

06

Экспериментальная оценка концентрационной зависимости действительной части диэлектрической проницаемости в неупорядоченной макросистеме парафин—графит

© В.А. Соцков

Кабардино-Балкарский государственный университет, Нальчик
E-mail: sozkov_va@rambler.ru

*Поступило в Редакцию 16 октября 2003 г.
В окончательной редакции 8 января 2004 г.*

Экспериментально исследована зависимость действительной части диэлектрической проницаемости макросистемы парафин—графит от концентрации проводящей фазы и показана монотонность зависимости.

В настоящее время исследование электрофизических свойств композиционных материалов, в том числе и макросистемы диэлектрик—проводник, приобретает все большее значение [1] для материаловедения. Резкие изменения проводимости, температурного коэффициента сопротивления и т.д. в области перколяционного перехода позволяют получать материалы с разными свойствами в рамках одной технологии [1–5] при небольших вариациях одного из компонентов. Аномальное поведение действительной части диэлектрической проницаемости ϵ' может иметь большое техническое значение при создании новых типов конденсаторов в микро- и нанoeлектронике. Однако экспериментальные исследования зависимости ϵ' макросистемы от концентрации проводя-

шей фазы — x , т.е. $\varepsilon' = f(x)$ для модельных систем, пригодных для анализа процессов в микроэлектронике, немногочисленны [1–7].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование изменения величины действительной части диэлектрической проницаемости в макросистеме парафин–графит в зависимости от объемной концентрации проводящей фазы.

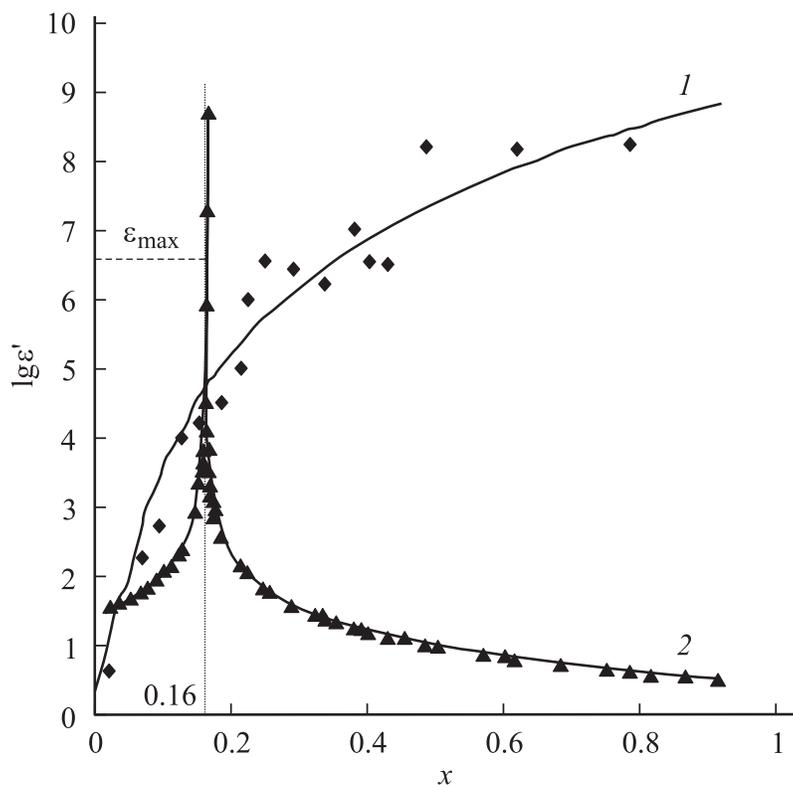
В качестве модельной системы для исследования действительной части диэлектрической проницаемости макронеупорядоченных систем была выбрана система парафин–графит. Обоснование выбора модельной системы достаточно полно представлено в [8]. Образец для исследований представлял собой конденсатор с обкладками из электролитической меди, внутрь которого предварительно заливалась смесь парафина и графита с определенной концентрацией проводящей фазы. Емкость образцов и добротность получающегося конденсатора определялись по стандартным методикам при частоте 1 кГц. При измерениях учитывались емкость подводящих проводов и краевая емкость [10]. Действительная часть диэлектрической проницаемости в настоящей работе определялась как отношение емкостей [9–11]:

$$\varepsilon' = \frac{C_x}{C_0}, \quad (1)$$

где C_0 — емкость пустой ячейки (воздушное заполнение) [10], C_x — емкость образца при определенной концентрации x проводящей фазы. Зависимость логарифма действительной части диэлектрической проницаемости от концентрации проводящей фазы, т.е. $\lg \varepsilon' = f(x)$, представлена на рисунке. Как видно из рисунка, $\lg \varepsilon' = f(x)$ является монотонно возрастающей зависимостью с конечными значениями ε' около $170 \cdot 10^6$. Изменение ε' в диапазоне исследований составляет приблизительно $4 \cdot 10^7$ раз. Подробное исследование зависимости удельного сопротивления системы парафин–графит от объемной концентрации проводящей фазы выполнено в [8]. В этой же работе был определен порог перколяции и ряд индексов, поэтому некоторые данные для расчетов были взяты из работы [8], так как исследуемые системы были идентичны. Теоретически зависимость $\varepsilon' = f(x)$ (см. рисунок, кривая 2) при $\omega = 0$ дается соотношением [3]:

$$\varepsilon'(0, x) = \frac{\varepsilon'_0}{|x - x_c|^q}, \quad (2)$$

где $\varepsilon'_0 = 2.1$ [12], $q = t(\frac{1}{s} - 1)$ при $x_c = 0.16$ [8]; $s = \frac{1}{2}$ [3] и $t = 1.4$ [8], так что $q = 1.4$.



