

Отзыв научного руководителя

на диссертацию Бутэ Ирины Владимировны

«Процессы теплопроводности и диффузии в эффекте резистивного переключения с памятью в тонкопленочных оксидных структурах»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника

Диссертационная работа И. В. Бутэ посвящена одной из актуальных задач современной электроники в области разработке систем хранения информации, исследованию униполярной энергонезависимой резистивной памяти (ReRAM) на основе бинарных оксидов металлов. Такая память сочетает в себе простоту и технологичность синтеза, а также возможность переключения униполярными импульсами, что позволяет разрабатывать перспективную схемотехнику микросхем по технологии 3D cross-point memory.

Кроме технологических проблем в разработке ReRAM исследователи имеют и ряд нерешенных задач фундаментального характера, касающихся, прежде всего, проблемы определения механизма переключения в перспективных материалах такой памяти – оксидах переходных металлов. Безусловно, эффект электрической неустойчивости, сопровождаемый шнурованием тока при униполярном переключении в MOM структурах на основе оксидов переходных металлов – это базовый физический принцип переключения, подтвержденный многочисленными экспериментами. Но динамика формирования переключающего канала остается вне поля внимания исследователей, а механизм его разрушения до конца не определен. Хотя устоявшаяся точка зрения на переход в высокоомное состояние в оксидных ячейках памяти существует, эта концепция (теплоиндуцированное окисление канала в условиях джоулева нагрева) воплощается в упрощенных моделях стационарного приближения. Это не позволяет ни проследить кинетику процесса переключения, ни применить сравнительный анализ различных режимов формирования и работы оксидных ячеек памяти.

Основная идея исследования Бутэ И. В. состоит в применении макроскопического подхода на основе хорошо известных уравнений теплопроводности, диффузии и непрерывности тока к анализу пространственно-временных параметров формирования и разрушения проводящего канала на примере MOM структуры Pt/NiO/Pt. При этом входными данными моделирования являются термодинамические параметры материалов (проводимость, теплопроводность, теплота плавления и пр.) достоверность которых с точки зрения физического измерения чаще всего выше, чем микроскопических (сечения

рассеяния, частоты колебаний и пр.). Именно поэтому такой подход показался автору работы действенным и перспективным по сравнению со сложными, но не обязательно более точными схемами расчета по уравнениям микроскопической динамики.

Данную научно-исследовательскую работу можно разделить на два взаимодополняющих друг друга направления. Первое из них это теоретический анализ с помощью моделирования результатов эксперимента по электрической формовке структуры Pt/NiO/Pt. Автору убедительно удалось показать, что в процессе электрической формовки “движущей силой” расширения канала является достижение теплоты плавления оксида никеля в прилегающих к каналу участках, что в свою очередь определяется максимальным током разряда структуры, то есть не его продолжительностью, а амплитудой. При этом вклад в амплитуду вносит как ток источника, так и емкость структуры, а разным их соотношениям может соответствовать одинаковый максимальный ток. Можно отметить в связи с этим, что не учет в экспериментах паразитной емкости синтезируемых структур и подводящих контактов приводит к нестабильности размеров формируемых каналов, их множественному шнурованию или к необратимому пробое. И все эти негативные с точки зрения практического применения факторы, как показано в диссертационной работе, могут определяться только одним, общим, контролируемым в эксперименте параметром – максимальным током разряда структуры.

Второе направление теоретического исследования работы – моделирование процесса разрушения проводящего канала на основе концепции диффузионного окисления. Преодоление в данной работе недостатков ранних упрощенных моделей этого механизма базируется на общей концепции нестационарного режима процессов теплопроводности и диффузии, а также на представлении нелинейного роста окисления канала. Для этого в процессе анализа вначале была решена аналитическая задача диффузии, когда для распределения по координате используется стационарное решение, а зависимость от времени определяется движением границы окисления. На основе этого решения была оценено возможное время переключения в высокоомное состояние сравнимое с экспериментом, а далее, разработан алгоритм расчета нестационарного уравнения диффузии никелевых вакансий.

Результаты моделирования говорят о решающем факторе именно механизма диффузионного окисления никелевыми вакансиями на разрушение канала. Кроме того, определены две противоположные картины кинетики этого процесса: в режиме генератора тока и генератора напряжения. С практической точки зрения стабильности циклов переключения важно, что бы разрыв канала за счет его сквозного окисления был как можно более полным, с отсутствием в новом высокоомном состоянии

недоокисленных металлических фрагментов в глубине пленки. Такому условию лучше всего подходит режим с заданием тока источника или большого балластного сопротивления, что установлено ранее экспериментально, а в данной работе объяснено и показано на основе теоретического анализа. Также в работе Бутэ И. В. определена оценка переключающего тока, при котором будет выполняться переход в высокоомное состояние, а также установлено время этого перехода, резко падающее с даже с небольшим уменьшением напряжения.

Указанные научно значимые результаты стали возможными благодаря целенаправленной работе И. В. Бутэ над темой диссертации, которая является продолжением ее исследований еще в магистратуре Петрозаводского государственного университета. Особой отметки заслуживает качество проведенного численного моделирования в плане разработки программ на основе сравнительного анализа различных алгоритмов, их тестирования по результатам упрощенных аналитических решений, а также с точки зрения детального обзора справочных материалов по исследуемым объектам.

Считаю, что диссертационная работа И. В. Бутэ представляет собой целостное исследование, имеющее большие перспективы для продолжения решения актуальной научной проблемы, и может быть представлена к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Научный руководитель, кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры Электроники и Электроэнергетики, ПетрГУ *Ворисов* Борисов П.П.

Подпись руки <i>доц. П.П. Борисова</i>
УДОСТОВЕРЯЮ.
Уч. секретарю ученого совета <i>К</i>
« 17 » 03 2016 г.

