

Моделирование физических процессов в элементе резистивной памяти на основе оксида гафния

С.В. Иванов^{1,2}, Д.Д. Воронов^{1,2}, О.М. Орлов²

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)

²Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»

Данная работа посвящена моделированию физических процессов, протекающих в элементе резистивной памяти на основе оксида гафния. В связи с тем, что разработка энергонезависимой памяти является важнейшей задачей современной микроэлектроники [1], а резистивная память является одним из основных кандидатов на роль «универсальной» памяти [2], данная тема имеет значительную актуальность. Несмотря на существование работоспособных прототипов, мировым научным сообществом не принято единой модели, объясняющей эффект резистивного переключения, а существующие модели имеют ряд недостатков и противоречий [3].

В работе представлена модель элемента резистивной памяти, позволяющая описать процессы записи и стирания элемента памяти, а также получить его вольт-амперную характеристику. Модель разработана для элемента резистивной памяти, представляющего собой МДМ-структуру с активным слоем из оксида гафния и электродами из нитрида титана.

В модели предполагается, что электрическая проводимость активного слоя зависит от концентрации анионов кислорода. Высокая концентрация кислорода соответствует низкопроводящему оксиду гафния, а область, обеднённая кислородом, соответствует высокопроводящему филаменту. Приложение электрического поля и последующий нагрев приводят к термической активации анионов кислорода и их миграции по структуре, что вызывает переключение между состояниями с высоким и низким сопротивлением. Модель основана на следующих уравнениях, описывающих процессы распределения тепла, термической активации и диффузии:

$$\nabla \left(\vec{\sigma}(\vec{r}, n_D) \cdot \vec{\nabla} \varphi(\vec{r}) \right) = 0 \quad (1)$$

$$C_{th}(\vec{r}, T) \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = \nabla \left(K_{th}(\vec{r}, T, n_D) \cdot \vec{\nabla} T(\vec{r}, t) \right) + \sigma(\vec{r}, n_D) \cdot \left| \vec{\nabla} \varphi(\vec{r}) \right|^2 \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_D(\vec{r}, t)}{\partial t} = \nabla \left(D(\vec{r}, T) \cdot \vec{\nabla} n_D(\vec{r}, t) \right) + \mu(\vec{r}, T) \cdot n_D(\vec{r}, t) \cdot \vec{\nabla} \varphi(\vec{r}) \quad (3)$$

$$D(T) = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{k_B \cdot T}\right) \quad (4)$$

$$D(T) = \frac{\mu(T) \cdot k_B \cdot T}{q} \quad (5)$$

$$\sigma^{met} = \frac{\sigma_0}{1 + \alpha(T - T_0)} \quad (6)$$

$$\sigma^{ins} = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_{AC}}{k_B \cdot T}\right) \quad (7)$$

(1) – Уравнение непрерывности для тока, (2) – Нестационарное уравнение теплопроводности, (3) – Второй закон Фика для кислородных вакансий, (4) – Уравнение Аррениуса для коэффициента диффузии, (5) – Соотношение Эйнштейна-Смолуховского для подвижности кислородных вакансий, (6) – Температурная зависимость проводимости металла, (7) – Температурная зависимость проводимости диэлектрика.

Для решения системы были применены специальные методы вычислительной математики. В модели также учитывался нагрев электродов и зависимость теплоёмкости материалов и температуропроводности от температуры.

Проведённые расчёты позволили получить распределение электрического потенциала, температуры и концентрации кислородных вакансий (Рис. 1) по структуре в процессах перезаписи. Это позволило получить электрофизические характеристики элемента памяти (Рис. 2). Полученные результаты показали хорошее совпадение с экспериментом.

