

На правах рукописи



Галушка Виктор Владимирович

**ВЛИЯНИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ  
НА ИОННЫЙ ПЕРЕНОС В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ  
ИОДИДА СЕРЕБРА И ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Саратов – 2022**

Работа выполнена на кафедре материаловедения, технологии и управления качеством ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Научный руководитель: **Вениг Сергей Борисович**  
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Быков Виктор Александрович**  
доктор технических наук, профессор МФТИ,  
Почетный президент Группы компаний НТ-МДТ  
Спектрум Инструментс г. Москва

**Бахтизин Рауф Загидович**  
Заслуженный работник Высшей школы РФ,  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры физической электроники и  
нанофизики Физико-технического института  
Башкирского государственного университета,  
г. Уфа

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» г. Воронеж

Защита состоится 23 июня 2022 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.392.01 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, 10 корпус, аудитория 511

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени В.А. Артисевич ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (г. Саратов, ул. Университетская, 42 ) и на сайте [www.sgu.ru/research/dissertation-council/24-2-392-01/kandidatskaya-dissertaciya-galushka-viktora](http://www.sgu.ru/research/dissertation-council/24-2-392-01/kandidatskaya-dissertaciya-galushka-viktora)

Автореферат разослан «\_\_\_» апреля 2022 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.392.01, доктор  
физико-математических наук,  
доцент



Сысоев Илья Вячеславович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Развитие твердотельной электроники исторически идет по пути миниатюризации элементов схемы. Стремление уменьшить размеры электронных компонентов электрической схемы до десятков и единиц нанометров ограничивается возрастающими утечками заряда через тонкие изолирующие слои. Проблемы качественной изоляции обусловлены эффектами туннелирования электронов сквозь потенциальный барьер и миграции ионов в сильных электрических полях. Однако, в наноструктурах эти, казалось бы, негативные эффекты открывают возможности для реализации новых функциональных элементов электроники. Нанокompозитные структуры с ионным переносом способны выполнять функции энергонезависимой памяти и служить элементами адаптивной логики. Подобные «Memristor» и «Atom Switch» структуры с ионным переносом, могут выступать твердотельным аналогом биологических нейронов. Современные технологии позволяют создавать из подобных электрохимических ячеек многоуровневую интегральную схему, что в несколько раз может увеличить число элементов. Стремительный рост числа публикаций в области наноионики свидетельствует о перспективности этих разработок. Пористый кремний с включениями из металла и твердых электролитов представляют большой интерес для применения в структурах с ионной проводимостью. Возможность управления проводимостью композитных структур с твердым электролитом и пористым кремнием требует изучения влияния электрического поля и электромагнитного излучения на процессы ионного переноса в таких структурах. Развитие технологий получения микро- и наноструктур трудно представить без применения таких инструментов контроля, как зондовые методы исследования. В измерительных системах, где исследования ведутся с использованием электронного зонда, известна проблема загрязнения поверхности продуктами разложения углеводородов. Осаждение углерода в области воздействия электронного луча искажает получаемые результаты морфологии, регистрируемого состава и структуры. Изучение факторов, влияющих на процессы осаждения углерода и разработка мер, позволяющих снизить влияние артефактов, является актуальной метрологической задачей. Локальное осаждение материалов из газовой фазы на поверхность электронным лучом может служить инструментом сухой литографии.

**Цель диссертационной работы:** установление возможности обратимого управления проводимостью структур металл-изолятор-металл за счет массопереноса в слоях с ионной проводимостью и влияния внешних воздействий на ионный перенос в наноструктурах, а также возможности учета и управления процессом осаждения углерода электронным лучом.

**Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:**

- изучение динамики образования слоев твердого электролита AgI на поверхности металлического серебра в ходе образования;
- определение оптимальных свойств слоя AgI, при которых наблюдается массоперенос серебра;
- экспериментальное исследование токовых характеристик туннельных структур, содержащих в качестве электрода структуру AgI/Ag и их теоретическое описание;
- получение и исследование свойств структур пористого кремния, насыщенных металлами и твердыми электролитами;
- изучение процесса образования слоя углерода на поверхности образца при использовании электронно-зондовых методов микроанализа;
- улучшение достоверности результатов количественного элементного анализа электронным зондом в условиях осаждения углерода.

**Новизна исследований, проведенных в ходе диссертационной работы, состоит в следующем:**

- установлено, что явление массопереноса серебра через тонкий слой AgI с образованием кластеров металла на его поверхности наблюдается при условии сплошной пленки;
- показано обратимое изменение проводимости туннельной структуры, содержащей слой AgI/Ag. На основе экспериментальных токовых зависимостей получена функциональная зависимость проводимости туннельного зазора в ходе роста серебряного кластера;
- обнаружены мемристорные свойства в структуре металл - пористый полимер - AgI/Ag;
- обнаружено влияние УФ излучения на массоперенос серебра в слоях пористого кремния;
- показана возможность получения ионопроводящего композита, состоящего из матрицы пористого кремния и приповерхностных слоев, насыщенных AgI;
- реализованы структуры с обратимо управляемым изменением сопротивления на основе слоев пористого кремния и твердого электролита;

- выявлены факторы, позволяющие снизить влияние артефактов осаждения углерода из газовой среды электронного микроскопа, что позволило существенно улучшить достоверность результатов количественного элементного анализа электронным зондом.

### **Практическая значимость**

Предложены и реализованы конструкции и устройства для контролируемого получения слоистых структур с требуемой толщиной слоя AgI на поверхности слоя серебра. Модернизирована установка контроля процесса образования пористого кремния. Показана возможность насыщения пористого слоя кремния металлами, что существенно оказывает влияние на электрофизические свойства получаемых композитов. Получены структуры с управляемым сопротивлением на основе AgI/Ag в качестве активного электрода и пористых слоев полимера (или кремния).

