

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 34.01.02  
ПРИ ФЕДЕРАЛЬНОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ БЮДЖЕТНОМ  
УЧРЕЖДЕНИИ НАУКИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ  
ИМ. А.Ф. ИОФФЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

Аттестационное дело № \_\_\_\_\_

Решение диссертационного совета от 24.06.2021 № 6

О присуждении Чернову Михаилу Юрьевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Метаморфные гетероструктуры InSb/InAs/In(Ga,Al)As на подложках GaAs для оптоэлектроники среднего инфракрасного диапазона 2.0–4.5 мкм» по специальности 01.04.10 – физика полупроводников принята к защите 15 апреля 2021 г., протокол № 5, диссертационным советом 34.01.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), расположенном по адресу 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, утвержденным 12 июля 2019 г. приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75.

Соискатель Чернов Михаил Юрьевич, 1992 года рождения, с отличием окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук» (194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина д. 8, к. 3, лит. А), получив квалификацию магистра в 2015 г. С 2015 по 2019 гг. соискатель проходил обучение в аспирантуре при ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Соискатель занимает должность и.о. м.н.с. в лаборатории оптики кристаллов и гетероструктур с экстремальной двумерностью Центра физики наногетероструктур ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Диссертационная работа выполнена в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, расположенном по адресу 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

Официальные оппоненты:

1. Член-корреспондент Российской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор Жуков Алексей Евгеньевич, руководитель департамента физики, заместитель декана по научной работе Санкт-Петербургской школы физико-математических и компьютерных наук при Санкт-Петербургском филиале федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 194100, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 3, корп. 1, лит. А;
2. Доктор физико-математических наук, доцент Васильевский Иван Сергеевич, профессор Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31,

– дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО СПбПУ, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29) в своем заключении, подписанном доктором физико-математических наук, профессором Высшей инженерно-физической школы ФГАОУ ВО СПбПУ Фирсовым Дмитрием Анатольевичем и доктором физико-математических наук, директором Высшей инженерно-физической школы ФГАОУ ВО СПбПУ Журихиной Валентиной Владимировной, утвержденном проректором по научной работе ФГАОУ ВО СПбПУ, доктором технических наук, членом-корреспондентом Российской академии наук, профессором Сергеевым Виталием Владимировичем, дала положительный отзыв и отметила, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и представляет собой завершенное научное исследование, соответствующее

профилю совета 34.01.02 (специальность 01.04.10 – физика полупроводников). Отзыв содержит 6 замечаний:

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.

Отмечено, что указанные замечания не являются принципиальными, не противоречат результатам и выводам, сформулированным в работе, и не

уменьшают научную значимость проведенного М.Ю. Черновым исследования.

В отзыве указано, что диссертационная работа Чернова Михаила Юрьевича выполнена на актуальную тему, связанную с разработкой технологии низкодефектных метаморфных гетероструктур для эффективных источников излучения среднего инфракрасного диапазона 2.0–4.5 мкм, 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. Основные результаты проведенных автором исследований, представленные в диссертационной работе, опубликованы в 14 научных статьях в реферируемых журналах, индексируемых в международных научных базах (Scopus, Web of Science). Результаты работы представлялись на многочисленных российских и международных научных конференциях по тематике исследования.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям 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 г., а соискатель, Чернов Михаил Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обуславливается их высокой квалификацией, а также сходством тематик работ, проводимых ведущей организацией и оппонентами, с тематикой диссертационной работы. На все замечания соискателем даны исчерпывающие квалифицированные ответы.

На автореферат поступило 7 отзывов, все они положительные.

1. Отзыв кандидата физико-математических наук Морозова Сергея Вячеславовича, заведующего лабораторией физики полупроводниковых гетероструктур и сверхрешеток Института физики микроструктур Российской академии наук – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт

прикладной физики Российской академии наук» (603087, Нижегородская обл., д. Афоново, ул. Академическая, д. 7). Отзыв положительный, без замечаний.

