

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Окулич Евгении Викторовны на тему:
«Ионно-лучевая модификация параметров мемристоров на основе SiO_x
и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ и имитационное моделирование их радиационной стойкости»,
представленной на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук по специальности 2.2.2 Электронная компонентная база
микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств

Диссертационная работа Окулич Е.В. посвящена вопросу улучшения и моделирования потребительских характеристик мемристоров, в которых качестве диэлектрического слоя используется оксид кремния с различными стехиометрическими коэффициентами или диоксид циркония, стабилизированный итрием. Востребованность мемристоров как элементной базы на новых физических принципах обусловлена необходимостью как в быстродействующей, энергонезависимой и компактной памяти, так и в элементах для реализации «вычислений в памяти» при векторно-матричном умножении. Использование мемристоров в кроссбаре для такой операции основано на аналоговом умножении вектора напряжений на проводимости мемристоров в столбце и последующим суммированием в каждом из них. В связи с тем, что удовлетворяющие требованиям одновременно по всем потребительским характеристикам мемристоры пока не созданы, соответствующие работы весьма актуальны и практически значимы.

К таким характеристикам мемристора относятся стабильность резистивного состояния, выносливость, пластичность, напряжение и время формовки, переключения и чтения, время хранения состояния и др. Учитывая довольно высокий уровень готовности технологии, подтвержденный успехами мировых и отечественных коллективов по созданию мемристоров, следует проводить именно комплексный анализ всех потребительских характеристик.

Новизна работы заключается в развитии путей улучшения воспроизводимости рабочих параметров и радиационной стойкости мемристоров на основе SiO_x и $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ с помощью проведения экспериментальных исследований, молекулярно-динамическое моделирование и разработки подходов к имитационным испытаниям радиационной стойкости.

В ходе выполненной работы были предложены и обоснованы решения следующих задач. Улучшение воспроизводимости ряда рабочих характеристик мемристоров — напряжений переключения между состояниями и величинами токов в них, формы гистерезиса BAX , — предложено выполнить путем формирования контролируемых концентраторов электрического поля, а также введением примесных атомов или дефектов с управлением их пространственного распределения. После облучения мемристоров с диэлектриком SiO_2 ионами H^+ и Ne^+ стабилизируются случайные выбросы токов после переключения; ионами Xe^+ — увеличивается окно сопротивлений, снижается разброс напряжений формовки, а также снижается влияние случайных факторов вследствие формирования филаментов в каскадах смещения; ионами Si^+ с последующим отжигом — повышения воспроизводимости и улучшение резистивного переключения вследствие формирования концентраторов электрического поля. Для мемристоров на основе $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ аналогичные улучшения выявлены лишь при облучении ионами Si^+ .

С помощью программ VMD, SRIM, и LAMMPS и собственных разработок на языке Python выполнено моделирование обработки структур SiO_x с различной стехиометрией при облучении ионным пучком и отжиге при 1500 K с отслеживанием эволюции в течение 100 нс, достаточном для оценки процессов перестройки структуры филамента. Выявлено, что облучение ионами Si^+ приводит к образованию нанокластеров Si-Si_n ($n > 5$), близких по структуре к кристаллическому кремнию. При высоких температурах в филаментах происходят динамические изменения структуры, включая образование и распад нанокластеров. Миграция кислорода из зоны филамента усиливает рост кластера, обратное движение приводит к их разупорядочиванию. Для коэффициента $x=1,1$ наблюдается формирование проводящих каналов благодаря сильным отклонениям от стехиометрии.

Для оценки радиационной стойкости мемристоров к воздействию ионизирующего и дефектообразующего излучения разработана методика имитации радиационных воздействий с использованием ионов средних энергий. В мемристорах на основе SiO_2 , ZrO_2 , $\text{ZrO}_2(\text{Y})$, HfO_2 выявлено сохранение переключаемости из СНС в СВС до доз, эквивалентных экстремально высоким радиационным нагрузкам. При облучении протонами и ионами наблюдаются обратимые изменения токов в состоянии СВС, которые устраняются после одного цикла переключения. В состоянии СНС изменения токов практически отсутствуют. Наблюдаемые эффекты объясняются локализацией тока в узких филаментах, где накопленные дефекты частично компенсируются процессами восстановления и окисления при переключении. Такие дефекты, как ловушки зарядов и точечные дефекты, не вызывают необратимых изменений параметров.

По теме работы с 2015 г. опубликовано 42 печатных работы, в том числе 7 статей; результаты представлены на 23 конференциях и применены в 6 НИР.

Достоинством работы является глубокая проработка поставленных задач, обеспеченная достаточным количеством результатов моделирования и исследований с последующим обсуждением полученных результатов.

В качестве недостатков следует отметить следующие: (1) отсутствие математических формул и выражений в автореферате затрудняет точность передачи научных результатов; (2) недостаточно полный анализ влияния изменения свойств материалов на весь перечень потребительских характеристик. Например, обратной стороной предложенного в работе облучения для улучшения части характеристик являются радиационные повреждения структуры, а примененное в пленке отклонение от стехиометрии — снижение долговечности. Такие изменения потенциально могут уменьшить одну из ключевых характеристик — время хранения состояния, но исследования по этому вопросу не проведены.

Однако указанные недостатки не снижают ценности научной и практической составляющих диссертации.

Таким образом, представленная работа соответствует требованиям ВАК к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор — Окулич Евгения Викторовна заслуживает присуждения учёной степени по специальности 2.2.2 Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Начальник отдела перспективных исследований АО «НИИМЭ»,
доцент базовой кафедры микро-
и нанoeлектроники МФТИ, к.т.н.

Подпись Тельминова О.А. удостоверяю

Тельминов Олег Александрович

О.А. Тельминов

22.11.2024г.

Николаев Олег Александрович

М.П.

Полное наименование организации: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»

Адрес: 124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6, стр. 1

Тел: +7 495 229 70 00, Факс: +7 495 229 77 73

E-mail: niime@niime.ru, сайт: www.niime.ru