

### «ИСКУССТВЕННЫЕ» ДИЭЛЕКТРИКИ

В работе<sup>1</sup> 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.

Авторы<sup>1</sup> 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 метод<sup>2</sup>, 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  $\gamma$  и характеристическое сопротивление образца —  $z_0$ , а по этим двум величинам вычисляли диэлектрическую постоянную, а также магнитную проницаемость (их действительные —  $\epsilon'$ ,  $\mu'$  — и мнимые —  $\epsilon''$ ,  $\mu''$  — 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<br>г/см <sup>3</sup> | Концентрация<br>наполнителя<br>(%) | Средние размеры<br>частиц<br>в дюймах | Электрические константы<br>компаунда |                              |       |                         |
|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|-------|-------------------------|
|                               |                                |                                    |                                       | $\epsilon$                           | $\text{tg } \delta_\epsilon$ | $\mu$ | $\text{tg } \delta_\mu$ |
| 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 ( $\theta$ ) показало, что

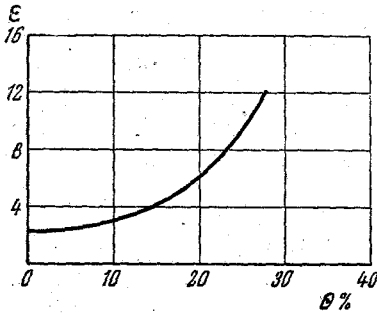


Рис. 1.

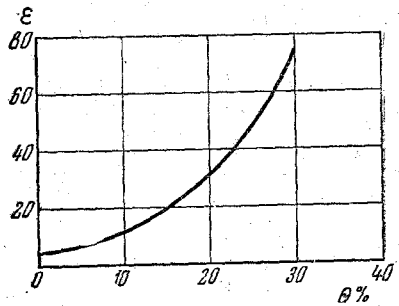


Рис. 2.

с ростом концентрации  $\epsilon$  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;  $\epsilon$  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 Левина<sup>3</sup> для  $\epsilon$  и  $\mu$  гетерогенной системы, состоящей из основного вещества ( $\epsilon_1, \mu_1$ ), в котором расположены симметрично в вершинах кубов сферические включения с электрическими характеристиками  $\epsilon_2, \mu_2$  ( $\theta$  — 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  $\epsilon_2$  и  $\mu_2$ :

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

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

Интересно отметить, что формула (1) в точности совпадает, — только несколько по-другому записана, — с известной формулой Оделевского<sup>4</sup>, 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  $\lambda$ .

Теоретический и экспериментальный анализ, проведенный в работе<sup>1</sup>, 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).