

На правах рукописи

УДК 621.373.826

Тер-Мартиросян Александр Леонович

**МОЩНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ
КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР**

Специальность:

01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Санкт-Петербург

2014

Работа выполнена в Закрытом акционерном обществе «Полупроводниковые приборы»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор Курочкин Владимир Ефимович, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН)

Официальные оппоненты: член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук Егоров Антон Юрьевич, профессор кафедры «физики и технологии наногетероструктур» Федерального государственного бюджетного учреждения высшего профессионального образования и науки Санкт-Петербургский Академический университет - научно-образовательный центр нанотехнологий РАН, г. Санкт-Петербург

доктор технических наук, профессор Прокопенко Виктор Трофимович, зав. кафедрой «твердотельной оптоэлектроники» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург

доктор физико-математических наук Кабанов Владимир Викторович, зав. лаб. «оптоэлектроники и голографии» Государственного научного учреждения института физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, г. Минск

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «05» декабря 2014 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д002.034.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН) по адресу: 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 31-33, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ИАП РАН по адресу 190103, Санкт-Петербург, Рижский пр., д. 26. Отзывы о диссертации в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по вышеуказанному адресу ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.034.01,
доктор физико-математических наук

Буляница А.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: Полупроводниковые лазеры обладают всеми преимуществами, присущими полупроводниковым приборам: малыми габаритами и весом, мгновенной готовностью к работе, отсутствием высокого напряжения питания и водяного охлаждения, совместимостью с интегральной полупроводниковой технологией, высокой эффективностью, надежностью, экономичностью и сравнительно низкой стоимостью. Реализовать эти преимущества в полной мере удалось только в наноразмерных инжекционных гетеролазерах, где имеется возможность осуществления как электронного, так и оптического ограничений, причем каждым можно управлять в определенных пределах независимо. Это обстоятельство в совокупности с успехами в технологии эпитаксиального выращивания гетероструктур (ГС) с заданными свойствами позволяет реализовывать приборы с параметрами, близкими к предельным. Оптимизация конструкции ГС (состав, толщина и уровень легирования гетероэпитаксиальных слоев) для достижения максимальной выходной оптической мощности излучения является предметом пристального внимания исследователей с момента их создания и до настоящего времени. Это объясняется не только постоянным совершенствованием ростового оборудования и расширением технологических возможностей эпитаксиального выращивания. Оптимизация конструкции ГС для мощных (более 1 Вт в многомодовом непрерывном режиме) лазерных диодов (ЛД) представляет собой поиск компромисса между основными характеристиками ГС (фактор оптического ограничения, величина потерь на свободных носителях заряда, рабочий ток, дифференциальная квантовая эффективность, удельное омическое сопротивление, расходимость излучения и т.п.).

Инжекционные лазеры наряду со светодиодами являются единственными приборами, в которых электрическая энергия непосредственно преобразуется в электромагнитное (световое) излучение. Количество применений мощных ЛД неуклонно растет, что связано, в первую очередь, с их высокой энергетической эффективностью. КПД современных ЛД составляет более 50%, что в 5 раз выше, чем в любых других типах лазеров. Динамичное развитие потребностей современного рынка требует постоянного совершенствования основных характеристик мощных ЛД – выходной оптической мощности, диаграммы направленности излучения и срока службы.

На сегодняшний день наиболее востребованными являются мощные полупроводниковые лазеры, генерирующие лазерное излучение в красном и ближнем ИК диапазонах: 670 нм (источники оптического возбуждения для фотодинамической терапии онкологических заболеваний), 808 нм и 950 нм (источники оптической накачки для твердотельных лазеров на основе YAG:Nd и Yb-Er стекол). Разработка таких полупроводниковых лазеров и оптимизация их характеристик является актуальной научно-технической задачей.

Процесс постепенной замены традиционно используемых в различных областях науки и техники твердотельных лазеров (ТТЛ) с ламповой накачкой лазерами с диодной накачкой в последние годы привел к значительному увеличению областей применения последних для создания приборов специального назначения, обработки материалов, в медицине, полиграфии, метрологии, научном приборостроении, а также в шоу-бизнесе. Уровень развития этих технологий определяет конкурентоспособность, независимость и безопасность государств, обладающих ими.

Цель работы: Разработка мощных полупроводниковых источников лазерного излучения (ЛД, лазерных линеек и матриц) в системах материалов GaInP/AlGaInP/GaAs и AlInGaAs/AlGaAs/GaAs, излучающих в видимом (670 нм) и ближнем инфракрасном (808 нм, 950 нм) диапазонах спектра. Создание на их основе твердотельных лазеров с диодной накачкой для технологических и информационных применений, а также высокоэффективных медицинских лазерных аппаратов и устройства для диагностики онкологических заболеваний.

Достижение указанной цели обеспечивается решением следующих задач:

1. Исследовать механизмы ограничения и определить пути увеличения выходной оптической мощности в ЛД с длиной волны излучения 808 нм.
2. Провести анализ работы и оптимизацию характеристик мощных ЛД на основе симметричных и асимметричных ГС со сверхнизкими оптическими потерями на свободных носителях заряда (НЗ), обеспечивающих высокую дифференциальную квантовую эффективность (ДКЭ), низкие рабочий ток и расходимость излучения в вертикальной плоскости.
3. Выполнить анализ и определить пути оптимизации конструкции теплоотводов для мощных ЛД, работающих в непрерывном режиме генерации.
4. Исследовать излучательные характеристики мощных ЛД и линеек, работающих в различных диапазонах спектра (670 нм, 808 нм, 950 нм).
5. Разработать импульсный твердотельный лазер (ТТЛ) с торцевой накачкой мощными ЛД для технологических применений.
6. Разработать компактный мощный ТТЛ с боковой накачкой лазерными линейками (ЛЛ) для информационных систем, работающий в безопасном для глаз диапазоне спектра.
7. Разработать медицинские лазерные аппараты для хирургии и фотодинамической терапии.
8. Разработать устройство для контроля температуры рабочего торца оптоволокна лазерных модулей с волоконным выходом излучения для медицинской аппаратуры.
9. Разработать устройство для визуализации пространственного распределения флуоресценции злокачественных новообразований при фотодинамической терапии (ФДТ).

Научная новизна работы:

1. С помощью математического моделирования показано, что уменьшение концентрации НЗ, инжектированных в волноводный слой мощных непрерывных ЛД и, следовательно, снижение поглощения на свободных НЗ, можно получить как дополнительным легированием волновода, так и изготовлением волноводных слоев с градиентными составами, причем последний подход является более перспективным из-за наличия встроенного электрического поля, ускоряющего движение НЗ в ГС.

