ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Коряжкиной Марии Николаевны «Резистивное переключение в мемристорах на основе стабилизированного диоксида циркония», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01-Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Тема диссертационной работы посвящена эффектам в области обратимого переключения состояний с различной поперечной электрической проводимостью в структурах резистивной памяти (ReRAM), а также материаловедческим и отчасти технологическим вопросам реализации таких структур. В качестве базового материала активного слоя элемента хранения ReRAM в работе рассматривается диоксид циркония (ZrO_2), легированный иттрием. Матрица ZrO_2 наряду с другими оксидами переходных металлов (HfO_2, TaO_2) относится к перспективным, но менее изученным активным материалам для ReRAM. Причем это касается как физических вопросов формирования и разрушения филамента поперечной проводимости, так и к вопросам изучения характеристик приборных структур на его основе. В связи с этим, **актуальность темы** как с научной, так и с прикладной точки зрения можно считать обоснованной.

Основными задачами диссертационной работы являются:

- исследования электрических характеристик структур металл-диэлектрик-металл с $Zr_{1-x}Y_xO_2$ активным диэлектрическим слоем при различных электрических режимах и температурах;
- выявление и изучение механизма резистивного переключения поперечной проводимости в исследуемых и производных от них структурах, а также влияние инкорпорированных в активный диэлектрический слой структуры наночастиц золота на свойства структур и оптического излучения на их характеристики переключения.

По результатам решения первой группы задач диссертант выносит на защиту **положения научной новизны**, которые определяют энергию активации миграции ионов кислорода в матрице $Zr_{1-x}Y_xO_2$ в диапазоне температур, включающем верхнюю границу диапазона рабочих температур приборов кремниевой микроэлектроники, а также тот факт, что диэлектрические потери в структуре обусловлены электропроводящим филаментом. По результатам второй группы задач на защиту выносится положение новизны об обнаруженном эффекте фотостимулированного переключения поперечной проводимости в исследуемой МДП структуре с тем же активным слоем. Предложенные положения новизны и

научные результаты работы в целом представляются обоснованными и достоверными, поскольку базируются на современных методах исследований, и не противоречат классическим представлениям физики твердого тела и полупроводников, а также накопленным данным в области генерации и поведения точечных дефектов в бинарных и более сложных решетках.

Практическая значимость работы неоспорима, поскольку ее результаты прямо связаны с созданием научного задела для разработки энергонезависимой памяти с повышенным, в сравнении с сегодня используемой Flash памятью, ресурсом переключений. **Результаты диссертационной работы опубликованы** в четырех научных изданиях из списка ВАК, докладывались на научных форумах, конференциях и семинарах.

Автореферат адекватно и достаточно полно отражает содержание диссертации. Диссертация содержит введение и пять глав, в первой из которых выполнен хороший аналитический обзор, а в остальных изложены оригинальные материалы работы.

Следует отметить, что в работе проведены не только исследования электрических характеристик элементов памяти на основе двуокиси циркония, но также методами просвечивающей электронной микроскопии исследованы структурные характеристики активного слоя на основе этого материала, полученного методами магнетронного распыления. Установлено наличие межзеренных границ раздела в исследуемой пленке $Zr_{1-x}Y_xO_2$, которые, по мнению автора, являются причиной пониженного значения энергии активации диффузии атомов кислорода в исследуемой пленке (0,55 эВ) в сравнении с известными данными для объемного материала. Отмечается, что модификация активного слоя ReRAM за счет встраивания в него наночастиц золота приводит к нелинейности вольт-фарадных характеристик емкостной структуры типа плоского конденсатора и облегчению процесса электроформовки. Эффект объясняется накоплением электрического заряда на наночастицах и появлением неравномерности электрического поля в поперечном направлении рабочего слоя. Отмечается, что воспроизводимое переключение поперечной проводимости в структурах на основе стабилизированной иттрием двуокиси циркония наблюдается вплоть до 125^0C. Безусловный интерес также представляют результаты исследования структур ReRAM с использованием оптического излучения, которые, возможно, лежат на пути абсолютно нового направления - создания оптически управляемых элементов энергонезависимой памяти.

Рекомендуемая область использования материалов диссертационной работы - продвижения к созданию блоков встраиваемой энергонезависимой памяти в современные СБИС, например кристаллы контроллеров.

Диссертационную работу Коряжкиной М.Н. в целом характеризует высокий научный уровень теоретического анализа и большой объем детальных экспериментальных данных, полученных с использованием разнообразных современных методов. Работа хорошо структурирована, текст написан исключительно ясно, хорошим научным языком, практически без опечаток.

К дискуссионным вопросам и замечаниям можно отнести следующее.

1. Представляется, что в формулировку научного положения о природе тангенса угла диэлектрических потерь в исследуемых структурах следовало бы включить количественную оценку вклада филамента на фоне других механизмов диэлектрических потерь, в противном случае положение необоснованно упрощается.
2. Объяснение эффекта нелинейности плоской емкостной структуры, в которой диэлектрическое заполнение обеспечено, по существу, композитным материалом в виде диэлектрической матрицы с встроенными наночастицами металла (Au) только с позиций заряда этих частиц, представляется дискуссионным, поскольку должна меняться также и диэлектрическая проницаемость такой матрицы. Кроме того, в этой части работы хотелось бы знать мнение автора о возможном понижении ресурса переключений такого композитного диэлектрика из-за туннельных токов зарядки/разрядки Au: не сведет ли этот показатель перспективного ReRAM к потенциалу Flash памяти.
3. В разделе 4.2. диссертации при изучении процесса формовки многократно говорится о возникновении филаментов в пределах одной мемристорной структуры во множественном числе. Между тем автор, как и другие исследователи структур ReRAM, отмечает слабую зависимость тока от площади электрода структуры, что указывает на наличие одного филамента, ответственного за поперечную проводимость. Возможно это лингвистическая неточность.
4. Представляется неудачным, с точки зрения выбранной терминологии, некоторые выражения, например: «…пленки Au… коагулировали в сферические наночастицы…»

Изложенные замечания являются лишь следствием интереса к углубленному обсуждению многочисленных результатов работы и не умаляют высокой положительной оценки диссертационной работы в целом.

Диссертационная работа Коряжкиной Марии Николаевны представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, характеризуемую высоким уровнем актуальности, теоретических и экспериментальных исследований, полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор,

Коряжкина Мария Николаевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01-Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук Итальянцев Александр Георгиевич, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО НИИМЭ), начальник отдела функциональной электроники.

Почтовый адрес: 124460, г.Москва, Зеленоград, 1-ый Западный проезд, д.12, стр.1
Тел.: +7 915 163-00-73
E-mail: aitalyantsev@niime.ru

А.Г. Итальянцев

07.12.2018

Подпись Итальянцева А.Г. удостоверяю:

1-ый заместитель
генерального директора
АО «НИИМЭ» Н.А. Шелепин

10.12.18

Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники" ОГРН 1117746598829 "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники" МОСКВА