

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОСТОЯННАЯ И МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ ФЕРРИТОВ НА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

В последние годы большое практическое значение приобрели полупроводниковые и диэлектрические магнитные материалы, особенно ферриты: полупроводники с химическим составом $m\text{MeO} \cdot n\text{Fe}_2\text{O}_3$, где m и n — некоторые целые числа, а символ Me обозначает двухвалентный металл (Ni , Co , Mn и т. д.).

Проблеме магнитных и электрических свойств ферритов был посвящен ряд докладов на 2-м Всесоюзном созывании по магнетизму в декабре 1951 г.¹ И в заключение своего доклада¹ на совещании Я. Г. Дорфман подчеркнул, что «проблема ферромагнитных и антиферромагнитных полупроводников и диэлектриков представляет собой узловую проблему современной физики твердого тела, а отнюдь не узко магнитную проблему». Представляется поэтому целесообразным привести некоторые новые экспериментальные данные об электрических и магнитных свойствах ферритов в наиболее интересном диапазоне — на сантиметровых волнах.

В работе² определялась диэлектрическая постоянная ϵ и магнитная проницаемость μ магниевого, медного, кобальтового, никелевого и марганцевых ферритов на волне 6,6 см. Образец в форме тонкого диска толщиной в 1,5 мм и диаметром 20 мм вводился в прямоугольный объемный резонатор (волна TE_{104}) поочередно либо в пучность электрического поля E , либо в пучность магнитного поля H . Непосредственно измерялись вызванные этим уменьшение добротности резонатора Q и смещение резонансной частоты $\Delta\omega_0$.

Эффективную диэлектрическую постоянную и магнитную проницаемость можно записать в виде суммы их действительной и мнимой части: $\epsilon = \epsilon_1 - j\epsilon_2$, $\mu = \mu_1 - j\mu_2$, причём ϵ_2 и μ_2 характеризуют собой потери. Тангенс угла потерь равен: $\text{tg } \delta_\epsilon = \epsilon_2/\epsilon_1$ и соответственно $\text{tg } \delta_\mu = \mu_2/\mu_1$.

Как показано в³, смещение резонансной частоты и добротность контура при внесении в него исследуемого образца связаны с ϵ_1 , ϵ_2 , μ_1 и μ_2

следующими соотношениями:

$$-2 \frac{\Delta \omega_a}{\omega} = (\epsilon_1 - 1) \int_{\Delta V} E_a^2 dv; \quad \frac{1}{Q_\epsilon} = \frac{\sigma}{\omega} \int_{\Delta V} E_a^2 dv + \epsilon_2 \int_{\Delta V} E_a^2 dv, \quad (1)$$

$$-2 \frac{\Delta \omega_a}{\omega} = (\mu_1 - 1) \int_{\Delta V} H_a^2 dv; \quad \frac{1}{Q_\mu} = \mu_2 \int_{\Delta V} H_a^2 dv, \quad (2)$$

где E_a и H_a — напряжённость поля в резонаторе в отсутствии образца.

Формула (1) относится к образцу, помещённому в пучность электрического поля, формула (2) — к образцу, помещённому в пучности магнитного поля. Соотношения (1) и (2) позволяют по измеренным значениям Q и $\Delta \omega_a$ определить искомые величины — ϵ_1 , ϵ_2 , μ_1 , μ_2 .

Результаты эксперимента показаны в таблице I.

Таблица I

Диэлектрическая постоянная и магнитная проницаемость
ферритов на волне 6,6 см

Вещество	ϵ_1	ϵ_2	$\text{tg} \delta_\epsilon = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$	μ_1	μ_2	$\text{tg} \delta_\mu = \frac{\mu_2}{\mu_1}$
MgO·Fe ₂ O ₃ **	9,66	0,174	0,018	1,20	0,974	0,812
MgO·Fe ₂ O ₃ *	8,53	0,132	0,016	2,84	0,341	0,120
CuO·Fe ₂ O ₃ **	9,29	0,520	0,056	1,94	1,240	0,639
CuO·Fe ₂ O ₃ *	8,65	0,089	0,010	1,38	0,740	0,543
CoO·Fe ₂ O ₃ **	9,49	0,045	0,047	1,57	0,211	0,138
CoO·Fe ₂ O ₃ *	9,00	—	—	1,90	0,116	0,061
NiO·Fe ₂ O ₃ **	13,40	3,520	0,260	1,74	0,460	0,264
NiO·Fe ₂ O ₃ *	8,88	0,155	0,017	1,47	2,377	1,620
MnO·Fe ₂ O ₃ **	9,30	0,475	0,051	2,31	2,040	0,883

