

Количественная модель униполярного эффекта переключения электрической проводимости в элементах резистивной памяти на основе SiO_x

П.С. Захаров

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»

Эффект обратимого переключения электрической проводимости (ОПЭП) интенсивно исследуется по причине использования его в перспективных элементах энергонезависимой резистивной памяти (ReRAM) [1]. Как правило, в качестве активного компонента в таких устройствах используются тонкие плёнки оксидов переходных металлов, например, циркония, гафния, никеля и др. На их фоне нестехиометрический оксид кремния (SiO_x , где $x < 2$) выделяется максимальной совместимостью с современным технологическим процессом кремниевой микроэлектроники, а потому представляет большой интерес для разработки ReRAM [2].

Ранее была построена феноменологическая модель [3], которая с единых позиций объясняет всю совокупность экспериментальных фактов, наблюдаемых при переключении проводимости SiO_x , включая её зависимость от амплитуды, длительности и крутизны заднего фронта электрических импульсов. Модель базируется на рассмотрении SiO_x как пересыщенного твердого раствора кремния в матрице стехиометрического SiO_2 . Настоящая работа посвящена развитию количественной модели эффекта ОПЭП.

Построение модели проводится с позиций эволюции системы кластеров в виде кремниевых нанокристаллитов в матрице оксида. В низкоомном состоянии система имеет крупнодисперсный характер, а в высокоомном – мелкодисперсный. Предположим, что переход в крупнодисперсное состояние (КДС) происходит вследствие «конденсации» кислородных вакансий (V_O) на поверхности кластеров. В диффузионном приближении скорость «конденсации» определяется выражением:

$$R = CD / r, \quad (1)$$

где C и D – концентрация в растворе и коэффициент диффузии V_O соответственно, r – эффективный радиус кластеров. Переход в мелкодисперсное состояние (МДС) происходит вследствие эмиссии атомов с поверхности кластера. Скорость такого процесса определяется выражением:

$$G = m_s v \cdot \exp(-E_b/kT), \quad (2)$$

где m_s – поверхностная концентрация частиц кластера, v – дебаевская частота, E_b – энергия связи частиц в кластере, T – термодинамическая температура. Эффективный радиус кластеров, а значит и состояние проводимости SiO_x , определяется уравнением массового баланса:

$$dr/dt = w[R - G], \quad (3)$$

где w – объем, приходящийся на одну частицу (атом Si) в кластере.

Поскольку скорости эмиссии атомов и «конденсации» V_O зависят от температуры, направление эволюции системы кластеров и твердого раствора, а, следовательно, и состояние проводимости SiO_x будет определяться характеристиками тепловых импульсов, порождаемых протеканием электрического тока через элемент ReRAM. В работе [4] было показано, что температура в локальных областях тонкой плёнки SiO_x может достигать сравнительно высоких значений порядка 1400°C .

В результате оптимизации E_b и D установлено, что разработанные модельные представления согласуются с экспериментальной картиной на количественном уровне, если $E_b \leq 1,7$ эВ, а энергия миграции E_d кислородных вакансий в твердом растворе, определяющая коэффициент диффузии, не превышает 1,5 эВ. В то же время, другими авторами были получены следующие значения: $E_b = 2-4,7$ эВ [5], $E_d = 2,5-4,56$ эВ [6]. Наблюдаемые расхождения в значениях E_b объясняются тем, что в работах других авторов представлена средняя энергия связи частиц, находящихся как в объеме, так и на поверхности кластера. В настоящей же задаче ключевую роль играют именно поверхностные атомы кластера. Низкое значение энергии миграции можно объяснить, если принять во внимание поля градиента температуры и механических напряжений, в которых происходят процессы диффузии.

Численное решение уравнения (3) дает следующие результаты. В процессе записи (переход в КДС) изменение радиуса кластеров определяется длительностью воздействующего теплового импульса. Результат стирания (переход в МДС) зависит от крутизны заднего фронта импульса. Именно такая картина наблюдается и в реальности. В случае резкого выключения электрического импульса стирания элемент ReRAM SiO_x сохранит высокоомное состояние, в случае плавного – переключится в низкоомное.

