

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 5 — 1972

УДК 621.372.852.22

Н. М. СПЕРАНСКИЙ, В. И. ЧЕЧЕРНИКОВ, В. Л. ИВАННИКОВ

НЕКОТОРЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА НИКЕЛЬ-КАДМИЕВЫХ ФЕРРИТОВ

Проведены измерения температурной зависимости величины резонансного поля $H_{\text{рез}}$, ширины линии резонансного поглощения ΔH - и g -фактора в интервале 20—360°С у никель-кадмиевых ферритов. Рассматривались две ферритные подсистемы, отличающиеся друг от друга содержанием Fe_2O_3 (в среднем на 6 мол.%). Обнаружено, что у образцов с ростом температуры напряженность $H_{\text{рез}}$ растет, а ΔH - и g -фактор уменьшаются.

Измерения ферромагнитного резонанса в никель-кадмиевых ферритах были проведены на радиоспектроскопе трехсантиметрового диапазона с низкочастотной модуляцией магнитного поля. Измерения проводились на шариках диаметром 0,2—0,3 мм, которые предварительно отжигались при температуре, несколько меньшей температуры спекания. Качество обработки поверхности проверялось при помощи микроскопа. Предварительные измерения при комнатной и при других температурах на различных образцах одного и того же состава ($\phi = 0,4$ —0,7 мм) показали хорошее согласие результатов. На этих образцах были исследованы температурная зависимость величины резонансного поля $H_{\text{рез}}$, ширины линии резонансного поглощения ΔH и g -фактора в интервале 20—360°С. При более высоких температурах (измерения на нашей установке можно было проводить до 600°С), приближающихся к точкам Кюри образцов, сигнал не улавливался.

Наша ферритная система состояла из двух подсистем, отличающихся друг от друга содержанием F_2O_3 (в среднем на 6 мол.%). Данные химического и других анализов приведены в таблице, где обе указанные группы составов выписаны отдельно и в то же время в порядке возрастания в образцах количества CdO . Было установлено, что у всех составов независимо от их принадлежности к той или иной подсистеме с ростом температуры $H_{\text{рез}}$ растет, а ΔH - и g -фактор уменьшается.

Ранее на этих же составах было установлено [1], что целый ряд физических свойств не изменяется заметным образом в результате указанной вариации количества Fe_2O_3 , а более существенным образом зависит от содержания в образцах CdO . Так, если рассматривать обе подсистемы как одну общую систему, где составы расположены в порядке возрастания в них количества CdO , то этой последовательности соответствуют определенные закономерности в изменениях таких

№ образца	Данные химического анализа (мол. %)			Постоянная решетки (ангстрем)	Намагниченность 20° С (гс·см ³ /г)	Точки Кюри (θ _f ⁰ С)	Интервал измерений (t °С)	H _{рез} (эрстед)	Изменение g-актора (Δg _t), t°С	Изменение ширины линии ΔH (эрстед), 2 t° С	Средняя величина зерна (микрои)	Кажущаяся плотность (г/см ³)
	Fe ₂ O ₃	NiO	CdO									
1	57,2	39,9	2,9	8,391	71,2	430	20—310	2500—2900 400	2,36—2,04=0,32	100—70=30	180	5,25
3*	57,1	31,8	11,1	8,401	63,7	300	20—240	2700—2900 200	2,40—2,08=0,32	120—60=60	300	5,39
4*	57,2	26,1	16,7	8,409	59,2	200	20—220	2800—2950 150	2,20—2,10=0,10	100—20=80	320	5,48
5	57,3	16,7	26,0	8,423	11,1	90	—	—	—	—	330	5,56
1*	63,6	28,2	8,2	—	69,5	500	20—360	2600—2900 300	2,40—2,05=0,35	100—60=40	40	—
2	64,6	21,7	13,7	—	60,2	370	20—290	2750—2820 70	2,20—2,10=0,10	100—50=50	100	—
3	63,5	18,9	17,6	—	44,6	300	20—320	2800—2900 100	2,18—2,08=0,10	140—60=80	120	—
4	61,6	15,0	23,4	—	27,4	200	20—370	2750—2950 200	2,20—2,04=0,16	130—100=30	280	—

свойств, как термоэдс, электропроводность, энергия активации, теплопроводность, теплоемкость [1]. Однако с резонансными свойствами дело обстоит несколько иначе. Определенные зависимости резонансных свойств от содержания CdO наблюдаются только в группах образцов, содержащих практически одинаковое количество Fe_2O_3 . То же самое имеет место и для зависимостей температур точек Кюри θ_f от содержания CdO (образцы 1, 3*, 4*, 5 и 1*, 2, 3, 4; в градусах Кельвина зависимости θ_f (CdO) — прямые линии).