Показано, что осаждение углерода при электронно-микроскопических исследованиях приводит не только к искажениям регистрируемой топологии, но может существенным образом исказить результаты элементного анализа. Проведен расчет влияния толщины образующегося слоя углерода на ослабление линий спектра рентгеновского отклика. Оценена вносимая ошибка определения количественного состава образца. Разработаны методики и приводятся рекомендации для режимов проведения электронно-зондового микроанализа.

### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту**

1. В слоистых структурах, образованных ионопроводящими AgI/Ag и диэлектрическими слоями, при протекании тока возникает обратимое изменение проводимости за счет массопереноса серебра, управляемое направлением и количеством перенесенного заряда.

2. В слоях пористого кремния, поверхность которого насыщена серебром, электрическое поле или ультрафиолетовое излучение вызывает перенос серебра как вдоль, так и перпендикулярно поверхности кремния, причем прямое воздействие потока электронов на поверхность структуры приводит к образованию серебряных кластеров.

3. Для резистивной структуры на основе композитного материала, состоящей из матрицы пористого кремния, поры которого заполнены иодистым серебром, характерно переключение сопротивления в зависимости от направления протекания тока через структуру.

4. В области гистерезиса вольтамперной характеристики структуры металл | пористый кремний | металл существует долговременная память стабильного переключенного состояния, управляемая дозой гамма-излучения.

5. Количество осажденного углерода в камере растрового электронного микроскопа снижается при воздействии на образец ультрафиолетового излучения, нагрева и электрического потенциала, учет динамики образования слоя позволяет значительно улучшить достоверность результатов измерения элементного состава.

**Достоверность результатов** проведенных исследований обеспечивается применением широко апробированных и хорошо зарекомендовавших себя методов исследования и аппаратуры, включающих в себя:

- оптические методы (спектральная эллипсометрия, интерферометрия, спектрофотометрия, рамановская спектроскопия, диффрактометрия);

- зондовые методы (туннельная, атомно-силовая, электронная микроскопии и электронно-зондовый микроанализ);

- электрофизические методы (исследование вольт-амперных и вольт-фарадных зависимостей);

- аппаратуру и методы обеспечивающие исследования влияния воздействия ультрафиолетового, электронного и рентгеновского тормозного излучения;

- использование независимых методов анализа и статистической обработки результатов и согласованностью с данными, полученными другими авторами, широкой апробацией результатов работы на международных и всероссийских конференциях.

**Апробация работы** проходила в рамках научных семинаров кафедры «Материаловедения технологии и управления качеством» СГУ и на научно-технических конференциях:

Всероссийская научная школа-семинар «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине» 23-25 мая 2007 г., Саратов;

Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Инновации и актуальные проблемы техники и технологий» 15–16 сентября 2009 г., и 26-29 октября 2010 г Саратов;

Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2010, 2012, 2014, 2016, 2018, 2020» г. Саратов;

Международная конференция «Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология. "Композит -2010" 30 июня – 2 июля 2010 г., Саратов;

18 Международное совещание «Физика конденсированных сред» 25 ноября 2011 г., Анкара, Турция;

III Международная школа-семинар «Наночастицы, наноструктурные покрытия и микроконтейнеры: технология, свойства, применения. 5-9 мая 2011 г., Анталья, Турция;

IV Всероссийская школа-семинар студентов, аспирантов и молодых ученых по тематическому направлению развития ННС «Нанобиотехнология» Нанобиотехнологии: проблемы и перспективы» 29 сентября - 1 октября 2011 г., Белгород;

Тридцать вторая международная конференция «Композиционные материалы в промышленности» 4-8 июня 2012 г., Ялта-Киев;

Международная конференция «Ионный перенос в органических и неорганических мембранах» 28 мая-2 июня 2012г., Краснодар;

II Международная конференция молодых ученых «Актуальные проблемы теории и практики электрохимических процессов» 21-24 апреля 2014 г., Энгельс;

Всероссийская научная школа-семинар «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами» 19-20 мая 2016 г. и 16 - 17 мая 2019 г. Саратов;

Всероссийская молодежная конференция «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине» 11-12 ноября 2015 г., Саратов;

X Международная научная конференция «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» 20-23 августа 2018 г., Минск, Беларусь;

Международная конференция «Nanoparticles, Nanostructured Coatings And Microcontainers: Technology, Properties» 2014 г, Гент, Бельгия; 2015 г, Саратов, Россия, 2016 г., Томск, Россия;

**Материалы диссертационной работы использовались при выполнении научно-исследовательских работ:**

НИОКР «Разработка методов снижения влияния артефактов при рентгеноспектральном микроанализе в электронной микроскопии» государственный контракт № 8758 р /13975;

НИОКР «Разработка методов активного воздействия с целью снижения влияния артефактов в электронной микроскопии» государственный контракт № 10072 р /14303;

Грант РФФИ/TUBITAK №10-08-91219-СТА «Влияние морфологии, условий получения и внешних воздействий на диэлектрические и магнитные свойства нанокompозитов»;

Грант 13-08-00678 А, «Композиционные материалы и покрытия на основе смесей тяжелых микро- и наночастиц с полимером и их свойства при знакопеременных деформациях в поле ультразвуковой волны»;

Гос. задание по проекту №3468, регистрация в ЕГИСУ НИОКР №114121550163, «Фазовая и структурная модификация микро- и наноструктур электромагнитным излучением широкого спектрального диапазона энергий»;

Грант РФФИ №18-07-00752 А, «Комплексное исследование кинетики формирования нано-, мезопористого кремния при гамма-облучении в сочетании с компьютерным моделированием для радиационно-стойких элементов микроэлектроники».

