

ИМПЕДАНС НАНОКОМПОЗИТОВ FeCoZr – ОКСИД АЛЮМИНИЯ

Федотов А.К.¹, Андриевский Б.В.², Калинин Ю.Е.³, Свито И.А.¹, Патрин А.А.²,
Мазаник А.В.¹, Ситников А.В.³, Малютина-Бронская В.В.¹

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

²Технический университет г. Кошалин, Кошалин, Польша

³Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

В данной работе представлены результаты исследования импеданса композитов $(\text{Co}_{0.45}\text{Fe}_{0.45}\text{Zr}_{0.10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ в диапазоне составов $30 \text{ ат.}\% < X < 65 \text{ ат.}\%$. Пленки толщиной 3-5 мкм в виде наночастиц сплава $\text{Co}_{0.45}\text{Fe}_{0.45}\text{Zr}_{0.10}$, хаотично распределенные в изолирующей аморфной матрице из оксида алюминия, были получены методом ионно-лучевого напыления на подложки из ситалла [1,2]. В процессе напыления в вакуумную камеру вводился либо аргон под давлением порядка 10^{-2} Па (серия 1), либо смесь аргон-кислород с общим давлением $9.6 \cdot 10^{-2}$ Па при парциальном давлении кислорода $4.41 \cdot 10^{-2}$ Па (серия 2). Измерительная установка, включающая прецизионный мост переменного тока НР-4284А и управляющую систему, позволяла проводить измерения амплитуды и фазы тока в исследуемых образцах в диапазоне частот 10^2 - 10^6 Гц, на основании которых рассчитывались действительная и мнимая части проводимости.

Исследование образцов серии 1 позволяет выделить два типа характерных зависимостей полного сопротивления Z от частоты f (рис. 1), тогда как для образцов серии 2 характерны три разных типа таких зависимостей $Z(f)$ (рис. 2).

Как видно, для образцов, находящихся на диэлектрической стороне перехода металл-изолятор (ПМИ) вблизи порога перколяции [1,2] (рис. 1а для серии 1 и рис. 2б для серии 2), наблюдаются близкие по виду зависимости $Z(f)$. Наблюдаемый на данных рисунках максимум $Z(f)$ на низких частотах может свидетельствовать о том, что эквивалентная схема, описывающая электрическое поведение композитов на переменном токе, содержит резонансные цепочки таких параллельно соединенных элементов как действительное сопротивление $R1$, индуктивность L и емкость $C1$. С ростом частоты наблюдается спад полного сопротивления, который может свидетельствовать о необходимости введения еще одной емкости $C2$ в эквивалентную схему для данного композита. При частотах порядка 1 МГц кривая $Z(f)$ стремится к насыщению, что свидетельствует о наличии еще одного элемента - сопротивления $R2$ в эквивалентной схеме. Таким образом, полная эквивалентная схема композитов серий 1 и 2 вблизи порога перколяции (с диэлектрической стороны) выглядит так, как показано на верхних вставках рис. 1а и 2б.

Для образцов обеих серий, находящихся за порогом перколяции [1,2], т.е. на металлической стороне перехода металл-диэлектрик, также наблюдаются сходные (но иные, чем в предыдущем случае) зависимости $Z(f)$ (рис. 1б и рис. 2в). На нижних вставках этих рисунков дополнительно приведены участки $Z(f)$ в области наиболее низких исследованных частот. Подобный рост полного сопротивления в области частот менее 100 Гц может быть описан только при использовании шунтированным сопротивлением R индуктивности $L1$ в эквивалентной схеме. Как следует из зависимостей $Z(f)$, с ростом частоты, из-за наличия емкости $C1$, индуктивная составляющая схемы $L1$ перестает влиять на полное сопротивление, так что в области частот выше 100 Гц характер $Z(f)$ определяется только действительным сопротивлением R . При частотах более 1 кГц полное сопротивление растет из-за влияния индуктивности $L2$. В результате, полная эквивалентная схема обеих серий нанокompозитов за порогом перколяции будет выглядеть как на верхних вставках рис. 1б и рис. 2в.

