в табл. 1. Границы диапазонов определены на основании не менее пяти измерений. Толщина пленок составляла 500—1000 Å. Из таблицы видно, что у пленок на подложке MgO  $K_u$ , вообще говоря, больше, чем у пленок на LiF. Кроме того, видно, что повышение  $T_p$  сопровождается увеличением  $K_u$  пленок на обеих подлож-

ках. Наибольшие значения  $K_u$  наблюдаются у пленок 70 Fe—30 Co. Одна из пленок этого состава на MgO имела  $K_u = 60 \cdot 10^4$  эрг/см<sup>3</sup> и вела себя практически как одноосная пленка.

Положение оси легкого намагничивания (о.л.н.) большой ( $10^5$  эрг/см<sup>3</sup>) одноосной анизотропии пленок совпадает с одной из двухосной анизотропии. Для пленок сплава 70 Fe—30 Co — с направлением типа [100], лежащим в плоскости пленки. Положение о.л.н. одноосной анизотропии при  $K_u \sim 10^4$  эрг/см<sup>3</sup> часто не совпадало с о.л.н. двухосной анизотропии.

В выполненной ранее работе [3] было установлено, что константа двухосной анизотропии  $K_1$  монокристаллических пленок сплава 70Fe—

Таблица 1

**Константы одноосной анизотропии  $K_u$  ( $10^4$  эрг/см<sup>3</sup>) монокристаллических пленок сплавов Fe—Co**

Состав пленки	Temperatura подложки LiF		Temperatura подложки MgO	
	160° C	240° C	160° C	240° C
84 Fe—16 Co	2,6—2,8	2,2—3,3	2,4—2,9	3,3—3,9
70 Fe—30 Co	2,8—3,2	5,0—9,3	3,0—3,5	9,0—60,0
60 Fe—40 Co	2,4—2,9	1,0—3,0	2,9—3,2	1,0—4,0
50 Fe—50 Co	2,2—3,0	2,1—3,2	2,8—3,4	5,4—6,0
30 Fe—70 Co	3,0—3,9	3,0—5,8	3,7—4,2	6,1—12,0

30 Co сильно зависит от  $T_{\text{пп}}$  ( $T_{\text{пп}} = 130^\circ$  соответствует  $K_1 \approx 1 \cdot 10^5$  эрг/см<sup>3</sup>,  $T_{\text{пп}} = 240^\circ$  соответствует  $K_1 \approx 4 \cdot 10^5$  эрг/см<sup>3</sup>). Этот факт в [3] объясняется тем, что во время формирования пленки при  $T_{\text{пп}} = 240^\circ$  в расположении атомов сплава возникает дальний порядок более высокой степени, чем при  $T_{\text{пп}} = 130^\circ$ . Сопоставляя результаты измерений двухосновной и одноосной анизотропии в пленках 70Fe—30Co, а также в пленках других сплавов, можно предположить, что причиной сильной одноосной анизотропии в монокристаллических сплавах 70Fe—30Co является направленное упорядочение сплава, модель и теория которого описаны в работе [4].

При высокой  $T_{\text{пп}}$  под действием лабораторного поля (или случайно, например, под влиянием неровностей подложки) формирующаяся из пара пленка 70Fe—30Co может оказаться однодоменной с намагниченностью, лежащей вдоль одного из направлений типа [100] плоскости пленки. Образующиеся при формировании пленки элементы направленного упорядочения (пары атомов) ориентируются вдоль этого направления. При охлаждении пленки до комнатной температуры часть из них оказывается «замороженной» в этом положении. Направление «замороженных» пар атомов становится направлением оси легкого намагничивания одноосной анизотропии. Условия для образования ориентированных определенным образом пар атомов, как и для всего процесса упорядочения сплава, при более низких температурах менее благоприятны. Поэтому в пленках, напыленных при  $160^\circ$ ,  $K_u$  много меньше, чем в пленках, напыленных при  $T_{\text{пп}} = 240^\circ$ .

Причина различий  $K_u$  пленок на подложках LiF и MgO объясняется следующим. Возникновение направленного упорядочения сплава в пленках на подложке MgO облегчено растянутостью решетки пленок [5] (облегчена диффузия атомов вообще). В пленках на подложке LiF, наоборот, из-за разных тепловых расширений пленки и подложки действуют сжимающие напряжения [5], затрудняющие диффузию атомов.

