

В диссертационный совет 34.01.02
при ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН
194021, Санкт-Петербург,
ул. Политехническая 26,

ОТЗЫВ официального оппонента

о диссертационной работе **ЧЕРНОВА Михаила Юрьевича**
«Метаморфные гетероструктуры InSb/InAs/In(Ga,Al)As на подложках GaAs для
оптоэлектроники среднего инфракрасного диапазона 2.0-4.5 мкм»,
представленной 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 диссертационной работы М.Ю. Чернова обусловлена тем, что она посвящена разработке технологии эпитаксиального синтеза полупроводниковых гетероструктур, существенно отличающихся по параметру кристаллической решетки от подложки. Востребованность исследований в данной области объясняется тем, что число подложек, которые по совокупности своих свойств удовлетворяли бы всем требованиям последующего эпитаксиального роста и приборных применений, крайне мало и, по сути дела ограничивается лишь двумя – GaAs и InP. Между тем, количество полупроводниковых материалов и их комбинаций невообразимо разнообразнее, и применение некоторых из них позволило бы решить те или иные насущные практические задачи, но ограничивается, однако, отсутствием подходящего материала подложки. Это побуждает разрабатывать различные методы метаморфного роста, т.е. эпитаксиального формирования качественных полупроводниковых материалов на рассогласованном основании.

В диссертации данная задача решается применительно к оптическим излучателям среднего ИК-диапазона, что еще более увеличивает востребованность ее результатов, поскольку лазеры этого спектрального диапазона позволяют реализовать детектирование газов, а также широкий спектр применений как гражданского, так и специального назначения, связанный с попаданием в окно прозрачности атмосферы, включая обмен данными, оптическое наблюдение, меры ИК противодействия и т.д.

Конкретные **практические задачи**, на решение которых преимущественно нацелена диссертационная работа, состоят в разработке конструкции и режимов роста методом молекулярно-пучковой эпитаксии, исследовании структурных и оптических свойств метаморфных буферных слоев InAlAs градиентного состава, осаждаемых на подложку GaAs, и выращиваемых на таком буфере гетероструктур InSb/InAs. Слои таких структур содержат только один компонент V группы, что повышает воспроизводимость и упрощает эпитаксиальный синтез по сравнению с альтернативными вариантами, в которых

одновременно содержатся два летучих компонента. Варьирование толщины тонкой вставки InSb позволяет перекрыть практически весь требуемый диапазон длин волн среднего ИК. Применение подложек GaAs(100) должно обеспечить возможность формирования зеркал лазерного резонатора скальванием, а кроме того является предпосылкой для внедрения подобных гетероструктур в производство благодаря относительно низкой стоимости и высокой прочности таких подложек.

Диссертация состоит из введения, пяти основных глав и заключения. Во введении описаны объект и предмет исследования, дано обоснование актуальности работы, дано краткое описание альтернативных методов формирования лазерных структур среднего ИК-диапазона и степень разработанности темы на момент начала диссертационных исследований, сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна, научная и практическая значимость, сформулированы четыре выносимых на защиту положений, даны сведения об апробации.

В **первой главе** представлен детальный обзор литературы по теме диссертации, рассмотрены различные типы лазерных гетероструктур и самих лазеров диапазона длин волн 2-5 мкм, отмечены недостатки, присущие ранее предложенным вариантам лазерных структур. Подробно описана концепция метаморфного роста, конструкции метаморфных буферных слоев и особенности релаксации упругих напряжений при градиентном изменении состава метаморфного буферного слоя.

