

Исследование физических принципов резистивного переключения в ReRAM-структурах на основе оксида гафния

Ганыкина Е.А.^{1,2}, Резванов А.А.^{1,2}, Горнев Е.С.¹, АО «НИИМЭ»¹, МФТИ (НИУ)²

Актуальность

В настоящее время ReRAM-память является одним из наиболее перспективных видов памяти благодаря энергонезависимости, совместимости с КМОП-технологией, и высокой скорости работы, что в свою очередь позволяет эффективно использовать ее для нейроморфных вычислений [1].

В настоящей работе представлена физическая модель мемристора Au/Ti/HfO₂/Au/Si на основе оксида гафния, описывающая перенос ионов кислорода, теплопередачу, а также протекание электрического тока через структуру.

Описание модели

Данная модель учитывает дрейф, диффузию и термодиффузию кислородных вакансий внутри проводящего слоя, а также протекание тока и теплопередачу во всех направлениях. При отсутствии внешнего электрического поля оксид гафния ведет себя как диэлектрик. Однако, при приложении положительного напряжения происходит разрыв связей Hf-O, приводящий к образованию положительно заряженных вакансий. Отрицательно заряженные ионы кислорода мигрируют по направлению к верхнему электроду, затем временно хранятся в слое Ti-HfO_x [2,3]. Далее, благодаря объединению нескольких эффектов: дрейфа (движущая сила – электрическое поле), диффузии (движущая сила – градиент концентрации), термодиффузии (движущая сила – градиент температуры), кислородные вакансии образуют проводящий слой внутри слоя диэлектрика – филамент (рис.1) [4].