Большой разброс значений  $K_u$  пленок 70Fe—30Co, выращенных на обеих подложках при  $T_{\text{пп}} = 160$  и  $240^\circ$ , может быть связан с тем, что в

момент образования пленки она разбивается на домены, намагниченность которых с разной степенью равномерности распределяется между двумя взаимно перпендикулярными о.л.н. двухосной анизотропии. Для проверки этого предположения были проведены измерения  $K_u$  пленок, конденсированных в постоянном магнитном поле.

### ОДНООСНАЯ АНИЗОТРОПИЯ ПЛЕНОК, КОНДЕНСИРОВАННЫХ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

При осаждении пленок сплава Fe—Co в постоянном магнитном поле, приложенном параллельно одной из осей легкого намагничивания двухосной анизотропии, о.л.н. одноосной анизотропии ориентируется параллельно этому направлению.

Константа одноосной анизотропии пленок сплава 70Fe—30Co, конденсированных в магнитном поле на подложке MgO при  $T_{\text{п}}=240^\circ$ , всег-

Таблица 2

**Константы одноосной анизотропии  $K_u$  ( $10^4 \text{ эрг}/\text{см}^3$ ) монокристаллических пленок сплавов Fe—Co, выращенных в постоянном магнитном поле**

Состав пленки	Temperatura подложки LiF		Temperatura подложки MgO	
	160° C	240° C	160° C	240° C
84 Fe—16 Co	2,6—3,0	2,2—3,5	2,4—3,2	3,3—4,1
70 Fe—30 Co	2,8—3,5	5,0—15,7	3,0—3,9	18,0—60,0
60 Fe—40 Co	2,4—2,9	3,0—5,0	2,9—3,2	3,0—6,0
50 Fe—50 Co	2,2—3,2	2,8—4,7	2,8—3,5	5,6—7,0
30 Fe—70 Co	3,0—4,2	3,0—6,5	3,7—4,2	6,0—14,0

да имеет значения порядка  $10^5 \text{ эрг}/\text{см}^3$ , что у пленок, конденсированных без приложения внешнего магнитного поля, наблюдалось нерегулярно. Сравнительно большие значения  $K_u$  имеют пленки сплава 30Fe—70Co, конденсированные в магнитном поле на MgO. Константа одноосной анизотропии пленок остальных исследовавшихся сплавов Fe—Co, как видно из табл. 2, незначительно превышает  $K_u$  пленок, осажденных без приложения поля.

Если при конденсации пленки 70Fe—30Co прикладывать поле вдоль оси трудного намагничивания (о.т.н.), то положение оси легкого намагничивания одноосной анизотропии оказывается несовпадающим с этим направлением. Вполне возможно, что имевшегося в нашем распоряжении поля ( $H=150$  э) было недостаточно для насыщения пленки в направлении о.т.н. даже в момент ее формирования. Величина  $K_u$  пленок, напыленных в поле, параллельном о.т.н. двухосной анизотропии, всегда меньше, чем у пленок, напыленных в поле, параллельном о.л.н. двухосной анизотропии.

В пленках 70Fe—30Co на подложке LiF удалось создать одноосную анизотропию такой же величины, как и на подложке MgO,  $(2—3) \times 10^5 \text{ эрг}/\text{см}^3$ , следующим образом. После напыления пленки на кристалл LiF в магнитном поле, параллельном о.л.н. двухосной анизотропии, температура кристалла в течение  $\sim 10$  мин сохранялась равной  $240^\circ$ , после чего пленка охлаждалась обычным способом. Этот эксперимент подтверждает высказанное ранее предположение о том, что образованию направленного упорядочения пар атомов в пленке могут мешать сжимающие термические напряжения,

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОДНООСНОЙ АНИЗОТРОПИИ ПЛЕНОК

Охлаждение пленок в магнитных полях напряженностью 6, 10, 15 кэ показало, что величина поля, прикладываемого к пленке при охлаждении, не оказывается заметно на величине изменений констант одноосной анизотропии. В табл. 3 приведены результаты измерений  $K_u$  после охлаждения до азотной температуры в полях 6 кэ.

