

Л. В. СОБОЛЕВ

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРОВ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ НИКЕЛЬ-ЦИНКОВЫХ ФЕРРИТОВ

Ферриты как магнитные материалы находят широкое применение в различных областях техники, поэтому большое количество физических исследований посвящено выяснению их магнитных свойств. Тем не менее ряд вопросов, как например вопрос о магнитных потерях, требует для своего разрешения сведений о поведении электропроводности ферритов в зависимости от частоты поля и температуры. Кроме того, так как электрические свойства тесно связаны со структурой вещества, особенно с состоянием электронов в веществе, данные о поведении электропроводности ферритов представляют ценный материал для выяснения этих важных вопросов. Учитывая, что вопрос об электрических свойствах ферритов изучен сравнительно мало, мы поставили целью исследовать эти свойства у смешанных никель-цинковых ферритов, находящих все более широкое применение в технике.

Электрические свойства смешанных никель-цинковых ферритов изучались на поликристаллических образцах состава  $\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}_{0,75} \cdot \text{Zn}_{0,25} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}_{0,5} \cdot \text{ZnO}_{0,5} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}_{0,25} \cdot \text{ZnO}_{0,75} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ . Образцы готовились по обычной технологии изготовления керамики и спекались при  $1200^\circ\text{C}$ . Они имели форму дисков диаметром около 30 мм и толщиной от 2 до 5 мм. Электроды наносились распылением серебра в вакууме.

На переменном токе в диапазоне от 20 до  $10^7$  гц мостовым методом измерялась температурная зависимость спектров диэлектрических потерь  $\rho(f)$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon(f)$  в интервале температур от  $-196$  до  $+200^\circ\text{C}$ . Некоторые результаты измерений представлены на рис. 1—5.

Для определения магнитных свойств образцов из той же шихты, что и керамические диски, готовились образцы в виде торондов и спекались в одной печи одновременно с дисками. На этих образцах снимались кривые намагничивания и спинки петель гистерезиса.

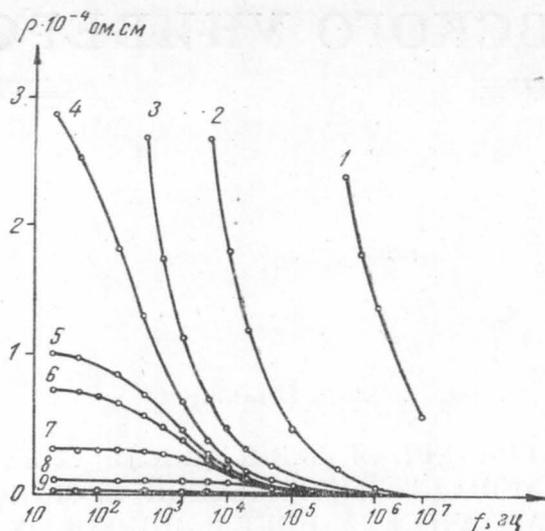


Рис. 1. Температурная зависимость спектров  $\rho(f)$  образца состава  $\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  в интервале температур от  $-196$  до  $200^\circ\text{C}$ : 1 —  $-196^\circ$ ; 2 —  $-78^\circ$ ; 3 —  $-30^\circ$ ; 4 —  $0^\circ$ ; 5 —  $20^\circ$ ; 6 —  $40^\circ$ ; 7 —  $60^\circ$ ; 8 —  $100^\circ$ ; 9 —  $200^\circ$

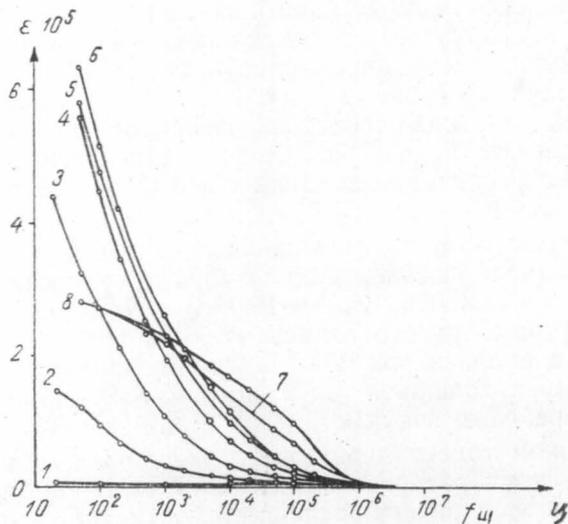


Рис. 2. Температурная зависимость спектров  $\epsilon(f)$  образца состава  $\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  в интервале температур от  $-196$  до  $100^\circ\text{C}$ : 1 —  $-196^\circ$ ; 2 —  $-78^\circ$ ; 3 —  $-30^\circ$ ; 4 —  $0^\circ$ ; 5 —  $20^\circ$ ; 6 —  $40^\circ$ ; 7 —  $60^\circ$

