Хаотическая динамика и диэлектрические потери

© А.В. Турик, С.И. Гармашов

Южный федеральный университет,
344090 Ростов-на-Дону, Россия

E-mail: turik@phys.rsu.ru

(Поступила в Редакцию 5 апреля 2007 г.)

Исследованы диэлектрические потери, порождаемые хаотической динамикой в неупорядоченных гетерогенных системах типа статистических смесей с хаотическим распределением компонентов, имеющих действительные диэлектрические проницаемости разных знаков. Проанализированы особенности поведения таких систем вблизи и по мере удаления от порога перколяции, выполнено сравнение с иерархическими дуальными средами, получаемыми при помощи процедуры перемешивания.

PACS: 77.84.Lf, 73.40.-c

1. Введение

Диэлектрические потери, определяющие мнимую часть ε'' комплексной диэлектрической проницаемости (ДП) $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ материала и обусловленные проводимостью и медленными (релаксационными) механизмами поляризации с временем установления более 10^{-10} s, достаточно хорошо исследованы и описаны в литературе [1]. Другой механизм диэлектрических потерь, связанный с хаотической динамикой и резонансным возбуждением локальных колебаний, исследован в меньшей степени [2–4].

Простейшая реализация последнего механизма возможна в неупорядоченных гетерогенных (случайно-неоднородных [4]) средах с хаотическим распределением компонентов, имеющих чисто действительные ДП или чисто мнимые адмиттансы (полные проводимости) разных знаков. Для создания такой системы можно в качестве одного из компонентов использовать пьезоэлектрик, у которого вблизи пьезоэлектрических резонансов легко достигаются отрицательные значения ДП [5]. В подобных системах, несмотря на отсутствие потерь в обоих компонентах, в некоторой области концентраций вблизи порога перколяции (на границе устойчивости) возникают гигантские флуктуации электрических полей [2,4] и диэлектрические потери, объясняемые хаотической динамикой и возникновением локальных резонансов.

Среди систем с разными знаками адмиттансов наиболее подробно исследованы иерархические дуальных среды, получаемые при помощи процедуры перемешивания [3,4]. В последние годы большой интерес проявляется и к композитным материалам с отрицательными модулями упругости одного из компонентов [6,7]. Настоящая работа посвящена исследованию других систем — двумерных двухкомпонентных (с объемными концентрациями θ_1 и $\theta_2 = 1 - \theta_1$) статистических смесей [8,9] с хаотическим расположением одинаково ориентированных частиц. Точное решение для эффективной ДП таких систем с геометрически эквивалентным расположением компонентов, т.е. при $\theta_1 = \theta_2 = \theta_c = 0.5$ (θ_c — порог перколяции), получено в работе [2]. Мы расширили область исследования на всю допустиую область концентраций компонентов как вблизи, так и на удалении от порога перколяции.

2. Основные положения и формулы

Каждый компонент статистической смеси предполагался состоящим из хаотически расположенных цилиндров кругового или эллиптического сечения с параллельно ориентированными осями, имеющих факторы деполяризации $A = 1/2$ и $0 < A < 1$ соответственно. Для расчетов использовался самосогласованный метод эффективной среды [8,9], согласно которому эффективная (средняя) ДП ε определяется из уравнения

$$\theta_1 f_1 + \theta_2 f_2 = 1, \qquad (1)$$

где

$$f_1 = \frac{1}{1 + A\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon} - 1\right)} \quad (i = 1, 2) \qquad (2)$$

— отношения средних электрических полей в каждом из компонентов к среднему полю в системе, ε_i — ДП компонентов. Однородное макроскопическое электрическое поле предполагалось приложенным перпендикулярно осям цилиндров.

Совместное рассмотрение (1) и (2) позволяет определить комплексную ДП ε рассматриваемой статистической смеси:

$$\varepsilon = \frac{H \pm \sqrt{H^2 + 4A(1-A)\varepsilon_1\varepsilon_2}}{2(1-A)},$$

$$H = \varepsilon_1(\theta_1 - A) + \varepsilon_2(\theta_2 - A). \qquad (3)$$

В первой формуле (3) для некоторых значений ε_i и A следует учитывать изменение знака перед корнем при прохождении через нуль подкоренного выражения. Рассчитанные по формулам (3) концентрационные зависимости действительной ε' и мнимой ε'' частей эффективной ДП $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ статистической смеси показаны на рис. 1–3.

