

УДК 621.315

© 1992

ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПРОВОДИМОСТИ РЕЗИСТИВНОЙ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ СТЕКЛА И ОКСИДА РУТЕНИЯ

А. В. Умаров, М. А. Магрупов, Р. Х. Махмудов, Ш. Р. Хамидов

Исследования частотной зависимости проводимости (σ) резистивной композиции на основе стекла и оксида рутения показали, что для образцов с низким содержанием оксида рутения при низких частотах наблюдается мультиплетная модель σ , а для более высоконаполненных образцов при этих частотах σ не зависит от частоты, при более высоких частотах переменного поля наблюдается резкий рост σ . Проводимость композиции при высоких частотах описывается парной моделью. Экспериментальные результаты частотной зависимости σ в интервале частот 10^2 — 10^7 Гц сравниваются с теоретическими расчетами на основе вышеупомянутых моделей.

Несмотря на то что в ряде радиоэлектронных устройств на резистивный элемент подается переменное электрическое поле, частотной зависимости резистивных композиций в литературе уделяется мало внимания. Но исследования показали, что частота переменного поля не в меньшей мере влияет на сопротивление образца, чем температура, особенно при высоких частотах. Кроме того, на основе исследования частотной зависимости можно получить дополнительную информацию о механизме проводимости резистивных композиций в переменном электрическом поле.

Резистивная композиция на основе стекла и двуокиси рутения является неоднородной системой. Имеются работы [1, 2], посвященные исследованию частотной зависимости проводимости σ неупорядоченных систем. Однако такие исследования для подобных композиций не проводились. Целью настоящей работы является исследование механизма σ резистивных композиций на основе стекла и оксида рутения в переменном электрическом поле.

Образцы резистивной композиции на основе боросиликатного стекла СЦНК-77-2 и оксида рутения при различных содержаниях проводящего компонента изготавливались по методике, описанной в [3, 4].

Электропроводность образцов СЦНК + RuO₂ с низким содержанием проводящего компонента с увеличением частоты электрического поля (f) от 10^2 до 10^7 Гц увеличивается и имеет степенной характер вида

$$\sigma \sim f^s. \quad (1)$$

Аналогичная зависимость σ от частоты электрического поля наблюдается и для других неупорядоченных систем (например, [5]).

На рис. 1 представлена частотная зависимость σ для серии образцов СЦНК-77-2 + RuO₂ с различной концентрацией проводящего компонента. Значения показателя степени s в формуле (1) определены дифференцированием кривых зависимости $\lg \sigma$ от $\lg f$. Как видно из рис. 2, в исследованном интервале f в

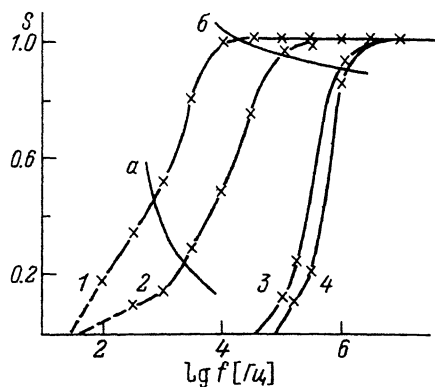
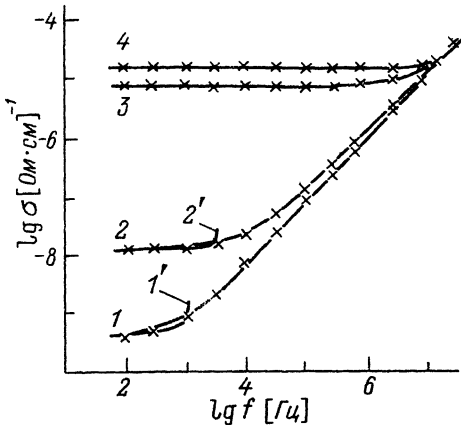


Рис. 1. Зависимость электропроводности композиционных материалов на основе стекла и оксида рутения с различной концентрацией проводящего компонента
 1 — 0.03, 2 — 0.05, 3 — 0.12, 4 — 0.15. 1'—2' — теоретически вычисленные по формуле (2).