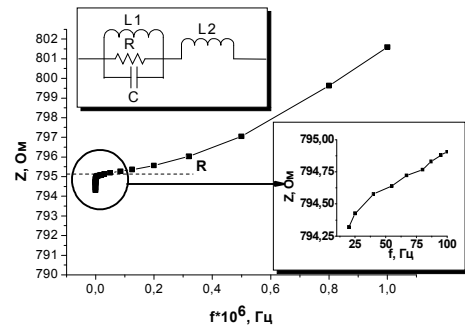
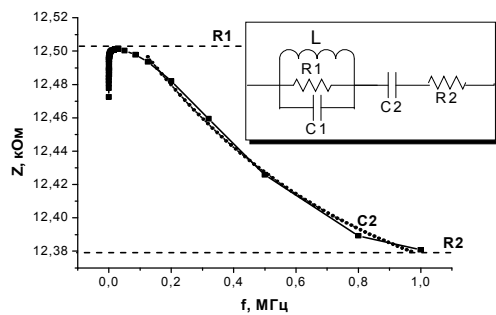


Рис.1. Зависимость $Z(f)$ для нанокompозитов $(Co_{0.45}Fe_{0.45}Zr_{0.10})_x(Al_2O_3)_{1-x}$ серии 1 для $x = 32,7\%$ (a) и $x = 43,2\%$ (б). На верхних вставках показаны эквивалентные схемы композитов.

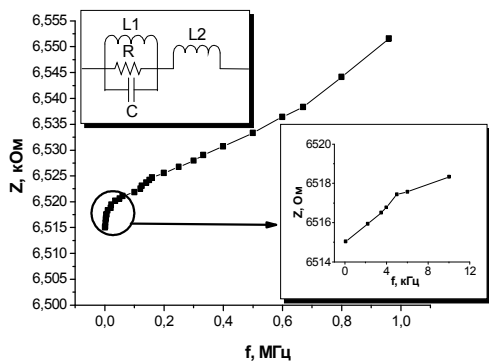
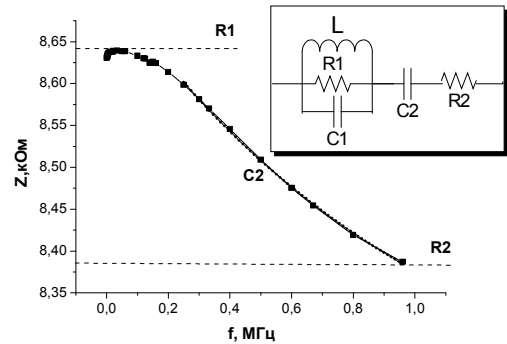
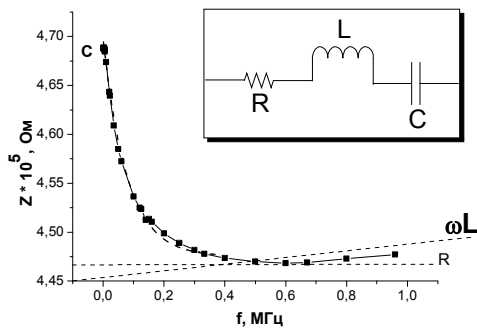


Рис.2. Зависимость $Z(f)$ для нанокompозитов $(Co_{0.45}Fe_{0.45}Zr_{0.10})_x(Al_2O_3)_{1-x}$ серии 2 для $x=35,2\%$ (a) и $x=48,7\%$ (б) и $x=54\%$ (в). На вставках показаны эквивалентные схемы композитов.

приведенных выше типов (рис. 2a).

Анализ показывает, что уменьшение Z с ростом частоты в низкочастотной части исследованного диапазона в этом случае может быть объяснено наличием емкости C в эквивалентной схеме. Последующий рост $Z(f)$ для $f > 600$ кГц может свидетельствовать о наличии индуктивности L в эквивалентной схеме. При этом, последовательное сопротивление R ограничивает зависимость $Z(f)$ по величине снизу.

