

## ОТЗЫВ

официального оппонента Гриценко Владимира Алексеевича 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

**Актуальность работы.** Движущей силой современной электроники является разработка универсальной памяти, которая объединяет преимущества оперативной памяти (высокое быстродействие в режиме перепрограммирования и бесконечное число циклов перепрограммирования) и энергонезависимость флэш памяти. В настоящее время разработкой универсальной памяти занимаются практически все ведущие полупроводниковые фирмы: Intel, IBM, Micron, Samsung, Toshiba, Hitachi, Sony, Matsushita, Mitsubishi, Macronix, Infineon.

Принцип действия резистивной памяти (ReRAM) основан на изменении сопротивления тонкой ( $\sim 10$  нм) диэлектрической пленки после приложения короткого (1 нсек) импульса напряжения в структуре металл-диэлектрик-металл. В настоящее время в качестве активной среды изучается широкий круг материалов: NiO, HfO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SiO<sub>x</sub>, GeO<sub>x</sub>. Число циклов перепрограммирования ReRAM для разных материалов лежит в диапазоне  $10^6$ - $10^{12}$ . ReRAM допускает трехмерную 3D интеграцию. ReRAM может работать в режиме многоуровневой (мультибитной) памяти. ReRAM представляет большой интерес для применения в нейроморфной электронике.

Диссертация И.В. Бутэ посвящена исследованию динамики переключения ReRAM на основе оксида никеля NiO с использованием макроскопического моделирования на основе уравнений теплопроводности, диффузии и непрерывности тока. Актуальность работы не вызывает сомнений.

Содержание работы изложено на 187 страницах, включающих 138 страниц текста, 54 рисунка, 12 таблиц. Текст состоит из введения, пяти глав, заключения, четырех приложений и списка литературы, из 137 наименований.

**В результате выполнения работы получены новые результаты и данные.**

1. Обоснованы модели и составлены численные программы для описания перехода элемента памяти из высокоомного состояния в низкоомное и обратно.
2. Обоснована модель плавления NiO при пробое за счет джоулева нагрева и диффузия ионов никеля в жидкости в электрическом поле к никелевым фрагментам, при одновременном транспорте кислорода из канала.
3. Предложена модель развития цилиндрического канала за счет плавления NiO с расширением канала. Установлено существенное влияние на этот процесс паразитной емкости электродов.
4. Получена оценка нагрева канала в состоянии «ON» до температуры 1200–1400К.
5. Предложена модель электрической формовки NiO.
6. Обоснован механизм окисления филамента при протекании тока.

**Практическая значимость работы:**

Построена динамическая модель и проведено численное моделирование процесса униполярного переключения резистивного элемента памяти Pt-NiO-Pt. Получена оценка минимального размера проводящего филамента 1.6 нм. Эта оценка задает предельный размер масштабирования ReRAM на основе NiO около 5 нм.

**Обоснованность и достоверность** полученных данных и научных рекомендаций основаны на согласии полученных при моделировании экспериментальных данных с известными литературными теоретическими и экспериментальными данными.

**Замечания по работе.**

Работа не лишена недостатков и ошибок.

1. Наиболее спорным предположением, на мой взгляд, является гипотеза о том, что динамика процессов переключения оксида никеля определяется диффузией вакансий никеля. В подавляющем большинстве других оксидов ( $\text{HfO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SiO}_x$ ,  $\text{GeO}_x$ ) динамика переключения элемента памяти из высокоомного состояния в низкоомное и обратно определяется диффузией вакансий кислорода, а не металла или полупроводника. Это противоречие в работе не обсуждается.
2. Проводимость полупроводников и диэлектриков часто лимитируется ионизацией ловушек по механизму Френкеля или многофононному механизму ионизации ловушек. В обоих механизмах ток экспоненциально возрастает с увеличением электрического поля и температуры. В структуре Pt-NiO-Pt ток также экспоненциально возрастает с увеличением напряжения (см. рис 1.6 на стр. 27). В то же время, в диссертационной работе вместо физических механизмов транспорта заряда используются эмпирические соотношения, например, между сопротивлением канала и максимальным током канала, см. выражение (4.11). В работе не обсуждаются пределы применимости эмпирических соотношений, что делает выводы расчетной модели несколько неопределенными.
3. В законе Аррениуса энергия используется как в килокалориях, так и в электрон-вольтах и Джоулях.
4. Рисунок 1.1 встречается как на стр. 16, так и на стр. 18. Сбитая нумерация рисунков в первой главе запутывает читателя.
5. На стр. 19 в предложении «... $10 \times 10 \text{ нм}$ ...» единица измерения отформатирована курсивным начертанием, выпадая из общего оформления. Та же ошибка имеет место быть на стр. 43, 44, 45–55. Стр. 51 и 52 изобилуют наклонным начертанием обозначений химических элементов в формулах и уравнениях. При этом переменные величины в нижних индексах химических формул (параметры

стехиометрии «x») отформатированы прямым начертанием (см. стр. 18, 19, 20, 24, 40).

