

05

Электрофизические и диэлектрические свойства железосодержащих нанокompозитов

© Н.М. Ушаков, К.В. Записис, И.Д. Кособудский

Саратовское отделение Института радиотехники и электроники РАН

E-mail: nmu@mail.saratov.ru

Саратовский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 21 апреля 2003 г.

В окончательной редакции 4 июня 2003 г.

Приведены результаты экспериментального исследования электропроводности и диэлектрических свойств нанокompозитов на основе наночастиц железа и матрицы из полиэтилена высокого давления. Показано, что изменение удельной проводимости и диэлектрической константы от разностной массовой доли наночастиц железа в композите, находящемся в „полупроводниковой“ фазе, описывается степенными функциями со средними значениями критических индексов $t = s = 1.5 \pm 0.3$. Определены области адекватности теории протекания для описания электрических и диэлектрических свойств таких нанокompозитов.

В настоящее время известно, что свойства неупорядоченных (случайно-неоднородных) сред в виде металлических нанокompозитных материалов критическим образом зависят от перколяционной концентрации (доля заполнения объема матрицы металлом) или массовой доли металла p [1,2]. При перколяционной концентрации p больше некоторой критической p_c в нанокompозите образуется объемный кластер и полимер становится проводником. В случае малой концентрации заполнения ($p < p_c$) металлические кластеры пространственно разделены между собой и электрическая проводимость нанокompозита приобретает полупроводниковую или диэлектрическую фазу.

Среди переходных металлов, используемых в нанокompозитах, важное место занимает железо. Электрические и диэлектрические свойства таких нанокompозитов для $p < p_c$ изучены еще недостаточно. Дело в том, что теория перколяции (протекания) адекватно описывает свойства неупорядоченных сред только вблизи критического значения

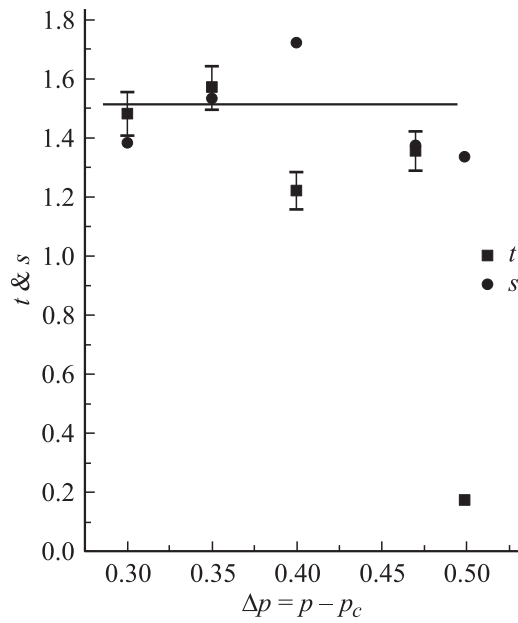
концентрации p_c [3]. Поэтому исследование электрических и диэлектрических свойств таких нанокompозитов во всей области значений $p < p_c$ представляется нам актуальным.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального изучения зависимости электропроводности и диэлектрических свойств нанокompозитных железосодержащих материалов на основе матрицы из полиэтилена высокого давления (ПЭВД) от доли наночастиц железа в таком композите. Определены области соответствия теории протекания экспериментально полученным закономерностям удельной проводимости и диэлектрической константы от разностной доли железа в нанокompозите.

Синтез железосодержащих нанокompозитов осуществлялся методом термораспада нестойких металлоорганических соединений типа пентакарбонила железа, изложенным подробно в [4]. Полученные порошки нанокompозитов имели окраску серого или черного цвета в зависимости от доли металла в нанокompозите. Из полученных порошков нанокompозита Fe-ПЭВД с помощью механического пресса и выбранной пресс-формы можно получить образцы требуемых размеров. Кроме того, нанокompозитные материалы могут быть получены в виде толстой пленки толщиной $10 \div 30 \mu\text{m}$, нанесенной на любую, в том числе стеклянную, подложку.

