

Сведения о выполненных работах и  
полученных научных результатах в 2023 году

по проекту «**Научные основы технологии инфракрасных детекторов MWIR  
и LWIR диапазонов с пониженными темновыми токами  
на основе униполярных барьерных структур МЛЭ n-HgCdTe  
со сверхрешётками**»,

поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 23-62-10021

Руководитель: д-р физ.-мат. наук Войцеховский Александр Васильевич

В результате выполнения проекта в 2023 г. коллективом исполнителей и партнёрами проведены все запланированные работы и получены следующие научные результаты.

1. Разработана технология создания nVn гетероструктур на основе n-HgCdTe со сверхрешётками методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) для обеспечения воспроизводимости их параметров.

Для получения структур, пригодных для выполнения работ в рамках текущего проекта, было необходимо создание гетероэпитаксиальных структур HgCdTe со сверхрешётками, состоящими из квантовых ям (КЯ) HgCdTe с составом  $x \sim 0-0,3$  молярных долей и толщиной 1-10 нм и барьерных слоёв с составом  $x \sim 0,7-0,8$  молярных долей и толщиной 1-10 нм.

Отработка режимов выращивания гетероструктур HgCdTe с наноразмерными слоями методом МЛЭ проводилась многокамерной сверхвысоковакуумной установке.

Для решения проблемы контроля параметров слоёв при выращивании структур HgCdTe с наноразмерными слоями предложен эллипсометрический метод прецизионного восстановления распределения состава в КЯ методом «эффективной подложки».

Для обеспечения максимально точного воспроизведения распределения состава по координате для каждой тестовой структуры было принято решение проводить отработку технологических процессов МЛЭ непосредственно перед её выращиванием.

2. Получены значения целевых параметров nVn-структур на основе МЛЭ n-HgCdTe со сверхрешётками в качестве барьера на основании теоретических оценок и анализа литературных источников.

Исходя из теоретического анализа возможность реализации сверхрешётчатого барьера в nVn-структурах можно считать вполне обоснованной. Имеющиеся литературные данные позволили определить интервалы значений основных параметров сверхрешёток: рассматриваются, главным образом, достаточно хорошо изученные сверхрешётки HgTeCdTe или близкие к ним по составу с толщинами квантовых ям 1-3,7 нм и толщинами барьеров 1-9 нм. Количество периодов сверхрешётки при этом варьируется в пределах от 4 до 18. С другой стороны, выбор

параметров сверхрешёток в барьерном слое  $nVn$ -структуры опирался на технологические возможности МЛЭ.

В связи с изложенным, а также на основании серии проведённых оценок энергетического положения минизон в СР было сформировано семейство тестовых гетероструктур, изготовление которых необходимо для проведения экспериментальных исследований и анализа воспроизводимости их параметров при выращивании методом МЛЭ.

3. Изготовлена 1-я серия  $nVn$  гетероструктур на основе  $n\text{-HgCdTe}$  со сверхрешётками в качестве барьера методом МЛЭ, а также тестовые структуры с защитным диэлектриком  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в двух конфигурациях (металл-диэлектрикполупроводник – МДП и структуры со вскрытым диэлектриком).

$nVn$  гетероструктуры на основе  $n\text{-HgCdTe}$  с определёнными целевыми параметрами были выращены методом МЛЭ на установке «Обь-М» с эллипсометрическим *in situ* контролем по разработанной технологии на базе ИФП СО РАН. Размытие гетерограниц, связанное с конструктивными особенностями установки МЛЭ, было минимизировано подбором ростовых условий. Для каждой выращенной гетероструктуры были изготовлены несколько идентичных тестовых структур: 2-3 МДП-структуры и 2-3 структуры со вскрытым диэлектриком.

4. Разработаны дизайны (конфигурации, топологии) многоэлементных фотопрёмных (МФП) структур для MWIR- и LWIR-диапазонов на основе  $nVn$  гетероструктур  $n\text{-HgCdTe}$  со сверхрешётками в качестве барьера, а также аналогичных по эксплуатационным характеристикам МФП структур на основе  $nVn$  гетероструктур  $n\text{-HgCdTe}$  с широкозонными барьерами, исходя из требуемых эксплуатационных характеристик будущей приборной структуры.

В рамках достижения поставленной данной цели был проведен анализ технических решений по созданию МФП структур на основе  $nVn$ -гетероструктур  $n\text{-CdHgTe}$  различного типа, детектирующих излучение в MWIR- и LWIR-диапазонах. Произведён комплекс исследовательских, теоретических и конструкторских работ, в результате которых осуществлён выбор и обоснование структуры чувствительного элемента и на основе гетероструктур  $\text{HgCdTe}$  барьерного типа, определены параметры схем считывания и вакуумных криостатируемых корпусов.

В результате разработана эскизная конструкторская документация на МФП устройства на основе гетероструктур КРТ с барьерами различного типа, включающие спецификации, чертежи общего вида и чертежи деталей.

5. Проведены экспериментальные исследования электрофизических характеристик изготовленных тестовых  $nVn$  гетероструктур на основе  $n\text{-HgCdTe}$  со сверхрешётками в качестве барьера в двух конфигурациях (МДП и структур со вскрытым диэлектриком).

Исследования проводились по следующим направлениям:

– Исследования структур в конфигурации МДП методом спектроскопии комплексной проводимости (адмиттанса). Исследования проводились на

автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса на основе на установки Agilent E4980A в диапазоне температур 11-330 К.

– Исследования токовых характеристик структур в конфигурации со вскрытым диэлектриком. Для исследования влияния тока поверхностной утечки на характеристики структур для каждой эпитаксиальной пленки были изготовлены структуры с различными диаметрами поперечного сечения от 0,50 мм до 0,02 мм. Исследования проводились также на автоматизированной установке температурной спектроскопии адмиттанса полупроводниковых наногетероструктур.

– Исследования фотоэлектрических характеристик структур в конфигурации МДП и структур со вскрытым диэлектриком при отсутствии и наличии подсветки ИК светодиодом с длиной волны 940 нм. Исследования проводились также на автоматизированной установке температурной спектроскопии адмиттанса.

Анализ этих результатов позволяет обеспечить характеризацию тестовых структур и в будущем сделать выводы об их применимости в фотоприёмных устройствах.

6. Проведён анализ экспериментальных результатов, проведено их сопоставление с данными теоретического анализа и с литературными данными, в том числе дана оценка воспроизводимости параметров nВn-структур на основе МЛЭ nHgCdTe со сверхрешётками в качестве барьера.

Анализ показал, что исследования nВn гетероструктур на основе n-HgCdTe со сверхрешётками методом спектроскопии адмиттанса позволяют в полной мере характеризовать исследуемые структуры. Однако в отдельных случаях интерпретация экспериментальных данных оказывается затруднительной из-за слабой изученности подобных структур. Также показано, что разработанная технология создания nВn гетероструктур на основе n-HgCdTe со сверхрешётками методом МЛЭ обеспечивает воспроизводимость параметров выращиваемых структур, достаточную для реализации целей настоящего проекта.

7. Результаты проекта представлены в 6 опубликованных и принятых в печать работ в журналах, 3 из которых в изданиях, индексируемых Scopus, а 3 – в изданиях, индексируемых RSCI. Результаты работы представлены в 5 докладах на 3 всероссийских и международных конференциях.