6. На стр. 22 указана размерность энергии «несколько еВ».
7. На той же странице температура указывается в различных единицах (при  $T = 300$  К ... при  $T = -195^{\circ}\text{C}$  жидкий азот), что вводит в заблуждение как самого автора, так и читателя ( $77$  К соответствует  $-196^{\circ}\text{C}$ ). Также бросается в глаза небрежность в рассогласовании падежей в этой же части предложения.
8. На стр. 23 дважды повторяется слово теплоемкость. На стр. 41 дважды повторяется знак равенства.
9. Для Рисунка 1.3 (по смыслу 1.4?) не указан источник (в подписи), хотя рисунок явно неавторский и взят из литературы при обзоре. То же относится и к последующим рисункам лит. обзора.
10. На стр. 32 обсуждается зависимости температуры «при разных удельных проводимостях», однако, как на рисунке, так и в тексте приведены удельные сопротивления.
11. На странице 40 последнее предложение в первом абзаце «При увеличении С до  $C = 7 \cdot 10^{-14}$  Ф при  $I_{\text{огр}} = 0,03$  мА ток  $I_{\text{ON}}$  рос до 3mA не переходил в «Reset».» либо рассогласовано, либо незакончено.
12. Далее на той же странице предложение «При обратном переходе  $R_C = 25$  Ом для детектирования токов перехода.» не имеет ни подлежащего, ни сказуемого.
13. На стр. 47 в предложении «В работе [98] 60 нм пленка NiO и затем окислением его при  $450^{\circ}\text{C}$  в воздухе в течение 1 часа.» нет сказуемого, и есть рассогласование родов.
14. На той же странице пункт «при чистом Ar ... пленка имела металлический характер ..., но круто поднималось при увеличении кислорода до 20%, после чего очень медленно спадала. Одновременно изменяла цвет от темно-коричневого до серого»

порождает у читателя ряд вопросов: 1) Что поднималось и что спадало? 2) Что меняло цвет? 3) При изменении каких условий?

15. На стр. 49 обозначение толщины плёнки *l* приведено в кавычках без надобности.
16. На стр. 50 пп. 1.4.3. начинается с предложения, в котором приведены только обозначения и сами значения параметров платины. Читателю считается разумным свести изложенный материал в пп. 1.4.2 и 1.4.3 в единую справочную таблицу.
17. В начале п. 1.5 приведена неправильная размерность энергии активации.
18. На стр. 51 написано слово «повеление», по-видимому, вместо слова «поведение».
19. На той же странице имеется рассогласование падежей «...значение дает среднее время проникновение...». При этом не уточняется, для каких объектов и сред приведено время проникновения.
20. В тексте присутствует большое количество ошибок со знаками препинания и символами-разделителями (отсутствующие или лишние пробелы и запятые, путаница между собой дефисов и тире).

Диссертационная работа Ирины Владимировны Бутэ является законченной научно-квалификационной работой, содержит новое решение актуальной научной задачи: моделирование динамики переключения ReRAM на основе перспективного материала оксида никеля NiO, имеющей существенное значение для специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Автореферат и научные публикации правильно и полностью отражают содержание диссертации. Считаю, что замечания не снижают общей ценности работы. Диссертационная работа «Процессы теплопроводности и диффузии в эффекте резистивного переключения с памятью в тонкопленочных оксидных структурах» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (пункт 9 постановления Правительства РФ от 24.09.2013 №842 «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Ирина

Владимировна Бутэ заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Гриценко Владимир Алексеевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории физических основ материаловедения кремния, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, проспект академика Лаврентьева 13, 630090 Новосибирск.

Тел. (393)3308891, факс: (383)3332771

e-mail: grits@isp.nsc.ru

<http://lib.isp.nsc.ru/grits/>

д.ф.-м.н

Гриценко

Гриценко Владимир Алексеевич

Подпись В.А. Гриценко заверяю:

Ученый секретарь ИФП СО РАН

к.ф.-м.н.



С.А. Аржаникова