

УДК 538.245

В. Л. ИВАННИКОВ, А. И. КАШЛИНСКИЙ, Н. З. МИРЯСОВ,
В. А. СЕМКИНА

КОНСТАНТА МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ ИОНАМИ Ni^{2+} В ТЕТРАЭДРИЧЕСКОЙ ПОДРЕШЕТКЕ

В работе исследована константа магнитной анизотропии поликристаллических ферритов шпинелей $Co_xNi_{0,5-x/2}Cu_{0,5-x/2}Fe_2O_4$ ($x=0,00; 0,02; 0,04; 0,06; 0,08$) методом ферромагнитного резонанса. Показано, что закалка с высоких температур ($950^\circ C$) приводит к увеличению положительной константы K , которое объясняется выходом небольшой части ионов Ni^{2+} в тетраэдрическую подрешетку. Результаты согласуются с данными Пойнтонна, исследовавшего этот эффект на ферритах никеля с небольшим содержанием Со.

В настоящее время невозможно объяснить ряд экспериментальных данных по исследованию анизотропии никелевых ферритов, если не предполагать, что часть ионов Ni^{2+} находится в тетраэдрической подрешетке феррита.

Впервые это предположение было сделано в работе [1], причем отмечалось, что ион Ni^{2+} в этом случае будет иметь большую константу анизотропии положительного знака.

Бальцер [2], исходя из одноионной теории и считая Ni^{2+} , находящийся в тетраэдрической подрешетке, ионом ян-теллеровского типа, провел теоретическое исследование вклада, вносимого им в константу анизотропии K_1 . Согласно полученным им результатам K_1 действительно велика, но имеет отрицательный знак. Последний вывод противоречит экспериментальным данным Пойнтонна [3, 4].

Настоящая работа также посвящена этому вопросу. Исследованию подвергались две системы поликристаллических ферритов одинакового состава $Co_xNi_{0,5-x/2}Cu_{0,5-x/2}Fe_2O_4$ ($x=0; 0,02; 0,04; 0,06; 0,08$), приготовленные по обычной керамической технологии. При этом одна система закаливалась с температуры $950^\circ C$ в воде, а другая медленно охлаждалась вместе с печью.

Измерения проводились методом ФМР на спектрометре типа ЭПА-2.

Полученные спектры поглощения свидетельствуют о том, что в данном случае мы имеем дело с мультипольным резонансом, причем слабо интенсивную низкополевую линию, согласно современным пред-

ставлениям [5], можно отнести к резонансу доменных границ, а две другие высокополевые линии связаны с резонансом в сильно анизотропной среде [6, 7].

Мультипольность резонанса в этом случае может быть использована для расчета константы анизотропии поликристаллического образца. Согласно Шлеману [8], если намагниченность насыщения мала по сравнению с полем анизотропии, а дипольным взаимодействием между зернами можно пренебречь, отдельные зерна будут резонировать уже самостоятельно.

Расчеты [8] с учетом этого обстоятельства показывают, что форма кривой поглощения будет сильно деформироваться в зависимости от величины параметра анизотропии $c = \gamma H_a / \omega$. В случае $c \geq 0,5$ кривая поглощения будет состоять из двух четких пиков поглощения.

При $K_1 < 0$: высокополевое $H_b = \omega/\gamma + H_a$ и низкополевое $H_H = \omega/\gamma - 2/3H_a$; и при $K_1 > 0$: высокополевое $H_b = \omega/\gamma + 2/3H_a$ и низкополевое $H_H = \omega/\gamma - H_a$.

Используя эти соотношения, легко рассчитать константу анизотропии, так как $K_1 = \frac{H_a M}{2}$;

$$\text{при } K_1 < 0 \quad K_1 = 3/10M(H_b - H_H),$$

$$\text{при } K_1 > 0 \quad K_1 = 3/10M(H_b' - H_H').$$

Анализируя ход кривых температурной зависимости ΔH по Шлеману [9], было установлено, что исследуемые ферриты имеют точки компенсации K_1 . Температура T_a , при которой K_1 меняет знак, определялась по положению минимума ΔH на кривых $\Delta H = f(t^\circ\text{C})$.