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликовано 39 работ, в том числе 10 статей в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus (всего 15 статей в журналах, включенных в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук» Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации).

**Личный вклад автора.** Основные результаты диссертации получены автором лично. Автором проводился анализ литературы, постановка экспериментов, построение математических моделей. Обсуждение и интерпретация результатов, подготовка статей и докладов осуществлялись совместно с научным руководителем и коллективом соавторов. При использовании результатов других авторов и полученных в соавторстве, приводятся соответствующие ссылки.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 148 страницах. Работа содержит 92 рисунка, 3 таблицы и список источников из 148 наименований.



## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** представлено обоснование актуальности темы исследования и степень ее разработанности. Приведены цель и поставлены задачи исследования.

**В первой главе** приводится анализ современного состояния исследований массопереноса в наноразмерных структурах с ионной проводимостью и измерительных системах. Структуры металл-диэлектрик-металл, способные обратимо менять сопротивление слоя диэлектрика с сохранением памяти состояния ReRAM (резистивная память), получили широкую известность благодаря реализации элемента «Memristor» с его перспективным применением в область нейропроцессоров. Немного ранее на эффекте образования и разрушения металлических мостиков в диэлектрике были реализованы ячейки памяти, получившие название «Atom Switch». Большинству диэлектриков и твердых электролитов свойственно прораствание усов металла через слой материала. Наиболее перспективным материалом в качестве ионного проводника является иодид серебра AgI, для которого это явление не характерно.

Слоем активного диэлектрика может быть композит, содержащий включения металла и твердого электролита, как например Ag/Ag<sub>2</sub>S или Ag/AgI. В основном твердые электролиты обладают смешанной электронно-ионной проводимостью, уникальным является AgI, у которого в суперионной фазе преобладает катионная проводимость, что существенно повышает эффективность переноса металла. Величина ионной проводимости зависит от многих факторов таких, как кристаллическая структура, размер кристаллитов, стехиометрия состава, давление, температура и кристаллическое окружение.

С позиции высокой кратности изменения сопротивления при минимально затраченной энергии на переключение представляют интерес структуры с управляемым туннельным барьером. Величиной туннельного зазора (его проводимостью) можно управлять ионным переносом, пропуская заряд в том или ином направлении. Анализ публикаций позволил сформировать представление о методах получения структур, их исследования и поиска путей решения имеющихся противоречий. Так, например, отсутствуют сведения о применении AgI/Ag в структурах с туннельным барьером.

Особенностью методов исследований в данной работе было получение сведений непосредственно в ходе образования структур. Однако, изучение материалов с ионной проводимостью методами туннельной или электронной микроскопии имеет существенные особенности. Помимо преобразования в

самой структуре под действием протекающего тока электронов измерительной системы присутствуют нежелательные явления, вносимые используемым методом. Проведенный анализ литературных данных показал, что рассматриваемая проблема, а именно, преобразование материала при его взаимодействии с электронным потоком и наличие артефактов в измерительной системе электронного микроскопа, связанных с осаждением углерода на поверхность изучаемого образца, исследованы недостаточно.

**Вторая глава** посвящена исследованиям массопереноса в структурах, содержащих твердый электролит. Приводится технология и методы контроля свойств структур непосредственно в ходе их получения. Тонкие слои AgI получали на поверхности слоя металлического серебра в парах иода. Методом спектральной эллипсометрии проводился контроль оптических свойств и толщины слоя в процессе роста. Конструкция реакционной камеры позволяет перемешивать и осуществлять подачу паров иода. С увеличением толщины слоя AgI скорость образования слоя уменьшается и увеличивается его показатель преломления.

Проводимость структуры, содержащей слои AgI/Ag - туннельный зазор - вольфрамовый зонд исследовалась методами туннельной микроскопии. Было установлено, что при некотором отрицательном потенциале зонда происходит резкое замыкание туннельного зазора с увеличением туннельного тока в несколько раз. Уменьшение разности потенциалов ниже порогового приводит к восстановлению исходной величины туннельного тока и положения зонда. Наблюдаемое явление может быть описано обратимым образованием на поверхности слоя AgI/Ag усюв серебра.

Теоретические и экспериментальные исследования поведения зависимостей тока от разности потенциалов и времени для туннельной структуры, содержащей слои с ионной проводимостью, позволяют оценить такие параметры, как сопротивление и контактную разность потенциалов материалов в замкнутом и разомкнутом состоянии туннельного зазора, а также размер усика серебра в туннельном зазоре в зависимости от заряда электронов, прошедшего через туннельный барьер. Экспериментально полученная зависимость туннельного тока  $I_{\text{тун}}$  от напряжения  $U$  хорошо описывается предложенной математической моделью, в которой туннельный зазор  $\Delta Z$  зависит от протекающего заряда  $\Delta Q$  по линейному закону (рис. 1).

