

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Захарова Павла Сергеевича «Эффект обратимого переключения электрической проводимости в тонких пленках нестехиометрического оксида кремния», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Диссертационная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию эффекта обратимого изменения электрической проводимости в тонких пленках нестехиометрического оксида кремния ( $\text{SiO}_x$ ) и включает теоретическое изучение динамики фазовых перестроек в  $\text{SiO}_x$  и экспериментальные исследование тестовых структур. Актуальность темы диссертации подтверждается необходимостью создания новой модели обратимого переключения проводимости в фазе  $\text{SiO}_x$ , адекватно описывающей этот процесс при ярко выраженном неизотермическом воздействии, учитывающем не только его длительность и уровень, но также скорость на стадии охлаждения, следующую за крутизной заднего фронта электрического импульса перезаписи. Кроме того, важность работы определяется ее перспективами в области энергонезависимой резистивной памяти (ReRAM).

В диссертации Захарова П.С. представлены комплексные исследования эффекта обратимого переключения проводимости, опирающиеся как на развиваемую в работе теорию, так и на эксперимент. Следует отметить, что, хотя и в разной степени, проведен анализ обоих из известных на сегодня вариантов формирования фазы  $\text{SiO}_x$  в активном слое ReRAM-структур: исходным созданием такой фазы в PECVD-процессе или индуцированного так называемой электроформовкой, т.е. предварительным электрическим воздействием на  $\text{SiO}_2$  в вакууме.

Содержание диссертационной работы состоит из четырех глав, в первой из которых приводится довольно полный аналитический обзор результатов исследований, предшествующих диссертации. Обзор включает анализ существующих моделей, которые, как отмечает автор, оказываются несостоятельными при попытке объяснить с единых позиций всю совокупность экспериментально наблюдаемых закономерностей, связанных с переключением проводимости  $\text{SiO}_x$ .

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию эффекта переключения, в том числе разработке оригинальной модели фазовых перестроек в  $\text{SiO}_x$ , индуцированной электроформовкой. В рамках разработанных модельных представлений изменение проводимости активного слоя ( $\text{SiO}_x$ ) обусловлено эволюцией системы кремниевых

кластеров, взаимодействующих с многокомпонентным пересыщенным твердым раствором подвижных точечных дефектов в матрице  $\text{SiO}_2$ .

В третьей главе приводится подробное описание конструктивных и технологических принципов изготовления тестовых структур, а также методов их исследования.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию изготовленных тестовых структур. Представленные результаты подтверждают адекватность разработанных модельных представлений, изложенных во 2-й главе.

Диссертация Захарова П.С. отличается высоким **уровнем новизны**. Среди достигнутых результатов следует отметить феноменологическую модель фазовых перестроек в  $\text{SiO}_x$ , адекватность которой подтверждена количественными расчетами, удовлетворительно совпадающими с экспериментом. В отличие от известных из литературы моделей, разработанные представления впервые позволили предсказать состояние электрической проводимости активного слоя в зависимости от амплитуды и крутизны заднего фронта воздействующего электрического импульса, чего раньше достигнуть не удавалось. Из всей теоретической части работы следует один важный факт: физика изменения проводимости в пленках с фазой  $\text{SiO}_x$  отличается от обратимого переключения электропроводности в значительно лучше изученных пленках оксидов переходных металлов. По результатам оппонируемой работы в  $\text{SiO}_x$  процессы фазовых перестроек по большей части обусловлены объемными процессами, а не стоком и генерацией кислородных вакансий на границах раздела активного слоя с электродами емкостного элемента хранения. К сожалению, автор не указывает прямо на этот обобщающий его исследования результат ни в автореферате, ни в тексте диссертации.

Уравнения взаимодействия многокомпонентного раствора подвижных точечных дефектов с нанокристаллитами (в терминологии автора – с кластерами) кремния в матрице  $\text{SiO}_x$  адекватны представленной феноменологии процесса. Результаты количественного машинного расчета всплеска температуры в области филамента представляются близкими к истине.

Что касается экспериментальной части, то здесь следует выделить следующие новые результаты: оценка сверху для величины диаметра филамента, указывающая на возможность создания высокоплотных массивов элементов хранения, а также оценка сверху для удельного электрического сопротивления филамента. Примечательно, что эта величина более чем на 6 порядков ниже значения для объемного собственного кремния.

**Практическая полезность** полученных результатов не вызывает сомнения и обусловлена актуальностью разработки энергонезависимой памяти ReRAM, тем более,

что в рамках диссертационной работы предложен оригинальный элемент хранения, защищенный патентом автора с соавторами.

**Достоверность** и обоснованность основных результатов диссертационной работы обусловлена комплексным подходом в исследовании эффекта переключения проводимости  $\text{SiO}_x$ . Кроме того, в части разработки феноменологической и количественной модели следует отметить совпадение модельных прогнозов с экспериментальными данными, полученными как автором лично, так и другими исследователями. Что касается результатов экспериментальной работы, то здесь достоверность и обоснованность обеспечивается использованием современного метрологического и технологического оборудования.

К сожалению, диссертационная работа Захарова П.С. не лишена недостатков, которые, однако, не снижают ценности полученных результатов:

1. Энергия связи частиц в кластере  $E_b$  является функцией его радиуса. В модельных же расчетах (стр. 68) автор без объяснения принимает эту величину константой.

2. В 3-й главе (стр. 87) говорится о том, что были изготовлены тестовые структуры на основе исходно нестехиометрической  $\text{SiO}_x$ -тонкой пленки с открытой торцевой поверхностью и без неё. Однако в 4-й главе отсутствует сравнение электрических характеристик этих тестовых структур.

3. Как уже отмечалось выше, автор явно не указывает на объемный характер процессов, протекающих в  $\text{SiO}_x$ -фазе.

Не смотря на указанные недостатки, диссертация Захарова П.С. «Эффект обратимого переключения электрической проводимости в тонких пленках нестехиометрического оксида кремния» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне, обладающая несомненной новизной и практической полезностью полученных результатов. Она содержит решение актуальной научной задачи, формирующей основу для разработки перспективных устройств микро- и нанoeлектроники – микросхем энергонезависимой резистивной памяти. Диссертация обладает внутренним единством, написана грамотно и доходчиво. Кроме того, в ней содержатся новые и практически значимые положения, апробированные на многочисленных научных конференциях. Основные результаты исследования достаточно полно изложены в семи статьях, три из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК. Автореферат адекватно описывает содержание диссертационной работы.

Диссертация Захарова Павла Сергеевича полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК, утвержденного

постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Официальный оппонент:

заведующий кафедрой физики полупроводников и оптоэлектроники

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский


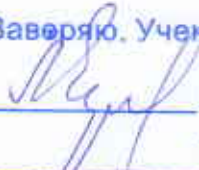
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»,

д.ф.-м.н., 01.04.07 – физика конденсированного состояния,

профессор  ПАВЛОВ Дмитрий Алексеевич

12 января 2017 г. ([pavlov@unn.ru](mailto:pavlov@unn.ru); +7 905 667 2218)

Адрес: 603950, Россия, г. Н. Новгород, пр. Гагарина, 23, ННГУ

Подпись   
Заворяю. Ученый секретарь ННГУ  
 Л.Ю. Черноморская  
Тел. 462-30-21