2. Отзыв доктора физико-математических наук Галиева Галиба Бариевича, главного научного сотрудника лаборатории исследования процессов формирования низкоразмерных электронных систем в наногетероструктурах соединений АЗВ5 Федерального государственного автономного научного учреждения Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук (117105, г. Москва, Нагорный проезд, д. 7, стр. 5). Отзыв положительный, содержат 2 замечания:
  - 1) Присутствует некоторое злоупотребление использованием многочисленных аббревиатур, что затрудняет восприятие текста автореферата. Редко используемые в тексте аббревиатуры можно было бы и не вводить (ДЭВО – дифракция электронов от выделенной области, ПД – протяженные дефекты, НЗ – носители заряда, ВКЭ – внутренний квантовый эффект, ФО – фотоотражение).
  - 2) Из автореферата остается неясным, исследовался ли линейный метаморфный буфер на предмет наличия обоих механизмов релаксации (через сетку дислокаций несоответствия и через разориентацию относительно подложки), и каково соотношение вкладов этих механизмов в релаксацию для линейного метаморфного буфера? Также не хватает численной оценки соотношения этих вкладов для метаморфного буфера с корневым профилем состава (доля упругой энергии метаморфного буфера, освобождаемая каждым из механизмов).
3. Отзыв кандидата физико-математических наук Баранова Алексея Николаевича, профессора, директора по научной работе Института Электроники и Систем (Университет Монпелье, Франция), (IES – UMR CNRS 5214, Université de Montpellier, 860 rue St. Priest, 34090, Montpellier, France). Отзыв положительный, без замечаний.
4. Отзыв кандидата физико-математических наук Лубышева Дмитрия Ивановича, главного специалиста фирмы IQE (IQE Inc., 119 Technology

Drive, Bethlehem, PA, USA, 18015). Отзыв положительный, содержит 3 замечания:

- 1) Список цитируемой литературы в автореферате короткий, недостаточно полно отражает историю вопроса и современное состояние проблемы как по метаморфным буферным слоям, так и по лазерам среднего ИК диапазона.
- 2) Поверхность метаморфного буферного слоя не является идеально плоской, характеризуется эшелонами ступеней или террас, а значит, слой InSb будет модулирован по толщине вплоть до перехода из 2D в 0-мерную область. Если это правда, то и зонная структура на рисунке 6 тоже будет другой.
- 3) Получение особо гладких поверхностей путем отжига в парах галлия интуитивно понятно, но не ясно как автор избегает накопления галлия на поверхности в виде микрокапель, так как коэффициент прилипания галлия при 450 °С есть единица, а пар галлия на поверхность поступает непрерывно.

В отзыве отмечается, что указанные замечания не являются принципиальными и не меняют общую оценку диссертационной работы.

5. Отзыв кандидата физико-математических наук Преображенского Валерия Владимировича, заведующего лабораторией физических основ эпитаксии полупроводниковых гетероструктур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, д. 13). Отзыв положительный, без замечаний.
6. Отзыв доктора технических наук Карачинского Леонида Яковлевича, генерального директора ООО «Коннектор Оптикс» (194292, г. Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, д. 16, лит. Б). Отзыв положительный, без замечаний.
7. Отзыв члена-корреспондента Российской академии наук, доктора физико-математических наук Егорова Антона Юрьевича, проректора по

науке Академического университета им. Ж.И. Алферова (194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8, корп. 3, лит. А). Отзыв положительный, без замечаний.

