

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе «8D06201 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ДУЙСЕБАЕВ ТОЛАҒАЙ САБЫРЖАНҰЛЫ

ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ С ЭФФЕКТАМИ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ И СВОЙСТВАМИ СЕНСОРА ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Общая характеристика работы

В данной диссертационной работе представлены результаты исследований электронных систем на основе полупроводниковых материалов с эффектами резистивного переключения и газосенсорики летучих органических соединений. С использованием современных методов анализа, а также впервые применённого в задачах газосенсорики метода эллипсометрии, продемонстрирована его перспективность для изучения процессов адсорбции газов на поверхности полупроводниковых структур. Показано, что структуры на основе пористого кремния и металлоксидных гетероструктур обладают мемристорными свойствами, проявляющимися в виде электрического гистерезиса. Проведены расчёты и подтверждены механизмы кинетики адсорбции газов с использованием методов теории функционала плотности (DFT).

Актуальность темы

Современное развитие микро- и нанoeлектроники связано с переходом к новым парадигмам обработки и хранения информации, включая нейроморфные вычислительные системы, интернет вещей (IoT), гибкую электронику и интеллектуальные сенсорные сети. Стремительное увеличение объемов данных и необходимость их энергоэффективной обработки требуют создания новых функциональных материалов и устройств, способных совмещать несколько функций в рамках единой архитектуры. В связи с этим особое внимание уделяется разработке энергоэффективных, масштабируемых и многофункциональных электронных компонентов, обладающих высокой скоростью отклика, низким энергопотреблением и возможностью интеграции в современные вычислительные платформы.

Одним из наиболее перспективных направлений современной электроники являются полупроводниковые системы с эффектом резистивного переключения, лежащие в основе мемристорных структур. Мемристоры рассматриваются как ключевые элементы энергонезависимой памяти нового поколения (ReRAM), способные обеспечить высокую плотность записи информации, низкое энергопотребление и высокую скорость переключения. Кроме того, благодаря способности изменять и сохранять промежуточные состояния проводимости, мемристорные структуры являются перспективной элементной базой для нейроморфных вычислительных систем, моделирующих работу биологических

нейронных сетей. Возможность аналогового управления сопротивлением позволяет использовать такие устройства в качестве искусственных синапсов при реализации систем искусственного интеллекта и аппаратного машинного обучения.

Особый интерес представляют металлооксидные полупроводники, такие как ZnO , TiO_2 , SnO_2 и их композиционные структуры, обладающие развитой поверхностью, высокой химической стабильностью и выраженной чувствительностью к внешним воздействиям. Эти материалы активно исследуются не только в качестве функционального слоя мемристоров, но и как основа высокочувствительных сенсоров для обнаружения газов и летучих органических соединений. Высокая чувствительность металлооксидных структур обусловлена процессами поверхностной адсорбции и десорбции молекул газа, изменяющими концентрацию носителей заряда и, соответственно, электрические характеристики материала.

Параллельно с развитием сенсорных технологий возрастает интерес к созданию интеллектуальных сенсоров нового поколения, способных не только регистрировать внешние воздействия, но и выполнять предварительную обработку и хранение информации непосредственно на аппаратном уровне. В этой связи интеграция эффектов резистивного переключения и сенсорных свойств в одной структуре открывает широкие возможности для создания многофункциональных устройств, совмещающих функции памяти, обработки сигнала и чувствительного элемента. Подобные системы могут стать основой перспективных адаптивных сенсорных платформ для интернета вещей, робототехники и автономных электронных систем.

Следует отметить, что механизмы резистивного переключения и сенсорного отклика во многом связаны с одинаковыми физико-химическими процессами. Ключевую роль в обоих случаях играют миграция кислородных вакансий, перераспределение дефектов структуры, формирование и разрушение локальных проводящих каналов, а также процессы адсорбции и десорбции кислорода и молекул газа на поверхности материала. Управление концентрацией дефектов и морфологией поверхности позволяет целенаправленно изменять как параметры резистивного переключения, так и сенсорные характеристики структур.

Несмотря на значительный прогресс в области мемристивных и сенсорных материалов, остаются нерешёнными проблемы стабильности, воспроизводимости и долговременной надёжности характеристик. Существенное влияние на параметры устройств оказывают особенности морфологии поверхности, неоднородность распределения дефектов, условия формирования проводящих каналов и деградиационные процессы при многократном переключении. Кроме того, механизмы взаимодействия сенсорного эффекта и резистивного переключения в комбинированных структурах до настоящего времени изучены недостаточно полно, что ограничивает практическое применение подобных систем.