2. Показано, что при непрерывной инжекционной накачке ЛД, напаянного на теплоотвод эпитаксиальными слоями вниз, температура активной области определяется тепловым сопротивлением эмиттера и тепловым сопротивлением теплоотвода. Если теплоотвод не даёт доминирующего вклада в тепловое сопротивление ЛД, лазерные ГС, выполненные из твёрдых растворов AlGaAs, имеют преимущество по тепловому сопротивлению относительно безалюминиевых ГС на основе InGaAsP, из-за более высокой теплопроводности используемых материалов.

3. Показано, что использование мощных ЛД с длинными резонаторами является

предпочтительным с точки зрения эффективного отвода тепла вследствие сильной зависимости теплового сопротивления лазерного диода от длины лазерного резонатора и, в меньшей степени, от его ширины.

4. Использование алмазного термокомпенсатора (сабмаунта), усиливающего латеральное растекание тепла, оказывается эффективным только в том случае, когда ширина сабмаунта заметно превышает ширину полоскового контакта мощного ЛД.

5. Использование пирометрического сенсора на основе иммерсионного фотодиода среднего ИК-диапазона, интегрированного в драйвер лазерного модуля с оптоволоконным выходом, обеспечивает повышение надежности и функциональности лазерных систем за счет непрерывного контроля температуры на торце оптоволокна, подключаемого для доставки лазерного излучения к облучаемой площадке или объекту.

6. Визуализация пространственного распределения флуоресценции при диагностике и лечении методом ФДТ позволяет наблюдать в реальном времени процесс взаимодействия накопленного в биоткани фотосенсибилизатора с оптическим излучением, определять момент окончания процедуры и избегать передозировки при проведении сеанса.

Практическая ценность работы:

1. Разработаны оптимизированные варианты лазерных гетероструктур со сверхнизкими оптическими потерями на свободных НЗ, обеспечивающие высокую ДКЭ, низкие рабочий ток и расходимость излучения в вертикальной плоскости.

2. Разработаны мощные ЛД и линейки, работающие в различных диапазонах спектра (670 нм, 808 нм, 950 нм), проведено исследование их характеристик и показано, что они могут эффективно использоваться для накачки твердотельных лазеров и медицинских применений.

3. Разработаны медицинские лазерные аппараты для хирургии и ФДТ, проведена их сертификация в Минздраве РФ.

4. Разработаны опытные образцы ТТЛ с диодной накачкой для технологических применений и дальнометрии. В качестве источников накачки в твердотельных лазерах используются разработанные ранее ЛД и линейки.

5. Разработано устройство для контроля температуры объекта, нагреваемого излучением диодных лазеров с оптоволоконным выходом излучения. Оснащение медицинской лазерной аппаратуры подобным устройством позволяет исключить неконтролируемый разогрев оптоволокна до температур, приводящих к его деформации и разрушению, а также обеспечивает возможность управления температурой лазерного «скальпеля» для оптимизации процесса коагуляции биоткани.

6. Разработано устройство для визуализации пространственного распределения флуоресценции злокачественных новообразований при фотодинамической терапии.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы в части:

а) разработки технологии изготовления инжекционного полупроводникового лазера защищены патентом №2110874 и полностью использованы в ОКР по созданию мощного непрерывного ЛД. Серийный выпуск этих приборов осуществляется ЗАО «Полупроводниковые приборы»;

б) оптимизации характеристик мощных ЛД, изготовленных на основе симметричных и асимметричных ЛГС со сверхнизкими оптическими потерями на свободных НЗ защищены

патентами №№ 2309501, 2309502 и полностью использованы в НИОКР по созданию ЛД, линеек и матриц. Серийный выпуск этих приборов осуществляется ЗАО «Полупроводниковые приборы»;

в) разработки импульсных ТТЛ с диодной накачкой полностью использованы при разработке конструкторской документации на эти приборы. ЗАО «Полупроводниковые приборы» освоил мелкосерийный выпуск твердотельных лазерных излучателей для технологических применений и дальнометрии;

г) разработки базовой блок-схемы лазерных аппаратов, способа суммирования лучей двух и более лазеров, лазерного излучателя, способа отвода тепла от полупроводниковых приборов использованы в НИОКР по созданию медицинских лазерных аппаратов для хирургии и ФДТ. Приоритет изделий защищен патентами №№ 8524, 9098, 14407, 112458, 117189, 117191 и товарным знаком «Латус». В настоящее время серийный выпуск медицинских лазерных аппаратов серии «Латус» освоен ООО «Аткус»;

д) разработки устройства для визуализации пространственного распределения флуоресценции злокачественных новообразований при ФДТ полностью использованы в НИОКТР по созданию лазерного комплекса для диагностики, профилактики и лечения онкологических заболеваний и медицинского аппарата «Флуовизор». Начата клиническая апробация аппарата «Флуовизор» в ведущих медицинских учреждениях РФ (ФГБУ «ГНЦ лазерной медицины ФМБА», г. Москва, ФГБУ «МРНЦ» МЗ РФ, г. Обнинск, ФГБУ «НИИ онкологии им. Н.Н. Петрова» МЗ РФ, г. С.-Петербург).

Положения, выносимые на защиту:

1. Уменьшение концентрации НЗ, инжектированных в волноводный слой мощных непрерывных ЛД и, следовательно, снижение поглощения на свободных НЗ, можно получить как дополнительным легированием волновода, так и изготовлением волноводных слоев с градиентными составами, причем последний подход является более перспективным из-за наличия встроенного электрического поля, ускоряющего движение НЗ в ГС.

2. Лазерные гетероструктуры (ЛГС), выполненные из твердых растворов AlGaAs имеют преимущество по тепловому сопротивлению относительно безалюминиевых ГС на основе InGaAsP из-за более высокой теплопроводности используемых материалов и, как следствие, меньшего вклада в тепловое сопротивление мощных ЛД.

3. Тепловое сопротивление мощных ЛД не является функцией площади полоскового контакта, как в случае одномерного переноса тепла, но зависит различным образом от его длины (более сильно) и ширины (более слабо), так что для уменьшения теплового сопротивления предпочтительным является увеличение длины резонатора.

4. Использование алмазного термокомпенсатора (сабмаунта) для усиления латерального растекания тепла оказывается эффективным только в том случае, когда его ширина более чем на порядок превышает ширину полоскового контакта мощного ЛД.