Диссертационный совет отмечает, что на **основании выполненных соискателем исследований** решен большой комплекс фундаментальных и технологических задач, которые являются актуальными для современной физики полупроводников в целом и, в частности, инфракрасной оптоэлектроники, а именно:

1. Разработан метод отжига подложек GaAs, позволяющий получать рекордно низкую шероховатость поверхности со среднеквадратичным отклонением (RMS) равным 0.15 нм на площади  $10 \times 10$  мкм<sup>2</sup>.
2. Показано, что метаморфный буферный слой InAlAs толщиной до 1.4 мкм с корневым профилем изменения состава, выращиваемый методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs(001), позволяет получать втрое меньшую плотность протяженных дефектов в упруго ненапряженной виртуальной подложке  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  с  $x \geq 0.7$  ( $(5 \pm 2) \cdot 10^7$  см<sup>-2</sup>), чем метаморфный буферный слой с линейным профилем изменения состава такой же толщины, выращенный в тех же условиях.
3. Разработан двухстадийный режим роста методом молекулярно-пучковой эпитаксии метаморфных буферных слоев InAlAs толщиной до 1.4 мкм с корневым профилем изменения состава, позволяющий получать на подложках GaAs(001) слои  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  с  $x \geq 0.7$ , а также квантоворазмерные гетероструктуры InSb/InAs/In(Ga,Al)As на их основе с рекордно низкой шероховатостью поверхности 0.7 и 2.4 нм, соответственно, на площади  $10 \times 10$  мкм<sup>2</sup>.
4. Разработан комбинированный метод структурного анализа, включающий построение карт интенсивности рассеянного рентгеновского излучения в обратном пространстве в сочетании с данными локальной электронной дифракции, позволяющий послойно анализировать релаксацию упругих напряжений в метаморфных гетероструктурах.

5. Показано, что релаксация упругих напряжений в метаморфных буферных слоях InAlAs с корневым профилем изменения состава осуществляется посредством двух механизмов: образования ортогональной сетки дислокаций несоответствия и разориентации кристаллической решетки метаморфного буферного слоя относительно подложки GaAs(001), что снижает плотность образующихся протяженных дефектов.
6. Методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs(001) с использованием метаморфных буферных слоев InAlAs с корневым профилем изменения состава реализованы квантоворазмерные гетероструктуры с уникальной сбалансированной по упругим напряжениям активной областью, представляющей собой субмонослойную вставку InSb/InAs типа II, расположенную в квантовой яме InAs/InGaAs типа I, излучающей в среднем инфракрасном диапазоне 2.0–4.5 мкм с внутренней квантовой эффективностью  $90 \pm 5$  % при температуре 10 К.
7. Определено значение обратной ступени  $\Delta x_{In} = 0.06$  в случае метаморфного буферного слоя InAlAs с корневым профилем изменения состава, при котором реализуется упруго ненапряженная виртуальная подложка  $In_xAl_{1-x}As$  при  $x \geq 0.7$ .
8. Показано, что одиночный упруго растянутый слой GaAs толщиной 5 нм, вставленный в метаморфный буферный слой  $In_xAl_{1-x}As$  с корневым профилем изменения состава при  $x = 0.37 \pm 0.02$ , играет роль дополнительной обратной ступени и позволяет снизить плотность протяженных дефектов в виртуальной подложке InAlAs до значения  $< 10^7 \text{ см}^{-2}$ .
9. Установлено, что максимальное значение внутренней квантовой эффективности метаморфных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As, излучающих в среднем инфракрасном диапазоне 2.0–4.5 мкм, составляет  $5 \pm 0.5$  % при комнатной температуре и достигается при значении обратной ступени  $\Delta x_{In} = 0.08$ –0.10.
10. Установлено, что основной причиной гашения фотолюминесценции метаморфных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs, излучающих в среднем инфракрасном диапазоне 2.0–4.5 мкм, является тепловой



выброс дырок с энергетического уровня в субмонослойной вставке InSb в квантовую яму InAs через имеющиеся в ней акцепторные уровни.

