

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

**621.382; 621.315**

Ремизевич Максим Владиславович

Элементы резистивной памяти на основе наноструктур с оксидами переходных металлов

### **АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-41 80 03 Нанотехнологии и наноматериалы (в электронике)

---

Научный руководитель  
Данилюк Александр Леонидович  
кандидат физ.-мат. наук, доцент

---

Минск 2019

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В научных центрах многих стран ведутся разработки методов получения наноразмерного оксида гафния на кремниевой подложке и других материалах, наноструктур на его основе, интенсивно исследуются его электрические, структурные и спектроскопические характеристики и параметры, проводятся исследования изменения свойств оксида гафния в результате электроформовки. На этом пути достигнуты внушительные результаты, основными из которых является получение стабильного наноразмерного слоя оксида гафния, переключаемого низким потенциалом.

Однако, остается еще много нерешенных задач, наиболее важными из которых являются выявление механизма переключения оксида гафния из высокоомного в низкоомное состояние, идентификация механизмов токопереноса при наличии высокой концентрации ловушек, определение вклада тепловых процессов при протекании тока через оксид гафния в его проводимость. Анализ опубликованных экспериментальных результатов и проведенного анализа позволил предположить, что переключение проводимости в наноструктурах резистивной памяти, содержащих оксидные диэлектрики, обусловлено синхронным изменением конфигурации бистабильных зарядовых центров (обратимым изменением их пространственной конфигурации и электронной структуры) за счет электрон-фононного взаимодействия, приводящего к изменению зарядового состояния этих центров. Синхронное изменение конфигурации бистабильных зарядовых центров обуславливается действие флуктуаций заряда, оно контролируется шумовой компонентой, действующей на электрон-фононную подсистему.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы магистерской диссертации.**

В настоящее время наноструктуры на основе оксидов металлов, в том числе оксида гафния, перспективны для применения в качестве подзатворных диэлектриков в металл-окисел-полупроводник (МОП) транзисторах и энергонезависимой резистивной памяти с произвольной выборкой. Оксид гафния имеет высокую диэлектрическую проницаемость в сочетании с большой энергией запрещенной зоны и характеризуется термодинамически стабильной границей с кремнием. Оксид гафния является весьма важным элементом наноструктур для резистивной памяти (RRAM) из-за того, что его формовка в электрическом поле (dielectric breakdown) приводит к переключению в состояние с низким сопротивлением, а также возникновению высокой плотности ловушек, обуславливающих токоперенос в нём и возможность длительного хранения заряда (до  $10^6$  -  $10^7$  с).

**Цели и задачи исследования.** Целью является выявление особенностей механизма переключения оксида гафния из высокоомного в низкоомное состояние, обусловленных метастабильными состояниями, сформированными в наноразмерном оксиде гафния при обратимом электрическом пробое.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- оценка параметров ловушек, сформированных в наноразмерном оксиде гафния при обратимом электрическом пробое.
- расчет времени переключения проводимости оксида гафния при обратимом электрическом пробое.
- анализ механизмов изменения зарядового состояния ловушек.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является наноструктура металл / оксид гафния/металл (кремний).

Предметом исследования является закономерности изменения сопротивления оксида гафния при обратимом электрическом пробое.

**Связь работы с приоритетными направлениями научных исследований и запросами реального сектора экономики.**

Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники и в Центре 4.11 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники за время обучения в магистратуре. Работа соответствует приоритетному направлению научных исследований 00006 Электроника и фотоника

**Основное положение диссертации, выносимое на защиту.** На защиту выносятся следующее основное положение:

В зависимости от значений конфигурационных параметров ангармонический бистабильный потенциал ловушечных центров изменяет свою симметрию, а также глубину и ширину потенциальных ям, что приводит к синхронизированному переключению ловушечных состояний в диоксиде гафния из одного метастабильного состояния в другое за время порядка нескольких наносекунд при воздействии шума по механизму Пула-Френкеля с участием многофононных взаимодействий, характеризующихся сильной электрон-фононной связью.

