

Н. З. МИРЯСОВ, Т. Н. ШАШКОВА

ИНДУЦИРОВАННАЯ МАГНИТНАЯ АНИЗОТРОПИЯ В Ni—Cu ФЕРРИТАХ С МАЛЫМИ ПРИСАДКАМИ Co

В работе исследована температурная зависимость магнитной одноосной анизотропии, индуцированной термомагнитной обработкой на ферритах состава $Co_x(Ni, Cu)_{1-x}Fe_2O_4$, где $x = 0,0; 0,02; 0,04; 0,06; 0,08$. Показано, что ТМО в атмосфере кислорода уменьшает время релаксации τ , т. е. ускоряет процесс образования одноосной анизотропии, не влияя при этом на конечную величину константы индуцированной анизотропии K_u . Последняя растет линейно с увеличением концентрации Co, что согласуется с одноионной моделью Слончевского [1].

Как известно, термообработкой в магнитном поле (ТМО) при температурах ниже точки Кюри в некоторых неупорядочивающихся сплавах и ферритах с кубической решеткой можно создать одноосную магнитную анизотропию. Энергия этой индуцированной анизотропии, возникающей дополнительно к естественной магнитокристаллической, выражается формулой

$$E_T = -F \sum \alpha_i^2 \beta_i^2 - G \sum_{i>j} \alpha_i \alpha_j \beta_i \beta_j,$$

где α и β — направляющие косинусы вектора намагниченности относительно кристаллографических осей во время измерения и в процессе ТМО, F и G — константы анизотропии.

Если индуцированная анизотропия не зависит от направления поля, приложенного при ТМО, относительно кристаллографических осей ($G = 2F$), то энергия анизотропии примет вид

$$E_u = K_u \sin^2 \theta, \quad (1)$$

где θ — угол между вектором намагниченности во время измерений и направлением поля при ТМО.

Установлено, что формула (1) применима и в случае поликристаллических образцов, т. е. направление легкого намагничения в этом случае совпадает с направлением поля, приложенного при ТМО.

Поскольку в кубических кристаллах анизотропия, выраженная формулой (1), невозможна, были высказаны различные предположения относительно природы индуцированной одноосной анизотропии в таких материалах и предложены соответствующие теоретические расчеты.

В опубликованных экспериментальных исследованиях природа индуцированной анизотропии объясняется либо на основе теории направленного упорядочения Нееля [2] и созданной также независимо от него Тангучи и Ямамото [3, 4], либо на основе теории одноионной модели Слончевского [1]. И довольно затруднительно отдать предпочтение какой-либо из этих теорий. Трудность обусловлена тем, что из результатов ряда экспериментальных работ нельзя сделать количественные выводы, поскольку нет уверенности в том, что в результате ТМО была достигнута предельная величина индуцированной анизотропии. Кроме того, в ряде работ измерения константы индуцированной анизотропии проводились лишь при комнатной температуре. Наибольший интерес представляет температурная зависимость предельного значения наведенной анизотропии, в особенности в области низких температур, где константа анизотропии K_u стремится к своему максимальному значению при 0°K , которым, строго говоря, и следует пользоваться при теоретической интерпретации результатов эксперимента.

В ряде экспериментальных работ, посвященных исследованию индуцированной анизотропии на ферритах, не учитывается еще тот факт, что состояние окисления образца (плотность катионных вакансий) играет огромную роль в образовании одноосной анизотропии при ТМО. Установлено, что чем выше степень окисления феррита, тем интенсивнее происходит диффузия ионов при ТМО, приводящая к более быстрому росту наведенной анизотропии. Теоретическая интерпретация результатов измерения анизотропии осложняется еще тем, что, по мнению некоторых авторов, конечная величина анизотропии зависит от степени окисления образца.

В данной работе исследовались влияния малых присадок ионов Co в ферритах $\text{Co}_x(\text{Ni}, \text{Cu})_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}$ ($x=0,0, 0,02, 0,04, 0,06, 0,08$) на величину константы индуцированной одноосной анизотропии в интервале температур $77-293^\circ\text{K}$. Выяснялась роль кислорода в образовании индуцированной анизотропии: исследовалась зависимость ее величины от времени термомагнитной обработки без доступа кислорода, на воздухе при атмосферном давлении и в атмосфере кислорода.

