

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по науке,  
инновациям и цифровизации ФГБОУ ВО ВГУ  
доктор химических наук  
О.А. Козадеров



04 2022 г.

## ОТЗЫВ

### ведущей организации

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Воронежский государственный университет»  
(ФГБОУ ВО ВГУ) о диссертации

**Галушка Виктора Владимировича** на тему «**Влияние излучений и электрического поля на ионный перенос в структурах на основе иодида серебра и пористого кремния**», представленной к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

На отзыв представлены:

- диссертация, выполненная в ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», объемом 148 страниц, включая 92 рисунка, 3 таблицы, списка использованных источников, содержащего 148 наименований;

- автореферат на 19 страницах, в котором изложены основные положения диссертации и представлен список публикаций автора по теме работы.

### Актуальность темы исследования

Широкое применение в твердотельной электронике находят нанокompозитные структуры с ионным переносом, позволяющие увеличить степень интеграции микросхем. При этом недостаточно внимания уделяется, изучению пористого кремния с включениями из металла и твердых электролитов. Управление проводимостью структур металл-изолятор-металл массопереносом в слоях с ионной проводимостью является актуальной задачей в области наноионики.

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.

### **Общая характеристика работы**

**Введение** содержит сведения об актуальности темы исследования, ее новизне и практической значимости, цели и задачах работы, основных положениях работы.

**В первой главе** на основе литературных данных проведен анализ структур металл-диэлектрик-металл, способных изменять сопротивление и сохранять состояние благодаря ионному массопереносу. Мемристоры получили широкую известность благодаря уникальным свойствам, позволяющим на их основе создать твердотельный аналог биологического нейрона. Материалом обладающим ионной проводимостью выбрана для исследований структура AgI/Ag, а слоем диэлектрика с переменной толщиной туннельный вакуумный зазор или пористые структуры кремния.

Также в главе рассматривается проблема электронно-микроскопических исследований и электронно-зондового микроанализа, связанная с наличием артефактов локального осаждения углерода в месте воздействия электронного луча.

**Во второй главе** приведены технология и методы контроля свойств структур AgI/Ag в ходе получения. Приводится описание реакционной камеры для контролируемого методом спектральной эллипсометрии получения слоя AgI на поверхности слоя Ag.

Приводятся экспериментально полученные зависимости туннельного тока через структуру металл (вольфрам) – туннельный зазор – AgI/Ag и модель, описывающая процесс переключения за счет переноса серебра и изменения туннельного зазора.

Приводится описание двух используемых способов получения слоев пористого кремния на подложках монокристаллического кремния (нанопористого и мезапористого кремния) в том числе с интерференционным контролем толщины. Получены и исследованы структуры пористого кремния, насыщенные металлами (серебро и железо) 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. Экспериментально установлено, что пороги напряжений, вызывающие массоперенос серебра составляют доли вольта, а толщины проникновения серебра в пористый слой кремния могут составлять десятки микрометров. Приводятся результаты исследований воздействий гамма излучения на свойства пористого кремния. Обнаружен эффект долговременной памяти стабильного переключенного состояния в области гистерезиса вольтамперной характеристики, управляемой дозой гамма-излучения.

**Четвертая глава** посвящена массопереносу под воздействием электронного потока. Показана возможность наблюдать обратимый перенос Ag через наноразмерные слои AgI/Ag при исследованиях методами электронной и туннельной микроскопии. В процессе получения нанослоя AgI модификацией поверхности слоя серебра в парах иода видно, что на начальной стадии образуются отдельные кластеры размерами около 20 нм, плотность расположения которых растет, но размеры не увеличиваются, пока не наступит порог образования сплошной пленки. Показано что на этой стадии и начинают проявляться ионопроводящие свойства пленки AgI. Во второй части предложен и описан способ в условиях неконтролируемого осаждения углеводородов при исследованиях электронной микроскопией в частности электронно-зондового микроанализа состава повысить точность результатов по сравнению со стандартным методом, не учитывающим поглощение в слое углерода.

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

Диссертационная работа Галушка В.В. представляет собой завершенное научное исследование. Текст работы отличается логичностью структуры и изложен качественным научным языком, оформлен технически грамотно.

Автореферат по своему содержанию полностью соответствует диссертации и содержит все основные научные положения, результаты и выводы по проведенному диссертационному исследованию.

### **Научная новизна работы**

К числу наиболее значимых научных результатов диссертационного исследования Галушка В.В. можно отнести следующее:

1. Автором предложена и построена на основе экспериментальных токовых характеристик математическая зависимость проводимости туннельного зазора в ходе роста серебряного кластера на поверхности твердого электролита AgI/Ag.

