АННОТАЦИЯ

Специальность «6D072300 – Техническая физика»
научно-исследовательская работа на соискание ученой степени доктора философии (PhD)

Аймаганбетов Казыбек Пиржанулы

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЯЧЕЙКА ДЛЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРОВ

Общее описание вакансии.

Научная работа направлена на разработку ячейки для измерения электрофизических характеристик полупроводниковых оптоэлектронных материалов и устройств.

Актуальность темы.

Электрические измерения полупроводниковых материалов с использованием постоянного и переменного тока при низких температурах дают ценную информацию об электропроводности материалов, природе и влиянии носителей заряда, расположении дефектов и примесей и других характеристиках, связанных со свободными носителями заряда.

Проведение электрических исследований, в особенности при низких температурах, может сопровождаться рядом проблем, которые в конечном итоге могут приводить к искажению сигнала и неверным результатам измерений: к таковым относятся плохие контактные соединения, воздействие окружающей среды, шумы и помехи при измерениях на низких уровнях сигнала. Решение этих проблем требует использования высококачественных измерительных инструментов, правильной методологии измерений, учета окружающей среды и тщательного изучения всех параметров, которые могут повлиять на результаты. В этой связи актуальной является разработка новых и усовершенствованных устройств и методов измерения.

Известно, что параметры атмосферной среды влияют на качество электрофизических измерений исследуемых образцов. В таких случаях основной проблемой является конденсация атмосферных паров или газов на образце, что может приводить к искажению и потере сигнала. Кроме того, для проведения определенных видов измерений часто требуется использование отдельных криостатов или специальных измерительных ячеек, адаптированных к определенному типу образцов и к форме расположения электрических контактных площадок. Конструкция измерительной ячейки, помещаемой в изолирующую вакуумную среду для проведения измерений при криогенных температурах, предполагает системную интеграцию сложных устройств. Одной из технически важных задач комплексного исследования электрофизических свойств полупроводниковых материалов, определённой в качестве актуальной проблемы в настоящей работе, является поиск

возможности реализации нескольких видов электрических измерений в темноте и при освещении, дающих разностороннюю информацию о свойствах исследуемых образцов, с использованием универсального измерительного прибора.

Целью диссертационной работы является разработка измерительных систем для исследования электрофизических характеристик полупроводниковых материалов и использование разработанной измерительной системы на практике.

Объект исследования – низкотемпературная система для изучения электрофизических свойств полупроводниковых материалов и приборов.

Предметом исследования являются расширенные измерительные возможности низкотемпературной системы для исследования электрофизических свойств полупроводниковых материалов и приборов.

Методы исследования: вольт-амперные характеристики, вольт-фарадные характеристики, импедансная спектроскопия.

Для достижения цели работы необходимо выполнить следующие основные **задачи**:

1. Разработка модернизированного низкотемпературного измерительного устройства для исследования электрофизических и оптоэлектронных свойств полупроводниковых материалов и приборов;
2. Перенос многослойного графена, методом жидкофазного переноса на подложку из кварцевого стекла и исследование его электрофизических свойств в диапазоне температур 10 - 350 К;
3. Получение высокоэффективного гетеропереходного кремниевого солнечного элемента и исследование его электрофизических и оптоэлектронных свойств в темноте и при освещении, исследование частотно-емкостных характеристик при изменении напряжения смещения и в температурном диапазоне 10 - 350 К;
4. Определить достоверность экспериментальных результатов путем сравнения с ранее полученными научными работами;

Научная новизна работы.

Новизна и оригинальность диссертации состоит в том, что впервые:

1. Впервые разработана низкотемпературная измерительная ячейка, позволяющая проводить комплексные низко- и высокочастотные измерения электрофизических и оптоэлектронных свойств полупроводниковых материалов и устройств с различным расположением электрических контактных площадок, в темноте и при освещении, в температурном диапазоне 10-350 К.
2. Впервые, были проведены температурные исследования электропроводности тонкопленочного графена и определена энергия активации, ассоциируемая с транспортом свободных носителей заряда;
3. Впервые, были проведены измерения емкостных спектров гетеропереходного кремниевого солнечного элемента в широком диапазоне температур и определена энергия активации, ассоциируемая с термической активацией зарядов, захваченных в ловушках.

