

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 посвящён ряд докладов на 2-м Всесоюзном созвещании 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 твёрдого 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 магниевых, медных, кобальтовых, никелевых 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 объёмный резонатор (волна TE_{104}) поочерёдно 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:

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

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

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 * ₁	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 I 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 I.

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.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

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