Ферриты всех составов были приготовлены из окислов высокой чистоты обычным керамическим способом и подвергались одинаковой термической обработке. Константа индуцированной одноосной анизотропии K_u измерялась известным методом вращательных моментов. Образцы имели форму сферы $(7,5-7,8) \pm 0,005$ мм. Такая точность обработки образцов исключает появление дополнительного момента кручения за счет несферичности. Термомагнитная обработка производилась при 300°C в поле электромагнита ≈ 5000 эрст.

Результаты измерений и их обсуждение

Кривые вращательных моментов измерялись в полях $10-14$ Кэв, что обеспечивало получение совершенно симметричных синусоидов с периодом 180° при всех температурах (рис. 1). Из этих кривых были рассчитаны константы индуцированной анизотропии K_u исследованных составов после каждого известного промежутка времени магнитного отжига. Исследование влияния атмосферы на скорость образования индуцированной анизотропии и конечную величину K_u ТМО образцов всех составов производилось без доступа кислорода и на воздухе, а для образцов с содержанием Co $0,02$ и $0,08$ также и в атмосфере чистого кислорода.

Измерения величины K_u в зависимости от времени ТМО показали, что после 72-часового отжига в поле она достигает значения, близкого к предельному, которое получилось бы при бесконечно длительном отжиге. На рис. 2 приведены кривые зависимости от времени ТМО в различных средах для образца с максимальным содержанием Со ($x=0,08$). Измерения проведены при температуре жидкого азота. Кривые на рис. 2

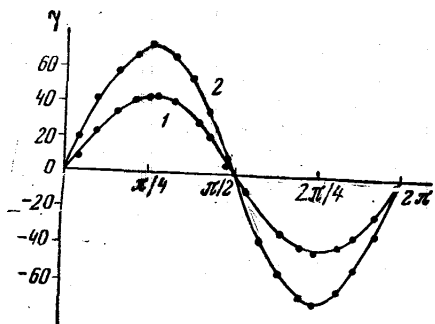


Рис. 1. Зависимость механического момента γ от угла α между направлением поля при измерении и поля H_T при ТМО. 1 — при $t=20^\circ$; 2 — при $t=-196^\circ\text{C}$

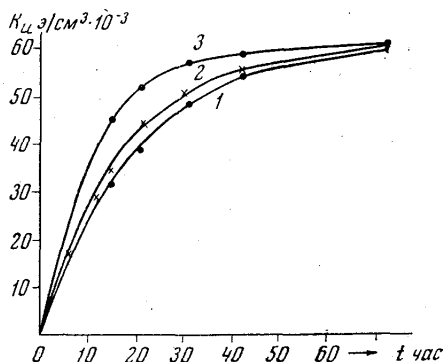


Рис. 2. Зависимость константы K_u , измеренной при $T=77^\circ\text{K}$, от времени отжига в магнитном поле образца $x=0,08$. 1 — отжиг без доступа кислорода, 2 — отжиг в воздухе, 3 — отжиг в атмосфере кислорода

рассчитаны теоретически в предположении, что рост константы со временем представляет собой релаксационный процесс и описывается экспоненциальной кривой, т. е.

$$K_u = K_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (2)$$

где τ — время релаксации, K_0 — величина K_u после очень большого периода ТМО. К такому же выводу приходят и другие авторы (см., например, [5]).

Как видно из рис. 2, экспериментальные данные, обозначенные на нем точками и крестиками, достаточно близко ложатся на кривые формулы (2). Расчеты показали, что время релаксации τ при ТМО равно: в атмосфере кислорода 11 час, на воздухе 16,7 час и без доступа кислорода 19,3 час. Из рисунка также видно, что длительный отжиг в различных атмосферах должен привести к конечному значению K_0 , одинаковому для всех трех отжигов, т. е. $K_0=61 \cdot 10^3 \text{ э/см}^3$. Аналогичный результат был получен и для образца с наименьшим содержанием Со ($x=0,02$). Разница заключается лишь в том, что постоянная анизотропии K_u этого образца стремится к своему предельному значению $15,2 \cdot 10^3 \text{ э/см}^3$ (при $t=-196^\circ\text{C}$), а время релаксации τ равно: в атмосфере кислорода 9 час, на воздухе — 13,2 час и без доступа кислорода 19 час.