В связи с этим исследование металлооксидных полупроводниковых структур с совмещенными мемристивными и сенсорными свойствами представляет собой актуальную научную и технологическую задачу современной микро- и нанoeлектроники. Разработка таких материалов и устройств позволит создать новое поколение интеллектуальных электронных систем, сочетающих функции памяти, обработки информации и чувствительных элементов в единой компактной архитектуре.

Цель работы

Целью диссертационного исследования является установление взаимосвязи между структурными, морфологическими, электрическими и оптическими характеристиками металлооксидных полупроводниковых структур и их газочувствительными свойствами, а также разработка на их основе многофункциональных электронных систем с эффектами резистивного переключения и сенсорики органических веществ.

Объекты исследования: полупроводниковые структуры на основе пористого кремния и металлооксидных гетероструктур, предназначенные для реализации сенсорных и запоминающих элементов электроники.

Предмет исследования: физические механизмы и закономерности формирования газочувствительного отклика, а также эффекты резистивного переключения в полупроводниковых структурах на основе пористого кремния и металлооксидных гетероструктур, определяющие их электрические и оптические характеристики и функциональные параметры сенсорных и запоминающих элементов.

Методы исследования

В работе использован комплекс методов формирования и исследования полупроводниковых структур. Пористый кремний получали электрохимическим методом, а металлооксидные гетероструктуры – методом магнетронного распыления. Структурные и морфологические характеристики исследовались методами сканирующей электронной микроскопии (SEM), атомно-силовой микроскопии (AFM) и рентгеновской дифракции (XRD). Поверхностные свойства оценивались по измерениям угла смачивания. Электрофизические характеристики определялись методом ван дер Пау и анализом вольт-амперных характеристик ($I-V$), а оптические параметры — методом спектрофотометрии. Газочувствительные свойства исследовались при воздействии органических веществ, при этом спектральная эллипсометрия применялась как чувствительный метод *in situ*-регистрации адсорбционных процессов на поверхности структур. Обработка результатов выполнялась с использованием экспериментальных и аналитических методов.

Задачи исследования

1. Разработать и исследовать сенсорный элемент на основе пористого кремния, полученного методом электрохимического травления, и оценить газочувствительные характеристики (чувствительность, время отклика и селективность) при детектировании органических веществ в составе электронной измерительной системы.

2. Исследовать влияние толщины металлооксидного слоя в гетероструктуре $\text{SnO}_2/\text{por-Si}$ на газочувствительный отклик при воздействии паров органических веществ с использованием метода спектральной эллипсометрии.

3. Исследовать эффекты резистивного переключения в гетероструктуре NiO/MgO и определить параметры анизотропной проводимости и отношение состояний HRS/LRS в зависимости от режима электрического воздействия и конфигурации электродов.

Новизна диссертационной работы:

1. Установлены закономерности формирования газочувствительного отклика пористого кремния в зависимости от режимов его электрохимического синтеза, обеспечивающие достижение максимальной чувствительности к аммиаку и минимального времени отклика в условиях интеграции в электронную измерительную систему.

2. Впервые выявлено влияние толщины металлооксидного слоя в гетероструктурах $\text{SnO}_2/\text{por-Si}$ на величину газочувствительного отклика к парам органических веществ с помощью метода эллипсометрии.

3. Обнаружены и систематизированы эффекты анизотропного резистивного переключения в гетероструктурах NiO/MgO , определяющие высокое отношение состояний HRS/LRS и обосновывающие возможность их применения в элементах энергонезависимой памяти и функциональных электронных устройствах нового типа.

Основные положения к защите:

1. Интегрированный в электронную систему сенсорный элемент из пористого кремния, полученный методом электрохимического травления с параметрами плотности тока $j = 12 \text{ мА/см}^2$, напряжения $U = 9 \text{ В}$ и времени $t = 45 \text{ мин}$ (пористость 52%) демонстрирует наибольшую чувствительность к аммиаку – 42%, с временем отклика равным $t_{\text{откл}} = 35 \text{ с}$.

2. При исследовании гетероструктуры $\text{SnO}_2/\text{por-Si}$ на основе метода эллипсометрии, газочувствительный отклик на пары этанола и пропанола увеличивается более чем на 50 % при увеличении толщины металлоксидного слоя со 100 нм до 300 нм.