11. На подложках GaAs:Zn p-типа методом молекулярно-пучковой эпитаксии реализованы метаморфные светодиодные гетероструктуры InSb/InAs/In(Ga,Al)As, демонстрирующие электролюминесценцию в спектральном диапазоне 3.1–3.8 мкм, интенсивность которой падает от температуры жидкого азота к комнатной в 17 раз.
12. На полуизолирующих подложках GaAs(001) методом молекулярно-пучковой эпитаксии получены метаморфные гетероструктуры InSb/InAs/In(Ga,Al)As со сверхрешеточным волноводом InGaAs/InAlAs, демонстрирующие стимулированное излучение в среднем инфракрасном диапазоне (2.8–3.0 мкм) вплоть до 60 К с пороговой плотностью мощности  $\sim 5$  кВт/см<sup>2</sup>.

**Практическая значимость** состоит в следующем:

1. Разработан оригинальный двухстадийный режим роста методом молекулярно-пучковой эпитаксии на отожженных специальным образом подложках GaAs(001), позволяющий воспроизводимо получать метаморфные буферные слои In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As толщиной 1.0–1.4 мкм с корневым профилем изменения состава ( $x_{\max} \geq 0.75$ ), а также метаморфные квантоворазмерные гетероструктуры InSb/InAs/InGaAs/InAlAs на его основе с рекордно низкой шероховатостью поверхности, равной 0.7 и 2.4 нм на площади 10×10 мкм<sup>2</sup>, соответственно. При этом начальные 200 нм метаморфного буферного слоя выращиваются при повышенной температуре  $T_{\text{подл.}} = 370\text{--}380$  °С и отношении потоков As<sub>4</sub>/III = 2.0–2.2, а остальная часть метаморфного буферного слоя выращивается при пониженной температуре  $T_{\text{подл.}} = 330\text{--}340$  °С и меньшем отношении потоков As<sub>4</sub>/III = 1.3–2.0.
2. Разработаны эффективные методы снижения плотности протяженных дефектов до значения менее 10<sup>7</sup> см<sup>-2</sup> в активной области метаморфных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs(001) через метаморфный буферный слой In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As с  $x_{\max} \geq 0.75$ , заключающиеся в использовании: (1) корневого профиля изменения состава в

метаморфном буферном слое InAlAs, (2) одиночного упругонапряженного слоя GaAs толщиной 5 нм, вставленного в метаморфный буферный слой  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  с корневым профилем изменения состава при достижении  $x = 0.37 \pm 0.02$ , и (3) оптимального баланса упругих механических напряжений в волноводных и квантоворазмерных областях гетероструктуры.

3. Впервые для детального анализа процессов релаксации упругих напряжений в метаморфных гетероструктурах In(Ga,Al)As/GaAs(001) продемонстрирована применимость комбинированного метода структурного анализа – профилированных по глубине структуры карт интенсивности рассеянного рентгеновского излучения в обратном пространстве, который включает 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.
4. На примере метаморфных низкоразмерных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs(001), излучающих в диапазоне 2.0–4.5 мкм, показано, что измерение зависимости интегральной интенсивности фотолюминесценции от мощности возбуждения при низких температурах является удобным и эффективным методом независимого количественного определения внутренней квантовой эффективности таких структур, а также эффективности процессов безызлучательной рекомбинации Шокли-Рида-Холла и Оже в зависимости от конструкции гетероструктур.
5. На подложках GaAs(001) методом молекулярно-пучковой эпитаксии получены метаморфные светодиодные гетероструктуры InSb/InAs/In(Ga,Al)As, излучающие в спектральном диапазоне 3.1–3.8 мкм с внутренней квантовой эффективностью  $5 \pm 0.5\%$ , а также лазерные гетероструктуры, демонстрирующие стимулированное излучение на длине волны 2.86 мкм с пороговой плотностью мощности накачки  $5 \text{ кВт/см}^2$  при температуре до 60 К, перспективные для развития оптоэлектроники среднего инфракрасного диапазона на платформе GaAs.

Диссертация является законченным, последовательным и внутренне согласованным научным трудом, имеющим как фундаментальное, так и прикладное значение.