Средняя величина зерен также существенно зависит от содержания Fe_2O_3 и, как это видно из таблицы, последовательно возрастает с ростом количества CdO лишь у составов с приблизительно одинаковым содержанием Fe_2O_3 . Из таблицы следует также, что в каждой подгруппе с увеличением в составах количества CdO величина g -фактора при 20°C уменьшается.

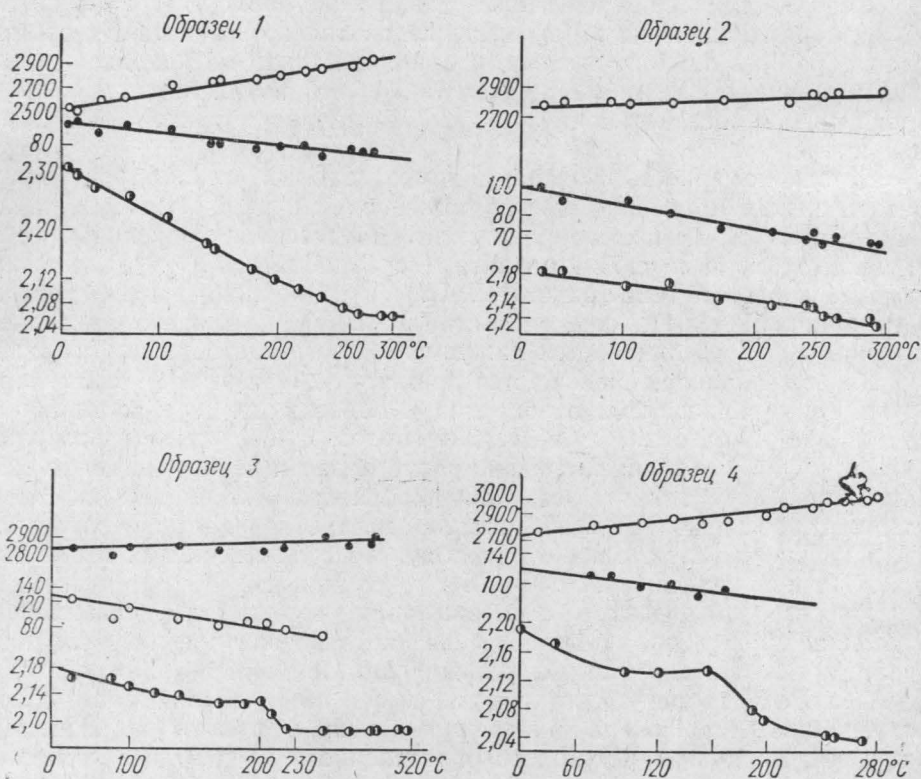
Эта закономерность связана, видимо, не только с характером взаимосвязи между подрешетками, но также с величиной зерна. Так, из этой же таблицы видно, что существует определенная корреляция между g -фактором, изменением g -фактора с температурой (Δg_{1°), изменением ΔH с ростом температуры [$\Delta(\Delta H)$] и величиной зерна ферритов, содержащих одно и то же количество Fe_2O_3 . С увеличением средней величины зерна увеличивается кажущаяся плотность образца (см. таблицу) и, как правило, уменьшается пористость. При этом g -фактор при 20°C и Δg_{1° уменьшаются от образца к образцу по мере роста в них CdO и величина зерна, а $\Delta(\Delta H)$, наоборот, существенно возрастает.

Как видно из таблицы, средние размеры зерен непосредственно связаны не только с количеством CdO в образцах, но и с количеством содержащегося в них Fe_2O_3 . С ростом числа ионов кадмия зерна значительно укрупняются, однако они столь же существенно уменьшаются по величине с увеличением количества ионов железа.

Известно, что g -фактор с уменьшением пористости уменьшается. Поскольку уменьшение пористости связано с ростом средней величины зерна, данные зависимости величины g -фактора при 20°C от состава, приведенные в таблице, согласуются с другими экспериментальными исследованиями по никель-цинковым и другим ферритам [2]. Известно также, что начиная с некоторого определенного процентного содержания пор в образце возникает четко выраженная зависимость: чем больше пористость, тем больше ширина линии поглощения ΔH . Такая зависимость объясняется тем, что с увеличением пористости ослабляется поглощение СВЧ-волны, что ведет к увеличению магнитных потерь и, следовательно, к уширению ΔH . Между тем из таблицы видно, что с ростом величины зерна (и, как предполагается, с уменьшением пористости) ширина линии, наоборот, растет. Это, по-видимому, говорит о том, что в никель-кадмиевых ферритах преобладающую роль в процессе уширения ΔH играют процессы релаксации. Процессы релаксации изучены слабо. Применительно к данному случаю можно лишь сказать, что эти процессы не связаны с электронными перебросами $\text{Fe}^{2+} \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+}$, так как исследованные полупроводники, по крайней мере до точки Кюри, имеют зонный механизм проводимости.