Основные положения, подлежащие защите:

1. Модернизированный вариант микрокриогенной измерительной ячейки, оснащенной тремя универсальными электрическими контактами, позволяет измерять электрофизические свойства полупроводниковых материалов как с односторонним, так и двухсторонним расположением контактных площадок при различной интенсивности света, в диапазоне температур 10-350 К, при низких и высоких частотах.
2. Тонкослойный графен на поверхности кварцевой подложки имеет энергию термической активации 22 мэВ в диапазоне температур 150-350 К, при этом электропроводность изменялась в зависимости от температуры аналогично поведению полупроводниковых материалов.
3. При исследовании в разработанной измерительной ячейке в температурном диапазоне 16-300 К гетероперехода кремниевого солнечного элемента, имеющего КПД выше 20 %, был определен центр захвата свободных носителей заряда с величиной энергии термической активации 15 мэВ.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

Модернизированный вариант измерительной ячейки на базе микрокриогенной машины позволяет проводить низкотемпературные комплексные импедансные измерения плоских тонкопленочных полупроводниковых материалов и приборов с электрическими контактными площадками, расположенными с одной и/или двух сторон образца, в диапазоне частот от 1 Гц до 1 МГц и в температурном диапазоне от 16 до 350 К, в темноте и на свету. Значимость полученных результатов подтверждена публикациями в международных рецензируемых изданиях и материалах международных конференций, а также патентами Республики Казахстан №6056, №4647. Проведение экспериментальных исследований полупроводниковых структур при помощи разработанной ячейки позволяет расширить знания в области прикладной физики по направлениям отечественной науки: теплофизики, альтернативной энергетики, электроники, материаловедения и индустрии наноматериалов.

Надежность и обоснованность полученных результатов – экспериментальные результаты, полученные в ходе научной работы, определяются их точным соответствием результатам, представленным по данному направлению в научной литературе. Кроме того, достоверность полученных результатов подтверждается наличием публикаций в зарубежных журналах и изданиях с квартилями Q2, Q3, а также наличием публикаций в изданиях, рекомендованных КОКСНВО МНВО РК и сборниках международных научных конференций.

Связь темы с планом исследования и различными государственными программами.

Научная работа выполнялась в рамках проектов и программ Института науки и технологий РК:

1. «АП05133645-ОТ-20, Контроль состояния поверхностного слоя кристаллического кремния пассивацией гидрированным самопроводящим аморфным кремнием, 2018 – 2020»

2. «АП05133651-ОТ-19, Разработка и исследование перспективных возобновляемых источников энергии на основе гибких органических полупроводниковых материалов, 2018-2020»

3. «БР05236498-ОТ-20, Создание оптимальных систем автономного электроснабжения объектов агропромышленного комплекса с использованием альтернативных источников энергии и разработка элементов, 2018 – 2020»

Личный вклад автора – весь объем диссертационной работы, включая экспериментальную и теоретическую работу, компьютерное моделирование и количественную оценку эксперимента, анализ научных материалов и подготовку к публикации. Постановка задач, выбор методов исследования и обсуждение результатов осуществлялись совместно с научными руководителями.

Публикации.

В целях получения ученой степени доктора PhD по материалам научно-исследовательской работы и результатам работы опубликовано 14 научных публикаций, включая 4 статьи в изданиях, включенных в перечень КОКСНВО МНВО РК, 1 статья опубликована в других научных журналах и изданиях, 3 статьи в материалах международных научных конференций и 6 работ в журналах с высоким импакт-фактором, включенных в международные информационные ресурсы Web of Science (Clarivate Analytics, США) и Scopus (Elsevier, Нидерланды), получено 2 патента на полезную модель.

Утверждение диссертационной работы.

Результаты научно-исследовательской работы были опубликованы в изданиях, входящих в международные научные базы данных Web of Science и Scopus:

1. **Аймаганбетов К.**, Алмас Н., Курбанова Б., Муратов Д., Серикканов А., Инсепов З. и Токмолдин Н. (2022). Электрические и структурные характеристики малослойных листов графена на кварце. Materials, 15(15), 5330. https://doi.org/10.3390/ma15155330 (Web of Science: IF=3.4, Q2; Scopus: процентиль=70%)
2. **Аймаганбетов К.**, Ережеп Д., Кишкенебаев М., Чучвага Н., Алмас Н., Токмолдин С. и Токмолдин Н. (2024). Характеристика кремниевого солнечного элемента с гетеропереходом методом импедансной спектроскопии. Микромашины, 15(2), 184. https://doi.org/10.3390/mi15020184 (Web of Science: IF=3.4, Q2; Scopus: процентиль=72%)
3. Чучвага Н., Жолдыбаев К., **Аймаганбетов К.**, Жантуаров С. и Серикканов А. (2023). Разработка кремниевых солнечных элементов с гетеропереходом и собственным тонким слоем: обзор. Coatings, 13(4), 796. https://doi.org/10.3390/coatings13040796 (Web of Science: IF=3.4, Q2; Scopus: процентиль=64%)
4. **Аймаганбетов К.**, Оспанов К. и Алмас Н. (2023). Подвижность иона гидроксония для протонообменных мембран на основе оксида графена и полиакрилата на молекулярном уровне. Ionics, 29(12), 5405-5415. https://doi.org/10.1007/s11581-023-05245-y (Web of Science: IF=2.8, Q3; Scopus: процентиль=80%)
5. **Аймаганбетов К.П.,** Алдияров А.У., Жантуаров С.Р., Алмасов Н.З., Теруков Е.И. и Токмолдин Н.С. (2021). Низкотемпературная ячейка для высокочастотных электрофизических измерений полупроводниковых приборов. Приборы и экспериментальная техника, 64, 886–890. https://doi.org/10.1134/S0020441221050146 (Web of Science: IF=0.6, Q4; Scopus: процентиль=9%)
6. Алмасов Н., Курбанова Б., Куанышбеков Т., Акатан К., Кабдрахманова С. и **Аймаганбетов К.** (2024). Исследование структуры и электрических свойств оксида графена (ГО) и оксида графена+наноцеллюлозы (ГО+НК). Комплексное использование