5. Оснащение лазерных аппаратов с волоконным выводом излучения пирометрическими сенсорами на основе иммерсионного фотодиода среднего ИК-диапазона позволяет с высокой точностью контролировать температуру выходного торца оптического волокна в диапазоне от +600 до +1000 °С, что не только увеличивает срок службы волоконно-оптического инструмента, но и обеспечивает равномерный и качественный разрез биоткани.

б. Наблюдение в реальном времени пространственного распределения сигнала флуоресценции фотосенсибилизатора накопленного в биоткани при проведении сеанса ФДТ позволяет точно определять момент окончания процедуры и избегать избыточного воздействия оптического излучения.

Апробация работы: Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах и конференциях: Международных конференциях Laser Optics 1998 и 2008 (Санкт-Петербург, 1998 и 2008 г.); 1-м, 2-м и 3-м Симпозиумах «Полупроводниковые лазеры: физика и технология» (Санкт-Петербург, 2008 г., 2010 г., 2012 г.); Российско-германском семинаре-совещании по вопросам внедрения лазерных технологий в промышленность (Санкт-Петербург, 2008 г.); IX международной конференции «Лазерная физика и оптические технологии» (Минск, Беларусь, 2012 г.); 9-м Белорусско-Российском семинаре «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе» (Минск, Беларусь, 2013 г.) [А36-А43].

Личное участие автора: Настоящая работа представляет обобщение результатов исследований и разработок, проведенных автором и руководимым им Закрытым акционерным обществом «Полупроводниковые приборы». Автором сформулированы задачи и организовано проведение научных исследований; осуществлены обзор литературы по механизмам ограничения выходной мощности полупроводниковых лазеров и выявление наиболее эффективных путей дальнейшего повышения мощности излучения многомодовых полупроводниковых лазеров; выполнен анализ работы и оптимизация с помощью моделирования квантоворазмерных ЛГС и эффективных теплоотводов, что позволило создать новый класс приборов – мощные непрерывные лазерные диоды и сверхмощные квазинепрерывные лазерные линейки и матрицы; созданы новые методы флуоресцентной диагностики злокачественных новообразований и пирометрического определения температуры выходного торца оптоволоконных лазерных модулей. Под руководством автора в качестве главного конструктора разработаны базовые конструкции ТТЛ с диодной накачкой для технологических применений и дальнометрии; создан, внедрен в серийное производство и широкую медицинскую практику ряд медицинских лазерных аппаратов, с новыми методиками их использования.

Публикации: По теме диссертации опубликовано 20 научных статей, в том числе 15 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, 8 тезисов докладов. Приоритет исследований и разработок защищен 15 патентами.

Объем и структура работы: Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка цитируемой литературы, включающего 179 ссылок, изложена на 331 страницах текста, содержит 34 таблицы, 158 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, показаны ее научная новизна и практическая ценность, приведены сведения об апробации работы, выносимые на защиту научные положения, показан личный вклад автора, и кратко изложено содержание диссертации.

Глава 1. Обзор литературы.

Фундаментальным фактором, ограничивающим возможность достижения высокой выходной оптической мощности в инжекционном гетеролазере, является предельно допустимая плотность электромагнитной энергии внутри активной области [1]. Оценка, сделанная для полоскового лазера на основе двойной гетероструктуры с идеально однородным распределением электромагнитного поля внутри GaAs активной области, дает величину порядка 1 Вт/мкм^2 . В многомодовом инжекционном лазере с активной областью, свободной от дефектов и неоднородностей, удельная плотность оптической мощности на выходе ЛД может достигать $(0,2 \div 0,4) \text{ Вт/мкм}^2$. Это означает, что для лазерного диода с излучающей площадкой размером $H \times W = 100 \times 1 \text{ мкм}^2$ выходная мощность излучения порядка 20 Вт является пределом, превышение которого скорее всего приведет к необратимым изменениям в объеме активной области и на гетерограницах.

Помимо фундаментального предела, выделяют четыре основных фактора, ограничивающих полезную выходную мощность инжекционных лазеров: катастрофическое разрушение зеркал (КРЗ), многомодовая генерация, тепловыделение и нагрев, старение (постепенная деградация). Уровень КРЗ по отношению к ширине излучающей площадки определяется плотностью оптической мощности на зеркале. Уменьшение нагрузки на зеркала в ЛГС с широким оптическим резонатором и создание качественной и надежной защиты зеркал ЛД позволяет предотвратить КРЗ и постепенную деградацию зеркал, что обеспечивает возможность достижения большей удельной оптической плотности мощности.

Тепловой нагрев мощных ЛД, работающих в непрерывном режиме, приводит к насыщению и даже снижению выходной оптической мощности излучения с возрастанием тока накачки. Как правило, такое поведение определяется снижением внутреннего квантового выхода излучательной рекомбинации или температурным выбросом НЗ из активной области. Поэтому все возможные потери, включая омические потери на контактах, потери на безызлучательную рекомбинацию и поглощение на свободных НЗ с последующей внутризонной релаксацией должны быть сведены к минимуму. Решающее значение имеют сотые и тысячные доли ома. Поскольку тепловыделение в мощных инжекционных лазерах достигает внушительных величин, то оптимизация теплоотвода для мощного инжекционного лазера представляет собой актуальную задачу и в ряде случаев именно теплоотвод является тем фактором, который не только ограничивает мощность излучения инжекционных лазеров, но и определяет как постепенную, так и катастрофическую деградацию прибора.

Дальнейшее увеличение энергии и мощности оптического излучения, генерируемого полупроводниковыми лазерами, достигается суммированием световых потоков от отдельных лазерных элементов в мощных ЛЛ и матрицах (200 Вт – 10 кВт в квазинепрерывном режиме). Эти приборы имеют КПД более 50% и являются идеальными источниками накачки для ТТЛ. В России серийное производство изделий такого класса отсутствует, что в значительной степени сдерживает разработку мощных ТТЛ с диодной накачкой и приборов на их основе. Это обуславливает целесообразность исследования излучательных характеристик и создания технологии серийного производства мощных ЛЛ и матриц, работающих в различных диапазонах спектра (808 нм, 950 нм). Узкий спектр генерации ЛЛ (полуширина $3 \div 5 \text{ нм}$) обеспечивает высокую эффективность поглощения излучения накачки материалом активного

элемента твердотельного лазера, при этом минимизируются потери излучения накачки и нагрев активного элемента, что обеспечивает высокие КПД и качество лазерного пучка ТТЛ.