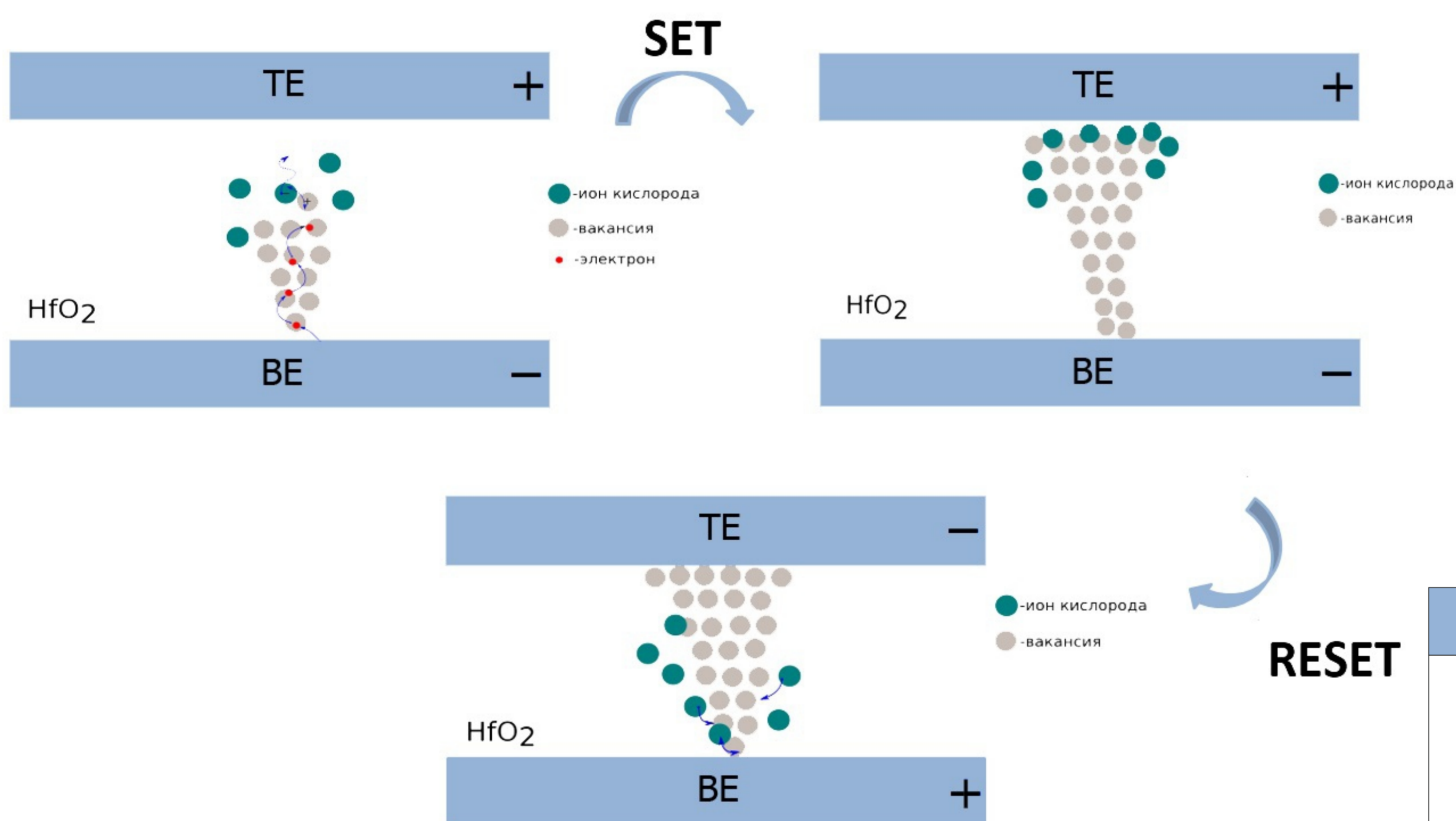


Рис.1 – Схема процессов Set и Reset

Уравнения модели

В модели совместно решаются 3 основных уравнения: уравнение диффузии кислородных вакансий (1), уравнение непрерывности (2) и уравнение теплопроводности (3), представленные ниже.

$$\frac{\partial n_v}{\partial t} + \nabla \cdot (u_v \cdot n_v) = \nabla \cdot (D_v \nabla n_v) + \nabla \cdot (S_v \cdot D_v \cdot n_v \nabla T) \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \nabla \mathbf{J} &= 0 \\ \mathbf{E} &= -\nabla V \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \mathbf{D} &= \varepsilon \mathbf{E} \end{aligned} \right\} \rightarrow \nabla \cdot \left(\sigma \nabla V + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \nabla V \right) = 0 \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \mathbf{q} &= Q_s \\ \mathbf{q} &= -k \nabla T \\ Q_s &= \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = \sigma (\nabla V)^2 \end{aligned} \right\} \rightarrow \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \sigma (\nabla V)^2 \quad (3)$$

Данная модель позволяет получить распределения концентрации кислородных вакансий в процессах SET и RESET при напряжениях от 1 В до -1В (рис. 3). При отрицательном напряжении наблюдается образование обедненной области вблизи нижнего электрода, что приводит к разрыву филамента. При положительном напряжении, благодаря совместному действию дрейфа и термической диффузии, вакансии кислорода мгновенно перегруппировываются в проводящий филамент.

