

06

Динамическая проводимость аморфных наногранулированных пленок в диапазоне сверхвысоких частот

© И.В. Антонец, Л.Н. Котов, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников,
В.Г. Шавров, В.И. Щеглов

Сыктывкарский государственный университет
Воронежский государственный технический университет
Институт радиотехники и электроники РАН, Москва
E-mail: vshcheg@cplire.ru

Поступило в Редакцию 13 февраля 2014 г.

Представлены результаты экспериментального исследования проводимости аморфных композиционных наногранулированных пленок, выполненного на постоянном токе и при отражении волны СВЧ. Показано, что измеренная таким образом динамическая проводимость превышает статическую на 2–4 порядка, и высказаны предположения о возможных причинах такого превышения.

В последнее время в технике СВЧ все большее значение приобретают различные метаматериалы — композиты, свойства которых определяются их структурой, состоящей из множества отдельных элементов [1]. Важными примерами таких материалов являются фотонные и магнотонные кристаллы [2,3], обладающие „левыми“ волноведущими свойствами [4]. Особое место занимают наноструктурные металл-диэлектрические пленки, содержащие гранулы металла, хаотически распределенные внутри диэлектрической матрицы [5]. Использование ферромагнитного металла в такой наноструктуре обуславливает наряду с проявлением гигантского магнитосопротивления высокий уровень

поглощения излучения СВЧ [6], что представляет значительный практический интерес.

В то же время свойства СВЧ гранулированных нанокомпозитов изучены недостаточно, что, по-видимому, обусловлено быстрым развитием технологии. Так, в последнее время появились нанокомпозиты с аморфной металлической фазой [7], однако исследования их свойств СВЧ отсутствуют.

С другой стороны, отсутствует информация о важном для практики соотношении между статическими и динамическими свойствами таких пленок, на различие между которыми впервые указывалось в работе [8].

Данная работа посвящена исследованию свойств СВЧ аморфных наногранулированных композитов, в первую очередь особенностям отражения электромагнитных волн от таких пленок, с целью выявления необходимой при конструировании устройств информации о соотношении между динамическими и статическими их параметрами.

Пленки наногранулированных композитов состава $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Zr}_2\text{O}_3)_{1-x}$ (где $x \sim 0.54-0.78$, что несколько выше порога перколяции $x \sim 0.45$) были получены методом ионно-лучевого напыления на подложках из лавсана толщиной 0.02 mm, размером 21×28 cm с применением методики экранирования [9], что позволило в одном технологическом цикле на протяженной подложке формировать слой композита непрерывно меняющейся толщины. Последующее разрезание подложки позволило получить 12 образцов пленок одинакового состава с толщиной от 70 до 550 nm, которая измерялась с помощью сканирующего электронного микроскопа путем наблюдения в торец по 15 точкам. Гранулированный характер и аморфность металлических гранул контролировались путем электронно-микроскопического исследования [9–12]. Размер гранул составлял 2–7 nm.

Поверхность пленок имела зернистую структуру, которая контролировалась с помощью атомно-силового микроскопа с разрешением около 10 nm. Размер зерен составлял от 30 до 100 nm и увеличивался с увеличением толщины пленки, углубленные промежутки между зернами составляли от 20 до 50% от их диаметра.

Проводимость пленок измерялась контактным методом по схеме замещения [13,14]. Коэффициент отражения волн СВЧ (по мощности) измерялся в диапазоне частот 14–18 Hz с помощью панорамного измерителя комплексных коэффициентов передачи [13–15].

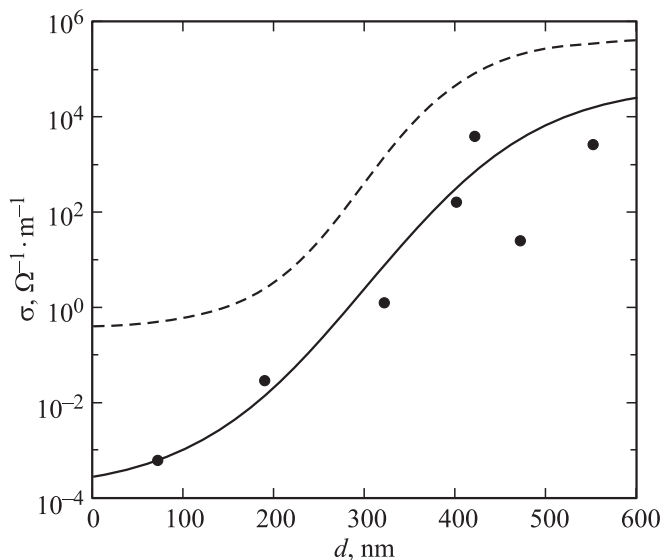


Рис. 1. Зависимость удельной проводимости от толщины пленок. Точки — результаты эксперимента. Сплошная кривая построена по формуле (1), пунктирная — по формуле (4).