Ключевым вопросом при создании мощных инжекционных лазеров является оптимизация характеристик ЛГС, которая должна удовлетворять следующим, частично конфликтующим между собой, требованиям: большой фактор оптического ограничения для уменьшения порогового тока; большая ширина волновода для уменьшения нагрузки на зеркала; малая ширина волновода для уменьшения общей толщины эпитаксиальных слоев, теплового и омического сопротивления; большая ширина волновода для уменьшения расходимости излучения в вертикальной плоскости; низкие потери на рассеяние излучения; низкие потери за счет поглощения излучения на свободных НЗ; высокий уровень легирования для уменьшения омического сопротивления; высокие потенциальные барьеры с целью улучшения латерального ограничения НЗ, внутренней квантовой эффективности и температурной стабильности; низкие барьеры между различными эпитаксиальными слоями для минимизации падения напряжения на ЛД. Очевидно, что при конструировании ГС неизбежны компромиссы, которые зависят от требуемой величины удельной выходной оптической мощности. Перспективный вариант ГС, называемый «широкий оптический резонатор» (Large Optical Cavity), предполагает наличие расширенных волноводных слоев, дает распределение ближнего поля близкое к гауссовому [2] и приводит к улучшению работы мощного ЛД. В этом случае фактор оптического ограничения, нагрузка на зеркало и перенос энергии в эмиттерные слои имеют наименьшие значения. Это позволяет делать эмиттерные слои относительно тонкими с высокой степенью легирования, что приводит к снижению омического и теплового сопротивления ЛД. Недостаток модового усиления в таких ГС компенсируется очень низкими оптическими потерями. Наличие низких оптических потерь позволяет изготавливать ЛД с большими длинами резонатора (3 – 4 мм), при этом сохраняется высокий КПД всего прибора.

Одним из наиболее критичных аспектов в технологической последовательности изготовления мощных ЛД является формирование стабильных и надежных зеркал на сколотых гранях лазерного кристалла, поскольку во время работы плотность мощности электромагнитного излучения находится вблизи порога разрушения материала полупроводникового лазера.

Таким образом, для мощных ЛД, работающих в непрерывном режиме генерации, актуальными задачами являются детальное исследование механизмов ограничения и определение путей увеличения выходной оптической мощности, приходящейся на единичную ширину полоскового контакта, проведение анализа и определение путей оптимизации конструкции теплоотводов, а также оптимизация ЛГС, обеспечивающих высокую ДКЭ, низкие рабочий ток и расходимость излучения в вертикальной плоскости.

Глава 2. Мощные диодные лазеры с длиной волны излучения 808 нм.

Благодаря высокому КПД преобразования электрической энергии в оптическую, компактности, надёжности и высокому уровню развития технологии изготовления, мощные ЛД, линейки и матрицы нашли широкое применение в системах накачки твердотельных и волоконных лазеров, в оборудовании для обработки материалов, в метрологии, полиграфии, медицине, системах оптической локации, робототехнике и других отраслях. Подавляющее

число приборов этого класса выполняется в виде торцевых излучателей с широким полосковым контактом, обеспечивающим многомодовую в плоскости эпитаксиальных слоёв лазерной структуры генерацию света. В главе 2 представлены результаты анализа основных механизмов, ограничивающих выходную мощность ЛД с длиной волны излучения 808 нм и их связи с конструктивными особенностями ЛГС и чипа. Большинство из рассмотренных механизмов не являются привязанными к выбранной выше длине волны излучения, а имеют общий характер. Проведённый анализ посвящен одиночным ЛД и не рассматривает механизмов, специфических для ЛЛ и матриц.

КРЗ инициируется разогревом выходного зеркала ЛД из-за безызлучательной рекомбинации на его поверхности электронов и дырок в активной области. В результате разогрева и сужения запрещённой зоны в узком слое, прилегающем к зеркалу, возникает усиленное поглощение света, приводящее к генерации в этом слое избыточных электрон-дырочных пар. В свою очередь, эти пары рекомбинируют на поверхности и в объёме активной области, усиливая, тем самым, разогрев выходного зеркала и прилегающей к нему области. Такая положительная обратная связь приводит к взрывному повышению температуры активной области ЛД у выходного зеркала при превышении мощностью излучения некоторого порогового значения. В результате повышения температуры происходит разрушение ГС вблизи выходного зеркала лазерного резонатора [3]. КРЗ характеризуется следующими основными особенностями: (а) существует критический (пороговый) перегрев зеркала относительно объёма ГС, выше которого возникает КРЗ; (б) взрывной подъем температуры и область генерации дефектов имеют локальный характер, т.е. КРЗ происходит в относительно малой части полоскового контакта; (в) КРЗ имеет нестационарный характер, вызванный неустойчивостью стационарного переноса тепла в ЛД. Качественная модель «убегания» (взрывного повышения) температуры, предложенная в [3], считается наиболее адекватной для объяснения КРЗ ЛД. Именно на основе этой модели сформулированы основные пути повышения порога КРЗ: (а) защита зеркал, уменьшающая поверхностную рекомбинацию неравновесных НЗ, (б) уменьшение плотности оптической мощности в активной области ЛГС различными конструктивными методами, и (в) улучшение отвода тепла из активной области.

В рамках термических механизмов ограничения мощности излучения ЛД рассмотрены эффекты, не вызывающие КРЗ, но понижающие ДКЭ полупроводниковых лазеров, приводя к сублинейности их ватт-амперных характеристик. Термические механизмы определяются температурными зависимостями порогового тока, квантового выхода стимулированного излучения и внутренних оптических потерь. На Рис. 1а,б показаны рассчитанные нами¹ ватт-амперные характеристики ЛД и зависимости КПД от тока, полученные для тепловых сопротивлений 5 и 10 К/Вт [A27], которые показывают высокую чувствительность характеристик к разогреву активной области.

Данные оценки учитывают наиболее сильный эффект – изменение порогового тока ЛД при его разогреве. Однако рост порогового тока означает также увеличение пороговой концентрации электронов и дырок, усиление поглощения света свободными НЗ и, как

¹ Здесь и далее моделирование характеристик лазерных структур и ЛД осуществлялось с помощью пакета SiLENSe 5.0 [4], алгоритм расчетов описан в главе 3.

следствие, уменьшение ДКЭ ЛД с током, инициирующим разогрев. Этот механизм, опущенный в приведённых выше оценках, усиливает сублинейность ватт-амперной характеристики лазера.