минерального сырья, 329(2), 103-109. https://doi.org/10.31643/2024/6445.21 (Web of Science: IF=0.7, Q3)

Статьи, опубликованные в изданиях КОКСНВО МНВО РК:

1. **Аймаганбетов К.П.**, Шегебай С.К., Алдияров А.У., Жантуаров С.Р. и Токмолдин Н.С. (2021). Исследование электрофизических свойств солнечных элементов методом импедансной спектроскопии с использованием специально разработанной низкотемпературной микрокриогенной измерительной ячейки. Вестник КазНУ . Серия Физическая (ВКФ), 76(1), 68-74. https://doi.org/10.26577/RCPh.2021.v76.i1.08
2. Чучвага Н.А., **Аймаганбетов К.П.**, Токмолдин Н.С., Токмолдин С.З. (2019). Моделирование и расчет тепловых и фотофизических характеристик высокоэффективных кремниевых солнечных элементов. Вестник. Серия Физическая (ВКФ), 70(3), 55-62. https://doi.org/10.26577/RCPh-2019-i3-7
3. **Аймаганбетов К.П.**, Чучвага Н.А., Жантуаров С.Р., Шонгалова А.К., Токмолдин Н.С. Исследование влияния ценовых факторов и эксплуатационных стоимостных характеристик гетеротрансмиссионных кремниевых солнечных элементов на срок окупаемости. Посланник. Серия по физике. № 1 (64). 2018. стр. 19-24.
4. Чучвага Н.А., Кислякова Н.М., **Аймаганбетов К.П.**, Ракыметов Б.А., Токмолдин Н.С. // Исследование влияния влажной химической обработки на поверхность монокристаллических пластин кремния // Вестник КазНУ. Серия физическая. № 4 (67). 2018 год

Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

1. Чучвага Н.А., Шульце Я., Клименов В.В., Жолдыбаев К.С., **Аймаганбетов К.П.**, Жантуаров С.Р., ... и Токмолдин Н.С. (2020). Оптимизация и изготовление гетеропереходных кремниевых солнечных элементов на опытно-промышленной установке АК-1000 Inline. Журнал высших учебных заведений России. Радиоэлектроника, 23(5), 57-62. https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-5-57-62

Публикации в сборниках международных конференций:

1. **Аймаганбетов К.П.**, Алдияров А.У., Теруков Е.И., Алмасов Н.Ж., Токмолдин Н.С., Токмолдин С.Ж. // Разработка установки для проведения комплексных измерений адмиттанса при исследовании полупроводниковых структур // XI Международная конференция «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия // 19–21 ноября 2018 г.
2. **Аймаганбетов К.П.**, Гирин Д.В., Клименов В.В., Токмолдин Н.С., Токмолдин С.Ж., // Разработка светодиодной контрольно-измерительной системы для испытаний фотоэнергетических установок// VI МЕЖДУНАРОДНЫЕ ФАРАБИЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ Международная научная конференция студентов и молодых студентов «ФАРАБИ ӘЛЕМІ» // Энергетика и энергоэффективность // КазНУ им. Аль Фараби// 2-12 апреля 2019 г.
3. Курбанова Б., **Аймаганбетов К.**, Карибаев М., Алмас Н., Оспанов К., Куанышбеков Т., ... и Кабдрахманова С. (2023). Формирование наноканалов тяжелыми ионами в карбоксиметилцеллюлозных мембранах, армированных оксидом графена, для применения в топливных элементах с протонообменными мембранами. ACAM-8. 8-Й АЗИАТСКИЙ СИМПОЗИУМ ПО ПЕРЕДОВЫМ МАТЕРИАЛАМ, 349-350.

Патенты:

1. **Аймаганбетов К.П.**, Алдияров А.У., Жантуаров С.Р., Серикканов А.С., Токмолдин С.Дж., Токмолдин Н.С., Низкотемпературная измерительная камера для проведения сложных электрофизических испытаний исследования полупроводниковых материалов // Патент на полезную модель № 6056. – 2021.
2. Токмолдин С.Ю., Кешуов С.А., Клименов В.В., Гирин Д.В., **Аймаганбетов К.П.**, Токмолдин Н.С., Устройство для проверки выходных характеристик фотоэлектрических установок // Патент № 4647 (29.01.2020).