

06

## Структурная поляризация в системе проводник–диэлектрик

© В.А. Соцков,<sup>1</sup> О.Г. Ашхотов,<sup>1,2</sup> И.Б. Ашхотова,<sup>1</sup> Т.Т. Магкоев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 360004 Нальчик, Россия

<sup>2</sup> Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, 362025 Владикавказ, Россия  
e-mail: oandi@rambler.ru

Поступило в Редакцию 26 января 2021 г.

В окончательной редакции 14 марта 2021 г.

Принято к публикации 29 марта 2021 г.

Исследованы электрофизические свойства композита диэлектрик–проводник. Показано, что введение проводящей фазы в диэлектрик позволяет существенно модифицировать свойства композита. Полученные гигантские значения действительной части диэлектрической проницаемости исследованного композита объясняются структурной поляризацией гетерогенного диэлектрика.

**Ключевые слова:** диэлектрик, парафин, проводник, графит, частота, проницаемость, композит.

DOI: 10.21883/JTF.2021.08.51098.13-21

### Введение

Функциональные материалы [1] получили широкое распространение в электро- и радиокомпонентах, поэтому исследования электрофизических свойств систем диэлектрик–проводник, диэлектрик–полупроводник имеют большое значение для создания новых материалов. Введение проводящих и полупроводящих компонентов в диэлектрик позволяет изменять его электрофизические свойства, в том числе проводимость и диэлектрическую проницаемость. В некоторых экспериментальных работах [2–6] в системах диэлектрик–проводник были получены аномально большие значения действительной части диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$ , которые имели величины  $10^5$ – $10^8$ . Характерно, что во всех вышеуказанных случаях исследуемые образцы не были сегнетоэлектриками и имели в своем составе хорошо проводящие примеси.

Целью настоящей работы является исследование электрофизических параметров системы диэлектрик–проводник, возможность их модификации и представление гипотетической модели, которая приводит к столь необычным результатам.

### 1. Методика эксперимента

Для создания проводящих структурных неоднородностей требовались частицы с минимально возможным изолирующим слоем на поверхности зерен, поэтому при приготовлении композитных образцов использовался термографит — препарат коллоидно-графитовый сухой С-1 ТУ 113-08-48-63-90 с основным размером частиц до  $4 \cdot 10^{-6}$  м (см. таблицу). В качестве матрицы использовался диэлектрик — парафин нефтяной твердый П2 ГОСТ 23683-89 [2]. Гранулометрический состав определялся методом произвольных выборов.

Гранулометрический состав графита

Гранулометрический состав	Размеры частиц, $\mu\text{m}$	Процентное содержание, %
Основные размеры частиц	3–5	70
Максимальные размеры частиц	5–12	10
Минимальные размеры частиц	2–3	20

Изготовление расплава и образцов происходило по стандартным методикам [2]. Емкость и добротность образцов в виде плоских и цилиндрических конденсаторов определялись на измерителе емкости Е7-11 на частоте 1 kHz. Активное сопротивление определялось с помощью тераомметра Е6-13. Частотные измерения производились на тех же образцах на измерителе Е7-20. Исследуемые образцы имели отклонения по электрофизическим параметрам 3–5%.

### 2. Результаты и выводы

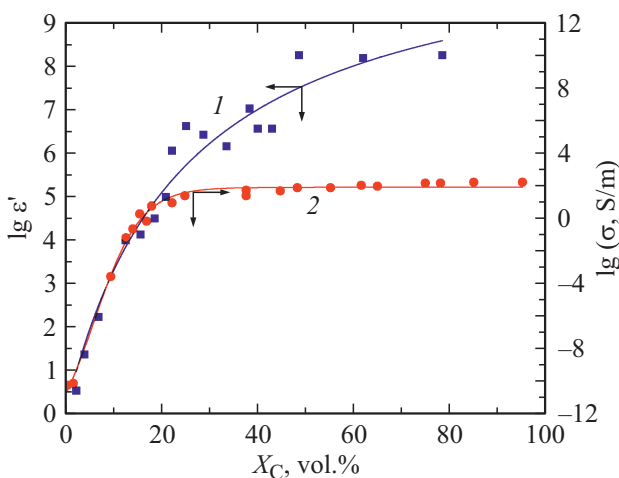
Обычно при анализе диэлектрической проницаемости композитов рассматривается диэлектрическая проницаемость компонентов и их концентрация в системе. Диэлектрическая проницаемость парафина  $\epsilon' = 2.1$  [7]. Аллотропные модификации углерода весьма разнятся по величинам действительной части диэлектрической проницаемости: так, для ковалентных кристаллов  $\epsilon' = 5.4$  [8], для углеродных нанотрубок  $\epsilon' = 34.3$  [9]. Некоторые авторы при моделировании электрофизических параметров графитонаполненных композитов при-

