

1. Цель проекта

При использовании самой современной технологии изготовления транзисторов с предельной длиной затвора 30–50 нм остаётся возможность повышения частотных характеристик транзистора за счёт увеличения дрейфовой скорости электронов. Реализованный проект направлен на решение проблемы увеличения дрейфовой скорости электронов в НЕМТ наногетероструктурах.

Целью реализованного проекта являлось моделирование наногетероструктур, в которых уменьшено рассеяние электронов на фононах благодаря захвату фононов в потенциальные ямы и вследствие этого повышена дрейфовая скорость движения электронов, последующее выращивание предложенных наногетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), их исследование и сопоставление полученных результатов с теоретическими предсказаниями.

2. Основные результаты проекта

По результатам проведения НИР получены 2 патента на изобретение № 2474923 от 10 февраля 2013 г. «Полупроводниковая метаморфная наногетероструктура *InAlAs/InGaAs*» и № 2474924 от 10 февраля 2013 г. «Полупроводниковая наногетероструктура *InAlAs/InGaAs* с метаморфным буфером».

Проведены патентные исследования по ГОСТ Р 15.011-96.

Проведен расчет изменения рассеяния электронов полярными оптическими и интерфейсными фононами в квантовых ямах, основанный на раздельном захвате фононов в узкие фононные ямы.

Произведён поиск оптимальных технологических режимов эпитаксиального роста предложенных в ходе первого этапа наногетероструктур *InAlAs/InGaAs* на подложках *InP* (температура роста слоёв и давление мышьяка во время их роста). Методом МЛЭ на установке ЦНА-24 выращены предложенные в ходе первого этапа наногетероструктуры с *InAs*- и *GaAs*-вставками разной толщины и расположения в квантовых ямах (КЯ).

Методом Ван дер Пау измерены электрофизические характеристики выращенных наногетероструктур: слоевая концентрация электронов и их подвижность.

На основании исследований выращенных в ходе выполнения второго этапа ПНИР наногетероструктур проанализирована эффективность их конструкций. Разработаны предложения новых конструкций наногетероструктур и рекомендации по их эпитаксиальному росту. Произведено моделирование распределения фононов и рассеяния электронов на фононах в каналах таких наногетероструктур.

Выполнен эпитаксиальный рост наногетероструктур с предложенными конструкциями при выбранных технологических режимах.

Разработана методика измерения дрейфовой скорости электронов методом геометрического магнитосопротивления на специально изготовленных меза-структурах с контактами. Также разработана методика определения шероховатости поверхности выращенных наногетероструктур методом АСМ на микроскопе СММ-2000.

Выращенные в ходе выполнения 2 и 3 этапов данной ПНИР наногетероструктуры были исследованы методами Ван дер Пау, геометрического магнетосопротивления, просвечивающей электронной микроскопии.

Показано, что рассеяние электронов очень чувствительно к технологическому режиму роста *InAs* вставки. Найден оптимальный режим для выращивания *InAs* вставки: температура роста 430°C, давление мышьяка 2 мкТорр. Показано, что дельта-легирование

немного менее эффективно по сравнению с объёмным легированием с точки зрения активации атомов Si. Показано, что увеличение толщины InAs вставки от 2 до 3,5 и далее до 4 нм приводит к росту подвижности электронов, а дальнейшее увеличение толщины InAs вставки от 4 до 7,5 и далее до 8 нм – к падению подвижности электронов, что находится в согласии с теоретическими предсказаниями.

Сделан литературный обзор применения НЕМТ транзисторов в качестве источников и приёмников электромагнитного излучения в терагерцевом диапазоне спектра.

Выполнен полный технологический процесс, заключающийся в эпитаксиальном выращивании НЕМТ наногетероструктуры $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ без вставок в КЯ на подложке InP и формировании на ней НЕМТ транзисторов. Были измерены СВЧ характеристики изготовленных транзисторов, а также проведён последующий анализ. Получены значения $f_T = 124$ ГГц, $f_{\text{max}} = 624$ ГГц (после деэμβеддинга). Поскольку методом геометрического магнетосопротивления было показано, что наногетероструктуры со вставками в КЯ позволяют увеличить дрейфовую скорость электронов, то сделан вывод, что они позволят увеличить рабочие частоты изготовленных на них транзисторов и, таким образом, перспективны для СВЧ электроники терагерцевого диапазона.

Разработана модель и метод расчёта рассеяния электронов на полярных оптических и интерфейсных фононах, захваченных в потенциальные квантовые ямы.

Разработана методика измерения подвижности электронов, их слоевой концентрации и дрейфовой скорости методом геометрического магнетосопротивления на специально изготовленных меза-структурах с контактами. Также разработана методика определения шероховатости поверхности выращенных наногетероструктур методом АСМ на микроскопе СММ-2000.

По полученным теоретическим и экспериментальным результатам подготовлена к публикации в журнале ФТП статья. Разработана программа внедрения результатов ПНИР в учебный процесс при подготовке лекций и практических занятий по дисциплине «Диагностика микросистем».

Академиком Ю.К. Пожелой впервые разработана модель расчёта рассеяния электронов на полярных оптических и интерфейсных фононах, захваченных в потенциальные фононные ямы.