Рис. 2. Зависимость степени s в формуле (1) композиции на основе стекла и оксида рутения от частоты переменного поля
 1, 4 — то же, что на рис. 1. a и b указывают границы раздела областей.

зависимости s от $\lg f$ имеются три области с различной частотной зависимостью σ : область I (слева от кривой a), область II, ограниченная кривыми a и b , область III (справа от кривой b). При $f < f_a$ (слева от кривой a) имеет место область линейной зависимости s от $\lg f$. С увеличением объемной доли RuO_2 в композиции значение s уменьшается и граница области I смещается в сторону высоких f . При высоких $f > f_b$ (справа от кривой b) наблюдается область, где значение $s \sim 1$ не зависит от f , причем с увеличением объемной доли двуокиси рутения граница области III также смещается в сторону высоких f . Области I и III разделяет переходная область II.

Проведенный анализ зависимости s от $\lg f$ (рис. 2) в рамках теории частотной зависимости проводимости неупорядоченных систем [1, 2] с учетом физической модели структуры показывает, что при низких $f < f_a$ в образцах СЦНК + RuO_2 с низким содержанием проводящего компонента характер зависимости σ от f может быть описан мультиплетной моделью, т. е. электрон за время полупериода колебания внешнего поля успевает совершить много прыжков между кластерами, состоящими из частиц оксида рутения. Иными словами, он движется внутри некоторой области, размер которой уменьшается с увеличением частоты [1]. Для проверки данного заключения экспериментальные результаты σ сравнили с расчетами, описываемыми формулой [2],

$$\sigma = \sigma' \frac{\pi}{2} \Omega \left[\ln \left(\frac{\pi}{2} \Omega \right) \right]^{-2}, \quad (2)$$

где Ω — безразмерная величина, выведенная на основе мультиплетной модели, σ' — постоянный множитель, характерный для образца. Характерной особенностью начала режима мультиплетных прыжков является рост показателя s с частотой, который стремится к единице по закону

$$s = 1 - 2/\ln \Omega. \quad (3)$$

При вычислении $\sigma(f)$ по (2) величина σ' , которая характеризует значение проводимости образца при критической частоте, когда начинается мультиплетная

область, определена следующим образом. При $s = 0$ в уравнении (3) $\Omega = e^2$, тогда из формулы (2) получим

$$\sigma_{f_0} = \sigma' \frac{\pi}{2} e^2 \left[\ln \left(\frac{\pi}{2} e^2 \right) \right]^{-2}, \quad (4)$$

где σ_{f_0} — величина проводимости образца при частоте f_0 , соответствующая значению $s = 0$, при которой доминирует механизм проводимости по мультиплетной модели. Значение f_0 определено экстраполяцией прямолинейной части зависимости s от $\lg f$ при $s \rightarrow 0$ (рис. 2). Значение σ_{f_0} определено экстраполяцией $\sigma(f)$ к частоте f_0 .

Близость экспериментальных результатов проводимости с расчетными при $f < f_a$ (рис. 1) подтверждает описанное заключение.

Для образцов резистивной композиции с высокой концентрацией V_1 электропроводящего компонента ($V_1 > V_c$, где V_c — порог протекания) для частоты f_c проводимость не зависит от частоты переменного поля. При $f > f_c$ начинается высококачественное пороговое возрастание проводимости за счет связи активной и емкостной компонент тока [6]:

$$f_c = (2\pi\epsilon_{r_2}\epsilon_0\rho_1)^{-1}, \quad (5)$$

где ϵ_{r_2} — диэлектрическая проницаемость связующей части композиции, ϵ_0 — постоянная диэлектрическая проницаемость, равная $8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Для наших образцов расчет по формуле (5) дает $f_c \sim 7 \cdot 10^6$ Гц, что соответствует в пределах ошибки частоте, при которой начинается резкий рост электропроводности для высоконаполненных образцов (рис. 1).