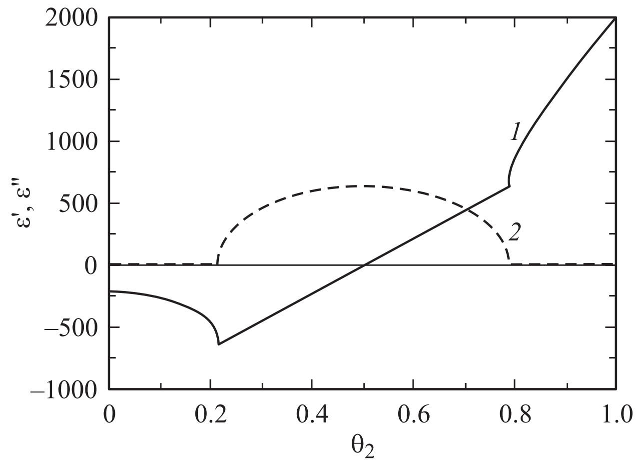

Рис. 1. Концентрационные зависимости действительной ε' (*1*) и мнимой ε'' (*2*) частей эффективной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ двумерной двухкомпонентной статистической смеси с частицами в виде цилиндров кругового сечения. $A = 0.5$, $|\varepsilon_2/\varepsilon_1| \gg 1$ ($\varepsilon_1 = -200$, $\varepsilon_2 = 2000$).

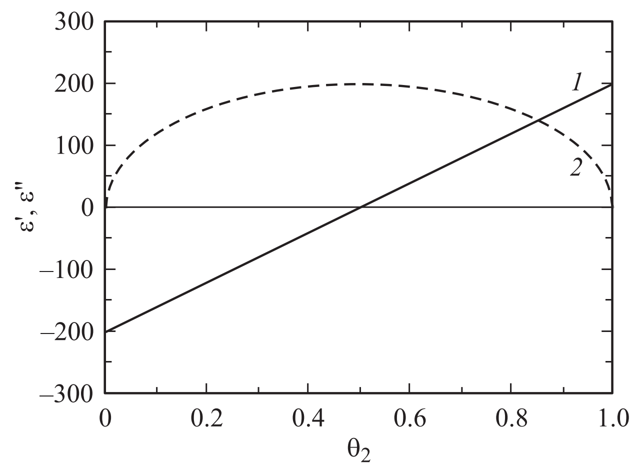

Рис. 2. То же, что на рис. 1, для $A = 0.5$, $|\varepsilon_2/\varepsilon_1| = 1$ ($\varepsilon_1 = -200$, $\varepsilon_2 = 200$).

3. Результаты и обсуждение

Сначала рассмотрим двумерную статистическую смесь с частицами в виде цилиндров кругового сечения ($A = 1/2$). На пороге перколяции ($\theta_c = \theta_1 = \theta_2 = 1/2$) получается точная формула Дыхне $\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_1\varepsilon_2}$ для систем с геометрически эквивалентным расположением компонентов. При разных знаках ε_1 и ε_2 эффективная ДП смеси $\varepsilon = -i\varepsilon''$ чисто мнимая. Это значает, что в системе имеют место детерминированный хаос и потери, связанные с резонансным возбуждением локальных колебаний [2–4]. Однако учет даже очень малых потерь, неизбежно присутствующих в обоих компонентах композита, разрушает, как показано в [2–4], хаотическую динамику и приводит к устойчивому существованию диэлектрических потерь.

Кривая зависимости $\varepsilon''(\theta)$ симметрична: величина ε'' максимальна на пороге перколяции и плавно уменьшается по мере удаления от θ_c. В области хаотической динамики имеется не только мнимая, но и действительная часть эффективной ДП $\varepsilon' = H$, которая линейно изменяется с концентрацией компонентов и при $\theta = \theta_c$ проходит через нуль. На границах области хаотичности ε' испытывает изломы. Поведение $\varepsilon'(\theta)$ и $\varepsilon''(\theta)$ качественно отличается от соответствующих кривых иерархических дуальных сред, рассмотренных в [3,4]. В последнем случае в области хаотической динамики действительная часть эффективной ДП $\varepsilon' \equiv 0$, а $\varepsilon''(\theta)$ монотонно увеличивается по мере роста концентрации компонента с большей величиной $|\varepsilon_i|$. При приближении к границе области хаотичности $\varepsilon''(\theta) \to \infty$.