Туннельный зазор  $\Delta Z$  по мере роста кластера серебра на поверхности структуры AgI/Ag уменьшается с увеличением заряда электронов, прошедшего через туннельный барьер  $\Delta Z = Z_0 - f(Q)$ .

$$I_{tun} = \frac{U}{R_s + 1/G_0 e^{-k \cdot (Z_0 - \eta \int I_{tun} \cdot dt)}}$$

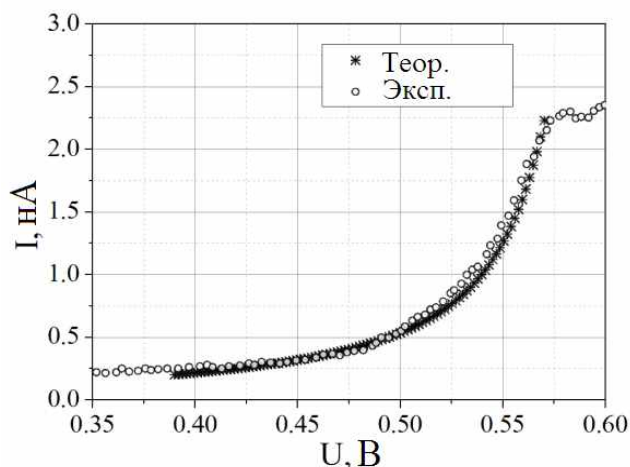


Рисунок 1 – Зависимость туннельного тока в структуре с туннельным зазором и твердым электролитом AgI/Ag

В самом простом случае  $f(Q) = \eta \cdot \int I_{tun} \cdot dt$ , где физический смысл коэффициента  $1/\eta$  есть величина заряда  $\Delta Q$  электронов, преодолевших туннельный барьер, и приведшая к изменению туннельного зазора на  $1 \text{ \AA}$ ,  $Z_0$  - начальный туннельный зазор,  $R_s$  - последовательное сопротивление слоев структуры,  $G_0$  - квант сопротивления. Согласование математической модели с данными натурального эксперимента дало значение параметра  $1/\eta \sim 4 \text{ пКл/\AA}$ . Величина прошедшего через структуру заряда  $\Delta Q$ , приведшего к переключению состояния проводимости, составила менее  $5 \text{ пКл}$ . Предложенная модель позволяет определить начальный туннельный зазор  $Z_0$ , параметр  $1/\eta$  и заряд электронов  $\Delta Q$ , затраченный на переключение.

Композитные структуры, состоящие из матрицы пористого кремния заполненной металлами, получали несколькими методами. Один из способов состоял в электрохимическом анодном травлении в растворе плавиковой кислоты. Процесс травления проводился при контроле параметров образующегося слоя по интерференции отраженного инфракрасного излучения. Второй способ получения слоев пористого кремния заключался в бестоковом травлении монокристаллического кремния в растворе нитрата серебра и плавиковой кислоты с последующим удалением с поверхности металлического серебра в растворе азотной кислоты.

Профиль распределения серебра в пористом слое контролировался на сколе структуры методом растровой электронной микроскопии. Установлено, что слой пористого кремния, насыщенный серебром и модифицированный в парах иода, под действием тока электронного луча, обладает переносом серебра с образованием металлических усов на поверхности (рис. 2)

В структурах пористого кремния, полученного бестоковым методом, с использованием наночастиц AgI наблюдается практически линейная зависимость изменения проводимости от перенесенного заряда электронами. Данные рентгеновской дифрактометрии показали, что при нагревании фазовый переход частиц AgI размерами  $50 \pm 15$  нм в высокотемпературную фазу наблюдался при температуре  $140-150$  C° и эта фаза сохранялась при охлаждении до  $60$  C° (рис. 3).

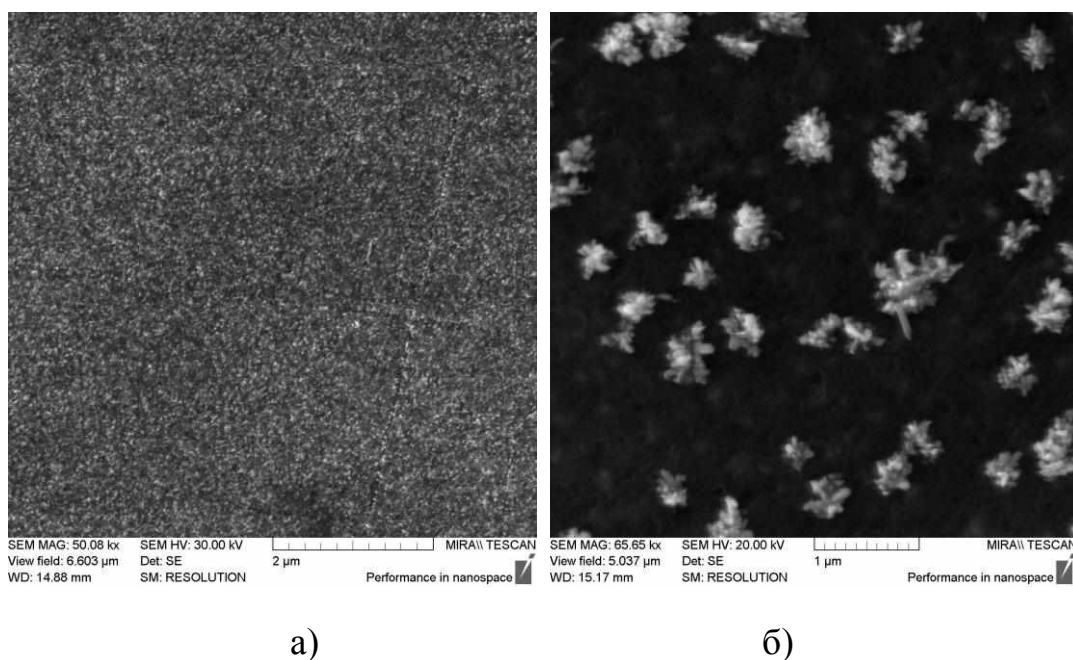


Рисунок 2 – СЭМ поверхности пористого кремния насыщенного AgI  
 а) – исходная поверхность, б) – после облучения электронным лучом

