

«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 нахо-

дится 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 г/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 |
| Магnezит | 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

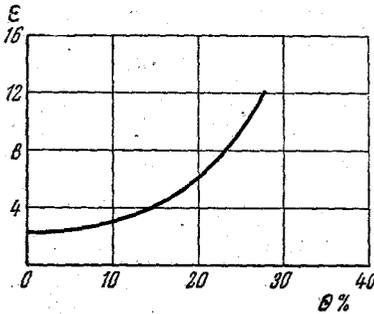


Рис. 1.

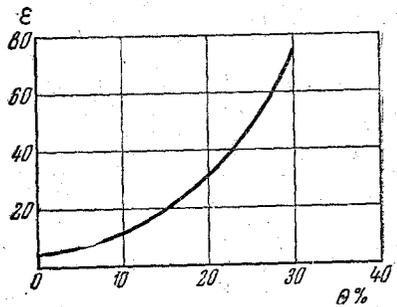


Рис. 2.

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 — объемная концентрация включений):

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

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

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

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

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

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

Реферлируемая 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. 94, ч. III, № 27, p. 65 (1947).
4. Оделевский, ЖТФ, т. XXI, в. 6, 667 (1951).