

Хаотическая динамика в пьезоактивных статистических смесях

© А.И. Чернобабов, А.В. Турик*, Е.А. Толокольников, М.Ю. Родинин*, Г.И. Темирчев

Пятигорский государственный технологический университет,
Пятигорск, Россия

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

E-mail: turik@sfedu.ru

Исследованы диэлектрические потери и пьезоэлектрический эффект в неупорядоченных гетерогенных системах типа пьезоактивных статистических смесей с хаотическим распределением компонентов, имеющих действительные диэлектрические проницаемости разных знаков. Показана связь диэлектрических и пьезоэлектрических констант с хаотической динамикой. Проанализированы особенности поведения таких систем вблизи и по мере удаления от порога перколяции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Южного федерального университета (грант № К-07-Г-40).

PACS: 77.84.Lf, 73.40.-c

1. Введение

Хаотическая динамика в гетерогенных системах, проявляющаяся в возникновении локальных резонансов и диэлектрических потерь в случайно-неоднородных средах, компоненты которых имеют разные знаки диэлектрических проницаемостей, рассмотрена только в отсутствие пьезоэффекта [1–3]. В последнее время большой интерес проявляется к вопросам устойчивости композитных материалов с отрицательными модулями упругости одного из компонентов [4,5]. Поэтому именно в пьезоактивных системах можно ожидать ряд новых эффектов, обусловленных электромеханическим взаимодействием компонентов. Настоящая работа посвящена хаотической динамике в пьезоактивных композитах, представляющих собой двумерную двухкомпонентную статистическую смесь из хаотически расположенных сильно вытянутых цилиндров кругового сечения с длиной L и диаметром D ($L \gg D$) и одинаково ориентированными осями.

Для создания такой системы можно в качестве одного из компонентов использовать пьезоэлектрик, у которого вблизи пьезоэлектрических резонансов легко достигаются отрицательные значения диэлектрических проницаемостей [6]. 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 [1–3] и диэлектрические потери, объясняемые хаотической динамикой и возникновением локальных резонансов.

2. Основные положения и формулы

Каждый компонент статистической смеси предполагался состоящим из хаотически расположенных цилиндров кругового сечения с параллельно ориентированными осями. Для расчетов использовался самосогласованный метод эффективной среды [7,8], согласно которому в

отсутствие пьезоэффекта эффективная (усредненная по ансамблю) диэлектрическая проницаемость ε композита определяется из уравнений

$$\theta_1 f_1 + \theta_2 f_2 = 1, \quad f_i = \frac{1}{1 + A\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon} - 1\right)} \quad (i = 1, 2), \quad (1)$$

где f_i — отношения средних электрических полей в каждом из компонентов к среднему полю в системе, $A = 1/2$ — фактор деполяризации цилиндрических включений, ε_i — диэлектрические проницаемости компонентов. Однородное макроскопическое электрическое поле считалось приложенным перпендикулярно осям цилиндров.

При наличии пьезоэффекта предполагалось, что компоненты композита с объемными концентрациями θ_1 и θ_2 имели действительные диэлектрические проницаемости разных знаков $\varepsilon_1 > 0$ и $\varepsilon_2 < 0$ и обычные для сегнетоэлектриков величины пьезомодулей и упругих