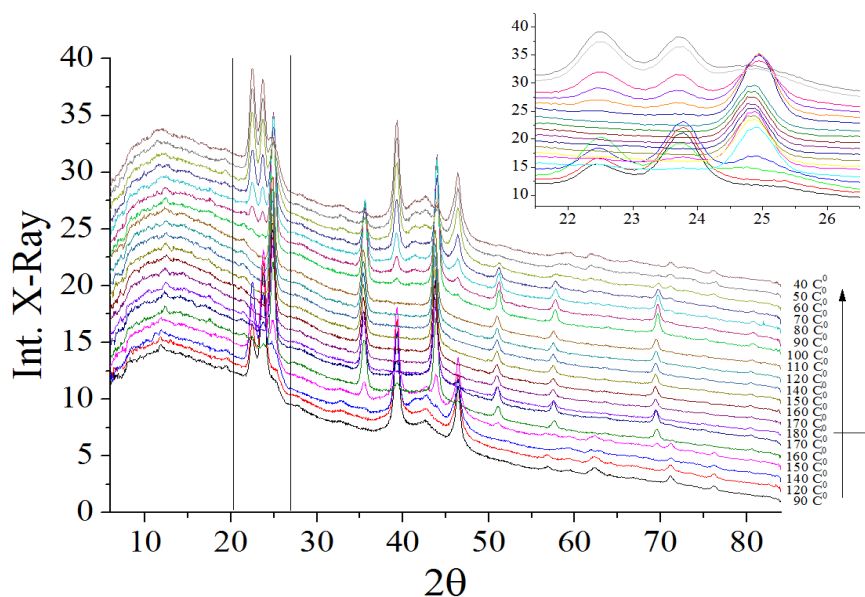


Рисунок 3 – Дифрактограммы нагрева и охлаждения nano-AgI

Исследовалось влияние насыщения пористого кремния металлами помимо серебра на его электрофизические свойства. Установлено, что пассивация пористого кремния железом стабилизирует электрофизические свойства, изменяя не только величину проводимости слоя, но и характер переноса носителей на низких частотах.

**В третьей главе** рассматриваются влияния воздействий электрического поля, ультрафиолетового и гамма-излучения на процессы переноса серебра в приповерхностных слоях пористого кремния. Показано, что облучение УФ оказывает влияние на перераспределение концентрации серебра в приповерхностном слое пористого кремния. Глубина границы насыщения серебром слоя пористого кремния увеличивается от 5 до 10 мкм за 7 часов, что свидетельствует о фотоактивации миграции ионов серебра.

Показана возможность применения Ag/AgI в устройствах с управляемым сопротивлением и памятью состояния. Слоистые структуры металл - пористый диэлектрик - AgI/Ag способны обратимо изменять величину проводимости в зависимости от полярности приложенного напряжения и перенесенного заряда. В качестве слоя диэлектрика, способного изменять сопротивление, могут применяться различные пористые материалы.

Активным слоем в переключающих структурах служит твердый электролит AgI, обладающий ионной проводимостью. Под действием электрического поля, вызывающего перенос ионов серебра, в слое пористого изолятора образуются проводящие каналы, что приводит к изменению проводимости всей структуры. Изменение направления протекания тока обратимо разрушает серебряные перемычки и сопротивление диэлектрического слоя и структуры в целом увеличивается. Реализован переключатель, демонстрирующий изменение проводимости, где состояние с низким сопротивлением (логическая "1") составляло не более 80 Ом, а состояние с высоким сопротивлением (логический "0") – не менее 200 кОм (рис. 4). Изменение сопротивления осуществлялось импульсным потенциалом 1 В, через последовательное сопротивление 10 кОм в течение 1 с. В структуре в качестве диэлектрика был применен слой полистирола толщиной около 5 нм. Пассивным электродом служил слой хрома.

Структуры пористого кремния с включениями серебра и твердого электролита AgI в зависимости от полярности протекающего поперек слоев тока обратимо изменяли свое сопротивление (рис. 5). Изменение проводимости структуры вызвано электромиграцией серебра в слое пористого кремния и обратимым образованием металлических нитей.

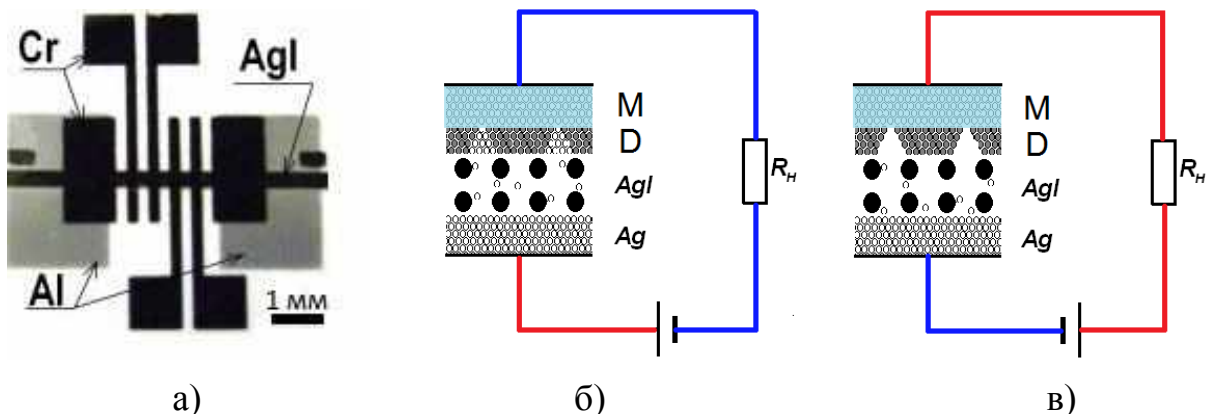


Рисунок 4 – Топология и схема структуры тонкопленочного переключателя: а) – Ag-AgI-диэлектрик-металл б, в) – схема в состояниях логических "1" и "0"

