

Сведения о выполненных работах в 2019 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 д-р физ.-мат. наук Войцеховский Александр Васильевич

Проект посвящен исследованию возможностей снижения темновых токов в инфракрасных детекторах на основе теллурида кадмия и ртути (HgCdTe), выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Значительно уменьшить значения тока поверхностной утечки и тока генерации Шокли-Рида-Холла можно при использовании униполярных барьерных архитектур детекторов (например, в nVn-конфигурации). При создании таких детекторов на основе МЛЭ HgCdTe можно исключить из технологического процесса дефектообразующую процедуру формирования p-n перехода при помощи ионной имплантации. С момента публикации в 2008 году концепции nVn-детекторов наибольшие успехи достигнуты при создании барьерных детекторов на основе материалов группы АЗВ5. Несмотря на очевидную проблему наличия барьера для дырок в валентной зоне, разработки nVn-детекторов на основе HgCdTe перспективны из-за фундаментальных преимуществ этого материала. Значительные усилия исследователей были направлены на теоретическое изучение процессов в nVn-детекторах на основе HgCdTe, но известно только несколько попыток практической реализации таких приборов. Для создания эффективных nVn-детекторов на основе МЛЭ HgCdTe необходимо решение ряда фундаментальных и прикладных задач, что возможно при комплексном исследовании механизмов формирования темновых и сигнальных характеристик униполярных барьерных структур при различных технологических циклах их создания. Основными задачами работ на первом этапе выполнения проекта являлись разработка технологии и создание приборных nVn-структур на основе МЛЭ HgCdTe для действия в средневолновом инфракрасном диапазоне, а также проведение экспериментальных и теоретических исследований свойств таких структур.

Гетероэпитаксиальные пленки  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  для барьерных детекторов выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs(013). Созданные многослойные системы содержали буферные слои ZnTe и CdTe, варизонный, поглощающий, барьерный и контактный слои HgCdTe. Составы, толщины и концентрации индия в различных слоях выбирались подходящими для приборной структуры, чувствительной в инфракрасном спектральном диапазоне 3–5 мкм. В nVn-структурах в качестве барьерных слоев использовались широкозонные слои  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  (с составом 0.67, 0.75 и 0.84), а также сверхрешетка из 18 периодов  $Hg_{0.2}Cd_{0.8}Te/HgTe$ . Меза элементы с диаметром от 20 до 500 мкм формировались при помощи литографии и мокрого травления. Ключевой особенностью технологии является пассивация поверхности при использовании

конформных пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , полученных методом плазменного атомно-слоевого осаждения. Для изучения процессов в nVn-структурах и оценки качества диэлектрика создавались тестовые МДП-приборы в планарной или меза конфигурации. В МДП-структурах планарной конфигурации обратный электрод создавался сверху контактного слоя, а в меза конфигурации – сверху поглощающего слоя.

Создана физико-математическая модель для расчета энергетических диаграмм униполярных барьерных структур на основе МЛЭ  $\text{HgCdTe}$ . В результате проведенного численного моделирования установлены значения напряжений включения при различных составах в барьере и поглощающем слое. Проведен анализ возможностей оптимизации характеристик nVn-структуры на основе МЛЭ  $\text{HgCdTe}$  путем изменения параметров различных слоев. Установлено, что наилучшее соотношение барьеров в валентной зоне и зоне проводимости обеспечивается, если состав в барьерном слое находится в диапазоне от 0.62 до 0.70 (при составе в поглощающем слое, равном 0.30–0.35). Проанализированы возможности снижения барьера в валентной зоне при использовании сверхрешетки  $\text{HgCdTe}/\text{HgTe}$ , а также неоднородного распределения состава и примеси вблизи границы барьерного слоя. Разработана физико-математическая модель формирования темновых токов в nVn-структурах и проведено численное моделирование ВАХ для структур различных типов. Проведенное численное моделирование позволило установить оптимальные толщины барьерного и поглощающего слоев.