Результаты расчетов K_1 указанных систем ферритов представлены на рис. 1 и 2.

Из сравнения кривых рисунков 1 и 2 видно, что закалка приводит к заметному увеличению анизотропии и температуры, при которой константа анизотропии меняет свой знак. Это увеличение может быть объяснено, если рассматривать величину $\Delta K_1 = K_{1 \text{ зак}} - K_{1 \text{ нез}}$, как аддитивную сумму вкладов, обусловленных: (1) изменением степени обращенности феррита, (2) образованием дополнительного количества двухвалентного железа; (3) разупорядочением Co^{2+} , (4), появлением никеля в тетраэдрической подрешетке и (4) наличием упругих напряжений.

1. Закалка ферритов, имеющих в своем составе медь, согласно [10], может вызвать изменение степени обращенности. При этом ян-теллеровский эффект, обусловленный переходом достаточного количества Cu^{2+} в тетраэдрическую подрешетку, приведет к изменению величины константы анизотропии. Однако измерения намагниченности насыщения M_s образцов закаленной и незакаленной систем поликристаллов показали, что в данном случае степень обращенности практически не изменилась, так как разница между M_s мала и находится в пределах ошибки измерения. Поэтому увеличение константы анизотропии, обусловленное этим ян-теллеровским эффектом, можно не рассматривать.

2. Маловероятно, что при быстром охлаждении содержание x двухвалентного железа Fe^{2+} настолько изменится, что этим можно было бы объяснить увеличение константы. Так, соответствующие расчеты, выполненные по теории Клогстона и на основе вклада в анизотропию от одного иона Fe^{2+} [11] дают в этом случае величину x по-

рядка 0,3. Указанное значение слишком велико, а потому и маловероятно.

3. Рассматривая зависимость ΔK_1 от концентрации Co^{2+} (рис. 3), можно отметить, что она подчиняется закону $\Delta K_1 = a - bx(\text{Co}^{2+})$. Одно из возможных объяснений этой закономерности заключается в том,