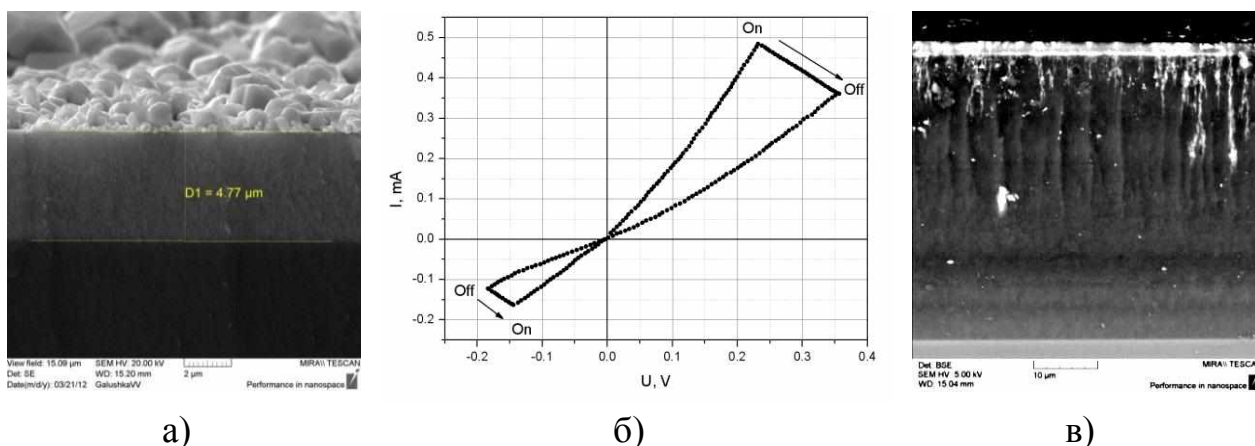


Рисунок 5 – Структура Ag/AgI-ПК-Si: а) – скол слоя пористого кремния, б) – график изменения проводимости структуры в) – скол структуры после электрических воздействий

Характеристики проводимости структур показали, что порог напряжения, приводящий к изменению сопротивления, составляет десятые доли вольта. На сколе структуры после токовых воздействий в слое пористого кремния наблюдаются области, обогащенные металлом на глубину до 20 мкм при общей толщине слоя пористого кремния 40 мкм. Толщина слоя пористого кремния, насыщенного серебром, изначально составляла не более 5 мкм.

Исследовано влияние малых доз гамма-излучения на электрические характеристики структур на основе слоя пористого кремния для выяснения возможности управления дефектностью в материале с высоким уровнем оборванных связей.

Облучение структур проводилось пучком гамма-квантов тормозного излучения ускорителей, экспозиционная доза менялась от 5 до 40 кР. Установлено, что в структуре с пористым кремнием на кремниевой подложке р-типа, воздействие гамма-квантов приводит к возрастанию проводимости за счет изменения концентрации ловушек. Так, например, при дозе излучения 5 - 20 кР концентрация ловушек в пористом кремнии падает от  $2 \cdot 10^{15}$  до  $4 \cdot 10^{14}$   $\text{см}^{-3}\text{эВ}^{-1}$ , при этом влияние излучения указанных доз на подложку практически не наблюдается. При дозе облучения около 20 кР гистерезис ВАХ наблюдается в диапазоне напряжений 0.05 - 0.2 В и характеризуется ростом тока в 20-30 раз. Стабильное значение тока в гистерезисе сохраняется с высокой степенью точности до долей микроампер при последовательном многократном включении и выключении напряжения в течение около 60 суток, затем ток постепенно уменьшается (рис. 6).

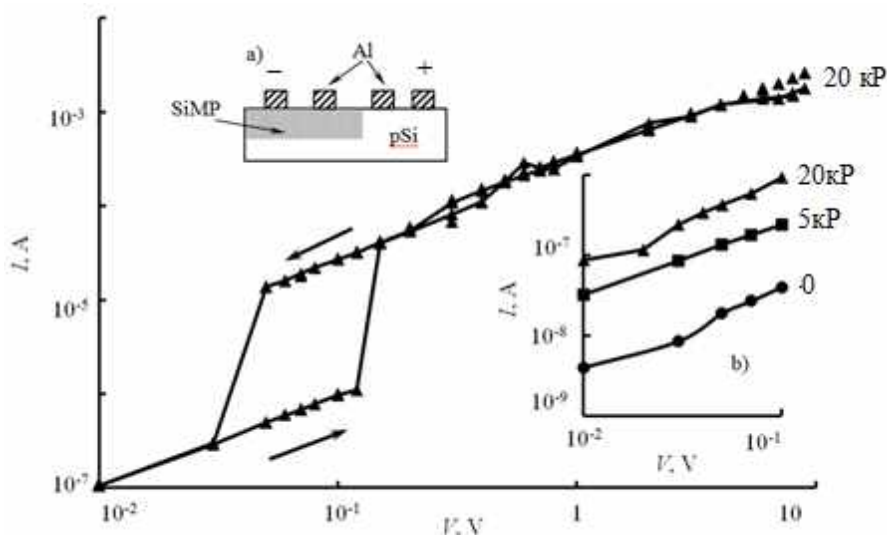


Рисунок 6 – ВАХ структуры после  $\gamma$ -облучения а) схема образца, б) омический участок характеристики при разных дозах.

Окончательная стабилизация гистерезиса происходит через 70-90 суток. Это показывает наличие долговременной памяти стабильного переключенного состояния в области гистерезиса вольт-амперной характеристики, управляемая дозой гамма излучения.