Размер металлических наночастиц контролировался методом малоуглового рентгеновского рассеяния и составлял от 4 до 15 nm. Измерения электропроводности и диэлектрической константы проводились на частоте 1 МГц с помощью измерительного моста типа Е7-12. Предполагалось, что образцы нанокompозита могли быть представлены эквивалентной схемой в виде параллельно включенных омической проводимости и емкостной реактивности. Известно, что если полное сопротивление образца является чисто омическим, то измерения на постоянном и переменном токе совпадают [5]. Однако в общем случае механизмы электропроводности на постоянном и переменном токе могут быть совершенно различными.

Удельное сопротивление (проводимость) и диэлектрическая проницаемость определялись стандартным способом на основании измеренных значений $G_0(p)$, $C_0(p)$ и формулы плоского конденсатора. Расстояние между обкладками конденсатора изменялось для разных образцов от 0.4 до 1 mm. Площадь обкладок составляла $\sim 10 \text{ mm}^2$. Массовая доля железа p в образцах составляла от 0.01 до 0.3. С увеличением доли p



Зависимости критических индексов удельной проводимости t и диэлектрической проницаемости s от относительной массовой доли железа в нанокompозите $p = p - p_c$.

удельная проводимость нанокompозита увеличивалась от $8 \cdot 10^{-7}$ См/м до $6 \cdot 10^{-6}$ См/м, а диэлектрическая константа (относительная диэлектрическая проницаемость) увеличивалась от 2.5 до 5.5. При этом тангенс угла потерь нанокompозита имел значение $\tan \delta \simeq 10^{-2} \div 10^{-1}$. Для сравнения проводимость, диэлектрическая константа и тангенс угла потерь для чистого полиэтилена составляют $10^{-15} \div 10^{-14}$ См/м, $2.5 \div 2.8$ и 10^{-4} соответственно [6].

Согласно теории протекания, макроскопическая удельная проводимость материала и его диэлектрическая константа подчиняются следующим закономерностям:

$$G_0(p) \sim G_m(\Delta p)^t, \quad \varepsilon(p) \sim |\Delta p|^{-s}, \quad \Delta p = p - p_c, \quad (1)$$

где G_m — проводимость металлического компонента. Показатели степени или критические индексы t и s являются универсальными пара-

метрами и позволяют определить дисперсию удельной проводимости и диэлектрической константы нанокompозита [7].

На рисунке приведены значения критических индексов t, s для разных областей значений относительной массовой доли железа в нанокompозите $\Delta p = p - p_c$. Значения этих индексов получены за счет математического преобразования измеренных значений функции $G_0(p)$, $\varepsilon(p)$. Для трехмерной решетки электропроводности ($d = 3$) измеренные средние значения критических индексов для удельной проводимости и диэлектрической константы с учетом погрешности измерения, равной 5%, равны между собой $t = s \simeq 1.5$ и практически совпадают с результатами, приведенными в [3,7]. Исключение составляют значения удельной электропроводности для $\Delta p \rightarrow 0.5$, соответствующие „диэлектрической фазе“ нанокompозита.

Таким образом, результаты экспериментального исследования электрических и диэлектрических свойств железосодержащих нанокompозитов на основе матрицы из полиэтилена высокого давления показали возможность создания искусственных сред с управляемыми электрическими и диэлектрическими свойствами и соответствие теории протекания.

Список литературы

- [1] *Gubin S.P.* // Colloids and Surf. A: Phys. Chem. and Eng. Aspects. 2002. V. 202. P. 155–163.
- [2] *Кособудский И.Д.* // Изв. вузов. Химия и хим. техн. 2000. Т. 43 (4). С. 3–18.
- [3] *Шкловский Б.И., Эфрос А.Л.* Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979. 416 с.
- [4] *Кособудский И.Д., Севостьянов В.П., Юрков Г.Ю.* // Изв. вузов. Химия и хим. техн. 2000. Т. 43 (1). С. 135–139.
- [5] *Gutmann F., Lyons L.E.* Organic Semiconductors. New York–London–Sydney: J. Wiley and Sons, Inc., 1967.
- [6] *Казарновский Д.М., Яманов С.А.* Радиотехнические материалы. М.: Высш. школа, 1972. 311 с.
- [7] *Sarychev A.K., Brouers F.* // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73. N 21. P. 2895–2898.