**Достоверность и надежность результатов.** Основные положения и выводы диссертации надежно обоснованы. В ходе диссертационной работы использовалось современное оборудование и современные методы исследований эпитаксиальных гетероструктур. Результаты работы многократно обсуждались на различных международных и российских конференциях по физике полупроводников, а также опубликованы в авторитетных рецензируемых журналах.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы были представлены на международной конференции ФизикА.СПб (Санкт-Петербург, 2019); 30-й международной конференции по дефектам в полупроводниках (Сиэтл, 2019); международной конференции по эпитаксии (Амстердам, 2019); международной междисциплинарной конференции «Передовые рубежи физики 21 века и ФТИ им. А.Ф. Иоффе» (Санкт-Петербург, 2018); 25-ой международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, 2018); 20-ом и 22-ом международных симпозиумах «Нанопизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2016, 2018); 18-й международной конференции «Оптика лазеров» (Санкт-Петербург, 2018); 8-й международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения» (Москва, 2017); 13-й и 14-й Российских конференциях по физике полупроводников (Екатеринбург, 2017; Новосибирск, 2019); 19-й Европейской конференции по молекулярно-пучковой эпитаксии (Санкт-Петербург, 2017); 19-й международной конференции по молекулярно-пучковой эпитаксии (Монпелье, 2016); 5-ом Российском симпозиуме с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология» (Санкт-Петербург, 2016); международной зимней школе по физике полупроводников (Зеленогорск, 2016).

**Личный вклад автора.** Основу диссертации составляют исследования, проведенные автором в период с 2015 по 2020 гг. Личный вклад автора заключается в разработке оптимальной конструкции метаморфного буферного слоя InAlAs с целью получения на его основе низкодефектных метаморфных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As; получении метаморфных

буферных слоев InAlAs методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs(001); разработке конструкции светодиодных и лазерных метаморфных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As, излучающих в спектральном диапазоне 2.0–4.5 мкм; нахождении оптимальных режимов роста и получении таких структур методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs(001); проведении фотoluminesцентных и транспортных исследований метаморфных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As различной конструкции; проведении расчетов упругих механических напряжений, энергетического спектра и вероятностей оптических переходов в метаморфных гетероструктурах InSb/InAs/In(Ga,Al)As различной конструкции методом слабой связи в рамках 8-зонной модели Кейна; анализе процессов релаксации упругих механических напряжений в метаморфных гетероструктурах InSb/InAs/In(Ga,Al)As по различным существующим моделям; анализе экспериментальных данных, полученных методами просвечивающей электронной микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии, а также с помощью карт интенсивности рассеянного рентгеновского излучения в обратном пространстве и дифракции электронов от выделенной области.

Автором были опубликованы статьи в авторитетных высокорейтинговых журналах, а также представлены результаты, полученные в ходе работы, на отечественных и международных научных конференциях (1 приглашенный, 4 устных и 3 постерных докладов).

По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, опубликовано 14 статей в рецензируемых журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus (в скобках указан личный вклад автора):

1. В.А. Соловьев, М.Ю. Чернов, А.А. Ситникова, П.Н. Брунков, Б.Я. Мельцер, С.В. Иванов / Оптимизация структурных свойств и морфологии поверхности метаморфного буферного слоя  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  с корневым профилем изменения состава ( $x = 0.05\text{--}0.83$ ), выращиваемого методом молекулярно-пучковой эпитаксии на GaAs(001) // ФТП. — 2018. — Т. 52. — С. 127. (Разработка конструкции структур, их получение методом молекулярно-пучковой эпитаксии, анализ полученных результатов).