На рис. 1 показана зависимость удельной проводимости σ от толщины пленок d . Точки — результаты измерений статической проводимости на постоянном токе. Сплошная линия построена по эмпирической формуле

$$\sigma(\Omega^{-1} \cdot m^{-1}) = \exp \left\{ 10 \operatorname{th} \left(\frac{d(\text{nm}) - 300 \text{ nm}}{190 \text{ nm}} \right) + 1 \right\}. \quad (1)$$

На рис. 2 показана зависимость коэффициента отражения R от толщины пленок d . Точки — результаты эксперимента. При расчете использовалась формула [16,17]:

$$R = \left| \frac{(\varepsilon_1 \mu_2 - \varepsilon_2 \mu_1) [\exp(ik_2 d) - \exp(-ik_2 d)]}{(\sqrt{\varepsilon_2 \mu_1} + \sqrt{\varepsilon_1 \mu_2})^2 \exp(ik_2 d) - (\sqrt{\varepsilon_2 \mu_1} - \sqrt{\varepsilon_1 \mu_2})^2 \exp(-ik_2 d)} \right|^2, \quad (2)$$

где ε_1 , μ_1 , k_1 — проницаемости и волновое число в свободном пространстве, ε_2 , μ_2 , k_2 — проницаемости и волновое число в пленке,

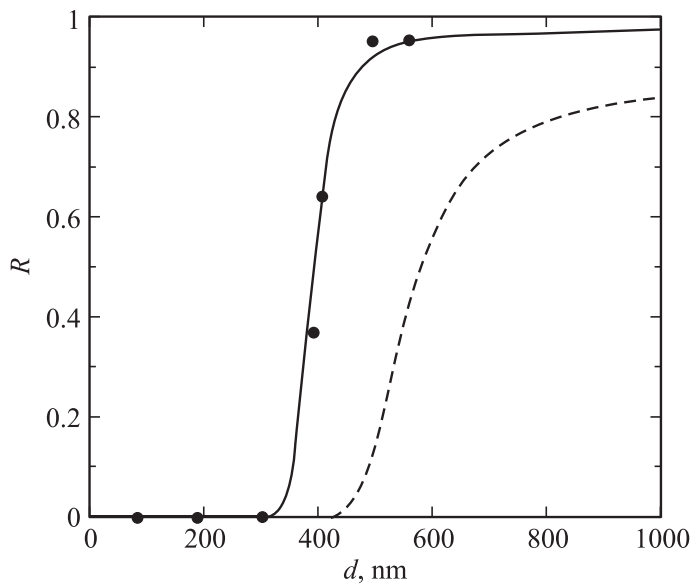


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения от толщины пленок. Точки — результаты эксперимента. Сплошная кривая — расчет по формуле (3) с учетом (4), пунктирная — по той же формуле (3) с учетом (1).

d — толщина пленки. Проводимость пленки σ учитывалась в виде мнимой добавки к диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon = \varepsilon_r + i\varepsilon_\sigma = \varepsilon_r - \frac{i\sigma}{\varepsilon_0\omega}, \quad (3)$$

где ε_r — диэлектрическая проницаемость пленки в отсутствие проводимости, ω — частота, ε_0 — диэлектрическая постоянная. В расчетах полагалось, при частоте $\omega = 1.0053 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$ ($f = 16 \text{ GHz}$) в свободном пространстве $\varepsilon_1 = 1$, $\mu_1 = 1$, $k_1 = 293 \text{ m}^{-1}$, в материале пленок в отсутствие проводимости $\varepsilon_{r2} = 2.5$, $\mu_2 = 1$, $k_2 = 463 \text{ m}^{-1}$.

Входящая в формулу (3) проводимость рассчитывалась с помощью формулы (1). При этом была получена кривая, показанная на рис. 2 пунктирной линией, т.е. резко не соответствующая эксперименту. Сплошная кривая на рис. 2, проходящая по экспериментальным точкам,

построена по той же формуле (3), но с использованием значений проводимости, рассчитанных вместо (1), по следующей формуле:

$$\sigma (\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}) = \exp \left\{ 7 \operatorname{th} \left(\frac{d(\text{nm}) - 300 \text{ nm}}{120 \text{ nm}} \right) + 6 \right\}. \quad (4)$$

Однако использование этой формулы для построения зависимости проводимости от толщины на рис. 1 дает пунктирную кривую, лежащую значительно выше и левее сплошной, проходящей по экспериментальным точкам (полученным на постоянном токе), причем превышение составляет от 2 до 4 порядков.