Из табл. 3 видно, что для всех монокристаллических пленок сплавов Fe—Co, выращенных на поверхностях кристаллов LiF и MgO, при ох-

Таблица 3  
Значения  $K_u$  ( $10^4$  эрг/см<sup>3</sup>) пленок Fe—Co при разных температурах

Состав пленки	$K_u$ (20°C)	$K_u^*$ (-196°C)	$K_u^{**}$ (-196°C)	Состав пленки	$K_u$ (20°C)	$K_u^*$ (-196°C)	$K_u^{**}$ (-196°C)
Подложка MgO							
84 Fe—16 Co	3,7 3,4	4,6 3,7	3,4 3,2	84 Fe—16 Co	2,2 2,9	2,5 3,3	1,2 3,1
70 Fe—30 Co	17,8 14,3 10,8	33,3 28,6 18,2	10,5 11,5 7,2	70 Fe—30 Co	5,0 9,3	7,2 11,4	5,6 10,4
60 Fe—40 Co	3,1 4,1	3,6 4,4	2,6 3,9	60 Fe—40 Co	2,7 2,1	3,0 2,8	2,9 2,6
50 Fe—50 Co	6,2 7,0	6,9 8,1	5,4 6,4	50 Fe—50 Co	3,7 2,8	4,2 3,6	3,2 2,5
30 Fe—70 Co	6,3 7,2	9,4 9,0	4,4 4,7	30 Fe—70 Co	5,2 6,0	6,3 7,2	5,6 6,6
Подложка LiF							

\* Поле при охлаждении приложено параллельно о.л.н. одноосной анизотропии.

\*\* Поле при охлаждении приложено перпендикулярно направлению о.л.н. одноосной анизотропии.

лааждении в магнитном поле, приложенном параллельно оси легкого намагничивания одноосной анизотропии,  $K_u$  увеличивается. При охлаждении пленок в магнитном поле, приложенном перпендикулярно направлению о.л.н. одноосной анизотропии,  $K_u$  уменьшается. Для некоторых пленок, чаще всего на LiF, при охлаждении в магнитном поле, приложенном перпендикулярно к о.л.н. одноосной анизотропии,  $K_u$  не уменьшается, а увеличивается.

Изменения константы одноосной анизотропии, вызванные охлаждением монокристаллических пленок, изготовленных на кристаллах MgO, больше, чем в случае пленок, изготовленных на кристаллах LiF. Отметим также, что наибольшие изменения  $K_u$  при охлаждении в магнитном поле происходят у монокристаллических пленок тех составов, у которых при комнатной температуре константа одноосной анизотропии велика ( $\sim 10^5$  эрг/см<sup>3</sup>): 70Fe—30Co, 30Fe—70Co. Если  $K_u$  имеет малые значения при комнатной температуре (порядка  $10^4$  эрг/см<sup>3</sup>), то изменения энергии одноосной анизотропии при охлаждении пленок в магнитном поле также невелики.

При нагревании от  $-196$  до  $+20^\circ$  константа одноосной анизотропии пленки принимает исходное значение даже после многих циклов охлаждения, независимо от величины магнитного поля при охлаждении. Основные изменения  $K_u$  монокристаллических пленок происходят в интервале температур от  $-196$  до  $-150^\circ$ .

Рассмотрим результаты исследований температурной зависимости константы одноосной анизотропии пленок с позиции гипотезы направ-

ленного упорядочения сплава. Прежде всего объясним, почему при охлаждении пленки в поле, параллельном оси легкого намагничивания одноосной анизотропии,  $K_u$  возрастает, а при охлаждении в поле, перпендикулярном о.л.н. одноосной анизотропии,  $K_u$  уменьшается. Будем считать, что перестройка пар атомов в ориентацию, параллельную вектору намагниченности, возможна лишь при определенном их окружении, а само окружение может обратимо изменяться в определенных пределах при изменении температуры. Как уже отмечалось, при охлаждении пленки (после ее конденсации) до комнатной температуры, ориентированная вдоль приложенного поля часть пар атомов закрепляется в этой ориентации (уменьшаются межатомные расстояния, снижаются тепловые колебания решетки) и, тем самым, создает одноосную анизотропию. Если затем снова приложить поле вдоль оси легкого намагничивания одноосной анизотропии и продолжить охлаждение пленки, то число пар атомов, закрепляющихся в ориентации вдоль о.л.н., будет возрастать. Соответственно этому возрастет и величина одноосной анизотропии. При охлаждении в поле, перпендикулярном о.л.н., часть пар атомов окажется закрепленной в этой ориентации, и, тем самым, снизит величину имевшейся одноосной анизотропии.

