

Сведения о выполненных работах в 2020 году
по проекту «**Физико-технологические основы создания униполярных барьерных структур на основе МЛЭ n-HgCdTe для инфракрасных детекторов с пониженными темновыми токами**»,
поддержанному Российским научным фондом
Соглашение № 19-12-00135

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

Основной целью Проекта является изучение возможностей снижения темновых токов в детекторах инфракрасного диапазона на основе полупроводникового твердого раствора $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках из $\text{GaAs}(013)$. Уменьшение значений темновых токов возможно при практической реализации в детекторах униполярных барьерных архитектур (например, nVn- или NVnN-конфигураций). При создании детекторов на основе nVn-структур можно существенно снизить значения некоторых компонент темнового тока (генерации в обедненной области и поверхностной утечки), что стимулировало в последние 15 лет интерес к разработкам таких детекторов на основе материалов III-V. Практическая реализация детекторов на основе NVnN-структур перспективна из-за теоретически предсказанных возможностей уменьшения токов Оже генерации-рекомбинации, ограничивающих рабочие температуры качественных фотодиодов на основе МЛЭ HgCdTe . Создание униполярных барьерных детекторов на основе МЛЭ HgCdTe предоставляет значительные технологические преимущества, поскольку в этом случае можно отказаться от дефектообразующих процедур ионной имплантации и сопутствующих отжигов, которые широко применяются при создании гибридных матриц фотодиодов на основе МЛЭ HgCdTe . Несмотря на большое число теоретических исследований различных аспектов разработки nVn-детекторов на основе HgCdTe , попытки практической реализации таких детекторов на основе МЛЭ HgCdTe крайне немногочисленны (A. Itsuno, et al., APL и JEM, 2012, O. Gravrand, et al., JEM, 2015). Первые созданные средневолновые (3–5 мкм, MWIR) nVn-детекторы на основе МЛЭ HgCdTe обладали большими темновыми токами, связанными с нефундаментальными компонентами. На первом этапе работ по Проекту были реализованы MWIR nVn-структуры на основе МЛЭ HgCdTe с диффузионным ограничением темновых токов в диапазоне температур 180–300 К (A.V. Voitsekhovskii, J Phys D: Appl.Phys, 2019), но в таких структурах компонентный состав в барьере несколько превышал оптимальные значения. Для практической реализации эффективных MWIR и LWIR nVn-детекторов на основе МЛЭ HgCdTe необходим выбор оптимальных параметров слоев в униполярной барьерной системе, что требует усовершенствования технологических процессов и проведения комплексных экспериментальных и теоретических исследований свойств изготовленных приборных структур. Основными задачами работ на втором этапе выполнения проекта являлись оптимизация технологии создания приборных MWIR nVn-структур, разработка технологии создания первых LWIR nVn-структур на основе

МЛЭ HgCdTe и проведение комплексных экспериментальных и теоретических исследований свойств таких структур.

Пленки $Hg_{1-x}Cd_xTe$ для приборных MWIR и LWIR структур выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs(013). Параметры различных слоев в изготовленных на втором этапе структурах были изменены в соответствии с результатами численного моделирования. В частности, был существенно снижен состав в широкозонном барьере (от 0.84 до 0.60-0.67), в поглощающих и контактных слоях (MWIR – 0.29–0.32, LWIR – 0.20–0.21), изменены распределения концентрации донорной примеси индия (в том числе, реализованы структуры с плавным изменением уровня легирования внутри барьерного слоя). Проведена отработка и оптимизация режимов выращивания заданных nVn-структур на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$ – режимов роста n-слоев различного состава x в интервале 0.2–0.7, режимов легирования этих слоев, подобраны режимы нагревателей для поддержания: температуры подложки, соотношения потоков кадмия и теллура, давления паров ртути при росте барьерных, контактных и поглощающих слоев с заданной скоростью. Оптимизирована технология выращивания пленок со специальными профилями распределения по толщине компонентного состава и легирующей примеси, разработана методика «эффективной» подложки для восстановления профиля компонентного состава по данным *in situ* эллипсометрических измерений. Разработана технология изготовления приборных nVn-структур, включающая литографическое травление пленок HgCdTe до поглощающего слоя для последующего нанесения контактной рамки и физического разделения отдельных элементов, пассивацию путем формирования пленок Al_2O_3 методом атомно-слоевого осаждения, травление диэлектрической пленки с последующим нанесением фронтальных индиевых электродов и контактной рамки. На втором этапе особое внимание уделялось режимам нанесения конформных пленок Al_2O_3 , выбрана оптимальная температура осаждения (120 °C), найдены оптимальные значения времени очистки ростовой камеры после окисления прекурсора. На втором этапе выполнения работ по Проекту были изготовлены пять типов MWIR nVn-структур с оптимизированными параметрами, а также два типа первых LWIR nVn-структур на основе МЛЭ HgCdTe. Приборные структуры всех типов содержали матрицу nVn-структур с диаметрами от 20 до 500 мкм. Все структуры создавались в двух вариантах – с Al_2O_3 пассивацией боковых стенок меза-структуры, а также без защиты боковых стенок меза-структуры пассивирующим покрытием.

На втором этапе Проекта проведена реализация физико-математической модели расчёта электрофизических, фотоэлектрических, сигнальных и шумовых характеристик униполярных барьерных структур на основе МЛЭ n-HgCdTe в виде расчётной программы с удобным пользовательским интерфейсом. Расчет основных характеристик униполярных барьерных структур проводился путем численного решения фундаментальной системы уравнений полупроводника, состоящей из уравнения Пуассона и уравнений непрерывности для носителей заряда. Особенностью модели, использованной на втором этапе, является учет токов поверхностной рекомбинации, а также межзонного туннелирования и туннелирования через ловушки.