Вторая глава является, на мой взгляд, основной в диссертации. В ней автор приводит результаты оптимизации профиля состава метаморфного буфера и режимов его роста методом молекулярно-пучковой эпитаксии, таких как температура осаждения и соотношение потоков атомов V-й и III-й групп. Следует отдельно отметить значительное число выполненных ростовых экспериментов, свидетельством чего, например, является большое число экспериментальных данных на рис. 17а. Для исследований механизмов релаксации упругих напряжений автором был использован новый метод, основанный на построении карт рентгеновской дифракции в обратном пространстве в сочетании с экспериментами по дифракции электронов от выделенной области, измеряемой вдоль направления роста в поперечном сечении (110). В результате, была определена степень релаксации упругих напряжений в формируемой с использованием предложенной автором схемы эпитаксиального роста виртуальной подложке (чем ближе к 100%, тем лучше), получено значение 96%. Сделан вывод о том, что для структур с корневым законом изменения состава метаморфного буфера характерно возникновение разориентации кристаллической решетки относительно исходной подложки, что является, в дополнение к образованию дислокаций несоответствия, эффективным механизмом релаксации упругих напряжений. Именно это явление позволяет, таким образом, снизить плотность образующихся дислокаций, как интерфейсных, так и прорастающих. Автором продемонстрировано снижение дефектности верхних слоев в три раза по отношению к метаморфному буферу традиционной конструкции с линейным законом изменения химического состава.

Третья глава диссертации посвящена исследованиям методами просвечивающей электронной микроскопии и низкотемпературной фотолюминесценции метаморфных структур с различной величиной обратной ступени, т.е. разницы по содержания индия в слое виртуальной подложки по отношению к конечному содержанию индия в метаморфном

буферном слое, служащим для релаксации упругих напряжений. В работе определена оптимальная величина обратной ступеньки, причем, как оказалось, она больше той, что соответствует ненапряженному слою виртуальной подложки. Сделан вывод, что для достижения полного баланса упругих механических напряжений (с учетом напряжений, вносимых активной областью) в метаморфных гетероструктурах InSb/InAs/InGaAs/InAlAs необходимо использовать обратную ступень на 0.02–0.06 больше равновесной. Гетероструктуры, синтезированные с использованием 10%-ой обратной ступени, демонстрируют наиболее интенсивный сигнал люминесценции. Также с использованием k·r-метода в рамках 8-зонной модели Кейна был выполнен расчет зон (волновые функции, уровни квантования, вероятности оптических переходов) исследуемых структур, особенностью которых является наличие гетероперехода II-типа, образующегося на гетерогранице InAs/InSb. Получено хорошее согласие с экспериментами по фотоотражению. Исследованы механизмы рекомбинации и найдено, что в структурах с оптимальной величиной обратной ступени каналы безызлучательной рекомбинации подавлены, причем это относится также и к Оже-рекомбинации, что является достаточно неожиданным результатом. Соответственно в таких структурах эффективность излучательной рекомбинации максимальна, а температурное гашение сигнала ФЛ минимально.

В четвертой главе исследовано влияние тонких вставок, вводимых в метаморфный буферный слой и отличающихся знаком вносимого рассогласования, GaAs или InAs, на структурные и оптические свойства метаморфных гетероструктур. Обнаружено, что эффект кардинально зависит от знака напряжения, вносимого вставкой. В случае GaAs наблюдается снижение плотности прорастающих дислокаций и рост интенсивности фотолюминесценции при 300К, в случае InAs, наоборот, достигается наихудший результат. Также в этой главе выполнена оценка влияния упругих напряжений на величину энергии локализации дырок в активной области. Показано, что именно упругие напряжения позволяют увеличить энергию локализации до 150 мэВ, что составляет около 6 тепловых энергий при комнатной температуре и позволяет, таким образом, надеяться на преодоление негативных последствий выброса дырок из активной области.

В пятой главе описаны результаты исследований, предпринятых автором в направлении реализации инжекционных лазеров среднего ИК-диапазона на основе гетероструктур InSb/InAs, синтезированных на метаморфном буферном слое. Во-первых, были изготовлены и исследованы эпитаксиальные структуры, содержащие локализующий оптическую моду волновод. Введение волновода обеспечило эффективное взаимодействие света с активной областью и позволило впервые в подобных гетероструктурах продемонстрировать возникновение при оптической накачке стимулированного излучения. Во-вторых, автором показана возможность реализации инжекционной накачки и получена электролюминесценция, в том числе и при комнатной температуре, на длине волны выше 3 мкм.