Пример решения уравнения (3) с учетом оптимизированных значений параметров представлен на рис. 1. При решении предполагалось, что в процессе перехода в КДС система кластеров в твердом растворе подвергается воздействию теплового импульса трапециевидной формы с длительностью 120 нс и амплитудой 1050°C , а в процесс перехода в МДС – 70 нс и 1400°C .

Разработанная модель с единых позиций объясняет эффект ОПЭП в тонких плёнках SiO_x , связанный с эволюцией пересыщенного твердого раствора и количественно согласуется с экспериментом.

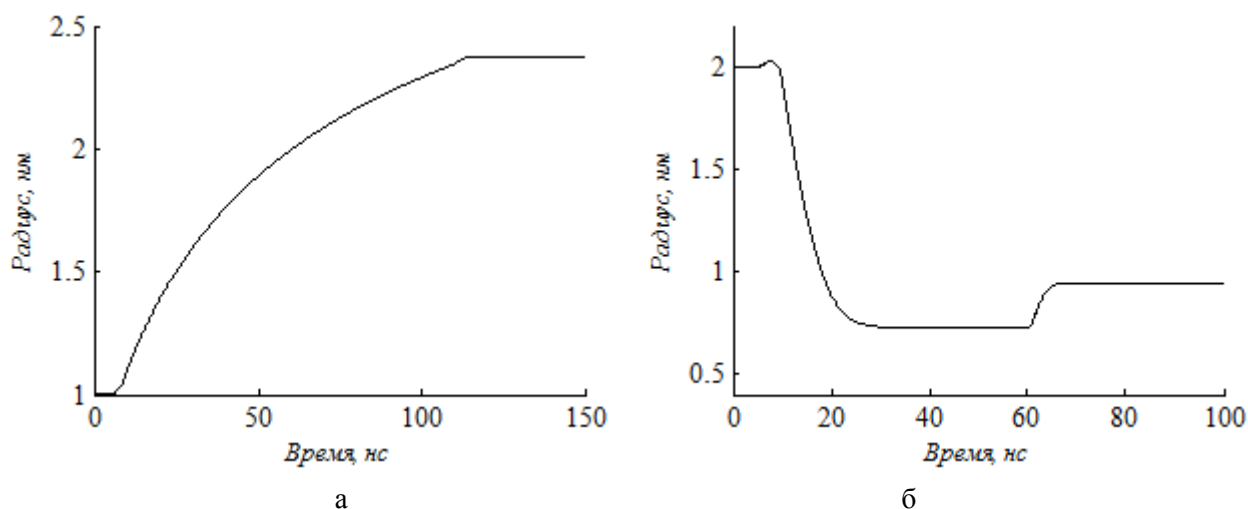


Рис. 1. Изменение эффективного радиуса кластеров а) в процессе записи и б) стирания

Литература

1. *Strukov D.B. and Kohlstedt H.* Resistive switching phenomena in thin films: Materials, devices, and applications // *MRS Bulletin*, 2012. V. 37, P.108-114.
2. *Wang G.[et al.]* High-Performance and Low-Power Rewritable SiO_x 1 kbit One Diode–One Resistor Crossbar Memory Array // *Adv. Mater.* 2013, V. 25, P. 4789-4793.
3. *Захаров П.С., Итальянцев А.Г.* Эффект резистивного переключения в структурах памяти на основе оксида кремния // *Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника*, 2015. Вып. 3 (159), С. 5-10.
4. *Захаров П.С., Итальянцев А.Г.* Математическое моделирование распределения температуры в ячейке резистивной памяти на основе оксида кремния // *Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника*, 2015. Вып. 4 (160), С. 69-72.
5. *Курганский С.И., Борц Н.А.* Геометрическая структура и спектральные характеристики электронных состояний кремниевых наночастиц // *ФТП*, 2004. Т. 38, С. 580-584.
6. *Yu D.* Multiscale Modeling of Formation and Structure of Oxide Embedded Silicon and Germanium Nanocrystals: PhD dissertation. - Austin, 2005. – 140 p.