Разработана комплексная методика электрофизической диагностики приборных nVn-структур из МЛЭ  $\text{HgCdTe}$  на основе измерений ВАХ и зависимостей адмиттанса в широком диапазоне условий. При использовании разработанной методики измерения проводятся в широком диапазоне температур (от 9 до 310 К) и частот (1–2000 кГц). Первым этапом методики являются измерения ВАХ всех элементов матрицы nVn-структур с различными диаметрами (20–500 мкм) при комнатной температуре. Такие измерения позволяют выявить элементы с повышенными значениями темновых токов, а также определить значения объемной и поверхностной компонент темнового тока. Далее проводятся измерения температурных зависимостей темнового тока при разных напряжениях, которые позволяют установить доминирующие компоненты тока в различных температурных диапазонах, энергии активации, оценить качество структур сравнением с эмпирической моделью «Rule07». Затем в широком диапазоне условий исследуется адмиттанс nVn структур, что позволяет определить некоторые параметры многослойных униполярных систем (например, концентрационные профили в поглощающем слое), а также выявить особенности, протекающих в таких системах процессов. Сопоставление экспериментальных частотных зависимостей емкости и проводимости с результатами численного моделирования, позволяет предложить эквивалентные схемы nVn-структуры в различных условиях и найти зависимости значений элементов эквивалентной схемы от температуры и смещения. В завершении комплексной методики в широком диапазоне условий проводятся исследования адмиттанса тестовых МДП-приборов, выполненных в планарной и меза конфигурации.

Проведены экспериментальные исследования ВАХ и адмиттанса изготовленных nВn-структур различных типов. Установлено, что темновые токи в структурах с широкозонным барьерным слоем  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0.67$  и  $0.75$ ) ограничены током поверхностной утечки. В nВn-структурах с составом в барьере, равным 0.84, в широком диапазоне температур (180–310 К) доминирует объемная компонента тока. Напряжение включения для этой структуры составило около -1 В, что хорошо согласуется с результатами теоретических расчетов. Энергия активации, определенная из графика Аррениуса, для таких структур соответствует энергии ширины запрещенной зоны поглощающего слоя, что свидетельствует о диффузионном ограничении темнового тока. Подтверждением этого вывода является хорошее соответствие экспериментальной температурной зависимости эмпирической модели «Rule07», разработанной для описания темновых токов в качественных p-n фотодиодах на основе МЛЭ  $\text{HgCdTe}$ . Можно заключить, что значения темновых токов для изготовленной nВn-структуры с барьером из  $\text{Hg}_{0.16}\text{Cd}_{0.84}\text{Te}$  сравнимы со значениями токов для современных nВn-детекторов на основе материалов группы АЗВ5 и лучших барьерных структур на основе МOCVD  $\text{HgCdTe}$ . Для структуры со сверхрешеткой  $\text{Hg}_{0.2}\text{Cd}_{0.8}\text{Te}/\text{HgTe}$  в качестве барьерного слоя темновые токи также ограничены объемной компонентой, но значения этой компоненты больше, что связано с понижением потенциального барьера для дырок в валентной зоне. Все исследованные образцы с широкозонным барьером имели чувствительность к инфракрасному излучению при обратных смещениях.

Впервые изучены зависимости адмиттанса nВn-структур на основе МЛЭ  $\text{HgCdTe}$  при разных частотах, смещениях и температурах. Показано, что барьерный слой в структурах является полностью обедненным, причем ОПЗ при обратных смещениях распространяется в поглощающий слой, а при прямых смещениях – в контактный слой. По спаду ВФХ при обратном смещении найдены распределения концентрации легирующей примеси, значения которой хорошо соответствуют концентрации введенной примеси индия. При высоких температурах (180–300 К) наблюдаются максимумы на ВФХ, которые связаны с перезарядкой поверхностных состояний на гетерогранице между поглощающим и барьерным слоями. Предложена эквивалентная схема nВn-структуры, значения элементов которой найдены из экспериментальных частотных зависимостей адмиттанса. Показано, что барьерный слой в эквивалентной схеме может описываться параллельной RC-цепочкой. Найдены значения элементов эквивалентной схемы при различных температурах и смещениях.

Экспериментально и теоретически исследован адмиттанс тестовых МДП-приборов на основе nВn-структур, причем МДП-приборы создавались в планарной или меза конфигурации. Показано, что качественная пассивация боковых стенок nВn-структур диэлектрической пленкой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  возможна при использовании оптимизированных режимов плазменного атомно-слоевого осаждения. В этом случае концентрация легирующей примеси в контактном слое, найденная из зависимостей адмиттанса, хорошо соответствует концентрации введенной примеси индия. Экспериментально изучено влияние емкости и сопротивления барьерного слоя на измеряемые зависимости адмиттанса. Предложена эквивалентная схема МДП-структур в меза

конфигурации, анализ которой позволяет исключить влияние барьерного слоя на экспериментальные результаты (что необходимо при диагностике свойств контактного слоя и пассивирующего покрытия). Изучена зависимость сопротивления барьерного слоя от температуры в темновом режиме и при освещении инфракрасным излучением. В различных температурных диапазонах найдены энергии активации темновой проводимости барьерного слоя.

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 данные будут использованы при создании инфракрасных барьерных детекторов на основе МЛЭ HgCdTe, имеющих сниженные значения темновых токов.