Знаком * отмечены ферриты, подвергнутые «отжигу», т. е. медленному охлаждению; знаком ** — подвергнутые «закалке» — быстрому охлаждению от температуры в 1200°С, очевидно, в какой-либо жидкости (один из них — медный феррит — был охлаждён не при 1200°С, а при 1000°С).

Заметим, что этот метод — один из самых распространенных методов определения электрических и магнитных свойств вещества в сантиметровом диапазоне. Из таблицы 1 можно заключить, что диэлектрическая постоянная ферритов в диапазоне сантиметровых волн порядка 10, а магнитная проницаемость — около 1,5. Тангенс угла потерь меняется в зависимости от химического состава феррита в довольно широких пределах. Наименьшими потерями характеризуется $\text{CoO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$; соответствующее уменьшение Q было настолько незначительно, что его не удалось даже измерить. Для контроля измерения были повторены с другими образцами прежнего диаметра, 20 мм, но уже иной толщины — 1 мм. Результаты этих измерений совпали с данными таблицы 1.

Данные работы² согласуются с общим характером зависимости диэлектрической постоянной ферритов от частоты, исследованной в работе⁴, правда, для более низких частот. В⁴ с помощью мостика переменного тока измерялась ёмкость ферритовых дисков и затем вычислялась диэлектрическая постоянная. Несколько типичных результатов приведено в таблице II.

Таблица II
Зависимость диэлектрической постоянной от частоты

Вещество	1 кГц	2 кГц	4 кГц	8 кГц	20 кГц	400 кГц	1 МГц	10 МГц
1. 50% $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, 50% $\text{CuO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. . .	$\epsilon = 220$	100		40		20	16	
2. 90% $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, 10% $\text{CuO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. . .	$\epsilon = 25$		20				16	
3. $\text{CuO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$: $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (большие кристаллы, грубодисперсная система)	$\epsilon = 10^5$				$1,8 \cdot 10^4$			45

Проводимость образца 1 равна $7 \cdot 1,8 \cdot 10^{-6}$; образца 2 равна $7 \cdot 10^{-11}$,
образца 3 равна 10^{-3} $\left(\text{в } \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}} \right)$

При низких частотах измеренное значение диэлектрической постоянной весьма велико, что связано, возможно, с неоднородностью структуры ферритов (см. также⁵). С повышением частоты диэлектрическая постоянная монотонно убывает, вначале очень быстро, а затем, начиная с частот порядка 10^4 гц, уже гораздо медленнее, асимптотически приближаясь к значению порядка 10 при частотах $10^7 - 10^8$ гц.

В⁴ содержится также ссылка на работу Герспинга, который получил на частотах $\sim 4 \cdot 10^9$ гц значение диэлектрической постоянной ряда ферритов также порядка 10. (Измерения проводились третьим употребительным методом — с помощью коаксиальной линии.)

Следует отметить, что ϵ и μ ферритов как поликристаллических материалов зависят не только от их химического состава, но также и от дисперсности системы, размеров и расположения отдельных кристалликов.

М. П.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Известия АН СССР, сер. физ. 14, № 4 (1952); УФН 46, 396 (1952).
 2. Т. Окамура, Т. Фуџимура, Мунейуки Дате, Phys. Rev. 85, 1041 (1952).
 3. J. C. Slater, Rev. Mod. Phys. 18, 441 (1946).
 4. Möltgen, Zeits. angew. Physik 4, № 6 (1952).
 5. F. W. Brockman, P. Dowling, W. Steneck, Phys. Rev. 77, 85 (1950).
-