Учитывались композиционные зависимости параметров материала, а также функциональные зависимости концентрации носителей заряда и протекающего тока в области гетероперехода. Проведены модельные расчёты спектральных, электрофизических и пороговых характеристик униполярных барьерных структур на основе МЛЭ $n\text{-HgCdTe}$. На основании выполненного моделирования определены диапазоны смещений и температур, обеспечивающие максимальные значения обнаружительной способности. С учетом анализа шумовых компонент и токовой чувствительности установлена природа максимумов и минимумов на зависимости обнаружительной способности от обратного смещения.

Проведены детальные экспериментальные исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) и адмиттанса изготовленных $n\text{Vn}$ -структур различных типов. Измерения ВАХ оптимизированных MWIR $n\text{Vn}$ -структур показали, что значения темновых токов определяются совместным влиянием объемной компоненты тока и компоненты поверхностной утечки. Показано, что для оптимизированных MWIR $n\text{Vn}$ -структур при небольших обратных смещениях темновой ток определяется диффузией дырок из поглощающего слоя. В этом диапазоне смещений в диапазоне температур 180–300 К экспериментальные значения темнового тока примерно на порядок превышают значения, найденные с использованием эмпирической модели Rule07, что свидетельствует о возможности создания на основе таких структур эффективных MWIR-детекторов. Показано, что роль поверхностной утечки в MWIR $n\text{Vn}$ -структурах на основе МЛЭ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с широкозонным барьерным слоем ($x = 0.60\text{--}0.67$) возрастает при увеличении обратного смещения. Установлено, что использование Al_2O_3 пассивирующего покрытия уменьшает компоненту поверхностной утечки для большинства MWIR образцов, а также для первых вариантов LWIR $n\text{Vn}$ -структур. Плотности темновых токов в LWIR $n\text{Vn}$ -структурах при охлаждении от 300 до 77 К уменьшаются более чем на два порядка величины, а энергии активации при небольших обратных смещениях хорошо согласуются с энергией ширины запрещенной зоны поглощающего слоя. При больших обратных смещениях возрастает роль токов поверхностной утечки, что приводит к уменьшению значений энергий активации. При прямых смещениях реализуются достаточно большие значения энергий активации, что свидетельствует о доминировании при этих условиях тока электронов. Значения плотности темнового тока в диапазоне температур от 150 до 300 К для LWIR $n\text{Vn}$ -структур при небольших обратных смещениях несколько превышают значения, определенные согласно модели Rule07. Установлено, что вблизи нулевого смещения энергии активации темнового тока определяются барьером для дырок в валентной зоне. При помощи разработанных методик проведены экспериментальные исследования фотоэлектрических, сигнальных и шумовых характеристик изготовленных MWIR $n\text{Vn}$ -структур на основе МЛЭ HgCdTe . Определены значения компонент теплового и дробового токов при различных смещениях. Для лучших MWIR $n\text{Vn}$ -структур с диффузионным ограничением темнового тока найденные значения чувствительности превышали 0.25 А/Вт, что несколько уступает предельным расчетным значениям этого параметра при оптимизированных параметрах слоев в униполярной барьерной системе.

В широком диапазоне условий изучен адмиттанс nVn -структур из МЛЭ $HgCdTe$ и МДП-приборов на их основе (A.V. Voitsekhovskii, *Semicond. Sci. Technol.*, 2020). Показано, что измерения адмиттанса МДП-приборов на основе nVn -структур позволяют исследовать свойства контактного, поглощающего, барьерного и диэлектрического слоев. Предложены эквивалентные схемы МДП-приборов на основе nVn -структур в различных режимах, показана возможность определения значений различных элементов эквивалентной схемы путем численного моделирования частотных зависимостей емкости и проводимости МДП-приборов и их сравнения с экспериментальными данными. Установлено, что сопротивление барьерного слоя в LWIR nVn -структурах, найденное из измерений адмиттанса тестовых МДП-приборов, определяется только объемной компонентой темнового тока, даже при ограничении ВАХ nVn -структур токами поверхностной утечки. Это определяется тем, что ширина области пространственного заряда в MWIR nVn -структурах значительно меньше расстояния от краев фронтального электрода до боковых стенок меза-структуры. Измерения температурных зависимостей адмиттанса показали, что температурная зависимость сопротивления барьера для LWIR nVn -структур хорошо соответствует эмпирической модели Rule07. Это свидетельствует о возможности создания при решении проблемы поверхностной пассивации эффективных LWIR детекторов на основе МЛЭ $HgCdTe$.

На основании сопоставления расчетных и экспериментальных данных выявлены отличия реальных nVn -структур от идеальных, определены оптимальные параметры униполярных барьерных структур (в nVn - и $NVnN$ -конфигурациях), сформулированы рекомендации по технологии создания приборных nVn -структур на основе МЛЭ $HgCdTe$. Результаты исследований представлялись на международных конференциях, а также опубликованы в журналах, индексируемых в базах Web of Science Core Collection, Scopus и РИНЦ. Предполагается, что полученные результаты будут использованы при разработках инфракрасных барьерных детекторов на основе МЛЭ $HgCdTe$, имеющих уменьшенные значения темновых токов.