2. Д.В. Побат, В.А. Соловьев, М.Ю. Чернов, С.В. Иванов / Распределение дислокаций несоответствия и упругих механических напряжений в метаморфных буферных слоях InAlAs разной конструкции // ФТТ. — 2021. — Т. 63. — С. 85. (Постановка задачи, руководство при создании программного обеспечения, позволяющего моделировать распределение дислокаций и упругих напряжений в метаморфных буферных слоях разной конструкции).
3. V.A. Solov'ev, M.Yu. Chernov, M.V. Baidakova, D.A. Kirilenko, M.A. Yagovkina, A.A. Sitnikova, T.A. Komissarova, P.S. Kop'ev, S.V. Ivanov / Strain relaxation in convex-graded  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0.05\text{--}0.79$ ) metamorphic buffer layers grown by molecular beam epitaxy on GaAs(001) // Superlat. & Microstr. — 2017. — Vol. 113. — P. 777. (Получение исследуемых гетероструктур методом молекулярно-пучковой эпитаксии, обработка результатов, полученных с помощью карт интенсивности рассеянного рентгеновского излучения в обратном пространстве, участие в обсуждениях полученных результатов).
4. M.Yu. Chernov, V.A. Solov'ev, O.S. Komkov, D.D. Firsov, B.Ya. Meltser, M.A. Yagovkina, P.S. Kop'ev, S.V. Ivanov / Enhanced room-temperature  $3.5\ \mu\text{m}$  photoluminescence in stress-balanced metamorphic  $\text{In}(\text{Sb},\text{As})/\text{In}(\text{Ga},\text{Al})\text{As}/\text{GaAs}$  quantum wells // Appl. Phys. Express — 2017. — Vol. 10. — P. 121201. (Получение метаморфных гетероструктур  $\text{InSb}/\text{InAs}/\text{In}(\text{Ga},\text{Al})\text{As}/\text{GaAs}$  методом молекулярно-пучковой эпитаксии, проведение фотолюминесцентных исследований, теоретический расчет энергетических зон с учетом упругих напряжений, анализ результатов, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии, подготовка статьи).
5. T.A. Komissarova, M.Yu. Chernov, V.A. Solov'ev, B.Ya. Meltser, P.N. Brunkov, A.A. Sitnikova, P.S. Kop'ev, S.V. Ivanov / Electrical and optical properties of convex-type metamorphic  $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  quantum well structures // Mater. Res. Express — 2017. — Vol. 4. — P. 105902. (Получение исследуемых гетероструктур методом молекулярно-пучковой эпитаксии, помощь в проведении транспортных исследований полученных гетероструктур, проведение измерений классического эффекта Холла в геометрии Ван-дер-Пау, обсуждение полученных результатов).

6. M.Yu. Chernov, O.S. Komkov, D.D. Firsov, B.Ya. Meltser, A.N. Semenov, Ya.V. Terent'ev, P.N. Brunkov, A.A. Sitnikova, P.S. Kop'ev, S.V. Ivanov, V.A. Solov'ev / InSb/InAs/InGa(Al)As/GaAs(001) metamorphic nanoheterostructures grown by MBE and emitting beyond 3  $\mu\text{m}$  // J. Cryst. Growth — 2017. — Vol. 477. — P. 97. (Получение метаморфных гетероструктур методом молекулярно-пучковой эпитаксии, проведение фотолюминесцентных исследований, подготовка статьи).
7. В.А. Соловьев, М.Ю. Чернов, Б.Я. Мельцер, А.Н. Семенов, Я.В. Терентьев, Д.Д. Фирсов, О.С. Комков, С.В. Иванов / Метаморфные квантовые ямы InAs/InGaAs/InAlAs с субмонослойными вставками InSb, излучающие в среднем инфракрасном диапазоне // Письма в ЖТФ. — 2016. — Т. 42. — С. 33. (Получение метаморфных гетероструктур методом молекулярно-пучковой эпитаксии, проведение фотолюминесцентных исследований).
8. S.V. Ivanov, M.Yu. Chernov, V.A. Solov'ev, P.N. Brunkov, D.D. Firsov, O.S. Komkov / Metamorphic InAs(Sb)/InGaAs/InAlAs nanoheterostructures grown on GaAs for efficient mid-IR emitters // Prog. Cryst. Growth Charact. Mater. — 2019. — Vol. 65. — P. 20. (Подготовка данной обзорной статьи).
9. O.S. Komkov, D.D. Firsov, A.D. Andreev, M.Yu. Chernov, V.A. Solov'ev, S.V. Ivanov / Peculiarities of the energy spectrum of InSb/InAs/InGaAs/InAlAs/GaAs nanoheterostructures revealed by room temperature photo-modulation FTIR spectroscopy // Jpn. J. Appl. Phys. — 2019. — Vol. 58. — P. 050923. (Получение метаморфных гетероструктур методом молекулярно-пучковой эпитаксии, обсуждение полученных результатов).
10. O.S. Komkov, D.D. Firsov, M.Yu. Chernov, V.A. Solov'ev, A.A. Sitnikova, P.S. Kop'ev, S.V. Ivanov / Radiative versus non-radiative recombination in high-efficiency mid-IR InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs metamorphic nanoheterostructures // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2018. — Vol. 51. — P. 055106. (Получение метаморфных гетероструктур методом молекулярно-пучковой эпитаксии, обсуждение полученных результатов).
11. В.А. Соловьев, М.Ю. Чернов, О.С. Комков, Д.Д. Фирсов, А.А. Ситникова, С.В. Иванов / Влияние сильнонапряженных вставок GaAs и InAs в