Итак, важной особенностью поведения исследованных образцов является наличие индуктивности в соответствующих эквивалентных схемах, что обычно не характерно для бинарных композитов. Согласно моделям теории протекания, для бинарных композитов металл-диэлектрик сплошной токопроводящий кластер возникает на пороге перколяции и состоит только из частиц электропроводящей фазы, пронизывая образец от контакта до контакта (рис. 3б). Однако в реально существующих композитах (в особенности, наноструктурированных), изолирующие прослойки между отдельными частицами (на диэлектрической стороне ПМИ, рис. 3а) или ветвями ограниченных кластеров электропроводящей фазы (вблизи порога перколяции, рис. 3в), также могут участвовать в формировании токопроводящих путей. Поскольку такие пути имеют существенно более сложную форму в виде самопересекающихся траекторий (штриховые линии на рис. 3), -

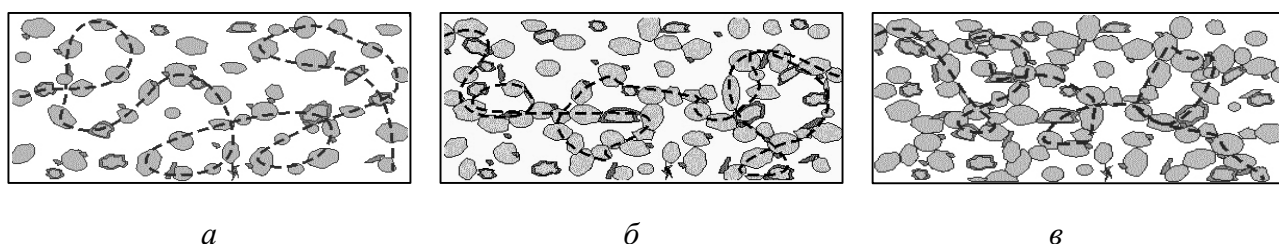


Рис. 3. Схематическое изображение структуры формирования токопроводящих путей в нанокompозитах:
а - до образования перколяционного кластера (прерывистой линией показан токопроводящий путь),
б - после образования перколяционного кластера для серии 1,
в - после образования токопроводящей сетки для серии 2.

это и может проявиться в виде индуктивности L в эквивалентных схемах всех типов исследованных нанокompозитов. Наличие емкостей C в данном случае, как обычно, учитывает участие тонких прослоек диэлектрической матрицы в формировании токопроводящих путей.

Участие диэлектрической фазы в переносе зарядов на постоянном токе для бинарных композиционных материалов обычно предполагается до порога перколяции (рис. 3а). В этом случае эквивалентная схема нанокompозитов (рис. 1а и 2б) содержит два последовательно соединенных резистора: первый учитывает сопротивление $R1$ прослоек диэлектрика и кластеров электропроводящей фазы на низких частотах, а второй соответствует сопротивлению $R2$ частиц электропроводящей фазы на высоких частотах. Заметим, что в композитах серии 2 в работе [2] было установлено существование еще одной неметаллической компоненты - оксидов на частицах металла (показаны темным цветом на схеме рис. 3б). Возможно, этот факт и определяет наличие еще одного типа эквивалентной схемы, которые описывают поведение образцов серии 2, соответствующих составу, где должен был бы наблюдаться порог перколяции, если бы токопереносу не препятствовали упомянутые дополнительные оксидные барьеры.

Таким образом, в ходе исследования импеданса композитов $(Co_{0.45}Fe_{0.45}Zr_{0.10})_x(Al_2O_3)_{1-x}$ было показано сильное влияние добавления кислорода в среду распыления композитов на транспорт носителей заряда на переменном токе и, соответственно, вид эквивалентных схем его описывающих.

1. Ю.Е. Калинин, А.Н. Ремизов, А.В.Ситников. Вестник Воронежского государственного технического университета: Материаловедение, **1.13** (2003) 43.
2. A.M. Saad, A.V. Mazanik, Yu.E. Kalinin, J.A. Fedotova, A.K. Fedotov, S. Wrotek, A.V. Sitnikov and I.A. Svito, Reviews on Advanced Materials Science, **8** (2004) 34.