На Рис. 2,а символы показывают полученное в результате моделирования изменение порогового тока ЛД с температурой. Видно, что при перегреве ГС на ~ 100 К пороговый ток возрастает примерно в два раза. Результаты моделирования неплохо аппроксимируются экспоненциальной зависимостью с параметром $T_0 = 135$ К. Оценка ДКЭ ЛД, сделанная в приближении, что квантовый выход стимулированного излучения $\eta_{st} = 1$, даёт весьма слабую зависимость от температуры (см. Рис. 2,б).

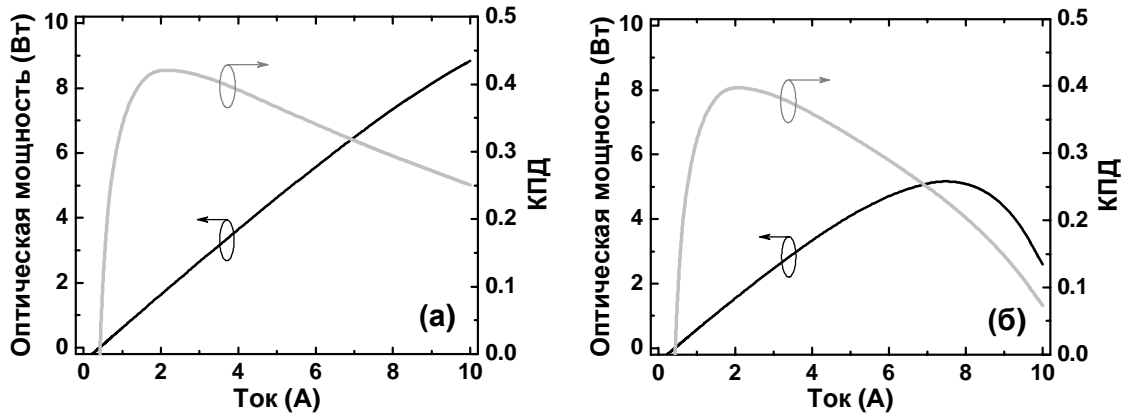


Рисунок 1 - Ватт-амперные характеристики и КПД ЛД с тепловым сопротивлением 5 К/Вт (а) и 10 К/Вт (б).

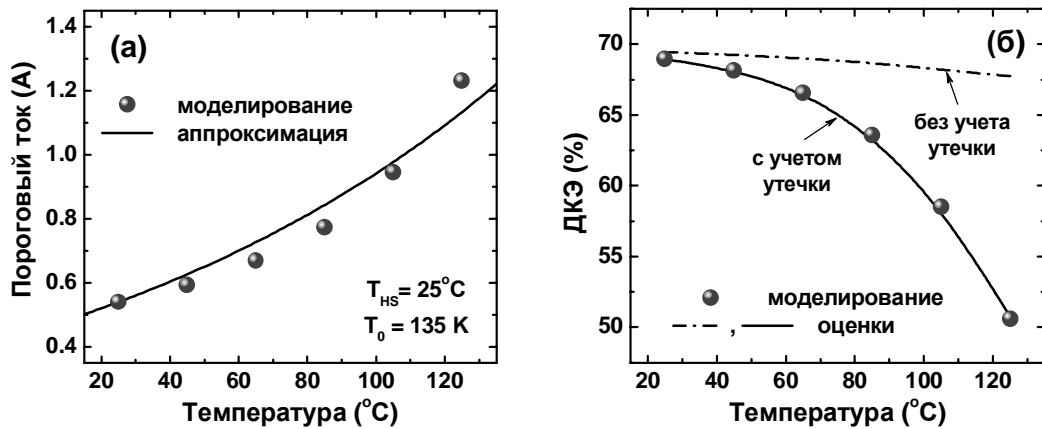


Рисунок 2 - Температурные зависимости порогового тока (а) и ДКЭ (б), полученные с помощью моделирования

На самом деле, разогрев рассматриваемой лазерной ГС приводит к утечке НЗ из активного и волноводного слоёв с последующей безызлучательной рекомбинацией на электродах, формирующих омические контакты. Этот механизм отличен от часто обсуждаемого выброса электронов и дырок из активной области в волноводный слой и определяется преимущественно электронами, имеющими более высокую подвижность, чем дырки. Утечка НЗ проявляется в отличной от единицы эффективности инжекции (отношение плотности тока НЗ, рекомбинирующих в ГС к полной плотности тока), которая, в свою очередь, определяет квантовый выход стимулированного излучения выше порога генерации ЛД. Оценка ДКЭ ЛД, сделанная в приближении, что квантовый выход стимулированного излучения η_{st} равен эффективности инжекции η_{inj} , полностью воспроизводит результаты численного анализа (Рис.

2,б).

Области лазерной ГС, примыкающие к зеркалам резонатора, дополнительно перегреваются относительно объёма материала, что связано с рекомбинацией неравновесных электронов и дырок на поверхности зеркал. Несмотря на заметный перегрев зеркал резонатора ЛД (температура может достигать $\sim 50-150^\circ\text{C}$), его влияние на пороговый ток и ДКЭ прибора может быть незначительным, что связано с малыми размерами перегретых областей (по сравнению с длиной резонатора типичных ЛД).

Температура активной области ЛД в условиях непрерывной накачки определяется суммой тепловых сопротивлений лазерного чипа и теплоотвода. Оценка суммарного теплового сопротивления в условиях непрерывной накачки AlGaAs/GaAs ЛД с шириной полоскового контакта 100 мкм и длиной резонатора 2 мм, напаянного на медный теплоотвод, даёт величину 2.27 К/Вт. При накачке ЛД импульсом тока длительностью τ температура активной области возрастает пропорционально $t^{1/2}$, где время t отсчитывается от момента включения импульса тока. При $\tau = 100$ нс, оценка теплового сопротивления составляет 0.18 К/Вт, что на порядок меньше теплового сопротивления, оценённого для случая непрерывной накачки. Это означает, что уже при длительностях импульса накачки ~ 10 мкс и более разогрев активной области в конце импульса может стать сравнимым с разогревом в условиях непрерывной накачки (см. Рис. 3,а). На Рис. 3,б показана расчётная зависимость перегрева активной области ЛД с AlGaAs эмиттерами от плотности подводимой электрической мощности.

