



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)297 2095, факс: +7(812)552 6080
office@spbstu.ru

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГАОУ ВО «СПбПУ»,

доктор технических наук, член-корре-
спондент Российской академии наук,
профессор

Сергеев В.В.

2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» – на диссертацию **Чернова Михаила Юрьевича** на тему: «**Метаморфные гетероструктуры InSb/InAs/In(Ga,Al)As на подложках GaAs для оптоэлектроники среднего инфракрасного диапазона 2.0-4.5 мкм**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников (1.3.11 – Физика полупроводников, в соответствии с приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 24.02.2021 № 118)

Актуальность работы

Инфракрасное излучение диапазона 2-5 мкм имеет весьма широкую область применения для диагностики твердых и газообразных материалов, экологического контроля, оптической атмосферной связи, оптической локации и др. благодаря наличию в этом диапазоне атмосферного окна прозрачности и полос поглощения большого количества газов, жидкостей и различных органических веществ. Активное освоение этого спектрального диапазона сдерживается сложностями в создании эффективных источников излучения. Для построения подходящих для практического применения светодиодных и лазерных источников излучения нижней части спектрального диапазона 2-5 мкм широко используются гетероструктуры на основе твердых растворов, содержащих сурьму. В большинстве подходов такие

гетероструктуры выращиваются на дорогостоящих подложках GaSb и InAs. Использование более доступных и дешевых подложек GaAs затруднено из-за сильного рассогласования параметров решетки подложки и активных слоев гетероструктуры. В последнее время развивается подход к решению этой проблемы, основанный на выращивании на подложке GaAs метаморфного буферного слоя (например, InAlAs) переменного состава, приводящего к релаксации упругих механических напряжений и позволяющего создать на его поверхности виртуальную подложку для выращивания малодефектных узкозонных слоев в активной области. Для дальнейшего развития этого многообещающего подхода следует решить ряд задач, среди которых оптимизация дизайна метаморфного буферного слоя и создание активной области, обеспечивающей хорошее электронное и оптическое ограничение и простой технологический контроль состава и упругих напряжений.

Настоящая работа посвящена разработке и оптимизации технологии роста методом молекулярно-пучковой эпитаксии низкодефектных двойных гетероструктур InAlAs/InGaAs с квантоворазмерной W-образной активной областью InSb/InAs/InGaAs на подложках GaAs и исследованию их структурных, электронных и люминесцентных свойств. Учитывая все сказанное выше, можно сделать вывод, что тема диссертационной работы Чернова Михаила Юрьевича несомненно является актуальной.

Новизна исследований и полученных результатов

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается, в первую очередь, в следующем:

1. Показано, что выбор корневой зависимости состава метаморфного буферного слоя $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ с максимальным составом $x \geq 0.75$ обеспечивает в исследуемых структурах низкую плотность протяжённых дефектов вблизи интерфейса с виртуальной подложкой.

2. В структурах с корневым профилем состава метаморфного буферного слоя экспериментальным образом выполнена оптимизация величины обратной ступени, представляющей собой разницу между конечным содержанием индия в метаморфном буферном слое InAlAs и содержанием индия в виртуальной подложке InAlAs.

Показано, что величина обратной ступени 6% обеспечивает получение равновесной ненапряженной виртуальной подложки.

3. Разработан дизайн структур и на подложках GaAs получены метаморфные гетероструктуры In(Ga,Al)As, выращенные на метаморфном буферном слое InAlAs с корневым профилем изменения состава, с субмонослойной вставкой InSb/InAs в активной области внутри КЯ InAs/InGaAs. Продемонстрирована интенсивная фотолюминесценция в диапазоне 2.0–4.5 мкм с внутренним квантовым выходом 5% при 300 К и 90% при 10 К.

4. Исследовано температурное гашение фотолюминесценции в исследуемых гетероструктурах, показано, что основным фактором является тепловой выброс дырок с энергией активации 45–49 мэВ из вставки InSb в квантовую яму InAs/InGaAs через имеющиеся в InAs акцепторные уровни.

5. Впервые предложено использовать вставку одиночного слоя GaAs толщиной 5 нм внутри метаморфного буферного слоя с корневым профилем состава для дополнительного снижения плотности протяжённых дефектов и повышения интенсивности фотолюминесценции метаморфных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, подтверждается примененным автором подходом к решению задач исследования, заключающимся в использовании для выращивания структур прецизионного и контролируемого метода молекулярно-пучковой эпитаксии, в использовании разнообразных взаимодополняющих методик характеристики и контроля качества структур. Для нахождения параметров структур, обеспечивающих их наилучшие характеристики, использовались методы оптимизации с проведением большого числа технологических экспериментов. Рассчитанные параметры структур хорошо согласовывались с результатами экспериментов.

Практическая ценность работы, наряду с изложенным ранее, заключается в следующем:

1. Разработана оригинальная двухстадийная методика роста метаморфных буферных слоев InAlAs толщиной 1.0–1.4 мкм с корневым профилем изменения состава ($x_{\max} \geq 0.75$) на подложках GaAs и метаморфных гетероструктур InSb/InAs/InGaAs/InAlAs на их основе с рекордно низкой шероховатостью поверхности.