Значимые результаты диссертации были выделены мной выше при анализе ее содержания. **Научная новизна** работы прежде всего заключается, на мой взгляд, в том, что в ней показана эффективность снятия упругих напряжений за счет возникновения разориентации кристаллической решетки слоев по отношению к подложке, что открывает путь формирования отрелаксировавших сильно-рассогласованных слоев с малым содержанием дислокаций в рабочих областях структуры. Во-вторых, в работе показано, что главной

причиной гашения люминесценции в гетероструктурах InSb/InAs является тепловой выброс дырок, что, соответственно, указывает, каким образом должна осуществляться оптимизации конструкции подобных структур для улучшения их оптического качества при комнатной температуре. Затронутые в диссертации вопросы имеют большую практическую значимость, поскольку полученные в работе результаты крайне востребованы при разработке конструкции не только светоизлучающих приборов конкретного спектрального диапазона на основе использованной системы материалов, но имеют более широкие возможности использования при разработке метаморфных транзисторных структур, метаморфных фотоприемников и других приборно-ориентированных структур, синтезируемых на чужеродных подложках.

Достоверность научных положений, сформулированных в работе, не вызывает сомнений. Они подтверждены экспериментальными результатами, полученными с использованием различных современных методов анализа, непротиворечивы, имеют теоретическое обоснование.

По диссертации у меня возникли следующие замечания:

1. Одной из целей работы являлась разработка технологии роста и конструкции метаморфных структур с уровнем дефектности не более 10^7 см^{-2} . Однако в работе не обсуждается, из каких соображений выбран именно этот уровень дефектности.

2. В работе неоднократно упоминается пороговая плотность мощности применительно к возникновению стимулированного излучения. Однако, такое использование термина представляется некорректным, поскольку в светоизлучающих структурах термин «порог» прежде всего относится к началу лазерной генерации, что не было достигнуто в работе.

3. В качестве одного из результатов работы в диссертации упомянуто достижение в метаморфных светодиодных гетероструктурах внутренней квантовой эффективности около 5%. Не ясно, на основании каких экспериментальных данных сделан этот вывод, поскольку в диссертации в принципе отсутствует обсуждение внутренней квантовой эффективности светодиодных структур.

4. Проиллюстрировать важность использования в активной области гетероперехода II-рода позволило бы сравнение гетероструктур InSb/InAs с таковыми без InSb-вставок с точки зрения эффективности излучательной рекомбинации, интенсивности люминесценции, температурного гашения люминесценции и т.д.

Указанные замечания не являются принципиальными, не затрагивают существа выносимых на защиту положений, и не меняют общую высокую оценку диссертационной работы.

Автореферат достаточно полно и объективно отражает ее содержание. В основе диссертации лежат результаты, опубликованные в 14-ти статьях в рецензируемых научных журналах и 12 конференционных тезисах. Публикации отражают основные положения работы и позволяют подтвердить личный вклад автора, который был определяющим при формулировании цели и задач исследований, выборе и реализации методов эпитаксиального роста и диагностики. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной соискателем самостоятельно на высоком научно-методическом уровне. В работе приведены результаты, имеющие существенное значение для развития технологии эпитаксиального синтеза гетероструктур, характеризующихся большим рассогласованием параметра кристаллической решетки по отношению к подложке. Работа соответствует паспорту специальности «физика полупроводников», имеет элементы новизны,

характеризуется практической и теоретической значимостью. Таким образом, 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) предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Чернов Михаил Юрьевич, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидат 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)

Жуков Алексей Евгеньевич

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.10 - Физика полупроводников,
член-корреспондент РАН
профессор, руководитель департамента, заместитель декана по научной работе

департамент физики,
Санкт-Петербургская школа физико-математических и компьютерных наук,
Санкт-Петербургский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург)

194100, г. Санкт-Петербург, Кантемировская ул., д. 3, корп. 1, лит. А,
<https://spb.hse.ru/>, office-spb@hse.ru

+7-921-9517190
aezhukov@hse.ru; zhukale@gmail.com

04 июня 2021 г.

Научный руководитель Жуков А.Е. удостоверяю.
Директор НИУ ВШЭ
Россия ЧАЛЬНИК ОГЕЛА КАДРОВ

Л.Н. Возян