

УДК 621.372.41

В.И. Лапчинский, А.В. Мачулянский, канд. техн. наук, Д.Д. Татарчук, канд. техн. наук,  
Т.Л. Волхова, канд. техн. наук

## Металлодиэлектрические нанокompозитные структуры

**Исследовано влияние состава нанокompозитных структур Al-полимер на их диэлектрические свойства в СВЧ диапазоне.**

Приведены экспериментальные зависимости коэффициентов пропускания и отражения электромагнитной волны, действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости исследуемых образцов от объемной доли дисперсной фазы.

The influence of nanocomposite structures Al-polymer at its dielectric properties in microwave range is investigated. The graphs of experimental dependences of transmission and reflection coefficients of electromagnetic waves, the real and the imaginary part of dielectric permittivity of the samples, as well as of the volume fraction of the dispersed phase are represented.

**Ключевые слова:** нанокompозит, коэффициент отражения, коэффициент прохождения, диэлектрическая проницаемость.

### Введение

Широкое применение телекоммуникационных систем приводит к необходимости повышения быстродействия, удешевления и миниатюризации устройств связи.

Для решения этих задач необходимо применение новых материалов. Одним из перспективных направлений в создании таких материалов является использование нанокompозитных структур. На их основе создаются материалы для микроэлектронной технологии, а именно пасты для внутрисхемных соединений, припайные, резистивные пасты защитные покрытия и другие технологические материалы [1], [2].

Хотя такие композиционные материалы уже долгое время используются, и исследования в этой области ведутся очень интенсивно, пока еще не полностью изучено влияние их состава на диэлектрические свойства этих материалов. Так, например, несмотря на многочисленные попытки, не существует точного решения даже для простейшей модели – гетерогенной системы. Теоретические исследования гетерогенных систем, представляющих собой совокупность неоднородностей с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_d$  и общей объемной долей  $q$ , вкрапленных в среду (матрицу) с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_m$  [3] не дают однозначного результата,

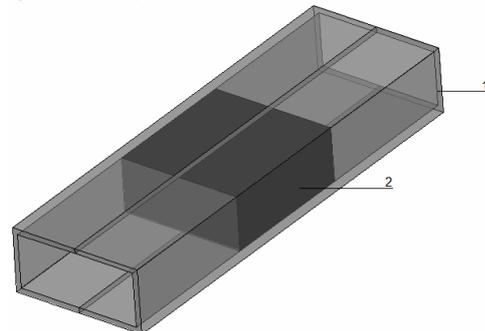
что указывает на необходимость дополнительных исследований. Поэтому определение влияния состава композиционных материалов на их свойства является актуальной задачей, решение которой позволит создавать материалы с заданными электрофизическими свойствами.

Цель данной работы – исследование влияния состава нанокompозитных структур на их диэлектрические свойства.

### Методы исследований

Для экспериментальных исследований использовался метод энергетических коэффициентов [4].

В качестве измерительной установки использовался панорамный измеритель Р2-61. На рис.1 показан измерительный узел, представляющий собой отрезок разъемного волноводного тракта, в полости которого размещается исследуемый образец. [4].



**Рис. 1. Измерительный узел: 1 – отрезок разъемного волноводного тракта; 2 – исследуемый образец**

Исследуемые нанокompозитные системы были получены на основе полимерных материалов с комплексными диэлектрическими проницаемостями

$$\epsilon_{m1}^* \approx 2,73 - j0,19 \quad \text{и}$$

$$\epsilon_{m2}^* \approx 2,05 - j0,07.$$

В качестве наполнителя были использованы нанодисперсные порошки алюминия, с размером частиц от 60 до 200 нанометров.

Образцы изготавливались путем электрохимического перемешивания дисперсной фазы с материалом матрицы.

Известно, что в случае нормального падения излучения коэффициент отражения определяется соотношением [5]:

$$R = \left( \frac{N^* - N_e^*}{N^* + N_e^*} \right)^2 \quad (1)$$

где  $N^*$  - комплексный показатель преломления материала,  $N_e^*$  - комплексный показатель преломления прилегающей к нему области. Коэффициент пропускания, с учетом закона Бугера и отражения на границах образца, описывается следующим выражением:

$$T = (1 - R)^2 e^{-\alpha d} \quad (2)$$

где  $d$  - толщина материала,  $\alpha$  - коэффициент экстинкции материала,

$$(1 - R)^2 = \left( 4 \frac{N^* N_e^*}{(N^* + N_e^*)^2} \right)^2 - \text{коэффициент, учи-}$$

тывающий отражение на границах образца.

Комплексный показатель преломления материала определяется формулой:

$$N^* = \sqrt{\epsilon^* \mu^*} \quad (3)$$

где  $\epsilon^*$  - комплексная диэлектрическая проницаемость материала. Для немагнитных материалов можно считать, что  $\mu = 1$ .

По измеренным значениям коэффициентов отражения и прохождения из выражений (1)-(3) рассчитаны значения комплексной диэлектрической проницаемости.

### Результаты эксперимента

Зависимости коэффициентов пропускания и отражения электромагнитной волны нанокomпозитных материалов от объемной доли дисперсной фазы в частотном диапазоне 8-12 ГГц представлены на рис. 2.

