

«ИСКУССТВЕННЫЕ» ДИЭЛЕКТРИКИ

В работе¹ сообщаются интересные результаты, полученные при изучении в области сантиметровых волн электрических свойств компаундов, состоящих из парафинового воска и погружённых в него металлических частичек малого размера.

Авторы¹ называют такие материалы «искусственными» диэлектриками, подчёркивая этим, что электрические свойства такого компаунда резко отличаются от свойств основного (связующего) диэлектрика — парафина. По сути дела, эти «искусственные» диэлектрики являются «макроскопической репродукцией» обычных диэлектриков. (Известно, что одна из фундаментальных формул физики диэлектриков — формула Клаузиуса-Мосотти — первоначально и была получена путём рассмотрения модели диэлектрика, представляющей собой совокупность проводящих шариков, разделённых друг от друга изолирующей средой.)

Для измерения указанных материалов при частоте 9364 Мгц ($\lambda = 3,2$ см) был использован волноводный метод², заключающийся в основных чертах в следующем. Образец для измерений изготовлялся в виде пластинки и помещался в прямоугольный волновод, где определялось его входное сопротивление (путём измерения коэффициента стоячей волны k и сдвига положения минимума стоячей волны x_0) при двух положениях образца:

1) короткозамкнутом — $z_{к.з}$ и 2) «разомкнутом», когда образец находится на расстоянии $\frac{\lambda}{4}$ от короткозамкнутого конца линии — $z_{раз}$. Далее, найдя $z_{к.з}$ и $z_{раз}$, определяли постоянную распространения γ и характеристическое сопротивление образца — z_0 , а по этим двум величинам вычисляли диэлектрическую постоянную, а также магнитную проницаемость (их действительные — ϵ' , μ' — и мнимые — ϵ'' , μ'' — части).

Были проведены измерения образцов парафина с порошками металлов: цинка, меди, алюминия, карбонильного железа, магнезита (Fe_3O_4), а также углерода; кроме того, были изготовлены и измерены образцы

парафина с порошком из диэлектрика рутила, обладающего весьма высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon \cong 100$).

Некоторые из результатов, сообщаемых авторами ¹, приведены в таблице.

Вещество, наполняющее парафин	Плотность $\rho/\text{см}^3$	Концентрация наполнителя (%)	Средние размеры частиц в дюймах	Электрические константы компаунда			
				ϵ	$\text{tg } \delta_\epsilon$	μ	$\text{tg } \delta_\mu$
Алюминий	2,7	18	0,0008	28	$< 0,01$	0,86	0,09
Карбонильное железо	7,8	19	0,0001	6,0	$< 0,01$	1,10	0,34
Медь	8,9	19	0,0006	8,4	$< 0,01$	0,83	0,09
Магнетит	5,2	18	—	6,2	$< 0,01$	1,02	0,25
Рутил	4,3	12	—	4,7	$< 0,01$	1,00	0,01
Цинк	7,0	20	0,0002	5,7	$< 0,01$	0,89	0,07
Цинк	7,0	29	0,0002	13,3	0,04	0,72	0,10

Образцы парафинового воска (без всяких включений) имели при $\lambda = 3,2$ см следующие электрические параметры:

$$\epsilon = 2,25, \text{tg } \delta < 0,0002.$$

Исследование зависимости диэлектрической проницаемости этих материалов от концентрации металлического порошка (θ) показало, что

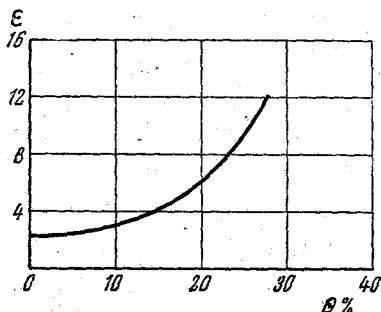


Рис. 1.