2. Показана возможность получения ионопроводящего композита из матрицы пористого кремния с включениями из AgI.
3. Получены структуры с обратимо управляемым изменением сопротивления на основе слоев пористого кремния и твердого электролита.
4. Выявлены факторы, позволяющие снизить влияние артефактов осаждения углерода при электронной микроскопии и улучшить достоверность результатов количественного элементного анализа электронным зондом.

### **Практическая значимость результатов диссертации**

На основании теоретических расчетов и экспериментальных исследований Галушка В.В. были получены структуры с управляемым сопротивлением на основе AgI/Ag в качестве активного электрода. Показана возможность насыщения пористого слоя кремния металлами, что оказывает влияние на электрофизические свойства получаемых композитов. Реализован способ получения слоя AgI на поверхности слоя серебра требуемой толщины.

Показано, что при электронно-микроскопических исследованиях неконтролируемое осаждение углерода может существенным образом исказить результаты элементного анализа. Разработана методика и приводятся рекомендации для режимов проведения электронно-зондового микроанализа.

Также диссертантом показана возможность создания заданного рельефа на поверхности в вакууме, осаждением углерода за счет локального воздействия электронного зонда.

Результаты, полученные соискателем, значимы для развития технологии получения тонкопленочных ионопроводящих и диэлектрических материалов. Фундаментальный характер результатов позволяет использовать их в высших учебных заведениях в курсах, посвященных синтезу наноматериалов, влиянию условий на функциональные свойства наноматериалов.

### **Достоверность результатов и степень обоснованности научных выводов**

Достоверность полученных результатов определяется корректным использованием предварительно апробированных методов и методик исследования с использованием современного оборудования. Достоверность полученных результатов подтверждается воспроизводимостью экспериментальных данных, соответствием полученных результатов современным научным представлениям.

### **Публикации соискателя**

Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в 39 работах, 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).

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В тексте диссертации слабо освещены методы контроля кластеров серебра на поверхности подложек, что отставляет вопросы о практической применимости разрабатываемых структур.
2. Как следует из результатов диссертационной работы электрическое поле или ультрафиолетовое излучение приводят к переносу серебра в слоях пористого кремния. Однако в работе не показано наличие или отсутствие процессов растворения серебра в пористом кремнии.
3. Не до конца раскрыта связь между динамикой образования слоя при воздействии на образец УФ излучения и образованием на поверхности образцов углеродной пленки.
4. При описании гистерезиса ВАХ структур металл-пористый кремний не проведено сопоставление с известными литературами данными о величинах наблюдаемого эффекта.
5. Имеются недочеты в оформлении работы, опечатки и неточности, которые не снижают общей научной ценности работы. Например, в ряде мест используются неправильные окончания и отсутствуют предлоги. Некоторые графики экспериментальных зависимостей изображены в виде точек, соединенных сплошными линиями, когда следовало использовать несоединенные линиями точки.

Сделанные замечания имеют рекомендательный частный характер и не снижают общую положительную оценку работы.

### **Заключение**

Диссертационная работа Галушка В.В. на тему «Влияние излучений и электрического поля на ионный перенос в структурах на основе иодида серебра и пористого кремния» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств представляет собой завершённую научно-квалифицированную работу, в которой представлены теоретические и экспериментальные исследования массопереноса в структурах, содержащих твердый электролит.

Автореферат по своему содержанию соответствует диссертации и содержит все основные научные положения, результаты и выводы по проведенному диссертационному исследованию.

Учитывая актуальность изученного вопроса, научную новизну, практическую значимость полученных результатов, их достоверность и обоснованность выводов, можно заключить, что диссертационная работа «Влияние излучений и электрического поля на ионный перенос в структурах на основе иодида серебра и пористого кремния» отвечает требованиям пп. 9-11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Галушка Виктор Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Диссертация и автореферат были рассмотрены и обсуждены на совместном заседании кафедр физики твердого тела и наноструктур (ФТТиНС) и физики полупроводников и микроэлектроники (ФПП) ВГУ, протокол № 10 от «26» апреля 2022 г.

Отзыв составил:

Заведующий кафедрой физики твердого тела и наноструктур,  
доктор физико-математических наук, доцент



П.В. Середин

Середин Павел Владимирович, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», 394018, г. Воронеж, Университетская площадь 1.  
Телефон: +7 (904) 211-22-62, E-mail: paul@phys.vsu.ru

