

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТРИЦ С НАНОСТРУКТУРНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

М. Н. Баршутина, С. Н. Баршутин, А. В. Ушаков

ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Рецензент д-р техн. наук, профессор С. В. Фролов

Ключевые слова и фразы: нанобъекты; проводимость полимеров.

Аннотация: Рассмотрены механизмы проводимости гранулированных полимерных матриц с нанобъектами. Показана теоретическая предпосылка возникновения нелинейных вольт-амперных характеристик таких материалов. Проведена экспериментальная проверка на основе полифенилсилоксановой смолы с фуллеренами, показавшая наличие нескольких резонансных потенциалов на вольтамперной характеристике.

Модифицирование полимеров наноструктурными объектами получило широкое распространение в различных областях промышленности. Такие полимеры используют в производстве элементов солнечных батарей, элементов радиоэлектроники, улучшающих служебные свойства тонкопленочных покрытий и т.д. Основной проблемой при синтезе и использовании таких композитных материалов является поиск и контроль концентрации наноструктурных объектов в полимерной матрице, при которых аномально улучшаются служебные свойства получаемого в итоге композитного материала. Прогнозирование количественного соотношения полимера и нанобъектов достаточно сложная задача, которая предполагает изучение широкого диапазона свойств полимера и наноструктурных объектов, начиная с определения механизма электропроводности полимера и нанобъектов до изучения структурного взаимодействия на границе фаз между ними.

Основной причиной возникновения аномальных свойств в рассматриваемых композиционных материалах является наличие межфазовых квантовых взаимодействий в структуре материала. Присутствие в полимерной диэлектрической матрице нульмерных объектов размерами 1...10 нм полупроводниковой или проводниковой природы позволяет рассматривать

Баршутина Мария Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление качеством и сертификация»; Баршутин Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора института энергетики, приборостроения и радиоэлектроники, e-mail: aspirs@yandex.ru; Ушаков Александр Васильевич – аспирант кафедры «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции», ТамбГТУ, г. Тамбов.

данную структуру как гранулированную с квантовыми точками (рис. 1). Описание электронного взаимодействия между подобными структурами, как правило, рассматривается с помощью туннельного гамильтониана [1]

$$H_0 = \sum_k \varepsilon_k a_k^+ a_k + \sum_p \varepsilon_p a_p^+ a_p + \varepsilon_1 a_1^+ a_1 + \varepsilon_2 a_2^+ a_2 + \sum_k (T_{k1} a_k^+ a_1 + T_{k1}^* a_1^+ a_k) + \sum_p (T_{p2} a_p^+ a_2 + T_{p2}^* a_2^+ a_p) + T_{12} a_1^+ a_2 + T_{12}^* a_2^+ a_1, \quad (1)$$

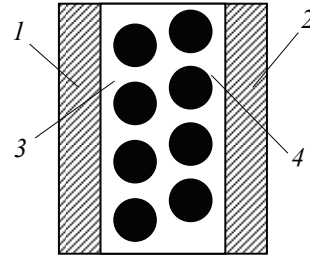


Рис. 1. Структура тонкой пленки гранулированного полимера: 1, 2 – электроды; 3 – нанобъекты (гранулы); 4 – полимер

где ε_j – энергия создания электрона; $j = 1, 2, \dots, k, \dots, p$; a_j^+ – оператор создания электрона; T_{k1}, T_{p2}, T_{12} – матричные элементы; $T_{k1}^*, T_{p2}^*, T_{12}^*$ – эрмитово сопряженные матричные элементы.

В данном случае необходимо учесть наличие в квантовых точках резонансных центров $\sum_f \varepsilon_f a_f^+ a_f$ и включить это взаимодействие в итоговый гамильтониан [2]

$$H = H_0 + H_{\text{res}}; \quad (2)$$

$$H_{\text{res}} = \sum_{kf} T_{kf} (a_k^+ a_f + a_f^+ a_k) + \sum_{pf} T_{pf} (a_p^+ a_f + a_f^+ a_p), \quad (3)$$

где T_{kf}, T_{pf} – матричные элементы гамильтониана между состояниями соответственно k и f, p и f .

Оператор тока определяем по выражению [3]

$$\hat{I} = e\hat{N} = -e \sum_j [a_j^+ a_j, H], \quad (4)$$

где e – заряд электрона; \hat{N} – производная по времени от оператора количества частиц.

После преобразования уравнения (4) определяем ток по формуле

$$I = \frac{e}{2\pi^3} \left[\int \left(\frac{\Gamma [F(\varepsilon_1) - f] |t_{1p}|^2}{\left[\varepsilon_1 - E_0(p_{\parallel}) + \mu - \mu_1 \right]^2 + \Gamma^2} \frac{d\varepsilon_1}{V_{\perp}} d^2 p_{\parallel} \right) + \frac{1}{(4\pi)^2} \int \left(\frac{|T_{1p}|^2}{V_{\perp}} \left\{ \frac{\Gamma [(1+N)f(1-F) - NF(1-f)]}{\left[\varepsilon_1 - E_0(p_{\parallel}) + \omega(q) - \mu_1 + \mu_i \right]^2 + \Gamma_i^2} - \frac{\Gamma [(1+N)F(1-f) - Nf_i(1-F)]}{\left[\varepsilon_1 - E_0(p_{\parallel}) + \omega(q) - \mu_1 + \mu_i \right]^2 + \Gamma} \right\} d\varepsilon_1 d^2 p_{\parallel} d^3 q \right) \right], \quad (5)$$