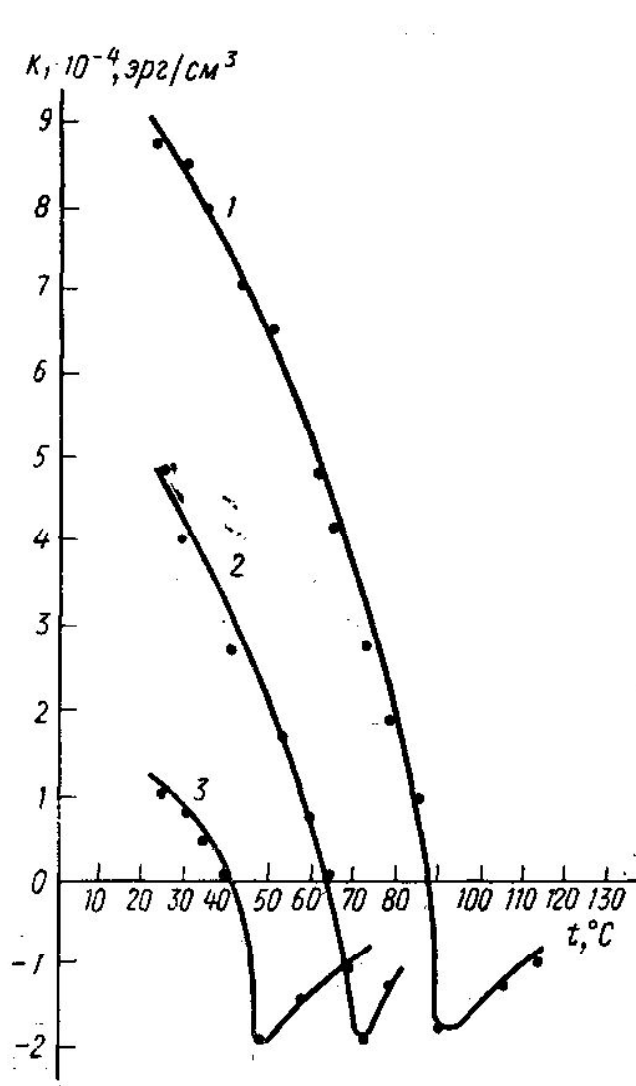


Рис. 1. Температурная зависимость константы медленно охлажденных образцов. 1 — $x=0,08$, 2 — $x=0,06$, 3 — $x=0,04$

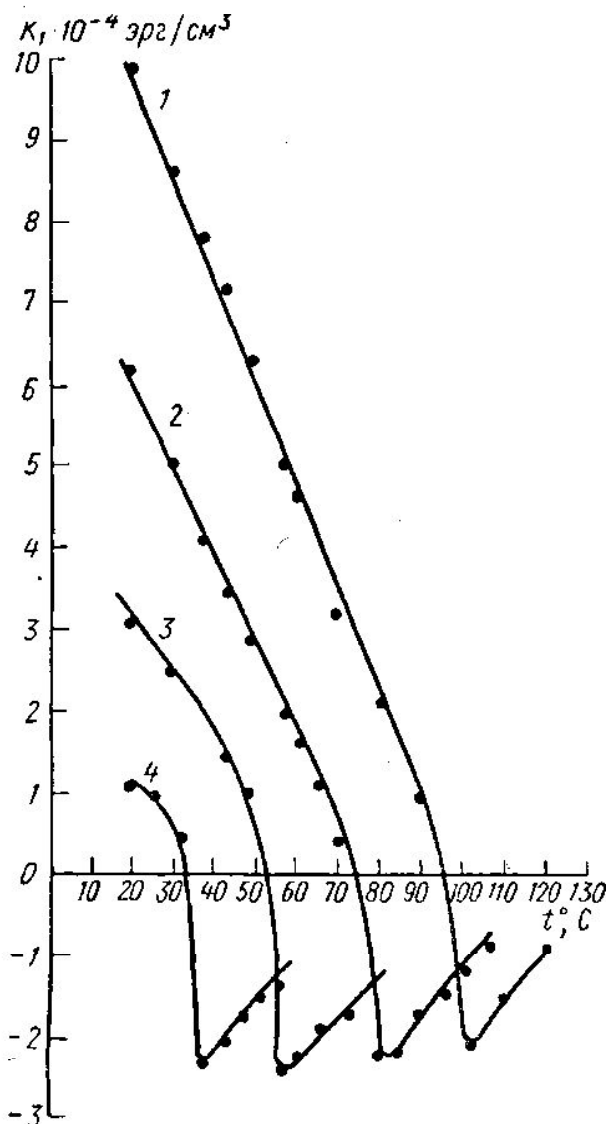


Рис. 2. Температурная зависимость константы закаленных образцов. 1 — $x=0,08$, 2 — $x=0,06$, 3 — $x=0,04$, 4 — $x=0,02$

что при быстром охлаждении феррита вероятность нахождения Co^{2+} в регулярных местах подрешетки B уменьшается. Это приведет к тому, что на ион Co^{2+} будет действовать уже не тригональное поле, а более низкой симметрии и, следовательно, изменится вклад в константу анизотропии от ионов Co^{2+} . Согласно нашим экспериментальным данным (см. рис. 3) этот вклад $\Delta K_1(\text{Co}_{\text{упор}}^{2+})$ при закалке уменьшается. Используя полученную зависимость ΔK_1 от x , легко исключить $\Delta K_1(\text{Co}_{\text{упор}}^{2+})$, экстраполируя ΔK_1 на нуль $x(\text{Co}^{2+})$. Найденное при этом значение ΔK_{10} равняется $2,6 \cdot 10^4 \text{ эрг/см}^3$.

