

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)

Эпитаксиальная технология является мощным и практически-ориентированным инструментом создания наноразмерных гетероструктур - новых функциональных материалов с заданными свойствами, применяемых практически во всех сферах электроники и фотоники. Одним из наиболее острых вызовов является расширение круга материалов, комбинацию которых возможно реализовать с достаточным совершенством получаемой структуры. Сложность стоящей проблемы обусловлена возникновением механических деформаций в гетерогенных слоях, что, в свою очередь, влияет на морфологию и дефектообразование в растущей пленке, тем самым, ограничивая варианты использования теоретически возможных сочетаний материалов по химическому составу и/или толщине слоев. В связи с этим, исследования в области метаморфной технологии, обеспечивающей переход к желаемому параметру кристаллической решетки за счет изменения химического состава метаморфного согласующего буфера на ограниченной толщине, существенно расширяют возможности инженерии полупроводниковых наногетероструктур и являются **несомненно актуальной и практически значимой задачей**.

Общая задача, присущая метаморфной технологии, традиционна - достижение требуемого финального параметра решетки (состава слоя) при минимизации плотности дефектов в его верхней части и относительно малой толщине. Необходимо отметить, что из-за сложности рассматриваемой системы взаимодействующих слоев, наличия кинетических и термодинамически обусловленных процессов при росте пленок и структур с различным составом слоев, наряду со стохастическим процессом зарождения и развития дефектов в рассматриваемых структурах, сформулированная многопараметрическая задача в общем виде решена быть не может. Подходы, применяемые различными группами, существенно

разнятся. Так, одним из традиционных подходов является рост низкотемпературного метаморфного буфера (ММБ) для релаксации деформации и захоранивания дислокаций, с последующим заращиванием высокотемпературным слоем постоянного состава. Использованный автором подход оригинален, позволяет сохранить превосходное качество поверхности с малой плотностью дислокаций без применения высокотемпературного залечивающего слоя. В диссертации особенности метаморфной технологии рассматриваются в приложении к гетероструктурам с квантовыми ямами InSb/InAs/In(Ga,Al)As, дизайн которых специально адаптирован для применения в среднем ИК-диапазоне. Данная область техники является достаточно сложно реализуемой, вследствие применения гетеропереходов второго типа в традиционно используемых InAsSb/InGaSb структурах.

Методология работы, избранная автором, отличается от ранее известных работ точным подбором режимов эпитаксиального роста метаморфного буферного слоя в области весьма низких температур подложки, на грани перехода к низкотемпературной эпитаксии. С одной стороны, минимизация температуры при росте обеспечивает снижение тепловой энергии, что позволяет снизить вероятность рождения дислокаций и скорость их движения, с другой стороны, ставит необходимость сохранения морфологии растущего фронта и исключения возможного отклонения в стехиометрии твердого раствора InAlAs за счет встраивания избыточного мышьяка в растущую пленку. Следуя этому подходу, автор экспериментально определяет допустимый интервал температуры роста и эквивалентного потока мышьяка, опираясь на данные *in-situ* мониторинга кинетики роста. В качестве критерия выбора служило сохранение двумерного характера растущей пленки из наблюдений дифракции быстрых электронов на отражение.

Диссертация состоит из введения, пяти основных глав и заключения. Во введении описаны объект и предмет исследования, дано хорошее обоснование актуальности работы, ее практической значимости, изложено текущее состояние проблематики, сформулированы цели и задачи работы, положения защиты, сведения об аprobации.

В первой главе представлен обзор состояния проблемы разработки конструкций лазерных структур среднего инфракрасного диапазона длин волн 2-5 мкм различного принципа действия, отмечены недостатки и преимущества известных лазерных структур. Подробно описана технология метаморфного роста на подложках GaAs, конструкции ММБ слоев различного состава при различных условиях роста, кратко рассмотрены модели релаксации упругих напряжений.

