

Сведения о выполненных работах в 2021 году
по проекту «Физико-технологические основы создания униполярных барьерных структур на основе МЛЭ $n\text{-HgCdTe}$ для инфракрасных детекторов с пониженными темновыми токами»,
поддержанному Российским научным фондом
Соглашение № 19-12-00135

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

Проект посвящен исследованию возможности создания Инфракрасных детекторов на основе теллурида кадмия ртути (HgCdTe) со сниженными темновыми токами для работы при высоких рабочих температурах. Объектами исследования на данном этапе Проекта были барьерные структуры NBvN , содержащие барьерный слой (В), поглощающий слой (v) и контактные N1+ (верхний) и N2+ (нижний) слои. Подобная униполярная структура содержит два перехода: переход N1+V/v с экстракцией и переход v/N2+ с эксклюзией носителей заряда, которые при смещении осуществляют удаление термогенерированных неосновных носителей из поглощающего v-слоя. При этом концентрации дырок и электронов снижаются до уровня ниже теплового равновесия, что приводит к подавлению Оже генерации-рекомбинации. Таким образом, происходит снижение темнового тока, что приводит к повышению рабочей температуры барьерного детектора.

Разработана технология молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) выращивания NBvN -структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ для средней (до длины волны 5 мкм) и дальней (до длины волны 12 мкм) областей ИК диапазона длин волн. Для этой цели выращивались структуры с поглощающими слоями составов $x = 0.30$ и $x = 0.22$, толщиной 3-4 мкм с уровнем легирования $\sim 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ со встроенными барьерными (В) слоями состава $x = 0.5-0.8$, толщиной 50-300 нм. Нижний и верхний контактные слои имели состав $x = 0.4-0.6$, толщину 0.5-1.0 мкм и концентрацию примеси $10^{15}-10^{16} \text{ см}^{-3}$. Проведена отработка режимов роста слоев различного состава многослойной структуры с эллипсометрическим контролем толщины и состава растущих слоев *in situ*.

Достигнуто воспроизводимое выращивание с заданным распределением состава и примеси по толщине структуры типа NBvN .

Впервые проведено усовершенствование технологических циклов создания как трехслойных $n\text{Bn}$ -, так и четырехслойных NBvN -структур для детектирования MWIR и LWIR диапазонов за счет оптимизации процессов роста (температуры подложки, температуры источников молекулярных потоков и скорости роста). Типичный технологический маршрут изготовления матриц тестовых структур включал фотолитографию и химическое травление для формирования меза-структур, металлизацию и нанесение пассивирующих диэлектрических покрытий Al_2O_3 на боковые стенки меза-структур.

Проведены экспериментальные исследования электрофизических и фотоэлектрических характеристик изготовленных NBvN-структур и МДП-систем на основе этих структур. Это позволило кроме вольтамперных характеристик (ВАХ) при различных температурах измерять также зависимости емкости и проводимости от температуры и напряжения при различных частотах и уровнях засветки. Установлено, что для некоторых структур токи определяются как объемными, так и поверхностными механизмами. Графики Аррениуса для ряда структур подтверждают объемный характер формирования тока и слабый вклад поверхностной утечки. Отмечено значительное увеличение тока при засветке (обратное напряжение смещения) барьерных структур.

Анализ экспериментальных результатов исследования изготовленных NBvN-структур подтвердил их достоинства в отношении требований к технологии пассивации и контроля уровня поверхностной утечки, а также снижения вклада туннелирования и генерации рекомбинации в широкозонном барьерном слое. К проблемам работы NBvN-структур относятся трудности устранения барьера для неосновных носителей заряда.

Проведена оценка эффективности подавления Оже генерации в NBvN-структурах за счет реализации обеднения в поглощающем слое, что позволяет существенно повысить рабочую температуру до 125-150 К для LWIR и MWIR структур.

Усовершенствование технологических циклов выращивания нового типа структур с NBvN-конфигурацией позволило создать оптимизированные приборные структуры униполярных барьерных детекторов с пониженными темновыми токами. Принципы оптимизации параметров NBvN-структур базировались на подборке оптимальных составов (x), концентраций легирующей примеси (Nd) и толщины каждого из 4-х слоев с целью повышения чувствительности и снижения шумов. Анализ оптимального режима работы униполярных детекторов (рабочая температура, напряжение смещения, уровень засветки) позволяет реализовать условия работы NBvN-структур с максимальным фототоком (I_{ϕ}) и минимальными темновыми токами (I_t) в рабочем интервале напряжений смещения для повышенных рабочих температур. Этим требованиям удовлетворяли структуры типа С, в которой достигнуты при смещении $V = -0,5$ В, $T = 80-100$ К, значения плотности темнового тока $I_t = 2 \times 10^{-6}$ А/см² и плотности фототока $I_{\phi} = 1 \times 10^{-4}$ А/см².

Разработаны рекомендации по технологии создания униполярных барьерных структур в nVn- и NBvN-конфигурациях на основе МЛЭ n-HgCdTe. Определены оптимальные конструктивные и электрические параметры всех слоев структур (толщина слоя, распределение концентрации примеси в слое, распределение состава в слое) при эллипсометрическом контроле *in situ* всех стадий роста многослойной структуры.

Дальнейшая оптимизация технологии изготовления структур включает:

1. Минимизацию энергетического барьера в валентной зоне за счет применения в качестве барьера сверхрешеток, выращивания с двух сторон барьерного слоя варизонных и дельта-легированных слоев.

2. Улучшение технологии пассивации меза-структур путем нанесения альтернативных диэлектрических покрытий (CdTe, оксиды редкоземельных элементов).

Результаты исследований опубликованы в журналах (4 статьи), индексируемых в базах Web of Science Core Collection, Scopus и РИНЦ, и представлялись на Международных (6) и Всероссийских (2) конференциях. Издана монография по тематике Проекта, проведены патентные исследования, подготовлен Отчет о патентных исследованиях и подана заявка на изобретение.

Предполагается, что полученные данные будут использованы при создании детекторов инфракрасного диапазона, работающих при повышенных температурах.