Впервые указанная модель применена к наногетероструктурам с КЯ $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ со вставками InAs.

В образце с нелегированной InAs вставкой толщиной 4 нм в центре КЯ толщиной 17 нм получено рекордное значение максимальной дрейфовой скорости электронов ($v_{\text{dr}} = 4 \cdot 10^7$ см/с при 5 кВ/см). Столь высокое значение v_{dr} в канале полевого транзистора позволит получить значение частоты отсечки более 1 ТГц при длине затвора меньше 100 нм. Для сравнения, Dae-Hyun Kim, Berinder Brar и Jesús A. del Alamo (Teledyne Scientific Company, USA; Massachusetts Institute of Technology, U.S.A) в 2011 г. получили рекордное значение $f_T = 688$ ГГц при $L_g = 40$ нм. Это соответствует $v_{\text{dr}} \sim 1.7 \cdot 10^7$ см/с.

3. Назначение и область применения результатов проекта

Полученные в ходе выполнения настоящей поисковой НИР результаты – модели наногетероструктур, их конструкция, лабораторная технология их роста подтвердили возможность создания структур для изготовления на них транзисторов терагерцевого

(ТГц) диапазона. В случае постановки необходимых следующих НИР по созданию базовых технологий получения наногетероструктур для ТГц диапазона и базовых технологий изготовления транзисторов и монолитных интегральных микросхем (МИС) с последующим выполнением соответствующих ОКР в России возможно получение отечественной элементной базы терагерцового диапазона, которая в настоящее время начинает осваиваться ведущими зарубежными фирмами. Создание МИС терагерцового диапазона открывает широкие перспективы по созданию приборов для разнообразных областей – от медицины (в первую очередь в онкологии и стоматологии) и метеорологии до систем связи (значительное расширение пропускной способности) и безопасности (поиск и обнаружение взрывчатых веществ).

ТГц диапазон охватывает актуальную область колебательных, вращательных и трансляционных линий широкого класса органических и биологических молекул. Беспрепятственное проникновение сквозь дымы и туманы, одежду, бумагу, дерево, пластмассу, керамику и другие материалы открывает широкие возможности интравидения, а небольшая энергия терагерцовых квантов и связанный с этим неионизирующий характер терагерцового излучения для его использования в биологии и медицине. В то же время энергия терагерцовых квантов соответствует колебательной энергии важных биологических молекул, включая молекулы ДНК и РНК, что позволяет осуществлять целенаправленное воздействие на них как в исследовательских, так и медицинских целях, стимулируя или подавляя развитие вирусов, клеток и/или их компонентов.

Полученные в ходе выполнения ПНИР результаты непосредственно сегодня могут быть использованы для внедрения в учебный процесс при подготовке лекций и лабораторных работ по дисциплине «Диагностика микросистем» с целью модификации и улучшения учебного процесса. Также полученные результаты дают возможность начать дальнейшие работы и уточнить пути решения задачи по созданию InP НЕМТ транзисторов для работы в терагерцовом диапазоне частот (выше 300 ГГц).

Полученные в ходе выполнения ПНИР результаты являются базой для развертывания прикладных НИР и ОКР в России по терагерцовой области частот. Проведение работ по разработке технологий и конструкций наногетероструктур, а также транзисторов и ТГц МИС на их основе позволят создать отечественную элементную базу для терагерцовой электроники, что в свою очередь откроет возможность создания оборудования и систем для широкого использования в отечественной экономике: приборы и системы для медицины, обеспечения безопасности, расширения возможностей телекоммуникационных систем.

Данная работа носит поисковый характер и направлена в конечном итоге на создание НЕМТ транзисторов, работающих в терагерцовом диапазоне. Освоение терагерцового диапазона открывает широкие возможности в области медицины ((в первую очередь в онкологии и стоматологии), метеорологии, систем безопасности (поиск и обнаружение взрывчатых веществ), систем связи. Перевод спутниковой и пользовательской аппаратуры в терагерцевый диапазон позволит резко повысить пропускную способность систем связи государственного, военного и специального назначения. Хотя сегодня терагерцевая технология используется в основном в перспективном военно-космическом оборудовании, в будущем она может стать доступной для любой области применения.

Коммерциализация полученных результатов проектом не предусмотрена. Однако в рамках настоящей работы были поданы две заявки на изобретение в области полупроводниковых наногетероструктур, являющихся базовыми для терагерцевой электроники. Кроме того, в рамках последующих поисковых и опытно-конструкторских работ, логически продолжающих настоящую, возможно получение РИД в виде ноу-хау на технологию создания наногетероструктур, патентов на полезную модель либо на изобретение в области полупроводниковых наногетероструктур, а также в области МИС для терагерцевого диапазона. Все указанные РИД могут оказаться востребованными в промышленности и, таким образом, являются коммерческой составляющей данных работ.

Как выше было сказано, настоящая работа носила поисковый характер и заложила основы технологии создания наногетероструктур для терагерцевого диапазона. Описание новых услуг и продукции может быть конкретно сформулировано по итогам последующих НИР и ОКР, имеющих прикладное значение и направленных на создание электронной элементной базы терагерцевого диапазона.