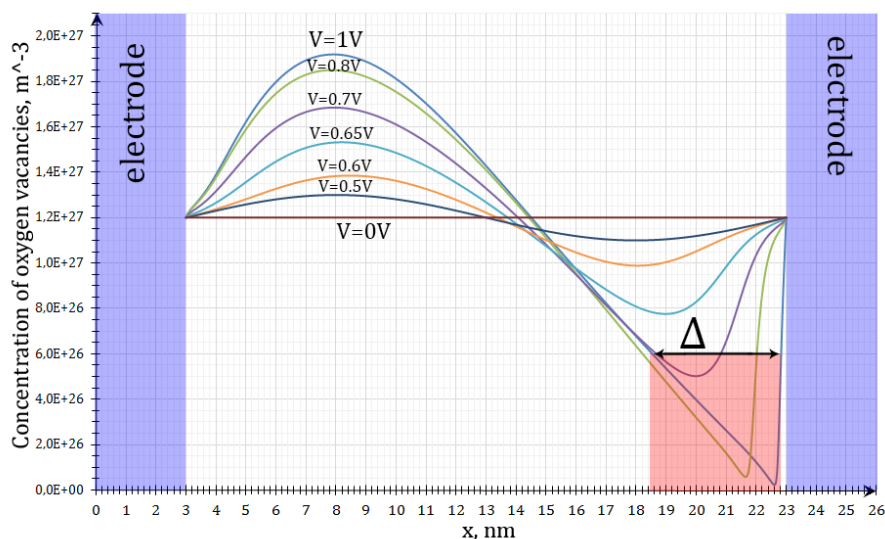


Рис. 1. Распределение концентрации кислородных вакансий по структуре

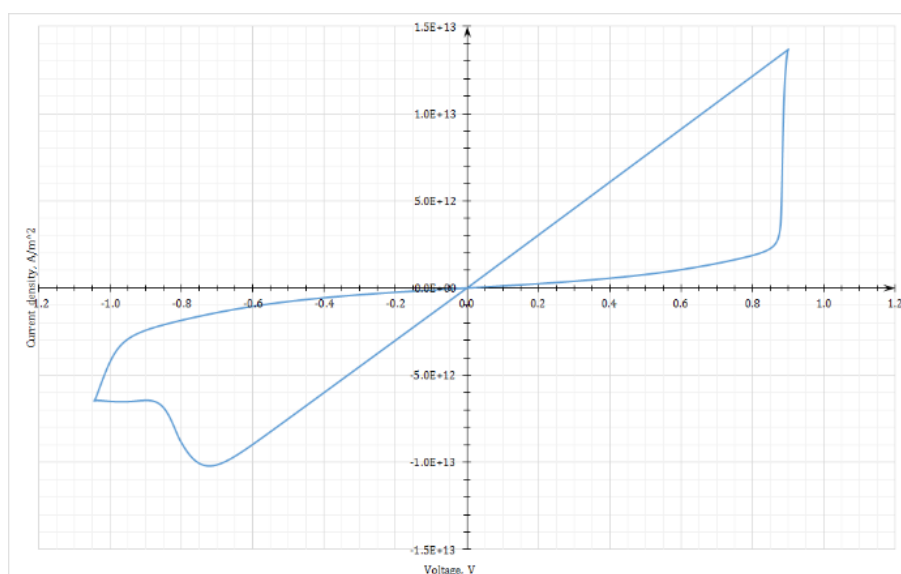


Рис. 2. Рассчитанная вольт-амперная характеристика элемента памяти

Литература

1. Г.Я. Красников, Н.А. Шелепин Состояние и перспективы развития технологий и элементной базы СБИС с энергонезависимой памятью // «Проектирование систем на кристалле: тенденции развития и проблемы». Сборник тезисов, с. 55, 2010.
2. J.S. Meena et al. Overview of emerging nonvolatile memory technologies // *Nanoscale Research Letters*, 9:526, 2014.
3. D. Ielmini, R. Waser Resistive Switching: From Fundamentals of Nanoionic Redox Processes to Memristive Device Applications, 2016