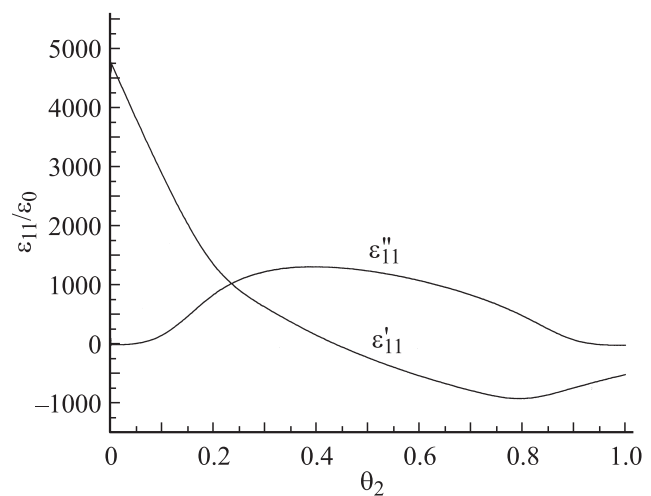


Рис. 1. Концентрационная зависимость действительной ε'_{11} и мнимой ε''_{11} частей эффективной диэлектрической проницаемости ε_{11} двухкомпонентной статистической смеси. $\varepsilon_1 = 4750$, $\varepsilon_2 = -500$, $d_1 = 980$ pC/N, $d_2 = 50$ pC/N.

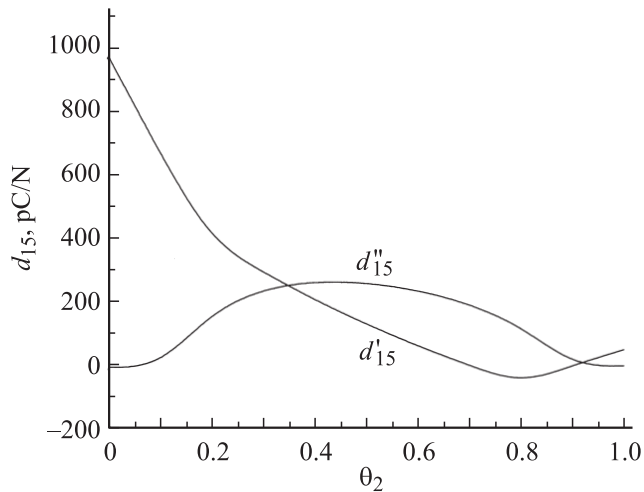


Рис. 2. Концентрационная зависимость действительной d'_{15} и мнимой d''_{15} частей эффективного пьезомодуля d_{15} двухкомпонентной статистической смеси. $\varepsilon_1 = 4750$, $\varepsilon_2 = -500$, $d_1 = 980$ pC/N, $d_2 = 50$ pC/N.

податливостей. Для расчета диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих констант композита использовался самосогласованный метод Марутакэ [9,10]. Однако если в отсутствие пьезоэффекта можно было использовать аналитические выражения (1) для диэлектрических проницаемостей [3] и проводимостей [1,2], то в случае пьезоактивных статистических смесей определение всех констант композита приходилось проводить с помощью итерационной процедуры. Это потребовало разработки специального программного обеспечения. Рассчитанные концентрационные зависимости действительной и мнимой частей эффективных диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{11} = \varepsilon'_{11} - i\varepsilon''_{11}$ и пьезомодуля $d_{15} = d'_{15} - id''_{15}$ статистической смеси показаны на рис. 1 и 2.

3. Результаты и обсуждение

Как известно, на пороге перколяции ($\theta_c = \theta_1 = \theta_2 = 1/2$) непьезоактивной двумерной двухкомпонентной статистической смеси с геометрически эквивалентным в среднем расположением частиц, имеющих форму цилиндров кругового сечения, эффективная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2}$ [1,2]. При разных знаках ε_1 и ε_2 диэлектрическая проницаемость смеси $\varepsilon = -i\varepsilon''$ чисто мнимая, а действительная часть ε обращается в нуль. Вблизи порога перколяции ε комплексная, несмотря на то что диэлектрические проницаемости ε_1 и ε_2 обоих компонентов действительные. Это означает, что в системе имеют место детерминированный хаос и потери, связанные с резонансным возбуждением локальных колебаний [3]. Однако учет даже очень малых потерь в компонентах композита разрушает, как показано в [1–3], хаотическую динамику и приводит к устойчивому существованию диэлектрических потерь.