буферном слое InAlAs на структурные и оптические свойства метаморфных квантово-размерных гетероструктур // Письма в ЖЭТФ. — 2019. — Т. 109. — С. 381. (Получение метаморфных гетероструктур методом молекулярно-пучковой эпитаксии, фотолюминесцентные исследования полученных структур, анализ полученных результатов).

12. N.A. Fominykh, V.A. Solov'ev, M.Yu. Chernov, S.V. Ivanov / In situ study of elastic strain relaxation in metamorphic InAs(Sb)/In(Ga,Al)As/GaAs heterostructures by using reflection high energy electron diffraction // J. Phys.: Conf. Ser. — 2019. — Vol. 1400. — P. 055035. (Получение метаморфных гетероструктур методом молекулярно-пучковой эпитаксии, помощь в подготовке статьи).
13. M.Yu. Chernov, V.A. Solov'ev, O.S. Komkov, D.D. Firsov, A.D. Andreev, A.A. Sitnikova, S.V. Ivanov / Effect of design and stress relaxation on structural, electronic, and luminescence properties of metamorphic InAs(Sb)/In(Ga,Al)As/GaAs mid-IR emitters with a superlattice waveguide // J. Appl. Phys. — 2020. — Vol. 127. — P. 125706. (Получение метаморфных гетероструктур методом молекулярно-пучковой эпитаксии, проведение фотолюминесцентных исследований полученных гетероструктур, анализ результатов, полученных с помощью просвечивающей электронной микроскопии и методом фотомодуляционной ИК фурье-спектроскопии отражения, теоретический расчет энергетических зон в исследуемых гетероструктурах с учетом упругих напряжений, подготовка статьи).
14. В.А. Соловьев, М.Ю. Чернов, С.В. Морозов, К.Е. Кудрявцев, А.А. Ситникова, С.В. Иванов / Стимулированное излучение на длине волны 2.86 мкм из метаморфных In(Sb,As)/In(Ga,Al)As/GaAs квантовых ям в условиях оптической накачки // Письма в ЖЭТФ. — 2019. — Т. 110. — С. 297. (Получение метаморфных гетероструктур методом молекулярно-пучковой эпитаксии, проведение фотолюминесцентных исследований, обсуждение полученных результатов).

На заседании 24 июня 2021 г. диссертационный совет принял решение присудить Чернову М.Ю. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении открытого голосования диссертационного совета в количестве 19 человек из 26 членов совета, из них 12 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, проголосовали:

За присуждение Чернову Михаилу Юрьевичу ученой степени кандидата физико-математических наук

подано голосов – 19.

Против – 0.

Воздержались - 0.

Председатель диссертационного совета,

Академик РАН,

Сурис Роберт Арнольдович

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физ.-мат. наук

Сорокин Лев Михайлович

24 июня 2021 г.