

УДК 666.762.52:621.365.06

М.А.Никитин (асп., каф. ЭИКиК), Ю.А.Полонский, д.т.н., проф.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КАРБИДКРЕМНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ МАРКИ КЭН-А И КЭН-Б

В работе рассчитана вольт-амперная характеристика (ВАХ) карбидкремниевых электронагревателей марки КЭН-А и КЭН-Б (ГОСТ-16139).

При рассмотрении процессов, происходящих в электронагревателях, их поликристаллическая микроструктура, содержащая при этом поры (~ 15-20%), моделировалась эквивалентной схемой, состоящей из линейных и нелинейных элементов с сосредоточенными параметрами, которые испытывают случайные вариации при переходе от микрокристаллического зерна (гранулы) к зерну. Нелинейные элементы представляли контакты между двумя зёрнами. Вольт-амперные характеристики контактов могут выбираться в различной форме в зависимости от физической модели [1], например, в форме Шокли $I = I_0(e^{\gamma eu/kT} - 1)$, где I - ток нелинейного контакта, I_0 - обратный ток насыщения, T - температура, e - заряд электрона, k - постоянная Больцмана, $\gamma \sim 1$, или в форме Шоттки $I = I_0 e^{-e(u_k - \gamma|u|)/kT}$, где $I_0 = AT^2$, u_k - высота барьера и т.д. В данной работе ВАХ контакта задавались в соответствии с [2] в виде

$$I = I_0(e^{au} - 1) \quad (1)$$

и допускался случайный разброс величин I_0 и a для различных контактов, что позволяло рассмотреть не только вышеуказанные характеристики типа моделей Шокли и Шоттки, но и промежуточный случай.

Вольт-амперные характеристики модели конгломерата строились на основе решения системы уравнений для токов в эквивалентной схеме при каждом заданном значении напряжения. Уравнения для токов в схеме составлялись методом узловых потенциалов по закону Кирхгофа для отдельных узлов схемы

$$G \times \vec{U} - \vec{I}_0 - F(\vec{U}) = 0, \quad (2)$$

где $\vec{U} = (u_1, u_2, \dots, u_N)$ – вектор узловых потенциалов, G – матрица проводимости, $\vec{I}_0 = (I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0N})$ – вектор токов постоянных источников, $F(\vec{U}) = (f_1(\vec{U}), f_2(\vec{U}), \dots, f_N(\vec{U}))$ – вектор токов нелинейных элементов, его составляющие равны сумме токов нелинейностей (1) в данном узле.

Система (2) решалась методом Ньютона-Рафсона-Канторовича [2], который достаточно эффективен при удачном выборе начального приближения. В качестве начального приближения выбиралось решение системы $G \times \vec{U} - \vec{I}_0 = 0$. Последующие приближения находились по формулам

$$\begin{aligned} \vec{U}^{(k+1)} &= \vec{U}^{(k)} + Y^{-1}(\vec{U}^{(k)}) \times \vec{I}(\vec{U}^{(k)}), \\ \vec{I}(\vec{U}^{(k)}) &= G \times \vec{U}^{(k)} - \vec{I}_0 - F(\vec{U}^{(k)}), \end{aligned} \quad (3)$$

$$Y_{ij}(\vec{U}^{(k)}) = \frac{\partial f_i(G \times \vec{U}^{(k)})}{\partial U_j^{(k)}},$$

где $\vec{I}_0 = (I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0N})$ – в рассматриваемых схемах элементы вектора токов постоянных источников ($I_{01} \neq 0, I_{0j} = 0, j=2, \dots, N$).

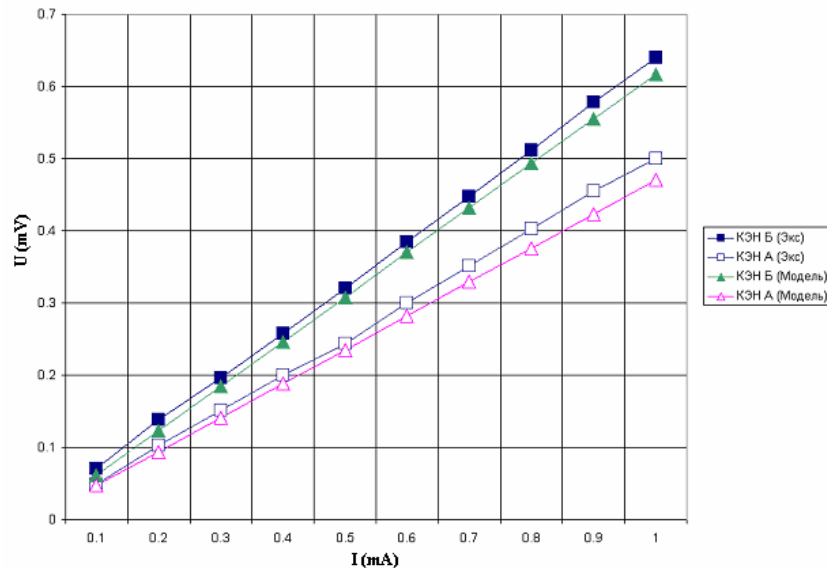


Рис.1. Сопоставление экспериментальных и расчетных результатов

В результате проведенной работы были получены вольт-амперные характеристики электронагревателей марок КЭН-А и КЭН-Б. При их моделировании было учтено распределение зерен по размерам реальных карбидкремниевых электронагревателей [3]. Полученные данные приведены на рис.1. Там же представлены и экспериментальные данные ВАХ электронагревателей марок КЭН-А и КЭН-Б.

Из рис. 1 видно, что, в первом приближении совпадение расчетных и экспериментальных кривых достаточно удовлетворительное. Это дает право полагать, что данная модель будет позволять прогнозировать свойства нагревателей и, в конечном варианте, корректировать технологический процесс изготовления высокотемпературных карбидкремниевых электронагревателей, имеющих существенное значение для различных отраслей современной промышленности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Губанов А.И. Теория выпрямляющего действия полупроводников. М.: ГИТТЛ, 1956. – 348 с.
2. Майор Е.А., Харитонов Е.В. Моделирование на ЭВМ вольтамперных характеристик нелинейных полупроводниковых конгломератов / Электронное моделирование. 1984. Т. 6. № 6. С. 22-26.
3. Карбидкремниевые электронагреватели / Сб. материалов Всесоюзной конференции по нагревателям. 19-21.10.1971, Ленинград // Л.: ВИО, 1975. – 212 с.