Из зависимостей, приведенных на рис. 2 следует, что при увеличении объемной доли дисперсной фазы коэффициент отражения увеличивается, а коэффициент пропускания уменьшается. При объемной доле дисперсной фазы более 0,4 коэффициент прохождения составляет менее 0,006.

Зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости исследуемых композиционных материалов представлены на рис. 3. Действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости возрастают с увеличением объемной доли дисперсной фазы. При объемной доле более 0,4 действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости возрастает почти на порядок для полимера 2 и в шесть раз для полимера 1. Таким образом, изменяя объемную долю дисперсной фазы можно изменять диэлектрическую проницаемость нанокomпозитных систем в широких пределах.

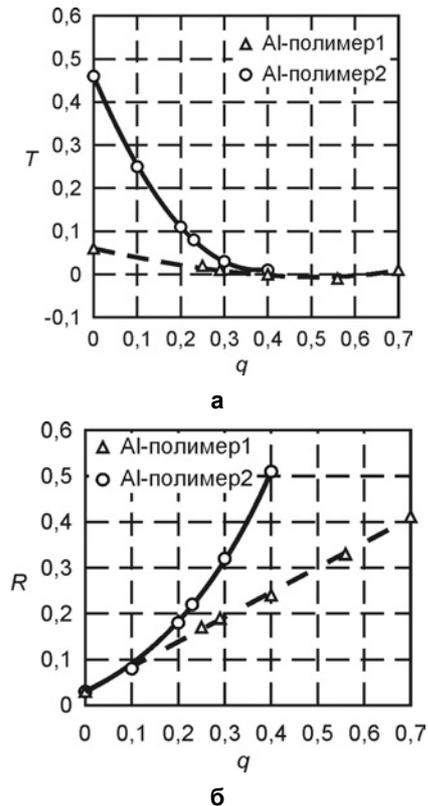


Рис. 2. Зависимости коэффициента пропускания (а) и коэффициентов отражения (б) нанокomпозитных структур от объемной доли дисперсной фазы

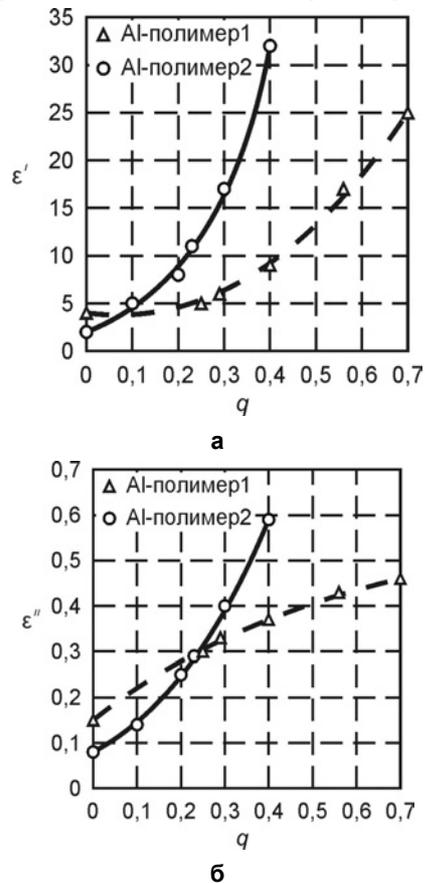


Рис.3. Зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей диэлектрической проницаемости образцов от объемной доли дисперсной фазы

## Выводы

Получены зависимости энергетических коэффициентов отражения и пропускания от изменения объемной доли дисперсной фазы в пределах от 0,1 до 0,7 для нанодисперсных композитных структур алюминий-полимер, в диапазоне частот 8-12 ГГц. Рассчитаны зависимости действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости образцов от объемной доли дисперсной фазы.

Установлено, что при объемной доле дисперсной фазы  $q \geq 0,4$  нанодисперсные композитные структуры алюминий-полимер, в сантиметровом диапазоне длин волн имеют коэффициент пропускания не более 0,006.

Определены зависимости действительной и мнимой компонент диэлектрической проницаемости от состава нанодисперсных композитных структур.

Установлено, что изменяя объемную долю дисперсной фазы нанодисперсных композитных структур полимер-алюминий в пределах от 0,1 до 0,4 можно изменять действительную часть диэлектрической проницаемости почти на порядок.

*Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»*

## Литература

1. *James E. Morris*, "Nanopackaging: Nanotechnologies and Electronics Packaging", Springer, ISBN 978-0-387-47325-3, 2008, 543 pp.
2. Интегральные микросхем и основы их проектирования: Учебник для техникумов. – 2-е изд., перераб. и доп. / И.М. Николаев, Н.А. Филинук. – М.: Радио и связь, 1992. – 424 с.: ил. – ISBN 5-256-00860-9
3. А.В. Мачулянский Моделирование ультрадисперсных металлодиэлектрических систем // «Электроника и связь», 2000, №9, с.123-125.
4. *W.E. Courtney* Analysis and Evaluation of a Method of Measuring the Complex Permittivity and Permeability of Microwave Insulator // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , vol. 18, 1970 , pp. 476-485.
5. *Матвеев А.Н.* Оптика: Учеб. Пособие для физ. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1985. – 351 с.