нимают величину  $\varepsilon' = 15$  [10]. На рис. 1 (кривая 1) приведена зависимость  $\lg \varepsilon'$  от объемного содержания графита в композите.

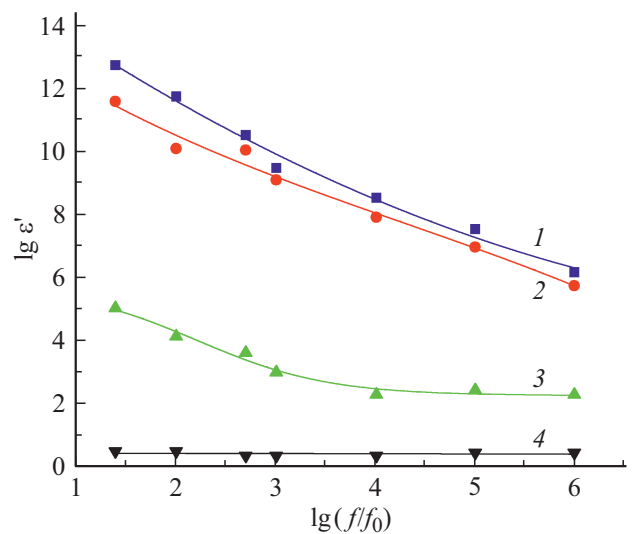
Полученные результаты сложно объяснить с точки зрения величин  $\varepsilon'$  исходных материалов. С увеличением концентрации проводника (рис. 1) величина  $\lg \varepsilon'$  также возрастает и достигает величины  $\lg \varepsilon' = 8$ . Рост  $\lg \varepsilon'$  наблюдается до  $X_C = 50\%$  и  $\varepsilon'$  достигает огромной величины  $10^8$ . Кривая 2 на рис. 1 демонстрирует зависимость удельной проводимости композита  $\lg \sigma$  от объемного содержания графита в композите. Видно, что начальный участок, характеризующий проводимость парафина, фактически отсутствует, что свидетельствует о способности графита к построению проводящих фрактальных цепей [2]. Следует обратить внимание на симбатное изменение проводимости и действительной части диэлектрической проницаемости с участками насыщения в верхней части графика.

Как видно из рис. 2, с ростом концентрации углерода для одной и той же частоты величина  $\varepsilon'$  также увеличивается, как и на рис. 1. Из рис. 2 видно, что функция  $\lg \varepsilon' = g(\lg(f/f_0))$  имеет вид нисходящей кривой (кривые 1–3). Для кривой 4 на рис. 2 не наблюдается зависимость от частоты, так как она построена для чистого парафина.

Таким образом, в системе графит–парафин, как и в [2–6] в композитах с проводящими компонентами, нами получены гигантские значения  $\varepsilon'$ . При увеличении проводимости системы (рис. 1) возрастает и  $\varepsilon'$ . Частицы графита образуют сложные пространственные неоднородности, в том числе и проводящие цепи, которые могут выступать в роли макромолекул. При приложении напряжения к обкладкам конденсатора электроны могут мигрировать по неоднородностям и создавать значительные некомпенсированные заряды на их краях. При миграции зарядов по проводящим неоднородностям следует учитывать роль контактного сопротивления, в



**Рис. 1.** Зависимости  $\lg \varepsilon'$  (кривая 1) и удельной проводимости  $\lg \sigma$  (кривая 2) от объемного содержания графита ( $X_C$ , vol.%) в композите.



