

## О Т З Ы В

официального оппонента д. ф-м. н. профессора Левшина Н.Л. на диссертационную работу 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 одному из центральных вопросов электроники – проблеме записи информации. Рассматривается альтернативный по отношению к широко используемой записи информации на ферромагнитных материалах подход – резистивное переключение в оксидных пленках. Большая часть работы представляет собой подробное описание характеристик процесса переключения в пленке, полученное на основании экспериментальных данных и вычисления ряда характерных параметров. На основании этой картины предложены физические механизмы переключения. Все это делает тему исследования И.В. Бутэ актуальной с фундаментальной и практической точек зрения.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, четырех приложений и списка литературы. Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи, научная новизна и научно-практическая значимость работы. Изложены основные положения, выносимые на защиту, приводится список публикаций и сведения об апробации работы.

Первая глава представляет собой обзор литературы. В ней кратко описаны возможные способы записи информации. Более подробно автор остановилась на создании элементов памяти на основе оксидов металлов, в частности NiO. Таким образом, значительная часть обзора диссертации посвящена свойствам оксида никеля, возможным дефектам структуры оксида, эффекту переключения в этом материале. Рассматриваются не только электрофизические свойства NiO, но и его тепловые характеристики. Автором работы убедительно показано, что в настоящее время накоплен значительный экспериментальный материал по оксиду никеля и настало время обработки этих результатов, аналитических оценок и создания моделей переключения в NiO.

Во второй главе рецензируемой работы представлены экспериментальные исследования автором структур Pt – NiO – Pt. Пленки NiO наносились на никелевые

подложки стандартным методом магнетронного распыления. Следует отметить, что состав полученных пленок определялся с помощью спектрографа, а толщина измерялась двумя независимыми методами: по сдвигу частоты пьезокварца и с помощью эллипсометра. Полученные образцы демонстрировали переключение с двумя состояниями, соответствующими высокоомной и низкоомной ветвям вольт-амперной характеристики. В этой же главе рассмотрены аналитические оценки задачи моделирования, включающие в себя размеры канала, а также величины температур при пробое и распределение температур в канале и за его пределами.

Третья глава посвящена описанию самой методики моделирования. Исходные уравнения учитывали основные этапы переключения, соответствующие рассматриваемой модели. Основным механизмом переключения предполагается процесс расширения проводящего канала после пробоя за счет быстрого выделения тепла плавлением NiO и сплавлением никелевых кластеров. Обратный переход в высокоомное положение предполагает окисление канала при повышении температуры путем диффузии никелевых вакансий из окружающего канала оксида никеля.

Четвертая глава описывает моделирование перехода в низкоомное состояние при пробое структуры Pt – NiO – Pt. Пробой в структуре происходит в виде образования тонкого канала радиусом 1-4 нм. В дальнейшем канал расширяется за счет присоединения новых атомов Ni и ухода никелевых вакансий в объем из канала. Границей канала автор считает границу плавления NiO. Определены характерные времена всех стадий рассмотренных процессов. В настоящей работе было рассмотрено изменение формы проводящего канала в процессе разряда. Кроме того были получены аналитические выражения, по которым можно было определить различные функциональные зависимости, характеризующие изменение всевозможных параметров в процессе разряда. Четвертая глава завершается сравнением вычисленных параметров переключения в NiO с экспериментальными данными. Экспериментальные и вычисленные параметры процесса переключения совпадали с точностью до погрешностей эксперимента.

В пятой главе рассматривается одна из стадий переключения – окисление проводящего канала в структуре Pt – NiO – Pt. Автор считает, что повышение температуры в канале при прохождении тока приводит к окислению проводящего канала никелевыми вакансиями, диффундирующими из объема пленки. Такие процессы окисления способствуют переходу образца в высокоомное состояние. При расчетах учитывалась передача тепла, как в радиальном направлении, так и на электроды. Кроме того принималась во внимание температурная зависимость теплоемкости, теплопроводности, электропроводности и коэффициента диффузии.

В заключении подводятся итоги полученным результатам, сформулированы выводы диссертационной работы.

Остановимся на основных достоинствах рецензируемой работы. Следует признать удачным выбор объекта исследования. Процессу переключения в NiO посвящено немало статей. Само переключение в данном материале происходит со значительным скачком сопротивления. Все это позволяет считать NiO хорошим модельным объектом для досконального изучения механизма переключения. Сравнительно небольшая экспериментальная часть работы, включающая в себя изготовление образцов и измерения на них, выполнена тщательно. В работе отсутствуют абстрактные теоретические построения. Все оценки и модели различных процессов доведены до численных значений различных параметров. Результаты вычислений сравниваются с экспериментом. Полученные в работе И.В. Бутэ теоретические и экспериментальные данные являются новыми и представляют научный интерес. Хорошая воспроизводимость экспериментальных значений и их соответствие теоретическим расчетам делают выводы работы достоверными и обоснованными. Основные результаты работы опубликованы в трех статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 3 тезисах докладов на международных и всероссийских конференциях. Работа оформлена аккуратно. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Отметим ряд недостатков рецензируемой работы:

1. Недостаточно подробно в обзоре описана запись информации на ферромагнитных материалах, которая широко используется в настоящее время. Отсутствует описание недостатков записи на сегнетоэлектриках. Все это не дает возможности читателю в полной мере оценить целесообразность поиска альтернативных путей записи.
2. Непонятно, почему процесс диффузии кислородных вакансий в проводящий канал сменяется диффузией никелевых вакансий при монотонном повышении температуры.
3. В диссертационной работе (рис.1.4, рис.1.5, рис.1.6 и др.) и в автореферате (рис.1) рисунки имеют надписи на английском языке.
4. Количество полученного материала безусловно позволяет более широкое опубликование результатов.

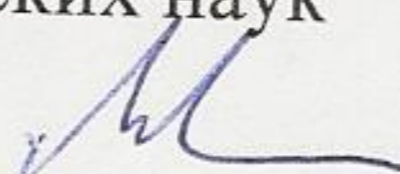
Однако указанные недостатки не носят принципиального характера и не снижают общий уровень выполненных исследований. Диссертация И.В. Бутэ заслуживает высокой оценки. Она представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне, автор которого хорошо владеет материалом.

Результаты, представленные в работе, имеют фундаментальное и прикладное значение. Она полностью соответствует всем критериям, которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно «Положению о присуждении ученых степеней», а соискатель И.В. Бутэ заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук

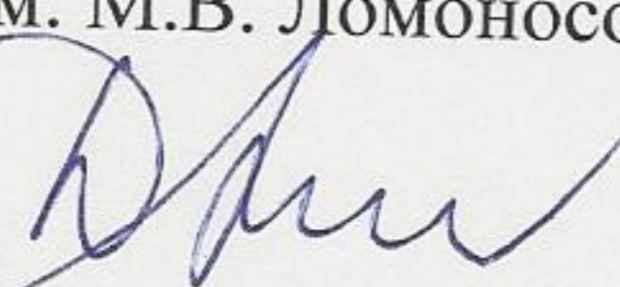
Профессор



Н.Л. Левшин

Декан физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Профессор



Н.Н. Сысоев

Левшин Николай Леонидович

Адрес: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, стр. 2

Телефон: +7(495) 939-17-92

e-mail: nlevshin@inbox.ru