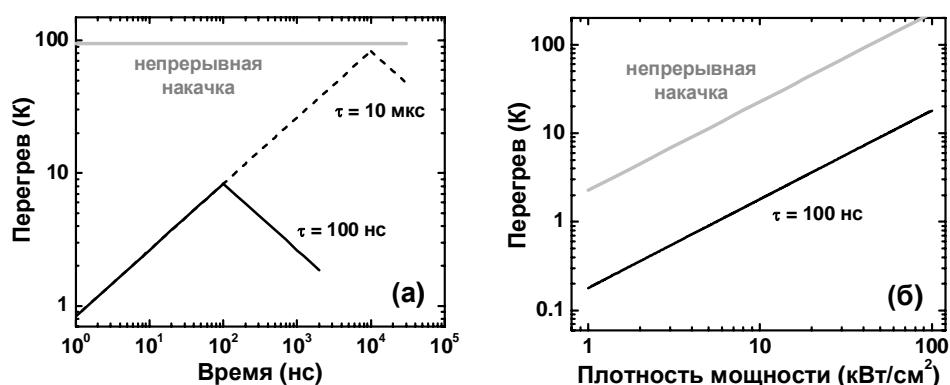


Рисунок 3 - Динамика нагрева активной области ЛД при накачке импульсами тока различной длительности с плотностью 30 кА/см^2 и при непрерывной накачке (а). Зависимость перегрева активной области от плотности подводимой электрической мощности при импульсной и непрерывной накачке (б). В обоих случаях КПД ЛД полагался равным 50%

Видно, что при непрерывной накачке перегрев ~ 10 К достигается при плотностях мощности $\sim 5-6 \text{ кВт/см}^2$, в то время как при накачке 100 нс импульсами этот же перегрев достигается при плотности мощности, на порядок большей. Это означает, что при высоких плотностях электрической мощности длительность импульса ~ 100 нс недостаточно мала, чтобы полностью исключить влияние тепловых эффектов на ватт-амперную характеристику.

Отвод тепла из активной области ЛД существенно влияет на порог КРЗ: чем лучше теплоотвод, тем большим становится порог КРЗ. В случае непрерывной накачки порог КРЗ интегрально отражает уровень технологии изготовления ЛД, включая защиту зеркал резонатора и организацию отвода тепла. При накачке ЛД импульсами длительностью 100 нс и менее

динамическое тепловое сопротивление лазерной ГС становится заметно меньшим, чем при непрерывной накачке. В результате переход от непрерывной к импульсной накачке даёт типичное повышение порога КРЗ у ЛД с полосковым контактом шириной 100 мкм от ~5-8 Вт до ~80-120 Вт, т. е. более, чем на порядок. Тем самым, порог КРЗ становится настолько высоким, что практически уже не он ограничивает мощность излучения лазера.

При импульсной накачке, заметно уменьшающей влияние тепловых эффектов и КРЗ, достигаются более высокие мощности излучения ЛД. В этом случае сублинейность ватт-амперных характеристик наблюдается при больших токах, чем в условиях непрерывной накачки. Выявленные к настоящему времени различные нетермические механизмы сублинейности ватт-амперных характеристик ЛД включают рост концентрации неравновесных НЗ в лазерной ГС за порогом генерации света, а также спектральное и пространственное выжигание НЗ. Последние два фактора обусловлены неравномерностью распределения электронов и дырок по энергии в активной области ЛД, вызванной существенным уменьшением их времен жизни в присутствии стимулированного излучения большой интенсивности и не являются предметом настоящего исследования.

Считается, что при превышении током порога генерации света, резкий рост темпа излучательной рекомбинации за счёт появления стимулированного излучения приводит к стабилизации концентрации неравновесных электронов и дырок в активной области ЛД вблизи соответствующих пороговых значений. Однако поддержание всё более возрастающего тока в ГС за порогом генерации требует роста концентраций неравновесных НЗ за пределами активной области. В волноводных слоях ЛГС уровень легирования обычно минимизируют, чтобы понизить поглощение света на свободных НЗ. Поэтому в волноводных слоях наблюдается увеличение концентрации неравновесных электронов и дырок за порогом генерации света [5]. Транспорт электронов и дырок в этих слоях носит амбиполярный характер, т. е. концентрации электронов и дырок в большей части волноводных слоёв равны друг другу. В результате моделирования работы лазерной ГС с шириной волновода 1,5 мкм нами было показано, что доминирующим может стать дрейф электронов и дырок в электрическом поле p - n перехода [A17]. В случае переноса носителей заряда за счёт амбиполярной диффузии концентрация электронов и дырок должна возрастать по мере удаления от активной области к эмиттерам. В случае дрейфа электронов и дырок в электрическом поле неравновесные НЗ должны более или менее равномерно распределяться по волноводным слоям. Моделирование показало, что в зависимости от температуры и тока, протекающего через ЛД, может доминировать как тот, так и иной механизм переноса. Распределения концентрации электронов и дырок на Рис. 4,а, демонстрируют признаки доминирования либо диффузионного, либо дрейфового механизмов по разные стороны от активной области.

Рост концентрации неравновесных НЗ в волноводных слоях приводит к (а) увеличению потерь света на свободных НЗ, что, в свою очередь может вызвать как уменьшение ДКЭ ЛД с током, так и срыв генерации при больших токах и (б) увеличению скорости их рекомбинации в этих слоях. При этом излучательная рекомбинация электронов и дырок в волноводе не даёт вклад в стимулированное излучение света из-за несовпадения с последним по длине волны. Тем самым, рекомбинация в волноводе представляет собой дополнительный канал потерь НЗ, усиливающийся с ростом тока.

Для уменьшения концентрации инжектированных в волновод НЗ и, следовательно, снижения поглощения на свободных НЗ, нами предложены два подхода: (1) дополнительное легирование волноводного слоя и (2) использование волноводных слоев с градиентными составами для ускорения движения НЗ в волноводе за счет встроенного электрического поля [A17].