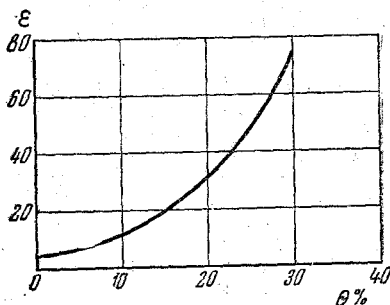


Рис. 2.

с ростом концентрации ϵ сильно увеличивается (рис. 1, 2). (Рис. 1 относится к включениям Zn, рис. 2 — Al.)

Наибольшей диэлектрической проницаемостью (при равных концентрациях) обладают компаунды с порошком алюминия; ϵ образцов с порошком цинка больше, чем у образцов с медным порошком, но меньше, чем с алюминием. Это, вероятно, объясняется тем, что, как показали микроскопические исследования авторов, частички алюминия имели форму слоистых чешуек, порошок меди состоял из комочков неправильной формы, а частички цинка имели форму, близкую к сферической.

Поляризуемость первых (при равных поперечных размерах) больше, чем вторых, а вторых — больше, чем третьих.

Экспериментальные результаты были сравнены с теоретическими формулами Левина³ для ϵ и μ гетерогенной системы, состоящей из основного вещества (ϵ_1, μ_1), в котором расположены симметрично в вершинах кубов сферические включения с электрическими характеристиками ϵ_2, μ_2 (θ — объёмная концентрация включений):

$$\epsilon = \epsilon_1 \left[1 + \frac{3\theta}{\frac{\epsilon_{эфф} + 2\epsilon_1}{\epsilon_{эфф} - \epsilon_1} - \theta} \right], \quad (1)$$

$$\mu = \mu_1 \left[1 + \frac{3\theta}{\frac{\mu_{эфф} + 2\mu_1}{\mu_{эфф} - \mu_1} - \theta} \right]. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) $\epsilon_{эфф}$ и $\mu_{эфф}$ — соответственно эффективная диэлектрическая постоянная и эффективная магнитная проницаемость сферических включений. При сверхвысокочастотных полях $\epsilon_{эфф}$ и $\mu_{эфф}$ отличаются от ϵ_2 и μ_2 :

$$\frac{\epsilon_{эфф}}{\epsilon_2} = \frac{\mu_{эфф}}{\mu_2} = \frac{2 \sin \xi - \xi \cos \xi}{(\xi^2 - 1) \cdot \sin \xi + \xi \cos \xi}, \quad (3)$$

где $\xi = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{\epsilon_2 \mu_2}$, a — радиус частицы, λ — длина волны в свободном пространстве.

Интересно отметить, что формула (1) в точности совпадает, — только несколько по-другому записана, — с известной формулой Оделевского⁴, полученной совершенно иным путём для диэлектрической проницаемости гетерогенной системы:

$$\epsilon = \epsilon_1 \left(1 + \frac{\theta}{\frac{1-\theta}{3} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}} \right) \quad (4)$$

при $\epsilon_{эфф} = \epsilon_2$, т. е. при $\xi \rightarrow 0$, или очень больших λ .

Теоретический и экспериментальный анализ, проведённый в работе¹, показывает, что потери в таких «искусственных» диэлектриках, образованных хорошо проводящими частицами, носят главным образом магнитный характер, а диэлектрические потери очень малы.

Реферируемая работа показывает, что можно получить «искусственные» диэлектрики, обладающие в области сантиметровых волн весьма высокими значениями диэлектрической проницаемости ($\epsilon \approx 60$, рис. 2) и малыми диэлектрическими потерями, если порошкообразные металлические частицы достаточно малы и обладают высокой электрической поляризуемостью.

В. Сарафанов

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Kelly, Stenoien, Isbell, J. Appl. Phys. **24**, № 3, 258 (1953).
2. Birks, Proc. Phys. Soc. **60**, № 339, 282 (1948).
3. Lewin, J. I. E. E. **94**, ч. III, № 27, p. 65 (1947).
4. Оделевский, ЖТФ, т. XXI, в. 6, 667 (1951).