Вторая глава посвящена разработке конструкции и технологии молекуллярно-пучковой эпитаксии ММБ слоев InAlAs на подложках GaAs. В ней кратко сформулирована методика эпитаксиального роста и контроля его параметров. Проводится сравнительное исследование влияния процессов разложения поверхностного окисла на шероховатость формируемого первичного слаживающего буфера GaAs. Проводится сравнительный анализ структур с метаморфным буфером линейного и корневого профиля состава, для последнего типа также проводится экспериментальное исследование влияния температуры подложки и эквивалентного соотношения потоков V и III групп с целью оптимизации шероховатости финальной поверхности ММБ. Приводится сравнительный анализ параметров модельных НЕМТ гетероструктур с ММБ InAlAs с корневым профилем состава и различной величиной

"инверсной ступени" по мольной доле индия. Приводится детальный анализ карт рентгенодифракционного отражения в обратном пространстве для установления структуры кристаллической ячейки (в т.ч. деформации и релаксации) участков ММБ на всем его протяжении и виртуальной подложки. Определен параметр разориентации кристаллической решетки относительно исходной подложки, показано, что данный механизм % может являться основным для корневого буфера, обеспечивающим снижение плотности дислокаций и малую шероховатость поверхности.

Третья глава диссертации посвящена исследованию фотолюминесцентных свойств метаморфных гетероструктур InSb/InAs/InGaAs/InAlAs, с корневым профилем изменения состава ММБ InAlAs. Определена оптимальная величина обратной ступени, проведено сопоставление с теоретической оценкой. По полученным ω - 2θ кривым рентгеновской дифракции было установлено, что при использовании $\Delta x_{In} = 0.06$ реализуется упруго ненапряженная ВП, в то время как использование $\Delta x_{In} > 0.06$ приводит к упругим напряжениям растяжения в активной области структуры, а $\Delta x_{In} < 0.06$ – к напряжениям сжатия. Показано, что разбалансированная структура с использованием 10% обратной ступени, проявляет наиболее интенсивный сигнал фотолюминесценции. Проведено исследование энергетического спектра и пространственного зонного профиля в рамках 8-зонной модели Кейна к·р-методом с учетом составной КЯ InAs/InSb. Получено превосходное согласие с данными спектроскопии фотоотражения. Подробно исследованы механизмы рекомбинации. Показано, что в структуре с оптимальной величиной обратной ступени безызлучательная рекомбинация значительно снижена.

В четвертой главе исследовано влияние тонких одиночных наноставок GaAs или InAs, вводимых в среднюю часть ММБ и отличающихся знаком рассогласования, на структурные и оптические свойства метаморфных гетероструктур. Показано, что в случае деформации растяжения (nanoслой GaAs) наблюдается снижение плотности прорастающих дислокаций и рост интенсивности фотолюминесценции при 300К, в случае сжатия (nanoслой InAs), наоборот, свойства ухудшаются.

В пятой главе описаны результаты и исследования изготовленных на основе выращенных автором структур инжекционных лазеров среднего ИК-диапазона. Приведенные в главе структуры имели более сложную конструкцию. Помимо активной области с составной КЯ, структуры имели волноведущие обкладки на основе сверхрешеток. В данных структурах продемонстрирована лазерная эмиссия при оптической накачке. В структурах второго типа продемонстрирована токовая инжекционная накачка и получена электролюминесценция на длине волны более 3 мкм, в том числе и при комнатной температуре, что является важным практическим достижением работы.