4. Появление внутренних напряжений в феррите при его закалке, вероятнее всего, мало скажется на величине константы анизотропии. Так, расчеты показали, что для объяснения наблюдаемой величины ΔK_{10} этим механизмом необходимы слишком большие напряжения

порядка 2—3 т/см^2 . При оценке величины напряжений использовалось значение λ_s , равное средней величине λ_s для $\text{Ni}_{0,8}\text{Fe}_{2,2}\text{O}_4$ [12] и CuFe_2O_4 [13], так как специальных экспериментов в этом направлении не проводилось.

Итак, можно отнести всю разность ΔK_1 , за счет участия Ni^{2+} , которые зафиксировались в тетраэдрической подрешетке, а также оценить его содержание. Для этого воспользуемся значением вклада в константу анизотропии от одного процента ионов Ni^{2+} , занимающих тетраэдрические места, которое вычислялось при исследовании монокристалла $\text{Ni}_{0,72}\text{Cu}_{0,1}\text{Fe}_{2,18}\text{O}_4$. Расчет показал, что в нашем случае вклад ΔK_1 в магнитную анизотропию, равный $2,6 \cdot 10^4 \text{ эрг/см}^3$, обусловлен переходом 0,42% ионов Ni^{2+} феррита в подрешетку А.

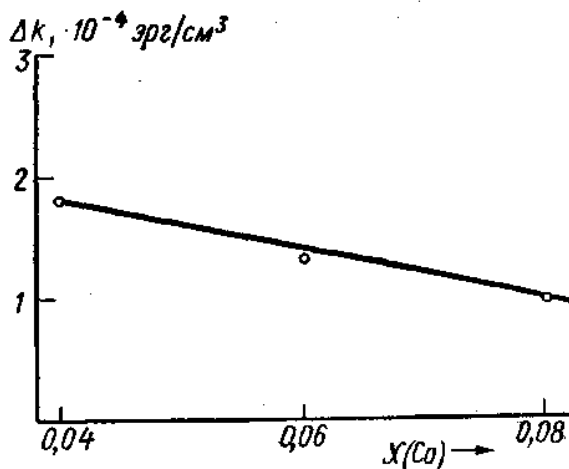


Рис. 3. Зависимость $K = K_{\text{зак}} - K_{\text{незак}}$ от содержания $x \text{ Со}$

Результаты, полученные Пойнтоном для ферритов, имеющих почти такой же состав, близки к этому значению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wolf W. P. Phys. Rev., 108, No. 5, 1957.
2. Balzer P. K. Phys. Soc. Japan, 17, Suppl B 1, 192, 1962.
3. Pointon A. T. The philos mag., 17, No. 148, 703, 1968.
4. Robertson T. M., Pointon A. T. State Commun., 4, 257, 1966.
5. Сб. «Ферромагнитный резонанс». М., ИЛ, 1952; Оноприенко Л. Г. «Физика металлов и металловеденье», 15, 45, 1963; Власов К. Б. ЖТЭФ, вып. 7, 56, 1967; Пильшиков А. И. и др. «Физика твердого тела», 8, 12, 1966; Дудкин В. И. Диссертация МГУ, 1968.
6. Artman T. Proc. IRE, 44, No. 10, 1284, 1956.
7. Tannenwald P. E. Phys. Rev., 99, No. 2, 15, 1955.
8. Schlomann E. J. Appl. Phys., 29, No. 3, 1958.
9. Schlomann E. Proc. Conf. Magnetism and magnetic mater, 606, 1956.
10. Gorter E. W. Adv. phys., 6, 336, 1954.
11. Smit T. et al. Phys. Soc. Japan., 17, B-1, 220, 1962.
12. Wijn H.P.J. и др. Phil. techn. Rev., 16, 49, 1954.
13. Ситидзе Ю., Сапох К. М., «Ферриты», 1964.

Поступила в редакцию
3.1 1970 г.

Кафедра
магнетизма