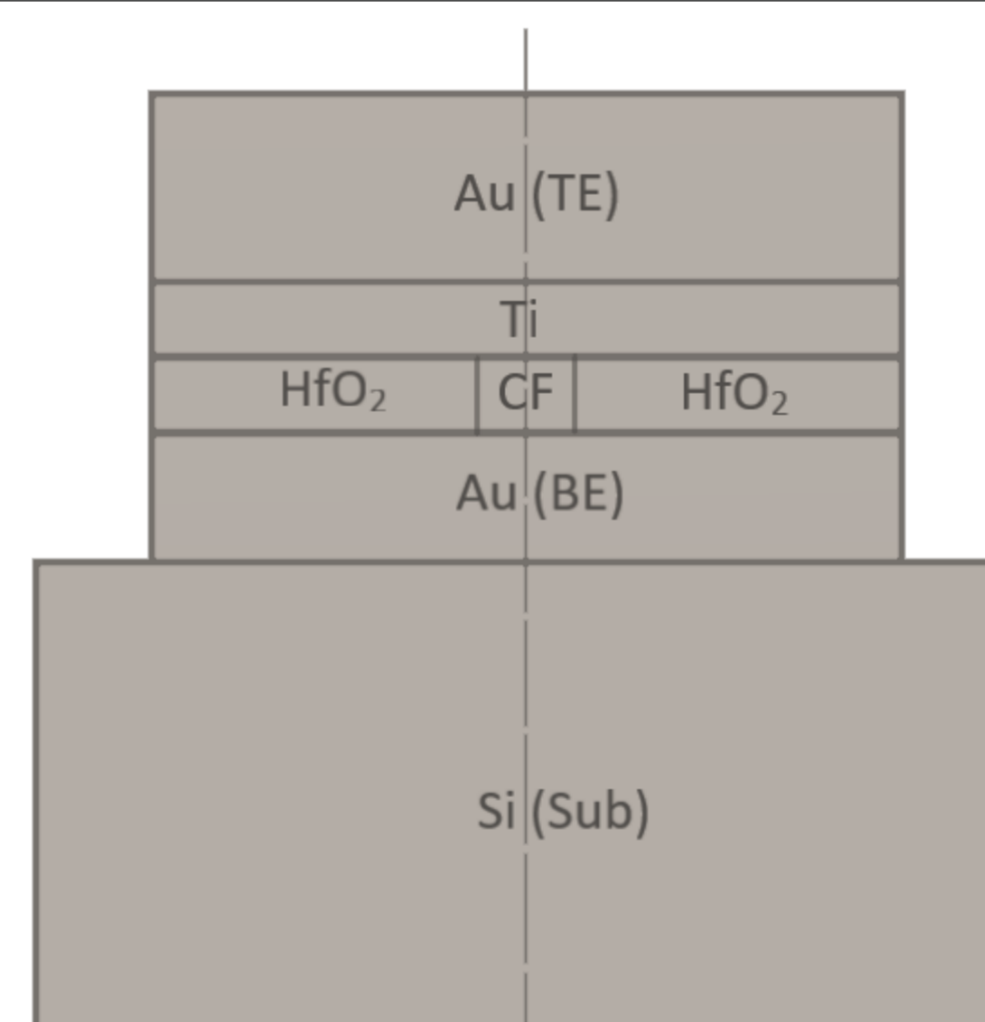


Рис. 2 – 2D-симметричная геометрия структуры

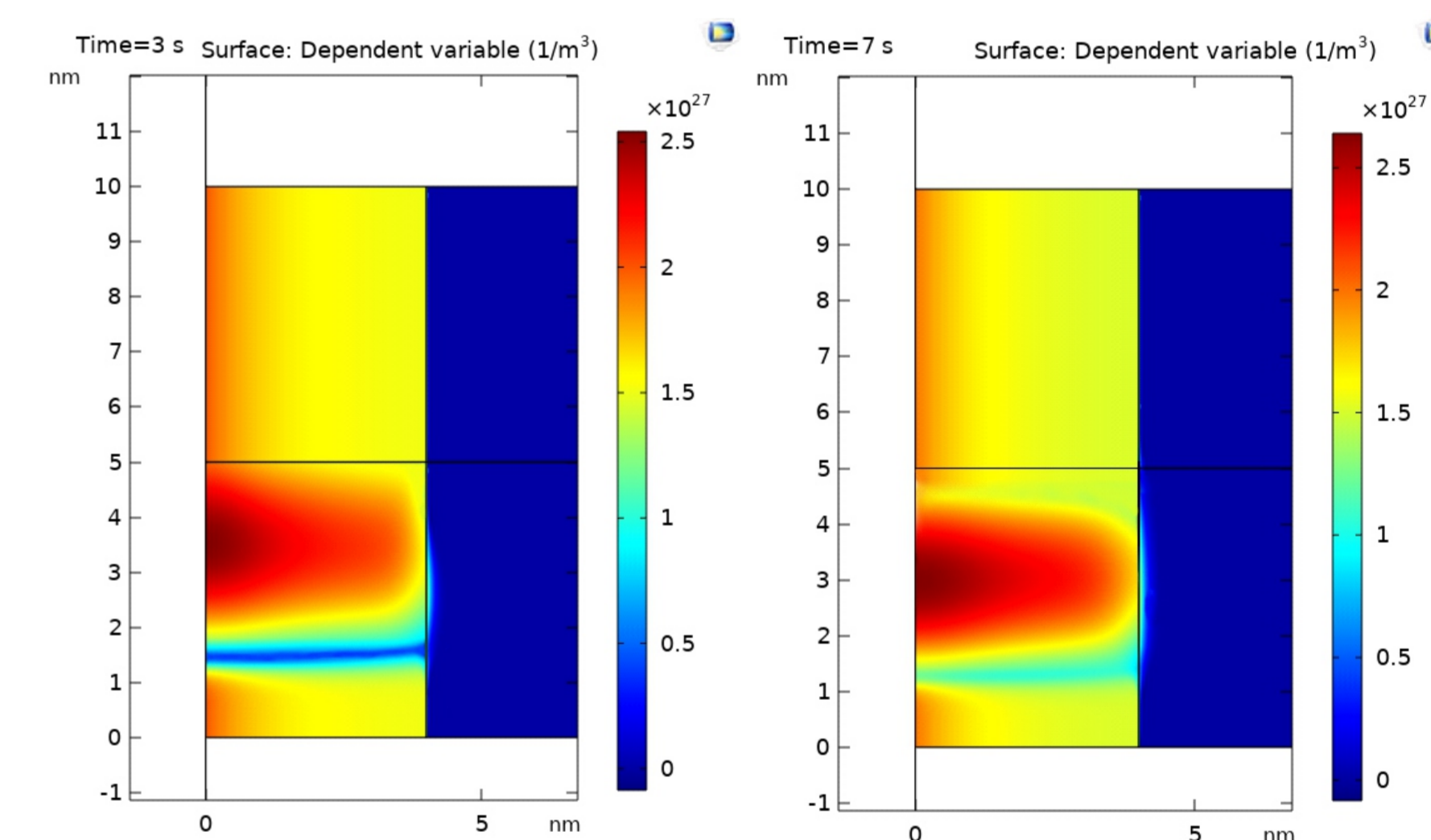


Рис. 3 – Моделирование структуры Au/Ti/HfO₂/Au/Si: состояние Reset (слева) и состояние Set (справа)

Выводы

В работе представлена теоретическая модель мемристора на основе оксида гафния, учитывающая дрейф, диффузию и термодиффузию кислородных вакансий, с помощью которой было получено распределение концентрации вакансий в процессах SET и RESET. Изменение свойств материала, расположение слоев, выбор электродов и подложки сильно влияют на электрические характеристики устройства, однако предложенная модель позволяет точно прогнозировать характеристики резистивного переключения.

Литература

- 1.Красников Г.Я., Зайцев Н.А., Красников А.Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 4 (177). С. 60-64.
- 2.Goux L. OxRAM technology development and performances //Advances in Non-volatile Memory and Storage Technology. – 2019. – С. 3-33.
- 3.Kalantarian A. HfO 2-Based Resistance Switching Non-Volatile Random Access Memory: Low Power Operation and Reduced Variability. – Stanford University, 2015.
- 4.Larentis S. et al. Resistive switching by voltage-driven ion migration in bipolar RRAM—Part II: Modeling //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2012. – Т. 59. – №. 9. – С. 2468-2475.