Тот факт, что у пленок на подложке LiF при охлаждении в поле, перпендикулярном оси легкого намагничивания, одноосная анизотропия, хотя и незначительно, возрастила, можно объяснить тем, что увеличение одноосной анизотропии при охлаждении пленки в поле происходит по двум причинам: 1) увеличивается число пар атомов, закрепленных в определенной ориентации; 2) увеличивается энергия анизотропии, приходящаяся на одну закрепленную пару атомов.

Так как в пленках на LiF пар атомов, которые могли бы закрепляться при охлаждении ниже комнатной температуры, сравнительно мало, то вклад в константу одноосной анизотропии со стороны закрепленных ранее пар атомов может возрастать быстрее с охлаждением пленки, чем вклад со стороны вновь закрепляющихся пар атомов.

### К ВОПРОСУ О ПРИРОДЕ ОДНООСНОЙ АНИЗОТРОПИИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

На основании исследований, проведенных на монокристаллических пленках, можно было предполагать, что одной из причин возникновения одноосной анизотропии в поликристаллических пленках также является направленное упорядочение сплава. В связи с тем, что наибольшая одноосная анизотропия наблюдалась в монокристаллических пленках сплава 70Fe—30Co, было решено проверить, какой величины одноосная анизотропия может возникать в поликристаллических пленках этого же состава. Исследования показали, что при конденсации поликристаллических пленок в магнитном поле о.л.н. одноосной анизотропии всегда совпадает с направлением поля. Однако значения  $K_u$  оказались небольшими не более  $10^4 \text{ эрг}/\text{см}^3$ . При охлаждении от комнатной температуры до  $-196^\circ$  поликристаллических пленок в магнитном поле 6 кэ, параллельном о.л.н. одноосной анизотропии, константа одноосной анизотропии увеличивалась. При охлаждении пленок в поле, перпендикулярном направлению о.л.н.,  $K_u$  уменьшалась. Последний факт можно рассматривать как доказательство того, что природа одноосной анизотропии в поликристаллических пленках сплава 70Fe—30Co та же, что и в монокристаллических, — направленное упорядочение сплава.

Выше было показано, что выстраивание и закрепление пар атомов в сплаве 70Fe—30Co происходит лучше вдоль направлений типа [100]. В

поликристаллических пленках имеет место разориентация кристаллографических направлений кристаллитов относительно друг друга, поэтому направленное упорядочение сплава не может создать большой одноосной анизотропии.

## ВЫВОДЫ

1. Ни один из описанных экспериментальных фактов не противоречит предположению о том, что наиболее значительная по величине одноосная анизотропия в монокристаллических пленках Fe—Co создается направленным упорядочением сплава.

2. Описанные эксперименты говорят также о том, что одной из причин одноосной  $M_s$  — индуцированной анизотропии поликристаллических Fe—Co пленок является направленное упорядочение сплава.

Авторы благодарят Н. М. Репину за помощь в проведении экспериментов.

Институт физики  
СО АН СССР  
Красноярский пединститут

Поступила в редакцию  
3 августа 1970 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пынько В. Г. и др. Изв. АН СССР, сер. физ., 1967, **31**, 485.
2. Chikazumi S. J. Appl. Phys., 1961, **32**, 81.
3. Овсянников М. А. Автореф. канд. дисс., Красноярск, Ин-т физики СО АН СССР, 1970.
4. Yamamoto M. a. o. Sci. Rep. Res. Inst. Tohoku Univers., 1961, **13A**, 117.
5. Пынько Г. П., Пынько В. Г., Овсянников М. А. Физика магнитных пленок, Иркутск, 1968.

Киренский Л. В., Пынько В. Г., Темченко Н. Ш. Одноосная магнитная анизотропия  
монокристаллических пленок Fe-Co сплавов // Физ. металлов и металловед. -

1971. - Т. 31 вып. 2. - С. 324-329