**Рис. 2.** Зависимость  $\lg \varepsilon'$  от логарифма отношения  $f/f_0$  ( $f_0 = 1$  Hz) для различного объемного содержания графита в композите: 1 — 30, 2 — 20, 3 — 10, 4 — 0%.

качестве которого может выступать и емкостное сопротивление между частицами и неоднородностями. Так как электрический дипольный момент  $\mathbf{P} = \mathbf{l} \cdot q$ , где  $q$  — величина положительного заряда,  $\mathbf{l}$  — вектор с началом в отрицательном заряде и концом в положительном. Величина модуля  $\mathbf{l}$  может быть значительна и практически может стремиться к расстоянию между электродами в плоском конденсаторе, а  $q$  помимо прочего зависит от величины напряженности внешнего электрического поля. Значение дипольного момента даже для одного диполя может быть очень велико и, кроме того, электрические дипольные моменты могут суммироваться. Подобный механизм поляризации отличен от ионной поляризации и может быть отнесен к разновидности объемно-зарядной поляризации — структурной поляризации. Структурная поляризация относится к низкочастотным видам поляризации [11], что подтверждается данными на рис. 2. При увеличении частоты  $\lg \varepsilon'$  уменьшается почти в два раза. Подобный механизм применим не только к твердым наполнителям — серебру, графиту [4] в матрице, но и к проводящим жидкостям в порах твердого тела [3] и другим подобным моделям [5,6,12]. Структурную поляризацию можно использовать как управляемую для улучшения параметров функциональных материалов, например, для увеличения емкости конденсаторов, изменении проводимости диэлектриков в целях борьбы со статическим электричеством и т.д. Из-за необычно больших значений действительной части диэлектрической проницаемости некоторые авторы предлагают ввести понятие эффективной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{\text{eff}}$  в сочетании с указаниями геометрических размеров, емкостью конденсатора и частоты измерения [11]. Перспективность исследований в области структурной поляризации заклю-

чается в том, что  $\epsilon_{\text{eff}}$  может мало зависеть от  $\epsilon$  матрицы и наполнителя. Единственным условием существования структурной поляризации является проводимость частиц наполнителя и структуры контактов между частицами. Варьируя методы создания проводящих структур, можно получать значительную модификацию электрических параметров композитов.

### Финансирование работы

Работа частично выполнена с использованием оборудования лаборатории физики поверхности и катализа в рамках госзадания СОГУ.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Е.В. Харитонов. *Диэлектрические материалы с неоднородной структурой* (Радио и связь, М., 1983)
- [2] В.А. Соцков. ФТП. **39** (2), 269 (2005).
- [3] О.С. Телегина. *Твердые композиционные электролиты на основе иодида серебра и полититаната калия для электрохимических приборов*. Дисс. на соискание уч. степени кандидата технических наук. Саратов. Саратовский технический университет им. Ю.А. Гагарина. 2014.
- [4] М.А. Кудряшов, А.И. Машин, А.А. Логунов, G. Chidichimo, G. De Filpo. ЖТФ, **84** (7), 67 (2014).
- [5] T. Deplancke, O. Lame, S. Barrau, K. Ravi, F. Dalmas. *Polymer*, (111), (2017). DOI: 10.1016/j.polymer.2017.01.040
- [6] A. Setaro. *J. Phys.: Condens. Matter.*, **29** (42), (2017). DOI:10.1088/1361-648X/aa8248
- [7] *Таблицы физических величин*. Справочник, под ред. И.К. Кикоина. (Атомиздат, М., 1976).
- [8] Н. Ашкрофт, Н. Мермин. *Физика твердого тела* (Мир, М., 1978), т. 2.
- [9] Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Романов. ЖТФ, **81** (1), 106 (2011).
- [10] П.А. Люкшин, Н.Ю. Гришаева, Б.А. Люкшин, С.В. Панин, С.А. Бочкарева, Н.Ю. Матолыгина, Г.Е. Уцын. *Вычислительная механика сплошных сред*, **10** (1), (2017). DOI: 10.7242/1999-6691/2017.10.1.1
- [11] Ю.М. Поплавко. *Физика диэлектриков* (Вища школа, Киев, 1980).
- [12] L. Shaolei, L. Guangfen, T. Run. *J. Mater. Sci.*, (51), (2016). DOI:10.1007/s10853-015-9671-z