Научная новизна работы присутствует во всех положениях, выносимых на защиту. Впервые с помощью комплекса аналитических методик продемонстрирован метаморфный рост при предельно низких температурах подложки, обоснован механизм релаксации деформаций за счет разориентации кристаллической решетки метаморфных слоев по отношению к подложке. Впервые продемонстрированы эффективно работающие гетероструктуры с квантовой ямой InSb/InAs/InGaAs/InAlAs для среднего ИК диапазона. На основе тонкого физического эксперимента проанализированы механизмы безызлучательной

рекомбинации в таких гетероструктурах. Полученные автором результаты имеют большую практическую значимость, благодаря комплексному характеру изложенной работы, охватывающей весь цикл разработки от проектирования зонной структуры и слоевого дизайна, через разработанную эпитаксиальную технологию изготовления, к демонстрации стимулированного излучения и электролюминесценции лазерной гетероструктуры. Таким образом, в работе показан и апробирован комплексный подход, имеющий важное значение для изготовления оптоэлектронных приборов ИК диапазона на основе использованной системы материалов и других приборных структур на основе арсенидов-антимонидов III группы, связанных с использованием высокого содержания индия в активной области.

Все изложенные в работе положения и основные результаты обоснованы и их достоверность не вызывает сомнений. Они подтверждены экспериментальными результатами, полученными с использованием различных современных методов анализа, непротиворечивы, имеют теоретическое обоснование. Личный вклад автора не вызывает сомнений, как по уровню владения материала, так и по публикациям и апробации на многочисленных конференциях.

Автореферат достаточно правильно и полно отражает содержание диссертации.

Большой объем изложенного в диссертации экспериментального и теоретического материала потребовал местами слишком сжатого изложения. По материалам диссертации имеется ряд замечаний:

1. При исследовании процессов разложения поверхностного окисла двумя способами в Главе 2 не приведены сведения, обосновывающие зависимость морфологии финальной части метаморфного слоя - виртуальной подложки InAlAs от шероховатости начального сглаживающего буфера GaAs. Также из измерений атомно-силовой микроскопии на рис. 12 представляется, что режимы роста буферных слоев GaAs были несколько различными.

2. В пункте 2.4 показано, что разориентация кристаллической решётки слоев $In_xAl_{1-x}As$ проявляется уже на ранних стадиях формирования метаморфного буфера. Было бы полезно провести сравнение влияния механизма разориентации кристаллической ячейки на степень релаксации и плотность дислокаций в случае корневого и линейного профилей метаморфного буфера при прочих других условиях роста.

3. В разделе 3.3 приведена физическая модель расчета зонного профиля и волновых функций носителей тока в квантовой яме ($k \cdot r$) методом, однако, не указано, каким образом учтен вклад деформации наноструктуры InSb, каковы были параметры расчета и в какой программе он был проведен.

4. Не указано, каким образом калибровалась толщина монослоевой вставки InSb, используемой в работе, имелись ли прямые или косвенные измерения флуктуаций ее ширины (фактически - ее латеральной сплошности).

Указанные замечания приведены в порядке пожеланий к дальнейшему развитию данного направления работы, не снижают общую высокую оценку диссертационной работы.

Основные результаты работы опубликованы в 14 статьях в рецензируемых научных журналах, в т.ч. 9 зарубежных, и прошли широкую апробацию, доложены на 12-ти профильных конференциях.

Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, демонстрирует высокую квалификацию автора и хороший научный кругозор. Результаты работы обладают достаточной новизной и практической значимостью, представляют интерес для широкого круга исследователей и разработчиков в области гетероструктурных материалов как оптоэлектроники, так и СВЧ электроники. Область работы соответствует паспорту специальности «физика полупроводников». 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, а соискатель, Чернов Михаил Юрьевич, заслуживает присуждения 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).

Васильевский Иван Сергеевич

03 июня 2021 г.

профессор Института нанотехнологий в электронике, спинtronике и фотонике НИЯУ МИФИ, доктор физико-математических наук по специальности 05.27.01 - «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах», доцент.

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
ЗМ. ДИРЕКТОРА ПО
ПЕРСОНАЛУ НИЯУ МИФИ
И.В. ВАСИЛЬЧЕНКО

Адрес места работы:

115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Контактные данные:

тел.: 7(495)7885699 доб. 8170, e-mail: ISVasilyevskij@mephi.ru

Даю свое согласие на обработку персональных данных.