Из теории известно, что поликристалл можно рассматривать как однородную среду, в которой имеется неоднородное эффективное поле анизотропии. В это поле включают также размагничивающие поля, возникающие вследствие непостоянства намагниченности на границах кристалликов. Следовательно, уширение ΔH поликристалла связано с дополнительным механизмом потерь, вызванных неоднородным возмущающим полем.

Если же не ограничиваться только магнитной анизотропией (которая, кстати, особенно сильна в обращенных шпинелях за счет беспорядочного распределения двух- и трехвалентных катионов по октаэдрическим позициям) и учитывать величину пористости, как это сделал Сайден, то уточненная формула (имеются в виду расчеты Шлемана) дает для ширины линии поликристаллического феррита значение 80 э.



Таким образом, согласно феноменологической теории, на уширение ΔH в поликристаллах оказывает влияние магнитная неоднородность, кристаллографическая неоднородность (примесные атомы, дислокации), поры, поверхностные шероховатости образца.

Исследованные образцы (как показал спектральный анализ) содержат ничтожное количество примесей ($1 \cdot 10^{-4}$ — $1 \cdot 10^{-3}$ %). Кроме того, как показали рентгеноструктурный и металлографический анализы, все образцы однородны (дополнительных фаз нет) и представляют собой однофазные чистые шпинели (лишних линий на дебаеграммах не обнаружено). Постоянная решетки меняется по линейному закону. По данным таблицы четыре из исследованных образцов имеют при 20°C ΔH , равную 100 э, а другие — 120, 130 и 140 э. Такое завышение величины по сравнению с ее теоретическим значением опять-таки наталкивает на вывод о том, что на формирование ΔH в данных ферритах существенное влияние оказывают различные механизмы релаксаций.

Нами иллюстрируются температурные зависимости величин $H_{рез}$, ΔH - и g -фактора четырех образцов. С ростом температуры происходит

уменьшение ΔH (до значений 50—60 э по линейному закону). Это говорит о том, что с ростом температуры в составах значительно возрастает спин-спиновое взаимодействие неспаренных электронов.

Значительное уменьшение с ростом температуры g -фактора свидетельствует о резком уменьшении вклада орбитального магнитного момента в общий магнитный момент подрешеток. Однако у ряда образцов g -фактор испытывает значительную аномалию (спад) за несколько десятков градусов до температуры Кюри. Проведенные дилатометрические исследования показали, что никаких структурных изменений нет. Никакие другие исследованные физические свойства (термоэдс, электропроводность, теплопроводность, намагниченность) также не имеют аномалий в этих температурных интервалах или вблизи их.

Температурные зависимости самопроизвольной намагниченности имеют нормальный вид. Лишь аномалия теплоемкости C_p на образце 4 приблизительно соприкасается с областью указанной аномалии g -фактора. У других составов, имеющих аномалии g -фактора, к сожалению, не измерены зависимости $C_p(T)$.

Как известно, g -фактор характеризует взаимодействие между подрешетками, поэтому указанная аномалия может быть связана со сдвигом во взаимной ориентации подрешеток. Весьма интересно, что в первых трех образцах, содержащих CdO до 11,1 мол.%, g -фактор не имеет аномалий. Однако у последующих составов указанная аномалия g -фактора увеличивается по мере роста в них CdO (начиная с 13,7 мол.%), сдвигаясь в то же время в сторону более низких температур. Однако и эти закономерности проявляются лишь в составах, у которых содержание Fe_2O_3 приблизительно одинаково. Количество Fe_2O_3 , как уже отмечалось, существенно влияет на все резонансные свойства исследованных ферритов, даже если их точки Кюри оказываются одинаковыми.

Однако многие другие исследованные свойства данных никель-кадмиевых ферритов (термоэдс, электропроводность, теплопроводность, теплоемкость) не столь чувствительны к относительно небольшим вариациям процентного содержания Fe_2O_3 в составах. Так, указанные физические свойства всех образцов, приведенных в таблице, имеют вполне определенные зависимости от количества CdO несмотря на то, что содержание Fe_2O_3 в этих образцах меняется от 57,1 до 64,6 мол.% [1].

Ниже приводятся данные аномальных изменений g -фактора (Δg) и соответствующие интервалы температур Δt , причем (см. табл.) образцы 2, 3 и 4 имеют примерно одинаковое процентное содержание Fe_2O_3 , тогда как у образца 4* количество Fe_2O_3 заметно меньше. Точки Кюри образцов 4* и 4 одинаковы, а Δg , Δt и сами температурные области аномалий Δg различны, причем образец 4* выпадает из общей закономерности, которой подчиняются образцы 2, 3 и 4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чечерников В. И., Сперанский Н. М., Малышев Н. И. Сб. «Физические и физико-химические свойства ферритов». Минск, 1966, стр. 71—75.
2. Сирота Н. Н., Бекбулатов М. С. Сб. «Ферриты и бесконтактные элементы». Минск, 1963, стр. 197.

Поступила в редакцию
4.10 1970 г.

Кафедра
магнетизма