Как известно [7], высокочастотная прыжковая электропроводность в неупорядоченных системах осуществляется за счет электронных переходов между локализованными состояниями с близкой энергией, т. е. между островками из частиц наполнителя. Оптимальные для таких переходов состояния образуют компактные пары, находящиеся на значительном расстоянии друг от друга. В статическом поле переход между парами отсутствует и не может вызвать перенос тока, однако высокочастотное поле осуществляет переходы внутри пар, создавая поляризацию. Переходы внутри пар в высокочастотной области могут происходить как с помощью участия фононов, так и без них. В первом случае, который называется релаксационным, энергия, требуемая для перехода электрона внутри пары, оказывается порядка kT , во втором бесфононном случае эта энергия равна кванту поля $\hbar\omega$. При релаксационном поглощении расстояние между локализованными состояниями внутри пары r определяется из условия, что частота поля порядка частоты переходов внутри пары $\nu_{ph} \exp[-2r/a]$, где ν_{ph} — характерная фононная частота порядка 10^{12} с⁻¹. Отсюда следует

$$r = \frac{a}{2} \ln \frac{\nu_{ph}}{\omega}, \quad (6)$$

где a — радиус локализованного состояния.

Впервые поглощение такого рода было рассмотрено в работе [8], где для случая примесной зоны легированного полупроводника была выведена формула

$$\sigma = \frac{\pi^2}{2} e^2 k T g^2 (\mathcal{E}) a \omega r^4. \quad (7)$$

Здесь $g(\mathcal{E})$ — плотность локализованных состояний в примесной зоне.

Аналогичная зависимость σ от f , связанная с релаксационным поглощением, которую часто применяют для описания аморфных полупроводников, была выведена Остином и Моттом [5].

Более точные расчеты [1] показывают, что в области f , когда применима парная модель, σ неупорядоченных систем описывается выражением

$$\sigma = \frac{256}{3} \pi^2 e^2 kT g^2(\mathcal{E}) \omega \nu r^4 \left[1 + \frac{2\lambda}{\pi} e^{-\beta} \frac{\mathcal{E}_T}{kT} \frac{g^2(\mathcal{E})}{g^2(\mu)} \right], \quad (8)$$

где $\beta = 1/kT$, λ — число порядка единицы [1], $g(\mu)$ — плотность локализованных состояний на уровне Ферми. Выражение (8) близко к зависимости $\sigma \sim f^4$.

Как видно из рис. 2, в области $f > f_b$ (справа от кривой б) значение $s \sim 1.0$. Энергия активации проводимости с увеличением f уменьшается и при $f > f_b$ составляет величину порядка kT . На основе этих результатов можно заключить, что зависимость σ от f резистивной композиции на основе СЦНК + RuO₂ при $f > f_b$ можно описать парной моделью с участием фонона.

Список литературы

- [1] Брыксин В. В. // ФТТ. 1980. Т. 22. № 8. С. 2441.
- [2] Брыксин В. В., Дьяконов М. Н., Муждаба В. М., Ханин С. Д. // ФТТ. 1981. Т. 23. № 5. С. 1516.
- [3] Магруппов М. А., Мирахмедов Ш., Абдурахманов Г. А., Файзиев А. Р., Хамидов Ш. Р. // Изв. АН УССР. 1988. № 2. С. 62—64.
- [4] Магруппов М. А., Мирахмедов Ш., Абдурахманов Г. А., Файзиев А. Р., Хамидов Ш. Р., Вахидова Г. С. // А. с. № 1461277. 1988.
- [5] Мотт Н. Ф., Дэвис Е. А. Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир, 1982. Т. 1, 2. 658 с.
- [6] Харитонов Е. В., Павлюцкий Я. В. // Инж.-физ. журн. 1988. Т. 55. № 5. С. 830—836.
- [7] Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. // ЖЭТФ. 1981. № 1 (7). С. 406—427.
- [8] Pollak M., Gebally T. H. // Phys. Rev. 1961. V. 122. N 6. P. 1742.

Ташкентский государственный университет
им. В. И. Ленина

Поступило в Редакцию
9 сентября 1991 г.