

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Галушка Виктора Владимировича

«Влияние излучений и электрического поля на ионный перенос в структурах на основе иодида серебра и пористого кремния»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Развитие микроэлектроники, разработка и производство все более и более сложных интегральных схем и устройств потребовал создания элементов памяти с разработкой на их основе больших и сверхбольших интегральных схем (БИС и СБИС), на основе которых и работают все компьютеры вплоть до настоящего времени. В основе своей это энергозависимая или энергонезависимая двоичная память на основе элементов  $\langle 0 | - \langle 1 |$ .

А память живых организмов устроена иначе – это многоуровневая память на основе нейронов. Всегда было интересно продвинуться именно в этом направлении. Еще в 1971 году профессором Леоном Чуа была разработана теория мемристора – элемента многоуровневой памяти. Вплоть до 2007 года мемристор оставался интересным, но чисто теоретическим объектом. И только в 2007 году коллективом лаборатории Хьюлетт-Паккард (Дмитрий Струков и др.) были экспериментально разработаны первые экспериментальные мемристивные схемы с мемристорами на основе оксида титана.

Работы по разработке мемристоров интенсивно ведутся по всему миру и тем не менее в производстве их еще нет. Диссертационная работа Галушка В.В., направленная на установление влияния излучений и электрического поля на ионный перенос в структурах на основе иодида серебра и пористого кремния является актуальной как в решении фундаментальных проблем физики поверхности, так и в практическом отношении для разработки мемристивных схем.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 148 страниц машинописного текста, включая 92 рисунка, 3 таблицы. Список литературы содержит 148 наименований. Работа по структуре и объему соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель, решаемые задачи, основные положения, выносимые на защиту, описана структура и объем работы.

**В первой главе** автором проведен анализ современных исследований мемристивных структур способных изменять сопротивление за счет ионного массопереноса. Основное внимание уделено структуре  $AgI/Ag$ , обладающей ионной проводимостью. Рассмотрена нерешенная проблема артефактов электронно-зондового микроанализа, связанная с осаждением углерода в месте воздействия электронного луча.



*Во второй главе* приведены технология и методы контроля свойств структур AgI/Ag в ходе получения. Приводятся экспериментально полученные зависимости туннельного тока в туннельной структуре с AgI/Ag слоями и описан процесс переключения сопротивления массопереносом серебра в туннельный зазор. Описаны способы получения слоев пористого кремния, насыщенных металлами и AgI.

*В третьей главе* рассмотрено влияние воздействий электрического поля, УФ- и гамма-излучения на процессы переноса Ag в приповерхностных слоях пористого Si. Установлено, что УФ-излучение вызывает перераспределение концентрации Ag в приповерхностном слое пористого кремния. Показано влияние воздействий электрического поля (тока) в структурах с твердым электролитом и пористыми диэлектриками, что приводит к электромиграции ионов серебра с образованием в диэлектрике участков с низким сопротивлением. Приводятся результаты исследований воздействий гамма излучения на свойства пористого кремния.

*В четвертой главе* основное внимание уделяется образованию слоя AgI на серебряной подложке и массопереносу углерода под воздействием электронного потока. При получении нанослоя AgI модификацией серебра в парах иода на начальной стадии образуются отдельные кластеры размерами около 20 нм, плотность расположения которых растет, вплоть до образования сплошной пленки. Методами электронной и туннельной микроскопии показан обратимый перенос Ag через наноразмерные слои Ag.

Во второй части главы описан способ повысить точность результатов электронно-зондового микроанализа состава по сравнению со стандартным методом.

*В заключении* сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертации.

Без сомнения, полученные диссертантом результаты **новы** с научной точки зрения, **обоснованы** и **практически значимы**.

К числу новых результатов, представляющих наибольший научный интерес, с моей точки зрения, можно отнести следующее.

1. Предложено математическое описание изменения сопротивления туннельной структуры в процессе роста серебряного кластера на поверхности твердого электролита AgI/Ag, основанное на экспериментальных токовых характеристиках.
2. В структурах на основе слоев пористого кремния и твердого электролита получено обратимо управляемое изменение сопротивления
3. Предложен способ снижения влияния осаждения углерода при электронной микроскопии и количественном элементном анализе электронным зондом.

Практическая значимость выполненных автором диссертации исследований заключается в следующем:

- получены структуры с управляемым сопротивлением на основе AgI/Ag в качестве активного электрода;
- показана возможность насыщения пористого слоя кремния металлами, оказывающих влияние на электрофизические свойства получаемых композитов;
- реализован способ получения слоя AgI на поверхности слоя серебра заданной толщины;
- показано, что при электронно-микроскопических исследованиях осаждение углерода искажает результаты элементного анализа.
- разработана методика проведения электронно-зондового микроанализа, учитывающая осаждение углеродного слоя;
- показана возможность создания заданного рельефа на поверхности локальным осаждением углерода воздействием электронного зонда.

Обоснованность и достоверность результатов, изложенных в диссертации, научных положений и сделанных выводов подтверждается как использованием теоретического моделирования, так и проведенных экспериментальных исследований.

Вместе с тем, необходимо высказать ряд замечаний:

1. Неоднородность структуры пористого кремния, затруднительно использовать в наноразмерных логических устройствах мемристоров.
2. При исследовании влияния углеродного слоя, осаждаемого электронным лучом в вакуумной камере электронного микроскопа, не приведены результаты того, что же представляет из себя образующаяся форма углерода.

Данные замечания не носят принципиального характера и не влияют на положительную оценку выполненной работы и не ставят под сомнение выводы диссертации.

Оценивая диссертацию в целом, считаю, что диссертационная работа Галушка В.В. является законченным научным исследованием, которое может быть квалифицировано как решение важной научной задачи, имеющей существенное значение для твердотельной электроники, связанной с выявлением особенностей воздействия электромагнитного излучения и электрического поля на ионный перенос в структурах на основе иодида серебра и пористого кремния.

Диссертация написана литературным и профессиональным языком, представленный иллюстративный материал хорошо оформлен.

**По результатам исследований**, выполненных при работе над диссертацией, опубликовано 39 работ, в том числе 10 входящих в базы данных Web of Science и Scopus (всего 15 статей в рецензируемых изданиях, включенных в Перечень ВАК Минобрнауки РФ).



Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации. Считаю, что диссертационная работа Галушка В.В. «Влияние излучений и электрического поля на ионный перенос в структурах на основе иодида серебра и пористого кремния» соответствует критериям пп. 9-11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а автор диссертации Галушка Виктор Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

**Официальный оппонент:**

доктор технических наук,  
профессор МФТИ, действительный член  
академии инженерных наук  
им.А.М. Прохорова и Академии  
технических наук, президент  
Нанотехнологического общества России,  
Почетный президент группы  
компаний «NT-MDT Spectrum Instruments»

Быков Виктор Александрович

Личную подпись доктора технических наук Быкова Виктора Александровича

«ЗАВЕРЯЮ»

Ученый секретарь  
ГК «НТ-МДТ Спектрум Инструментс»  
к.ф.-м.н.



В.Н. Рябокони

Группа компаний НТ-МДТ Спектрум Инструментс (НТ-МДТ СИ)  
124460, Россия г. Москва, г. Зеленоград, проезд №4922, д.4, стр 3.  
www.ntmdt-si.ru  
Телефоны: +7 (985) 211-35-44 (моб.), E-mail: info@ntmdt-si.com

Научные специальности докторской диссертации Быкова Виктора Александровича  
05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах,  
01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

03.06.2022 года