2. Продемонстрирована применимость комбинированного метода структурного анализа, включающего построение карт рентгеновской дифракции в обратном пространстве в сочетании с данными локальной электронной дифракции, измеренной методом просвечивающей электронной микроскопии вдоль направления роста по поперечному сечению гетероструктуры для детального анализа процессов релаксации упругих напряжений в метаморфных гетероструктурах In(Ga,Al)As/GaAs.

3. Впервые получено стимулированное излучение в диапазоне 2.8–3.0 мкм при температурах до 60 К с пороговой плотностью интенсивности оптической накачки около 5 кВт/см² из структур InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs с W-образной активной областью и свержрешётчным волноводом на подложках GaAs.

Рекомендации для использования результатов и выводов диссертационной работы

Полученные в работе результаты и развитые подходы могут быть использованы при выращивании низкодефектных гетероструктур для источников спонтанного и стимулированного излучения среднего ИК диапазона (2.0–4.5 мкм). Дальнейшее совершенствование предложенных подходов позволяет надеяться на продвижение в более длинноволновую область спектра. Результаты работы могут быть использованы при разработке оптоэлектронных приборов нового поколения в различных научно-исследовательских и производственных организациях, среди которых можно выделить такие как Институт физики микроструктур РАН, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Институт физики твердого тела РАН, Санкт-Петербургский государственный университет, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Академический университет им. Ж.И. Алфёрова, Университет ИТМО, Новосибирский государственный технический университет и др.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, связанную с разработкой технологии низкодефектных гетероструктур для эффективных источников излучения среднего инфракрасного диапазона, и представляющую в настоящее время как научный, так и практический интерес. Автором применены надежные технологические методы роста структур, обобщены результаты всех проведенных исследований, четко сформулированы и обоснованы основные научные выводы диссертационной работы.

Замечания по диссертационной работе

Несмотря на в целом положительное мнение о диссертации, к ней имеются некоторые вопросы и замечания:

1. Одним из результатов работы является получение рекордно низкой шероховатости поверхности метаморфного буферного слоя. Тем не менее характерные величины этой шероховатости существенно превышают толщину монослоя. Как такое несовершенство ростовой поверхности влияет на качество и параметры субмонослойной вставки InSb в активной области? Каково влияние на эти характеристики флуктуаций толщины вставки InSb?

2. С какой целью структура, предназначенная для изучения релаксации упругих механических напряжений, содержала легированный слой?

3. Выполненные исследования позволили оптимизировать температурный режим роста метаморфного буферного слоя. В частности, была предложена оригинальная двухстадийная методика. Неясно, почему структура, предназначенная для изучения релаксации упругих механических напряжений, была выращена без использования этих результатов.

4. На спектрах фотоотражения (например, рис. 31) изображены стрелки, соответствующие энергии межзонных оптических переходов электронов. Для чего приводятся переходы между состояниями с разной четностью, запрещенные правилами отбора в симметричном потенциале?

5. В диссертации приводятся результаты расчета уровней энергии и волновых функций в исследуемых структурах (рис. 30, 33), из которых видно, что волновые

функции некоторых возбужденных дискретных уровней не содержат нулей. В чем причина?

6. В диссертации используется значительное количество аббревиатур, которые не всегда являются общеупотребительными. Несмотря на список сокращений, приведенный в работе, это затрудняет чтение текста.

Указанные замечания не являются принципиальными, не противоречат результатам и выводам, сформулированным в работе, и не уменьшают, тем самым, научную значимость проведенного М.Ю. Черновым исследования.

Апробация работы

Все основные результаты проведенных автором исследований, представленные в диссертационной работе, опубликованы в 14 научных статьях в реферируемых журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в международных научных базах (Scopus, Web of Science). Результаты работы представлялись на многочисленных российских и международных научных конференциях по тематике исследования. Автореферат диссертации правильно и достаточно полно отражает содержание диссертационной работы и соответствует ее основным положениям.

Заключение

Диссертационная работа Чернова Михаила Юрьевича на тему: «Метаморфные гетероструктуры InSb/InAs/In(Ga,Al)As на подложках GaAs для оптоэлектроники среднего инфракрасного диапазона 2.0-4.5 мкм», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников (1.3.11 – физика полупроводников, в соответствии с приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 24.02.2021 № 118), является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема, имеющая существенное значение для современной физики полупроводников – разработана технология выращивания низкодефектных гетероструктур на подложке GaAs с использованием метаморфного буферного слоя, предназначенных для использования в источниках излучения инфракрасного диапазона 2,0-4,5 мкм.

Диссертация Чернова М.Ю. соответствует требованиям Раздела 2 Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук от 19.08.2019, а соискатель Чернов Михаил Юрьевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников (1.3.11 – физика полупроводников, в соответствии с приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 24.02.2021 № 118).

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании Высшей инженерно-физической школы, протокол № 9 от 4 июня 2021 г.

Отзыв подготовил:
профессор Высшей инженерно-физической школы,
доктор физико-математических наук (01.04.10), профессор

Дмитрий Анатольевич Фирсов

Председатель заседания:
директор Высшей инженерно-физической школы,
доктор физико-математических наук (01.04.04), доцент

Валентина Владимировна Журихина

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Адрес: 195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Телефон: +7 (812) 775-05-30

E-mail: office@spbstu.ru