**В четвертой главе** приводятся результаты индуцированного электронным пучком переноса серебра в структурах Ag/AgI. Результаты исследований методами растровой электронной микроскопии образующегося слоя AgI показывают, что сначала на поверхности серебра образуются отдельные кластеры AgI, число которых с увеличением количества иода растёт. Размеры кластеров AgI составляют  $20\pm 5$  нм и с увеличением количества паров иода практически не меняются. Отдельные кластеры не проявляют заметного переноса серебра под действием тока электронного пучка. Увеличение числа кластеров AgI на некоторой стадии модификации приводит к образованию сплошной пленки и при этом под воздействием электронного луча наблюдается интенсивный массоперенос серебра с образованием металлических усов на поверхности. Аналогичное явление наблюдается при воздействии электронным лучом на наночастицы AgI, нанесенные на поверхность металлического серебра. Отдельные частицы не вызывают появления серебряных усов, в то время как на сплошном слое частиц усы серебра интенсивно образуются. По-видимому, перенос ионов происходит преимущественно по поверхности границ кристаллитов. На поверхности микрочастиц AgI образование кластеров серебра под действием электронного луча наблюдается вдоль слоев межфазных границ.

Рассмотрено влияние ослабления рентгеновского сигнала в осаждаемом слое углерода. Получить сведения о толщине образующегося слоя углерода и его изменении возможно из анализа динамики изменения концентраций элементов. Полученные значения толщины слоя углерода хорошо согласуются с результатами измерения рельефа углеродного пятна методом атомно-силовой микроскопии. Оценки ослабления рентгеновского излучения в слое углерода показывают, что регистрируемое отношение концентраций компонентов в образце существенно зависит от выбора характеристических пиков для количественного анализа (рис. 7).

Разработана методика, позволяющая повысить точность результатов анализа состава по сравнению со способом однократного измерения. Суть способа заключается в анализе динамики изменения состава с целью определения скорости образования слоя углерода и экстраполяции к моменту начала воздействия электронного луча на исследуемый участок. Данный способ позволяет определить начальный уровень загрязнения образца адсорбированными углеводородами.

Полученная информация о толщине слоя углерода может быть использована для введения поправок на поглощение излучения характеристических пиков и восстановления истинного состава образца.



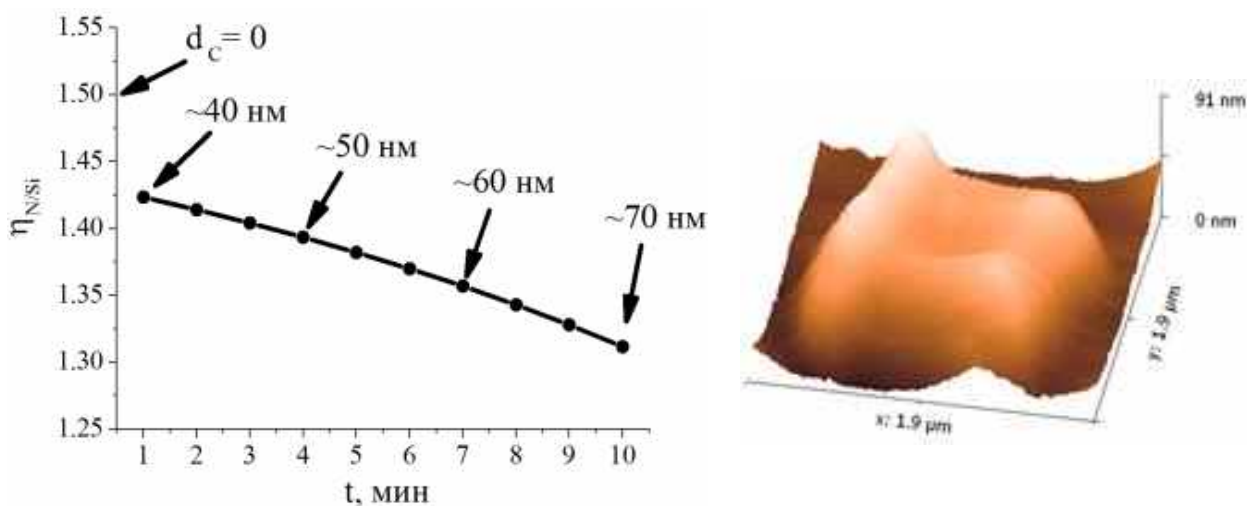


Рисунок 7 – Влияние толщины слоя углерода на регистрируемую стехиометрию состава образца. Справа АСМ рельеф участка после 10 мин воздействия электронного луча

В ходе исследований процесса осаждения углерода в электронной микроскопии было установлено, что после воздействия на поверхность образца ультрафиолетом следы углеродного загрязнения на морфологии практически отсутствуют. По результатам динамики состава также заметна тенденция к уменьшению как скорости образования углерода на поверхности, так и начального загрязнения поверхности.