Зависимость действительной части диэлектрической проницаемости от объемной концентрации проводящей фазы $\lg \varepsilon' = f(x)$ для макросистемы парафин–графит: 1 — экспериментальная, 2 — теоретическая по результатам работы [2].

На рисунке кривая 2 представлена двумя ветвями: левая ветвь $x < x_c$ и правая $x > x_c$, при $x = x_c$ функция имеет разрыв. Если частота ω отлична от нуля, то теоретическая кривая отличается от кривой 2 (см. рисунок) при $\omega = 0$ наличием максимума в точке $x = x_c$, повторяя в остальном ее при $\omega = 0$. Величина максимума ε'_{\max} для случая $\frac{4\pi\sigma_D^0}{\varepsilon'_0} \gg \omega$ может быть рассчитана как

1* Письма в ЖТФ, 2004, том 30, вып. 12

$\varepsilon'_{\max} = \varepsilon'_0 \left(\frac{\sigma_M}{\sigma_D}\right)^{1-S}$ [3] или $\varepsilon'_{\max} = \varepsilon'_0 \left(\frac{\rho_D}{\rho_M}\right)^{1-S}$, где удельное сопротивление диэлектрика $\rho_D = 10^{10.5} \Omega \cdot \text{m}$, а удельное сопротивление углерода $\rho_M = 4.1 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$ [8]. В этом случае $\varepsilon'_{\max} \approx 3.25 \cdot 10^{6.25}$ или $\lg \varepsilon'_{\max} \approx 6.8$. Теоретическая кривая 2 на рисунке имеет малый интервал между правой и левой ветвями. Так, например, оценка по формуле (2) на уровне $\lg \varepsilon'_{\max} \approx 6.8$ дает расстояние между левой и правой ветвями кривой 2 $\Delta x \approx 5 \cdot 10^{-5}$. В районе пересечения экспериментальной и теоретической кривых $\lg \varepsilon' \approx 4.5$ $\Delta x \approx 1.2 \cdot 10^{-4}$. Исходные компоненты для образцов развешивались с точностью, которая обеспечивала вхождение в интервал $\Delta x \approx 1.2 \cdot 10^{-4}$ при $x_c = 0.16$ (для концентрации $x = x_c$ изготовлено 50 образцов). Если даже предположить, что в силу стохастических процессов при изготовлении образца (перемешивание, заливка, остывание) ни один из них не вошел по концентрации проводящей фазы в интервал между левой и правой ветвями на уровне $\lg \varepsilon' \approx 4.5$, то этим можно объяснить отсутствие максимума в экспериментальной кривой 1 и разницу в два порядка для ε' в экспериментальном и теоретическом случаях (см. рисунок) при $x = x_c$. Однако можно отметить, что экспериментальная кривая при $x > x_c$ отличается от теоретической, так как имеет возрастающий характер и является логическим продолжением экспериментальной кривой при $x \leq x_c$. Таким образом, опираясь на вышеприведенные факты, можно предположить, что зависимость $\lg \varepsilon' = f(x)$ носит монотонный возрастающий характер. Эффекта аномалии действительной части диэлектрической проницаемости в окрестностях порога перколяции для трехмерной макросистемы парафин–графит экспериментально не обнаружено. Возрастание ε' в [1] рассматривается как возрастание поверхности контакта между металлическими и диэлектрическими фазами при убывании толщины диэлектрических прослоек, но лишь при $x < x_c$ и, по мнению автора настоящей работы, в реальных макросистемах этот рост должен продолжаться и при $x \geq x_c$, поскольку свойства композита должны стремиться к свойствам проводника. Экспериментальные результаты, представленные в [6,7], получены для перехода металл–диэлектрик в кремнии n -типа [6] и для островковых пленок [7]. Различие полученных результатов с приведенными данными по фактически двумерным системам в работах [4,6,7], по-видимому, заключается в размерно-пространственном эффекте [1].

Список литературы

- [1] Харитонов Е.В. Диэлектрические материалы с неоднородной структурой. М.: Радио и связь, 1983. 128 с.
- [2] Чмутин И.А., Летягин С.В., Шевченко В.Г., Пономаренко А.Т. // Высокомолекулярные соединения. 1994. Т. 36. № 4. С. 699–713.
- [3] Efros A.L., Shklovskii B.I. // Phys. Stat. Sol. (b). 1976. V. 76. P. 475.
- [4] Дубров В.Е., Левинштейн М.Е., Шур М.С. // ЖЭТФ. 1976. В. 5. Т. 70. С. 2014–2023.
- [5] Бонч-Бруевич В.Л. // Вестник московского университета. 1975. № 5. С. 550–554.
- [6] Gastner T.G., Lee N.K., Cieloszyk G.S., Salinger G.L. // Phys. Rev. Lett. 1975. V. 34. P. 1627.
- [7] Ritchie R.H. // Surface Sci. 1973. V. 1. P. 34.
- [8] Соцков В.А., Карпенко С.В. // ЖТФ. 2003. Т. 73. В. 1. С. 107–109.
- [9] Пасынков В.В. Материалы электронной техники. М.: Высш. школа, 1980. С. 155–160.
- [10] Хиппель А.Р. Диэлектрики и их применение. М.–Л.: Энергоиздат, 1959. С. 336.
- [11] Берзан В.П. и др. Справочник по электрическим конденсаторам. Кишинев: Штиинца, 1982. С. 27.
- [12] Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. С. 1005.