В связи с этим следовало ожидать, что и в случае пьезоактивной статистической смеси вблизи порога перколяции действительная часть диэлектрической проницаемости ε' проходит через нуль, и появляется мнимая часть ε'' . И действительно, как видно из рис. 1, $\varepsilon' = 0$ при $0.40 < \theta_{2\varepsilon} < 0.45$. Однако в отличие от непьезоактивных сред [1–3] концентрация, при которой обращается в нуль ε' композита, не совпадает с критической (соответствующей порогу перколяции) объемной концентрацией компонентов смеси $\theta_c = 1/2$, а сдвинута в сторону компонента с положительной диэлектрической проницаемостью.

Оказалось также, что через нуль проходит действительная часть не только диэлектрической проницаемости, но и пьезомодуля композита, причем соответствующая концентрация $\theta_{2d} > 0.5$, т.е. сдвинута относительно порога перколяции в сторону компонента с отрицательной диэлектрической проницаемостью. Концентрация θ_{2d} сильно зависит от величины пьезомодуля компонента с отрицательной ε и может быть значительно уменьшена при отрицательных значениях последнего. Эффекты сдвига $\theta_{2\varepsilon}$ и θ_{2d} относительно критической концентрации $\theta_c = 1/2$ являются следствием пьезоэлектрического взаимодействия компонентов композита; кроме того, пьезоэлектрический эффект приводит к сужению области хаотической динамики.

В области хаотической динамики эффективные диэлектрические, пьезоэлектрические и упругие константы композита становятся комплексными величинами, хотя все физические константы обоих компонентов чисто действительные. Для концентрационных зависимостей мнимых частей диэлектрической проницаемости и пьезомодуля композита характерны четко выраженные максимумы при $\theta_2 < \theta_c$. Как действительные, так и мнимые части эффективных констант сильно зависят от отношения $\varepsilon_1/\varepsilon_2$. Хаотическая динамика проявляется в том, что для сходимости итерационного процесса необходимо использовать по аналогии с [1,2] очень малые („затравочные“) мнимые части диэлектрических проницаемостей компонентов.

В области хаотической динамики действительная часть эффективной упругой податливости s_{44} композита проходила через размытый минимум, тогда как мнимая часть s_{44} имела хорошо выраженный максимум. Как и в непьезоактивной системе [3], ширина области хаотической динамики расширяется по мере того, как отношение $|\varepsilon_1/\varepsilon_2| \rightarrow 1$, но даже при $|\varepsilon_1/\varepsilon_2| = 1$ эта область при наличии пьезоэффекта не охватывает всю доступную область концентраций компонентов.

4. Заключение

В двумерных статистических смесях, состоящих из компонентов с разными знаками диэлектрических проницаемостей (реактивных адмиттансов), в области концентраций вблизи порога перколяции возникает дина-

мический хаос, проявляющийся в прохождении через нуль действительных частей и возникновении мнимых частей диэлектрических проницаемостей, пьезомодулей и упругих податливостей. Хаотическая динамика порождается неустойчивостью системы, а ширина области хаотической динамики зависит главным образом от отношения диэлектрических проницаемостей (адмиттансов) компонентов.

Список литературы

- [1] А.М. Дыхне. ЖЭТФ **59**, 110 (1970).
- [2] А.М. Дыхне, А.А. Снарский, М.И. Женировский. УФН **174**, 887 (2004).
- [3] А.В. Турик, С.И. Гармашов. ФТТ **50**, 233 (2008).
- [4] R.S. Lakes. Phys. Rev. Lett. **86**, 2897 (2001).
- [5] W.J. Drugan. Phys. Rev. Lett. **98**, 055 502 (2007).
- [6] Д. Берлинкур, Д. Керран, Г. Жаффе. В кн.: Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. Мир, М. (1966). Т. 1. Ч. А. С. 204.
- [7] D.A.G. Bruggeman. Ann. Phys. **24**, 636 (1935).
- [8] В.И. Оделевский. ЖТФ **21**, 678 (1951).
- [9] M. Marutake. J. Phys. Soc. Jpn. **11**, 807 (1956).
- [10] А.В. Турик, А.И. Чернобабов, Г.С. Радченко, С.А. Турик. ФТТ **46**, 2139 (2004).