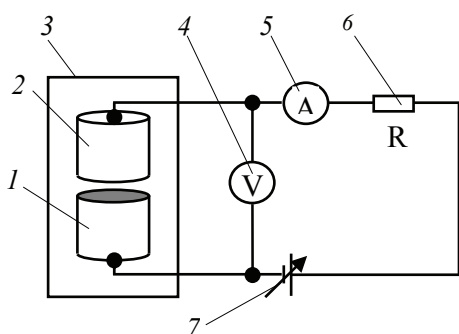


Рис. 2. Схема подключения структуры к измерительной цепи

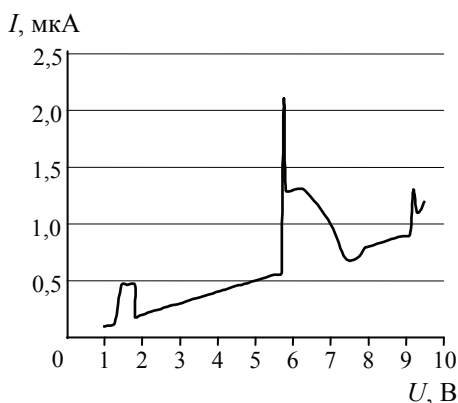


Рис. 3. Вольтамперная характеристика исследуемого образца

рис. 2. В качестве полимерной матрицы выбирали раствор полимера на основе раствора полифенилсилоксановой смолы, модифицированной глифталевым лаком, в толуоле. Для изменения толщины пленки полимерной матрицы и внесения нанобъектов в нее раствор разбавляли в соотношении 1:3 с раствором толуола и фуллерена C60. Полученным составом покрывали полированный торец цилиндра 1 в центрифуге при 2000 об/мин. В итоге образовалась пленка, которая приобрела синий оттенок. Контроль толщины пленки осуществляли на свидетеле с помощью МИИ-4 с когерентным источником света и цифровой обработкой изображения. В результате нанесения и сушки полимерной пленки толщина сформированного слоя составила порядка 150 нм. Затем на торец цилиндра с нанесенным слоем полимера устанавливался второй идентичный цилиндр 2 с полированным торцом и помещался в термостат 3. Сформированная структура подключалась в схему, содержащую вольтметр 4, амперметр 5, резистор 6 сопротивлением 0,47 МОм и регулируемый блок питания 7. Далее определялась зависимость тока от напряжения.

По результатам экспериментов строилась вольтамперная характеристика исследуемого образца (рис. 3), на которой явно прослеживались области с резким изменением проводимости пикового характера, что указывает на резонансный характер.

где Γ – размытие уровня поперечного квантования; f, f_i – среднее число электронов в квантовой яме и на примеси соответственно; μ, μ_1 – уровень Ферми для электронов в квантовой яме и на левом электроде соответственно; F – функция Ферми на левом электроде 1 (см. рис. 1); ε_1 – энергия Ферми левого электрода; p_{\parallel} – продольная составляющая импульса; V_{\perp} – поперечная составляющая скорости носителей тока.

Зависимость (5) содержит лоренцевский член, который при значении энергии уровня Ферми на левом электроде меньше разрешенной энергии уровня нанобъекта приводит к значению тока, равному нулю. Увеличение значения энергии уровня Ферми позволяет появиться упругой компоненте резонансного туннельного тока.

Для исследования подобной структуры разрабатывалась схема подключения структуры к измерительной цепи, представленная на

Список литературы

1. Glazman, L. I. Inelastic Tunneling across Thin Amorphous Films / L. I. Glazman, K. A. Matveev // *Sov. Phys. JETP*. – 1988. – Vol. 67, No. 6. – P. 1276 – 1282.
2. Горловнев, Ю. Ф. Неупругое туннелирование в гетероструктурах на основе ферромагнитных полупроводников / Ю. Ф. Горловнев, Д. А. Нургулеев // *Изв. Тул. гос. университета. Естеств. науки*. – 2009. – № 2. – С. 193 – 202.
3. Брагинский, Л. С. Неупругое резонансное туннелирование / Л. С. Брагинский, Э. М. Баскин // *Физика твердого тела*. – 1998. – Т. 40, № 6. – С. 1151 – 1155.
4. Трусова, Я. В. Структура и электрические свойства объемного керамического композита SrNiO₃–YSZ / Я. В. Трусова, О. Н. Иванов // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2013. – Т. 19, № 4. – С. 880 – 885.

References

1. Glazman L.I., Matveev K.A. *Sov. Phys. JETP*, 1988, vol. 67, no. 6, pp. 1276-1282.
2. Gorlovnev Yu.F., Nurguleev D.A. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennyye nauki*, 2009, no. 2, pp. 193-202.
3. Braginskii L.S., Baskin E.M. *Physics of the Solid State*, 1998, vol. 40, no. 6, pp. 1051-1055.
4. Trusova Ya.V., Ivanov O.N. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 4, pp. 880-885.

Electric Properties of Dielectric Polymeric Matrices with Nanostructured Objects

M. N. Barshutina, S. N. Barshutin, A. V. Ushakov

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: conductivity of polymers; nanoobjects.

Abstract: This paper describes the mechanisms of conductivity of pelletized polymer matrices with nanoobjects; the theoretical assumption for non-linear current-voltage characteristics of these materials has been made. The materials under study have been tested using polyphenyl siloxane resin with fullerenes; the results of the tests showed the presence of several resonant potentials on the current-voltage characteristic.

© М. Н. Баршутина, С. Н. Баршутин, А. В. Ушаков, 2014