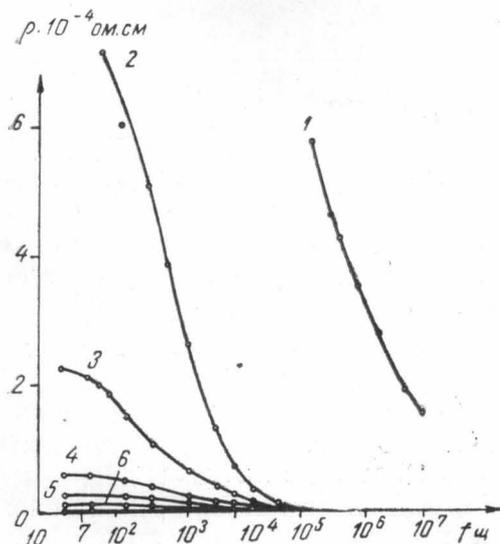


Рис. 3. Температурная зависимость спектров  $\rho(f)$  образца состава  $\text{NiO}_{0,5} \cdot \text{ZnO}_{0,5} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  в интервале температур от  $-196^\circ$  до  $60^\circ \text{C}$ :  
 1 —  $-196^\circ$ ; 2 —  $-78^\circ$ ; 3 —  $-30^\circ$ ; 4 —  $0^\circ$ ; 5 —  $20^\circ$ ;  
 6 —  $40^\circ$ ; 7 —  $60^\circ$

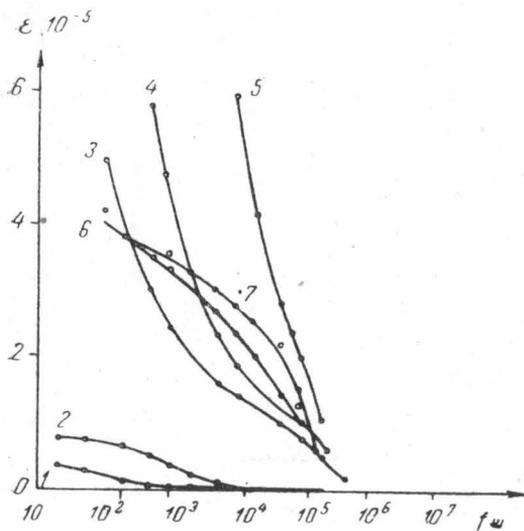


Рис. 4. Температурная зависимость спектров  $\varepsilon(f)$  образца состава  $\text{NiO}_{0,5} \cdot \text{ZnO}_{0,5} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  в интервале температур от  $-196$  до  $80^\circ \text{C}$ :  
 1 —  $-196^\circ$ ; 2 —  $-78^\circ$ ; 3 —  $-30^\circ$ ; 4 —  $0^\circ$ ; 5 —  $40^\circ$ ;  
 6 —  $60^\circ$ ; 7 —  $80^\circ$

резиса, по которым определялись коэрцитивная сила  $H_c$ , максимальная индукция  $B_m$ , начальная проницаемость  $\mu_0$  и максимальная проницаемость  $\mu_{\max}$  (см. таблицу).

Состав образца	$H_c$ , э	$B_m$ , гс	$\mu_0$	$\mu_{\max}$
$\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	6,5	1630	27	118
$\text{NiO}_{0,75} \cdot \text{Zn}_{0,25} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	2,5	3400	110	600
$\text{NiO}_{0,5} \cdot \text{Zn}_{0,5} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	0,65	3800	330	2100
$\text{NiO}_{0,25} \cdot \text{Zn}_{0,75} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	2,0	105	14	27
$\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$		парамагнитен	1,25	—

Результаты измерений, представленные на рис. 1—5, позволяют сделать следующие заключения о спектрах диэлектрических потерь  $\rho(f)$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon(f)$ .

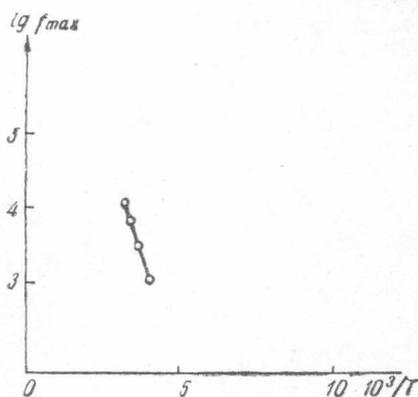
Спектры  $\rho$  и  $\epsilon$  обладают заметной релаксационной дисперсией в области звуковых и ультразвуковых частот. Предельных постоянных значений  $\rho$  и  $\epsilon$  в интервале от 20 до  $10^7$  гц не обнаружено.