Результаты приведенных исследований позволяют утверждать, что ТМО в кислороде, приводящая к увеличению плотности катионных вакансий, вызывает ускорение процессов образования индуцированной одноосной анизотропии, т. е. уменьшает время релаксации τ , не влияя при этом на конечную величину константы K_u .

На рис. 3 приведены кривые температурной зависимости K_u для образцов с различным содержанием Со и подвергнутых ТМО в течение 72 час. Как показал эксперимент, отжиг такой длительности на воздухе при 300°C практически приводит к величине K_u , близкой к ее предельному значению (с точностью менее 1%). Из рис. 3 видно, что экстраполяция K_u к 0°K дает величину K_u , мало отличающуюся от K_u , измерен-

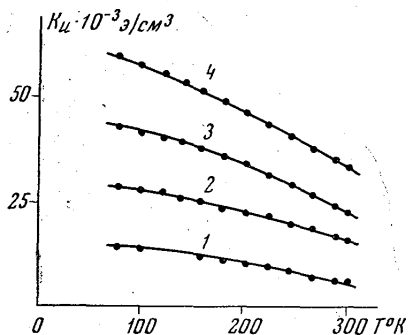


Рис. 3. Температурная зависимость K_u ферритов $\text{Co}_x(\text{Ni}, \text{Cu})_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$. Кривая 1 образца с $x=0,02$, 2 — с $x=0,04$, 3 — с $x=0,06$, 4 — с $x=0,08$

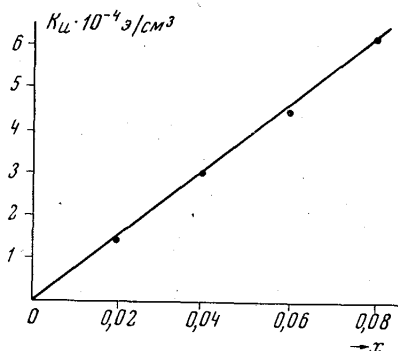


Рис. 4. Зависимость K_u , измеренной при $T=77^\circ\text{K}$, от содержания ионов Со

ной при температуре жидкого азота. Поэтому для иллюстрации зависимости K_0 от содержания ионов Со можно с достаточной точностью использовать ее значения при этой температуре. Такая зависимость $K_u=f(x)$ приведена на рис. 4. Из этого рисунка видно, что константа индуцированной одноосной анизотропии исследованных ферритов линейно зависит от концентрации Со. На образцах, не содержащих Со, мы не обнаружили индуцированной анизотропии.

Из сказанного следует сделать некоторые выводы.

Конечная величина константы наведенной магнитной анизотропии в Ni—Cu ферритах с малыми присадками Со не зависит от концентрации вакансий. Основная роль в создании индуцированной анизотропии принадлежит ионам Со, величина которой растет линейно с ростом концентрации ионов Со, что согласуется с теорией одноионной модели Слончевского.

Катионные вакансии, число которых существенно зависит от степени окисления феррита, являются лишь причиной более быстрой релаксации индуцированной анизотропии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Slonczewsky J. C. J. Appl. Phys., **29**, 448, 1958; Phys. Rev., **110**, 1341, 1958.
2. Neel L. J. Phys. rad., **15**, 225, 1954.
3. Taniguchi S., Yamamoto M. Sci. Rep. Res. Inst. Tohoku Univ., **A6** 330, 1954.
4. Taniguchi S. Sci. Rep. RITU, **A7**, 296, 1954; **A9**, 196, 1957.
5. Szydzowsky H. Acta physica polonica, **25**, 3, 402, 1964.

Поступила в редакцию
17.6 1968 г.

Кафедра
магнетизма