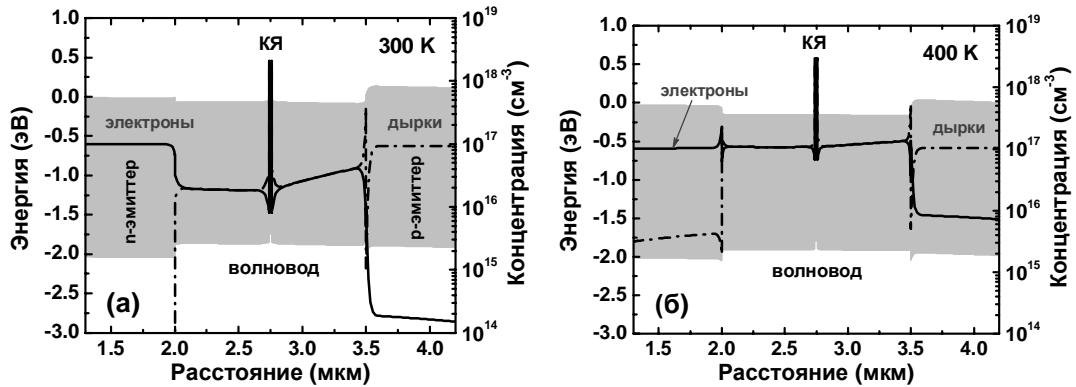


Рисунок 4 - Зонные диаграммы и распределения концентраций электронов и дырок в ЛГС, излучающей свет на длине волны 808 нм, при температурах 300 К (а) и 400 К (б) и токах, соответствующих порогу генерации при данной температуре

Рис. 5 демонстрирует схематические зонные диаграммы рассмотренных ЛГС (а, б, в), а также полученные в результате моделирования зонные диаграммы и концентрации НЗ в ЛД на пороге генерации при длинах резонатора 1500 мкм (г, д, е) и 500 мкм (ж, з, и). Диаграммы (Рис. 5 г, ж) демонстрируют распределение электронов и дырок в нелегированном волноводном слое ЛГС шириной 0,5 мкм (Рис. 5 а). Диаграммы (Рис. 5 д, з) соответствуют варианту такого же волноводного слоя, легированного примесью n-типа до уровня $(1 - 2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. На диаграмме видно, что это привело к уменьшению концентрации дырок, инжектированных в волновод. Несмотря на увеличение концентрации электронов, результатом является уменьшение поглощения на свободных НЗ и, следовательно, увеличение ДКЭ ЛД. Диаграммы (Рис. 5 е, и) соответствуют варианту волноводного слоя с переменным показателем преломления (graded index, GRIN) шириной 0,3 мкм со встроенным тянущим полем. В этом варианте, который представляется более перспективным с точки зрения снижения поглощения на свободных НЗ, наблюдается значительное уменьшение инжектированных в волновод НЗ по сравнению с волноводным слоем постоянного состава (Рис. 5 е, и). Встроенное тянущее поле ускоряет движение НЗ в ГС, что также приводит к существенному подавлению поглощения на свободных НЗ за пределами активной области. Отличительной чертой зонных диаграмм (Рис. 5 е, и) является немонотонный профиль края зоны проводимости. Изломы в распределении концентрации электронов связаны с изменением плотности состояний в зоне проводимости $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с составом, близким к $x = 0.45$ (пересечение дна Γ -долины с X - и L -долинами зоны проводимости).

Современное состояние технологии изготовления одиночных ЛД с широким полосковым контактом можно считать установившимся. Считалось, что активные области лазеров, не содержащие алюминия, обладают более высоким порогом КРЗ из-за меньших скоростей поверхностной рекомбинации НЗ на выходном зеркале [6]. Рис. 6, на котором представлены наилучшие результаты по мощности излучения ЛД в зависимости от их длины волны

генерации, достигнутые за достаточно долгий период времени, показывает, что это не так – в пределах собственного разброса данных максимально достижимые плотности оптической мощности для алюминий-содержащих и безалюминиевых активных областей можно считать примерно одинаковыми.