**Личный вклад соискателя.** Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Во время работы над диссертацией соискателем были изучены математические модели переключения бистабильных ловушек при наличии периодической силы, связанной с электрон-фононным взаимодействием и воздействием шума, разработана методика моделирования синхронизации переключения бистабильных ловушечных состояний при обратимом электрическом пробое диоксида гафния. Обсуждение полученных расчетных данных проводилось совместно с научным руководителем, кандидатом физико-математических наук, доцентом Данилюком А. Л.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты исследований, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных конференциях: 27-й международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния», 55-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР и 17-й Белорусско-российской научно-технической конференции, а также опубликованы в виде соответствующих тезисов и материалов конференций.

**Публикации.** Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 3 опубликованных работах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из титульного листа, общей характеристики работы, введения, трех глав, заключения, списка использованных источников из 32 наименований, графического материала. Полный объем диссертации составляет 85 страниц, в том числе 36 рисунков.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** описаны особенности устройства и работы элементов резистивной памяти, переключения состояний проводимости и поставлены задачи, которые необходимо решить.

Во **второй главе** рассмотрены электрические характеристики наноструктур с оксидом гафния в режиме обратимого электрического пробоя

В **третьей главе** представлены результаты расчета параметров ловушек в оксиде гафния при обратимом пробое, времени переключения проводимости и времени хранения заряда.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено компьютерное моделирование электронных свойств метастабильных атомарных структур, возникающих в оксидных диэлектриках при формовке в электрических полях, содержащих кислород и кислородные вакансии. Показано, что при наличии периодического воздействия и шума возможны переходы из одного метастабильного состояния в другое состояние. Такие переходы существенно зависят от соотношения глубин потенциальных ям и определяются уровнем шума.

Проведено компьютерное моделирование зарядовых свойств бистабильных электронных центров, возникающих в оксидных диэлектриках при формовке в электрических полях. Установлено, что ионизация ловушек в оксиде гафния происходит по механизму Пула-Френкеля с участием многофононных взаимодействий, характеризующихся сильной электрон-фононной связью. Рассчитано время туннелирования дефекта из основного состояния в состояние ионизированного центра и свободного электрона с нулевой кинетической энергией, его значение по порядку величины соответствует ловушке с энергией 0,5 эВ.

Проведены расчеты концентрации ловушек, их энергии и времени хранения заряда. Проведенные расчеты времени хранения заряда на ловушках показали, что вероятнее всего центры в оксиде гафния являются метастабильными, способными изменять свою конфигурацию в зависимости от зарядового состояния и величины внешнего поля.

Полученные результаты могут найти практическое применение при разработке элементов и устройств резистивной памяти на основе наноразмерных слоев оксидных диэлектриков, при подготовке инженеров и специалистов соответствующих специальностей в ВУЗах РБ, а также являться основой для дальнейших разработок экспериментальных методов формирования структур с элементами резистивной памяти, отличающимися конкурентными параметрами функционирования, такими как время переключения, низкое внешнее смещение (а значит и энергопотребление) и стабильность, а также для создания новых магнитных нанокompозитов для спинтроники.

Получены новые данные о закономерностях и механизмах поведения элементов резистивной памяти на основе наноструктур с оксидами переходных металлов в условиях обратимого электрического пробоя.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

[1-А] Ремизевич М. В. Переключение и синхронизация бистабильных ловушечных состояний / М. В. Ремизевич // ФКС XXVII: материалы конференции. – Гродно : ГрГУ, 2018 – С. 122-123.

[2-А] М.В. Ремизевич, А.Л. Данилюк. Спинтронные элементы резистивной памяти. // Технические средства защиты информации. Тезисы докладов XVII Белорусско-российской научно-технической конференции, г. Минск, 11 июня 2019 г. – С. 60.

[3-А] Ремизевич М.В. Электронные свойства метастабильных атомарных структур в оксидных диэлектриках при формовке в электрических полях. // Материалы 55-й Юбилейной Научной Конференции Аспирантов, Магистрантов и Студентов 22-26 апреля, БГУИР, Минск – (3 стр.)