С ростом температуры область дисперсии значительно сужается и смещается в сторону более высоких частот, дисперсионное изменение величин  $\rho$  и  $\epsilon$  значительно уменьшается. Максимум релаксационных потерь, характеризующийся величиной  $\text{tg } \delta$ , с ростом температуры также сдвигается в сторону более высоких частот. При  $-78$  и  $-196^\circ\text{C}$  этот максимум не обнаруживается.

Величины  $\epsilon$  и  $\rho$  обладают большими температурными коэффициентами, причем  $\epsilon$  — положительным, а  $\rho$  — отрицательным.

Общий характер спектров  $\epsilon(f)$  и  $\rho(f)$  одинаков для образцов различного состава, но в деталях спектры разнятся в зависимости от состава образцов.

Рис. 5. Температурная зависимость логарифма частоты максимума потерь. Энергия активации, определенная по наклону прямой  $E_{\text{ак}} = 0,48$  эв



Абсолютные значения электропроводности  $\sigma$  образцов определяются не столько составом, сколько технологией их приготовления

и в первую очередь характером температурной обработки: образцы одного и того же состава, но спеченные при различных закладках в печь и при разных температурах имели сопротивления, отличающиеся на несколько порядков. Значения  $\epsilon$  на низких частотах увеличиваются с возрастанием электропроводности образца. Наибольшее значение  $\epsilon$  на низких частотах достигало  $10^5$ — $10^6$ , наименьшее значение  $\epsilon$  на высоких частотах — от 10 до 40. Электрические свойства структурно значительно чувствительнее, чем магнитные. Последние хорошо воспроизводились при той же разнице в технологии обработки.

Если (по Брекенриджу [1, 2]) построить зависимость  $\lg f_m = \psi(1/T)$ , где  $f_m$  — частота максимума диэлектрических потерь, а  $T$  — абсолютная температура образца, то получается прямая линия, по наклону которой можно определить энергию активаций процесса, ответственного за появление диэлектрических потерь. На рис. 5 приводится такое построение для образца состава  $\text{NiO}_{0,5} \cdot \text{ZnO}_{0,5} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Спектры  $\varepsilon(f)$  и  $\rho(f)$  имеют вид, характерный для релаксационного процесса, причем  $\varepsilon$  достигает очень больших значений на низких частотах. То же самое наблюдается при межслойной поляризации в неоднородных полупроводниковых и диэлектрических средах при наличии границ между областями с сильно различающимися проводимостями [3—6].

Это дает основание предполагать, что наблюдавшаяся дисперсия на спектрах  $\varepsilon(f)$  и  $\rho(f)$  объясняется межслойной поляризацией, что свидетельствует о неоднородности образца по электрическим свойствам. Большая ширина области дисперсии объясняется распределением времен релаксации  $\tau$  межслойной поляризации. Области повышенного сопротивления, имеющие вид тонких прослоек между относительно хорошо проводящими зернами основного материала феррита, возможно, являются областями агрегированных дефектов решетки подобно тому, как это имеет место в галогенидах щелочных металлов [2].

При учете электрических свойств ферритов, например при расчете магнитных потерь, нельзя отпираться от проводимости, измеренной на постоянном токе, так как при наличии неоднородностей в поликристаллическом материале проводимость, измеренная на постоянном токе, не характеризует проводимости основной массы материала образца; в области радиочастот за счет ослабления межслойной поляризации она может значительно возрасти, а значение  $\varepsilon$  сильно падать.

Значения проводимости  $\sigma$  и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ , характеризующие само вещество феррита, могут быть определены при очень высоких частотах (больше  $10^7$  гц).

Измерение спектров  $\rho(f)$  и  $\varepsilon(f)$  является весьма чувствительным методом контроля технологического процесса изготовления поликристаллических образцов ферритов.

В заключение считаю своим приятным долгом выразить благодарность проф. Е. И. Кондорскому за предложение темы и обсуждение результатов работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Breckenridge R. J. Chem. Phys., **16**, 959, 1948.
2. Imperfections in nearly perfect crystals, ed. by Shockly W. et al., New York, 1952.
3. Billig E., Plessner K. Proc. Phys. Soc., **64**, 361, 1951.
4. Субашиев В. К. и Тучкевич В. М. ЖТФ, **17**, 2, 177, 1947.
5. Лашкарев В. Е. ЖТФ, **15**, 598, 1945.
6. Koops C. Phys. Rev., **83**, 121, 1951.

Поступила в редакцию  
9.10 1958 г.

Кафедра магнетизма