3. Полученная гетероструктура NiO/MgO с анизотропным резистивным переключением дает наибольшее соотношение HRS/LRS равное 10^2 , при значениях напряжения $\pm 5 \text{ В}$ и параллельной конфигурации электродов.

Теоретическая значимость

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в установлении взаимосвязи между структурными, морфологическими, электрическими и газочувствительными свойствами полупроводниковых структур на основе пористого кремния и металлооксидных гетероструктур. Полученные результаты расширяют представления о механизмах резистивного переключения, процессах адсорбции газов и влиянии толщины металлооксидных слоёв на формирование газочувствительного отклика. Также

показана перспективность применения метода спектральной эллипсометрии для исследования адсорбционных процессов в задачах газосенсорики.

Практическая значимость

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанных полупроводниковых электронных систем для детектирования летучих органических соединений (ЛОС) в системах экологического мониторинга, промышленной безопасности и медицинской диагностики. Полученные результаты также могут быть применены при создании элементов энергонезависимой памяти и функциональных устройств нового поколения на основе эффектов резистивного переключения. Кроме того, результаты исследования открывают перспективы разработки нового класса устройств – газисторов, объединяющих сенсорные и мемристивные свойства.

Надежность и достоверность результатов

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждены наличием публикаций в изданиях МНВО РК, в журналах, входящих в международные информационные ресурсы Web of Science (Clarivate Analytics, США) и Scopus (Elsevier, Нидерланды) и в международных научных конференциях, а также в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в исследовательской работе на всех этапах диссертационной работы. Автор провел работу по получению наноструктур, изучению влияния частиц газа на их электрические характеристики, а также обработке и анализу результатов исследования оптических, морфологических и электрических характеристик образцов. Утверждение задач и плана работы, обсуждение результатов осуществлялось совместно с научными руководителями.

Апробация диссертационной работы

По теме диссертации было опубликовано 4 работы, входящих в международные информационные ресурсы Scopus. Также имеется авторское свидетельство.

Статьи с высоким импакт-фактором в публикациях, включенных в международную научную базу данных Scopus/Web of Science:

1. A.Skabylov, L.Abdizhalilova, M.Ibraimov, B.Khaniyev, Y.Tezebay, M.Abdullah, R.Azamat, O.Toktarbaiuly and **T.Duisebayev**. Wireless Ammonia Gas Sensor based on P-type Porous Si: Methods, Materials and Design. Engineered Science, 2025, V.37. [IF = 12.5, Процентиль 96%] <http://dx.doi.org/10.30919/es1704>.
2. M.Ibraimov, B.Khaniyev, Y.Tezebay, R.Azamat, N.Yakovlev, O.Toktarbaiuly, M.Zhazitov, M.Karibayev, B.Akilbekov, S.Piskunov, J.Liu, **T.Duisebayev**. Ellipsometry optical gas sensor of SnO₂/porous-Si heterostructure for organic compounds detection. Advanced Sensor Research [Q2, IF = 3.5, процентиль 70%] <https://doi.org/10.1002/adsr.202500194>

3. **T.Duisebayev**, B.Khaniyev, M.Ibraimov, O.Toktarbaiuly, M.Zhazitov, M. Abdullah, Y. Tezekbay, A. Syrlybekov, T. Serikov, N. Nuraje. Anisotropic resistive switching in NiO thin films deposited on stepped MgO substrates. Nanomaterials. [Q1, IF = 4.3, процентиль 76%] <https://doi.org/10.3390/nano15221703>.
4. **T.Duisebayev**, M.Ibraimov, B.Khaniyev, A.Tileu, D.Alimbetova. Development of memory elements based on surface-modified nanostructured porous silicon. WSEAS Transactions on Electronics, 15 2024 [IF=1.1, процентиль 25%] <https://doi.org/10.37394/232017.2024.15.8>.

Авторское свидетельство: №685501 от 11 марта 2026г. «Эллипсометрический метод обнаружения органических веществ», **Т. Дуйсебаев**, М. Ибраимов.

Связь работы с научными проектами:

Работа выполнена в рамках проекта № AP19678266 «Разработка селективного газового сенсора для взрывоопасных и вредных веществ на основе наноструктурированных полупроводников для обеспечения промышленной безопасности», финансируемого Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (2023-2025гг.)

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, определения, обозначений сокращений, 3 разделов, заключения, списка литературы и приложения. Работа включает 66 рисунков, 28 формул, 4 таблиц, 106 списка литературы и 107 страниц.