

Расчет вольт-амперных характеристик для упрощенной модели варистора*

К.К. Сабельфельд¹, Д.С. Абрамкин², С.Е. Киреев¹, А.Е. Киреева¹

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН¹,
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН²

Варистором называется нелинейный резистор, который используется для стабилизации и защиты электронного оборудования от перенапряжений. Его отличительной чертой является нелинейная вольт-амперная характеристика (ВАХ). Варистор состоит из высокопроводящих гранул (например, Ni, покрытых тонким слоем Al_2O_3), на стыке которых возникает эффект нелинейной проводимости. Исследование связи между электрическими характеристиками варистора и его микроструктурой является актуальной задачей, в частности, для усовершенствования технологии их производства. Целью работы является разработка и реализация алгоритма вычисления динамической ВАХ варистора с учетом его трехмерной микроструктуры, процессов туннелирования электронов и токов утечки. В настоящий момент выполнен первый этап работы: разработан и реализован алгоритм вычисления статической ВАХ для двумерной модели варистора. Варистор представлен в виде массива плотно упакованных шариков (гранул) одинакового радиуса. Заданная микроструктура варистора определяет его электрическую схему. К электродам варистора прикладывается напряжение U_{tot} , и вычисляется протекающий через него ток I_{tot} . Зависимость тока I от напряжения U для контакта между двумя гранулами описывается степенным законом: $I(U) = k \cdot U^\alpha$ [1]. Алгоритм вычисления статической ВАХ следующий. 1) С использованием законов Кирхгофа для электрической схемы варистора составляется система нелинейных уравнений для I , I_{tot} и U . 2) Система решается для заданного значения U_{tot} с помощью метода Ньютона. 3) Шаг 2 повторяется для необходимого множества значений U_{tot} . При реализации метода Ньютона для решения СЛАУ применяется функция LAPACK_dgelsd. Задача расчета ВАХ является трудоемкой, так как нелинейная система решается для многих значений U_{tot} , и для каждого U_{tot} требуется несколько раз решить СЛАУ. Например, расчет ВАХ варистора 21×21 гранул (размер СЛАУ 1254×1253) для $U_{tot} \in [0.1; 30]$ Вольт занимает 17 ч. Следовательно, необходима параллельная реализация алгоритма, которая выполняется путем распределения между MPI-процессами вычислений шага 2 для различных значений U_{tot} . Для расчетов использовался кластер НКС-1П, ЦКП «Сибирский суперкомпьютерный центр СО РАН», узел с Intel Xeon Phi 7290 (KNL). На рис. 1 а представлена эффективность распараллеливания программы для $k = 0.1$, $\alpha = 25$, $U_{tot} \in [0.1; 3000]$ Вольт для варистора 7×7 гранул (размер СЛАУ 127×126). Результаты моделирования (рис. 1 б, в) соответствуют физическим данным: степенному закону $I(U)$ и заданной электрической схеме варистора.

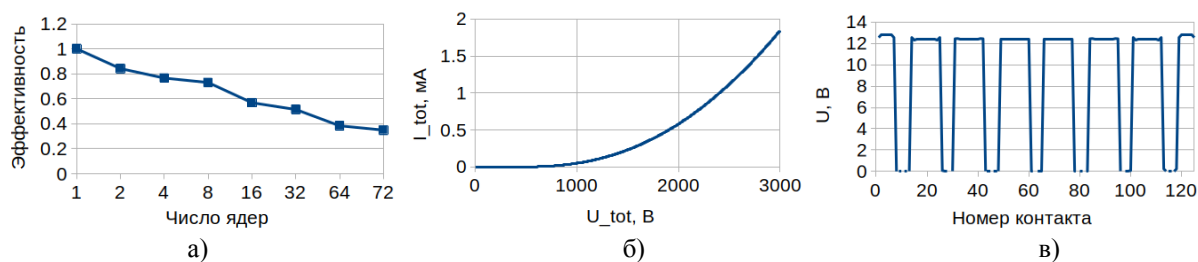


Рис. 1. Эффективность распараллеливания (а), ВАХ варистора (б), значения U на контактах (в)

Литература

1. Weimer M.A., Hakim L.F., King D.M. et. al. Ultrafast metal-insulator varistors based on tunable Al_2O_3 tunnel junctions // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 92. P. 164101–164103. DOI: 10.1063/1.2913763.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-11-00107.