Таким образом, если рассматривать измерение коэффициента отражения как метод для измерения динамической проводимости (на СВЧ), то можно видеть, что такая проводимость превышает статическую на 2–4 порядка.

Следует заметить, что некоторое (около 2 раз) превышение динамической проводимости над статической отмечалось ранее на металлических пленках, имеющих зернистую структуру [8]. Однако наблюдаемое здесь превышение на несколько порядков, по-видимому, связано именно с гранулированной структурой композитных пленок. В пользу этого говорит рассмотренный в работе [18] механизм емкостного шунтирования межкластерных промежутков, существенный именно в диапазоне СВЧ.

С другой стороны, поскольку проводимость исследуемых композитных пленок на 7–8 порядков меньше проводимости чистого металла, т. е. проводящие перколяционные каналы весьма слабы и извилисты, значительную роль может сыграть механизм туннелирования электронов через диэлектрические промежутки между гранулами [19]. Дополнительным следствием наблюдаемого резкого превышения динамической проводимости над статической может явиться уширение линии ферромагнитного резонанса в таких пленках, дополняющее механизм спинполяризационной релаксации [20], уточнение чего требует постановки отдельных экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-02-01401-а) и Минобрнауки РФ, Соглашение № 14.574.21.0083.

Список литературы

- [1] Вендик И.Б., Вендик О.Г. // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 1. С. 3–28.
- [2] Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Животовский Л.В., Климов А.А., Тайд Ф., Пресманес Л., Бонин К., Цай Ч.С., Высоцкий С.Л., Филимонов Ю.А. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77. № 10. С. 670–674.
- [3] Ustinov A.B., Drozdovskii A.V., Kalinikos V.A. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 142 513–142 517.
- [4] Агранович В.М., Гармштейн Ю.Н. // УФН. 2006. Т. 176. № 10. С. 1052–1068.
- [5] Петров Ю.И. Кластеры и малые частицы. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 386 с.
- [6] Казанцева Н.Е., Пономаренко А.Т., Шевченко В.Г., Чмутин И.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В. // Физика и химия обработки материалов. 2002. № 1. С. 5–11.
- [7] Иванов А.В., Калинин Ю.Е., Нечаев А.В., Ситников А.В. // ФТТ. 2009. Т. 51. В. 12. С. 2331–2336.
- [8] Антонец И.В., Котов Л.Н., Шавров В.Г., Щеглов В.И. // РЭ. 2006. Т. 51. № 12. С. 1481–1487.
- [9] Ситников А.В. Электрические и магнитные свойства наногетерогенных систем металл–диэлектрик: Дис. . . . докт. физ.-мат. наук. Воронеж: ВГТУ, 2010. 318 с.
- [10] Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V., Stognei O.V., Zolotukhin I.V., Neretin P.V. // Mat. Scien. and Engin. A. 2001. V. 304–306. P. 941–945.
- [11] Золотухин И.В., Неретин П.В., Калинин Ю.Е., Стогней О.В., Ситников А.В. // Альтернативная энергетика и экология. 2002. № 2. С. 7–14.
- [12] Калинин Ю.Е., Пономаренко А.Т., Ситников А.В., Стогней О.В. // Физика и химия обработки материалов. 2002. № 5. С. 14–19.
- [13] Антонец И.В., Котов Л.Н., Некипелов С.В., Голубев Е.А. // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 3. С. 24–27.
- [14] Антонец И.В., Котов Л.Н., Некипелов С.В., Карпушов Е.Н. // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 11. С. 102–106.
- [15] Антонец И.В., Котов Л.Н., Некипелов С.В., Шавров В.Г., Щеглов В.И. // РЭ. 2004. Т. 49. № 10. С. 1243–1250.
- [16] Антонец И.В., Котов Л.Н., Шавров В.Г., Щеглов В.И. // РЭ. 2007. Т. 52. № 4. С. 403–414.
- [17] Антонец И.В., Щеглов В.И. Распространение волн через тонкие слои и пленки. Сыктывкар: ИПО СыктГУ, 2010. 132 с.
- [18] Калинин Ю.Е., Котов Л.Н., Петрунёв С.Н., Ситников А.В. // Изв. РАН. 2005. Т. 69. № 8. С. 1195–1199.
- [19] Луцев Л.В., Звонарева Т.К., Лебедев В.М. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 15. С. 84–89.
- [20] Луцев Л.В. // ФТТ. 2002. Т. 44. В. 1. С. 97–105.