Ширина области хаотической динамики расширяется по мере того, как отношение $|\varepsilon_1/\varepsilon_2| \to 1$, и при $|\varepsilon_1/\varepsilon_2| = 1$ эта область охватывает всю доступную область концентраций компонентов (рис. 1 и 2). Это связано с тем, что при одинаковых или близких по величине модулях ДП компонентов (согласно (2), при этом близки абсолютные величины средних внутренних полей $|f_1|$ и $|f_2|$) локальный резонанс в LC-контуре, индуктивность L которого пропорциональна отрицательной ДП ε_1, а емкость C — положительной ДП ε_2, возбуждается наиболее легко. По мере удаления $|\varepsilon_1/\varepsilon_2|$ от единицы увеличивается различие полей f_1 и f_2, резонанс возбуждается труднее и область хаотической динамики сужается. Отметим, что в иерархической дуальной среде, рассмотренной в [3,4], наблюдается совершенно иное поведение: область хаотической динамики сужается по мере того, как $|\varepsilon_1/\varepsilon_2| \to 1$, и при $|\varepsilon_1/\varepsilon_2| = 1$ эта область исчезает.

При эллиптическом поперечном сечении цилиндров и $|\varepsilon_2/\varepsilon_1| > 1$ порог перколяции θ_c, рассчитываемый

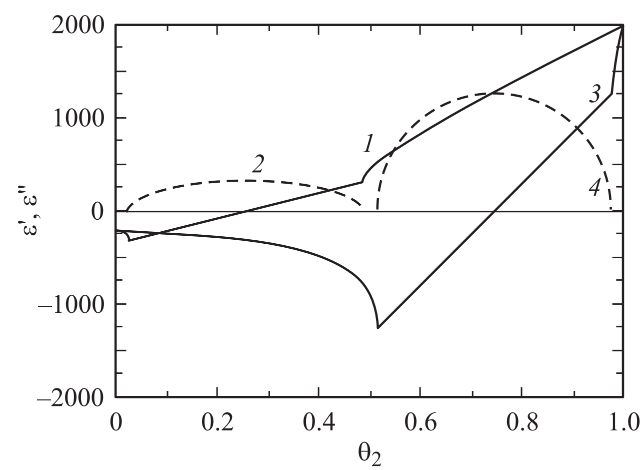

Рис. 3. Концентрационные зависимости действительной ε' (*1, 3*) и мнимой ε'' (*2, 4*) частей эффективной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ двумерной двухкомпонентной статистической смеси с частицами в виде цилиндров эллиптического сечения. $\varepsilon_1 = -200$, $\varepsilon_2 = 2000$. $A = 0.2$ (*1, 2*) и 0.8 (*3, 4*).

для второго компонента, смещается в сторону больших θ_2 при $A > 1/2$ и в сторону меньших θ_2 при $A < 1/2$ (рис. 3). Подобное поведение характерно и для порога перколяции трехмерных статистических смесей [10]. При $|\varepsilon_2/\varepsilon_1| = 1$ $\theta_c = 1/2$ независимо от величины фактора деполяризации A.

4. Заключение

В двумерных статистических смесях, состоящих из компонентов с разными знаками ДП (реактивных адмиттансов), в области концентраций вблизи порога перколяции возникают диэлектрические потери, порождаемые неустойчивостью системы и хаотической динамикой. Ширина области хаотической динамики зависит от отношения ДП (адмиттансов) компонентов и от фактора деполяризации частиц статистической смеси.

Список литературы

[1] Н.П. Богородицкий, Ю.М. Волокобинский, А.А. Воробьев, Б.М. Тареев. Теория диэлектриков. Энергия, М.–Л. (1965). 344 с.
[2] А.М. Дыхне. ЖЭТФ **59**, 110 (1970).
[3] С.П. Лукьянец, А.Е. Морозовский, А.А. Снарский. Письма в ЖТФ **23**, 89 (1997).
[4] А.М. Дыхне, А.А. Снарский, М.И. Женировский. УФН **174**, 887 (2004).
[5] Д. Берлинкур, Д. Керран, Г. Жаффе. В кн.: Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона, Мир, М. (1966). Т. 1. Ч. А. С. 204.
[6] R.S. Lakes. Phys. Rev. Lett. **86**, 2897 (2001).
[7] W.J. Drugan. Phys. Rev. Lett. **98**, 055 502 (2007).
[8] D.A.G. Bruggeman. Ann. Phys. **24**, 636 (1935).
[9] В.И. Оделевский. ЖТФ **21**, 678 (1951).
[10] А.В. Турик, А.И. Чернобабов, Г.С. Радченко, С.А. Турик. ФТТ **46**, 2139 (2004).