**В заключении** представлены основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы:

- разработана методика и устройства для контролируемого получения структур AgI/Ag модификацией поверхности слоя серебра в парах иода;
- показано, что динамика образования нанослоев AgI за счет иодизации поверхности серебра имеет нелинейный характер. С ростом толщины слоя AgI скорость образования уменьшается, пленка уплотняется;
- на основе экспериментальной зависимости туннельного тока от напряжения в области переключения сопротивления структуры с ионной проводимостью и туннельным барьером разработана математическая модель, описывающая изменение проводимости туннельного барьера при массопереносе вещества в туннельный зазор;
- показана возможность получения структур, обладающих мемристорными свойствами на основе слоев Ag/AgI-пористый диэлектрик-металл;
- установлено что, облучение ультрафиолетом структур пористого кремния, частично насыщенных серебром, приводит к миграции и

перераспределению концентрации серебра на поверхности и в объеме пористого слоя;

- композитный материал, состоящий из матрицы пористого кремния, поры которой заполнены иодистым серебром, обладает массопереносом ионов серебра. Получены и исследованы резистивные структуры Ag/AgI-пористый кремний-металл, обладающие переключением сопротивления в зависимости от направления протекающего тока;

- показано, что воздействие гамма излучения приводит к возрастанию проводимости слоя пористого кремния. Обнаружена долговременная память стабильного переключенного состояния в области гистерезиса вольт-амперной характеристики;

- показано, что особенностью фотоэлектрических свойств структур с мезопористым кремнием, насыщенным наночастицами серебра, является оптически управляемое скачкообразное увеличение темного тока с памятью воздействия;

- предложен способ проведения количественного элементного анализа, учитывающий динамику процесса осаждения углерода на исследуемую поверхность;

- показана возможность создания заданного рельефа на поверхности локальным осаждением углерода при воздействии электронного луча.

### **Основные результаты диссертации изложены в работах:**

1. Белобровая О.Я., Биленко Д.И., Галушка В.В., Жаркова Э.А., Терин Д.В., Хасина Е.И. Влияние адсорбции на емкостные свойства нанопористого кремния // Нано- и микросистемная техника. – 2009. – № 10. – С.15–18.
2. Биленко Д.И., Сагайдачный А.А., Галушка В.В., Полянская В.П. Определение оптических свойств и толщины нанослоев по угловым зависимостям коэффициента отражения // Журнал технической физики. – 2010. – Т.80. – Вып. 10. – С. 89–94.
3. Галушка В.В., Биленко Д.И. Снижение влияния артефактов при рентгеноспектральном микроанализе в электронной микроскопии // Вестник СГТУ. – 2010. – №4(51). – С. 20–25.
4. Биленко Д.И., Галушка В.В., Жаркова Э.А., Мысенко И.Б., Терин Д.В., Хасина Е.И. Электрофизические и фотоэлектрические свойства наноструктур, полученных неэлектролитическим травлением кремния // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45. – Вып. 7. – С. 984–987.
5. Биленко Д.И., Галушка В.В., Жаркова Э.А., Мысенко И.Б., Терин Д.В., Хасина Е.И. Электрофизические свойства мезопористого кремния, пассивированного железом // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47. – Вып. 5. – С. 644-648.

6. **Галушка В.В.**, Биленко Д.И., Терин Д.В. Исследование управляемого массопереноса в наноструктурах AgI-Ag методом туннельной микроскопии// Нано- и микросистемная техника. – 2014. – №8. – С.37– 42.
7. Биленко Д.И., **Галушка В.В.**, Жаркова Э.А., Мысенко И.Б., Терин Д.В., Хасина Е.И. Фотоэлектрические и фотовольтаические свойства структур на основе мезопористого кремния, пассивированного железом // и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48. – № 10. – С.1405-1408.
8. Биленко Д.И., **Галушка В.В.**, Жаркова Э.А., Мысенко И.Б., Терин Д.В., Хасина Е.И. Особенности фотоэлектрических свойств структур на основе мезопористого кремния с наночастицами серебра // Письма в журнал технической физики. 2015. – Т. 41. – Вып. 21. – С.80–87.
9. Биленко Д.И., **Галушка В.В.**, Жаркова Э.А., Сидоров В.И., Терин Д.В. Хасина Е.И. Влияние гамма-излучения малых доз на электрофизические свойства мезопористого кремния// Письма в журнал технической физики. – 2017. – Т.43. – Вып. 3. – С.57–63.
10. **Галушка В.В.**, Жаркова Э.А., Терин Д.В. Сидоров В.И., Хасина Е.И. Емкостные свойства структур на основе мезопористого кремния, облученного малыми дозами гамма-излучения// Письма в журнал технической физики. – 2017. – Т.43. – Вып. 21. –С. 72–77.
11. **Galushka V.V.**, Belobrovaya O.Y., Bratashov D.N., Kondrateva O.Yu., Polyanskaya V.P., Sidorov V.I., Yagudin I.T. & Terin D.V. Gamma-Radiation Monitoring of Luminescent Porous Silicon for Tumor Imaging // BioNanoScience. – 2018. – Т. 8. – №. 3. – С. 818–822.
12. Биленко Д.И., Белобровая О.Я., Терин Д.В., **Галушка В.В.**, Галушка И.В., Жаркова Э.А., Полянская В.П., Сидоров В.И., Ягудин И.Т. Влияние малых доз гамма-излучения на оптические свойства пористого кремния // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т.52. – Вып. 3. – С.349–352.
13. Белобровая О.Я., **Галушка В.В.**, Карагайчев А.Л., Полянская В.П., Сидоров В.И., Терин Д.В. Формирование слоев наноструктурированного пористого кремния при облучении малыми дозами  $\gamma$ -радиации // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. –2019. –Т. 19.–Вып. 4. –С. 312-316.
14. **Галушка В.В.**, Жаркова Э.А., Терин Д.В., Сидоров В.И., Хасина Е.И. Механизмы частотно-зависимой проводимости мезопористого кремния при гамма-облучении малыми дозами // Письма в журнал технической физики. – 2019. – Т. 45. – Вып. 11. – С. 6–8.
15. Белобровая О.Я., **Галушка В.В.**, Исмаилова В.С. Полянская В.П., Сидоров В.И., Терин Д.В., Машков А.А. Влияние малых доз гамма-излучения на оптические свойства наноструктурированного кремния, полученного методом металл-стимулированного химического травления *insitu* // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. – 2020. – Т. 20. – Вып. 4. – С. 288-298.