

УТВЕРЖДАЮ
Врио директора ФТИАН РАН
чл. корр. РАН
В.Ф. Лукичев
«20» января 2017 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Физико-технологического института Российской академии наук (ФТИАН РАН) на диссертационную работу Захарова Павла Сергеевича «Эффект обратимого переключения электрической проводимости в тонких плёнках нестехиометрического оксида кремния» по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертационная работа П.С. Захарова посвящена исследованию эффектов скачкообразного обратимого изменения электрической проводимости в тонкопленочных структурах нестехиометрического оксида кремния. Актуальность выбранной темы обусловлена возможностями применения исследуемого эффекта для создания устройств энергонезависимой резистивной памяти. Несмотря на значительные успехи в исследованиях переключения проводимости в оксидах переходных металлов, в настоящее время отсутствуют общепризнанные модельные представления, позволяющие объяснить наблюдаемые особенности эффекта в пленках нестехиометрического оксида кремния. Таким образом, тема работы актуальна с точки зрения фундаментальных задач материаловедения, а выполненные исследования обладают значимой научной новизной.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка работ, опубликованных по теме диссертации, списка цитируемой литературы из 123 наименований, приложения и содержит 160 страниц, в том числе 85 рисунков и 6 таблиц.

В первой главе представлен обзор литературы по предмету исследования – подробно рассмотрены публикации, посвященные экспериментальному и теоретическому исследованию эффекта обратимого переключения

проводимости в тонкопленочных структурах с оксидом кремния. Особое внимание уделено эффектам, наблюдаемым в нестехиометрическом оксиде кремния, и не присущим оксидам других материалов. Автором рассматриваемой диссертации проведен глубокий анализ существующих моделей эффекта. Показано, что представленные в литературе модели, в полной мере не могут описать наблюдаемые закономерности эффектов обратимого переключения, например, влияние длительности фронтов управляющих электрических импульсов и температуры.

Вторая глава посвящена построению модели эффекта обратимого переключения проводимости индуцированной электроформовкой фазе нестехиометрического оксида кремния. Результаты моделирования качественно и количественно сопоставлены с экспериментальными результатами, как из литературных источников, так и полученными автором работы лично.

В третьей главе разработаны конструктивные и технологические принципы изготовления структур элементов хранения на основе оксида кремния, измерены их электрические характеристики. Предложена структура и способ изготовления элемента памяти, в котором не требуется использование вакуумированных корпусов. Элементы резистивной памяти с субмикронным топологическим размером $0,6 \times 0,6$ мкм получены автором впервые.

В четвертой главе выполнено исследование структур элементов памяти, предложенных автором. На основе выполненных измерений получена численная оценка размера филамента, оценено его удельное электрическое сопротивление, установлен металлический характер температурной зависимости проводимости филамента, проведено исследование механизмов потери логических состояний.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты могут быть применены при разработке и изготовлении структур резистивной памяти. Автором получена модель, адекватно описывающая наблюдаемые эффекты. Кроме того, предложена конструкция элемента памяти на основе исследованного в работе эффекта, защищенная патентом. Важно

отметить, что автором были поставлены эксперименты подтверждающие правильность выводов построенной им модели.

Полученные автором результаты могут быть использованы при разработке и исследовании новых элементов резистивной памяти в организациях РАН, профильных организациях электронной промышленности: ФТИАН РАН, ИФП СО РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, АО «НИИМЭ», ПАО «Микрон».

Следует отметить большую проделанную работу диссертанта в области математического моделирования исследуемых структур, постановке экспериментов, в которых были определены ключевые параметры эффекта переключения в структурах на основе SiO_x . Важно, что все полезные технические решения, вытекающие из работы, защищены патентом РФ, создан действующий экспериментальный образец ячейки памяти.

Однако в ходе обсуждения работы был выявлен и ряд недостатков, которые можно сформулировать в виде следующих замечаний.:

1. В поставленной задаче моделирования уравнения для массопереноса и теплопроводности следовало бы решать в виде системы, так как ряд параметров в них взаимосвязаны, например, скорость эмиссии частиц из кластера, входящая в диффузионное уравнение, есть функция температуры. В модели не учтены существенные температурные зависимости параметров, входящих в уравнения: электропроводности, теплоемкости, коэффициента теплопроводности, а также коэффициента диффузии. Поэтому, по нашему мнению, полученные расчетные значения температуры в филаменте при импульсном нагреве представляются завышенными (1400 °С – режим расплавления кремния).

2. В общем случае направление и скорость массопереноса при диффузии определяется градиентом химического потенциала. В столь сложном объекте с нанокластерами автору следовало бы учесть в расчетах не только диффузию по градиенту концентрации, но и массоперенос в сторону большей концентрации вблизи поверхности раздела фаз (известное явление «диффузии в гору» - uphill

diffusion) при кластеризации кремния, а также влияние на диффузию механических напряжений, возникающих в филаменте при импульсном нагреве.

3. Не учтено влияние значительных электрических полей в диэлектрике на механизм переключения проводимости SiO_x режиме записи.

4. Не проведены исследования зависимости эффекта обратимого переключения проводимости в нестехиометрическом SiO_x от температуры внешней среды и толщины активного слоя, представляющие как теоретический, так и практический интерес.

5. Кажется не вполне удачной терминология «точечные дефекты в твердом растворе», примененная к аморфной фазе SiO_x . Точечный дефект предполагает наличие кристаллической решетки.

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертационная работа Захарова П.С. производит положительное впечатление и является завершенным научным исследованием. Тема работы полностью соответствует паспорту научной специальности, по которой проходит защита, а результаты диссертации имеют важное научное и практическое значение. Считаем, что работа выполнена на высоком уровне, отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатской диссертации на соискание ученых степеней согласно п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ (№ 842, от 24 сентября 2013 г.). Автореферат достаточно полно и ясно отражает содержание диссертационной работы, а основные публикации по теме диссертации в полной мере раскрывают ее суть. Выводы и положения, вынесенные на защиту, полностью соответствуют поставленной задаче диссертации, обоснованно следуют из результатов проведенной автором работы. Стоит отметить способности автора, как к проведению эксперимента, так и к выполнению теоретических расчетов, а также ясный стиль изложения результатов.

Результаты диссертационной работы были рассмотрены на научном семинаре ФТИАН РАН «Перспективные технологии и устройства микро- и наноэлектроники» 16 января 2017 г., а настоящий отзыв был одобрен на заседании Ученого совета ФТИАН РАН 19 января 2017 г., протокол № 1-17.

Считаем, что Захаров Павел Сергеевич, безусловно, заслуживает присвоения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Отзыв составил:



канд. физ.-мат. наук, с. н. с. лаб. МССП Мяконьких А.В.

Сведения о лице, утвердившем отзыв: Лукичев Владимир Федорович, Чл. корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, Врио директора ФТИАН РАН, адрес 117218, Россия, г. Москва, Нахимовский просп., 34, Тел.: +7 (499) 129-54-92, e-mail: lukichev@ftian.ru

Сведения о составителе отзыва: Мяконьких Андрей Валерьевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаб. Микроструктурирования и субмикронных приборов, адрес 117218, Россия, г. Москва, Нахимовский просп., 34, Тел.: +7 (499) 129-56-08, e-mail: miakonkikh@ftian.ru