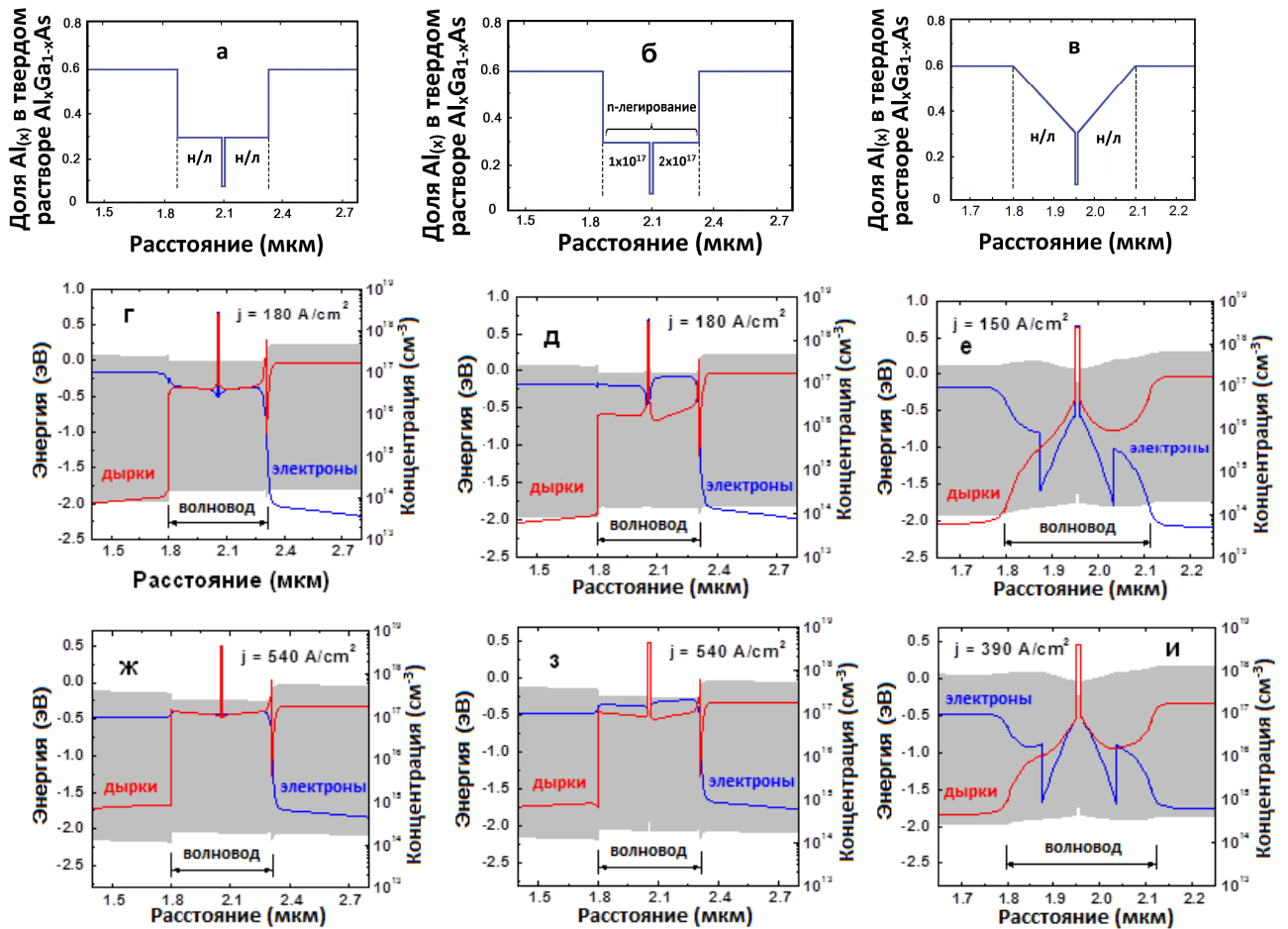


Рисунок 5 – Схематические зонные диаграммы ЛГС (а, б, в), концентрации НЗ и зонные диаграммы AlGaAs/GaAs ЛД полученные в результате моделирования при плотности тока равной пороговому значению, длинах резонатора 1500 мкм (г, д, е) и 500 мкм (ж, з, и). Слева направо – нелегированный волновод (а, г, ж); волновод, легированный примесью n-типа (б, д, з) и GRIN-волновод со встроенным тянущим полем (в, е, и)

В частности, мощность излучения, которую можно получить из ЛД с полосковым контактом шириной 100 мкм и активной областью любого типа, составляет в среднем ~8-9 Вт. Для выявления общей тенденции мы не ориентировались на отдельные рекордные результаты, поскольку для их получения часто использовались специальные высокоэффективные теплоотводы, а характеристики ЛД измерялись при несколько пониженной относительно комнатной температуре. Что касается основной массы результатов с тенденцией, показанной на Рис. 6 сплошной линией, то в спектральном интервале, где могут использоваться ЛД с алюминий-содержащими активными областями, особой разницы между ними и ЛД с безалюминиевыми активными областями не видно. Интересна и спектральная зависимость предельной достигнутой мощности. Видно, что максимум достигается при длинах волн ~980-1100 нм, а при удалении в обе стороны от этих длин волн мощность излучения ЛД падает.

Такое поведение означает, что не только наличие алюминия в активной области, но и другие факторы влияют на предельные мощности излучения, например, Оже-рекомбинация неравновесных НЗ в ГС, приводящая к дополнительным их потерям и повышающая пороговые токи ЛД. Другим фактором вполне может быть материал волноводных слоёв и его теплопроводность. Действительно, максимальные мощности излучения на Рис. 6 соответствуют длинам волн ЛД, волноводные слои которых выполнены из GaAs, имеющего теплопроводность, заметно бóльшую по сравнению с теплопроводностью многокомпонентных твёрдых растворов. Поэтому бóльшие предельные мощности излучения лазеров с длиной волны 980-1100 нм могут быть связаны, в том числе, и с лучшим отводом тепла.

Пути повышения оптической мощности излучения ЛД включают защиту выходных зеркал; улучшение отвода тепла из активной области за счет оптимизации материалов ГС и теплоотвода; модификацию конструкции лазерных излучателей за счет оптимизации конструкции ГС и лазерного чипа. Ключевым моментом защиты зеркал является исключение доступа/накопления кислорода к/на поверхности выходного зеркала при нанесении на него защитного покрытия. Очевидным путём увеличения скорости отвода тепла является использование для теплоотвода материалов с более высокой теплопроводностью, чем у меди, однако набор таких материалов достаточно ограничен. Идеальным материалом теплоотвода мог бы стать алмаз, если бы не его высокая стоимость и сильное отличие коэффициента теплового расширения (КТР) от значений, характерных для GaAs и AlGaAs (см. Рис. 7).

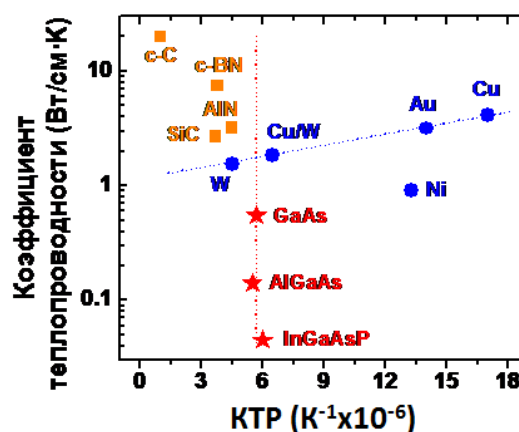
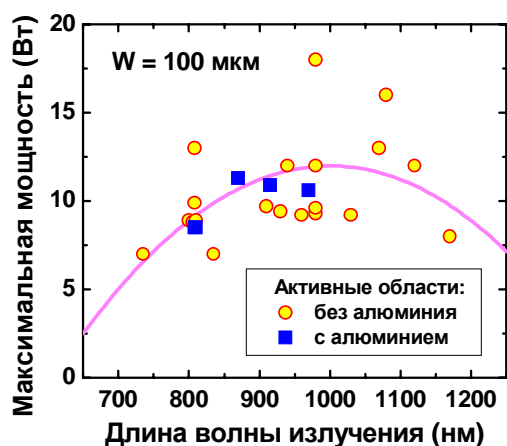


Рисунок 6 - Максимальные мощности излучения лазерных диодов с полосковым контактом шириной 100 мкм в зависимости от длины волны генерации. Линия показывает тенденцию, обсуждаемую в тексте

Рисунок 7 - КТР и коэффициенты теплопроводности материалов для теплоотводов и ГС. Вертикальная линия показывает условия согласования КТР. Наклонная линия показывает эмпирическое соотношение между коэффициентами теплопроводности и КТР

В случае, когда тепловое сопротивление теплоотвода становится сравнимым с тепловым сопротивлением ГС, свойства слоёв ГС могут начать играть заметную роль в общем отводе тепла. При этом ГС, использующие AlGaAs эмиттеры и волноводные слои имеют несомненное преимущество по сравнению со структурами, выполненными из твёрдых растворов InGaAsP.

Оптимизация конструкции ГС обычно направлена на повышение порога КРЗ за счет снижения фактора оптического ограничения Γ до $\sim 1-2\%$. Уменьшения Γ -фактора добиваются использованием: а) расширенного волновода (обеспечивает наименьшую расходимость лазерного пучка в плоскости, перпендикулярной р-п переходу), б) асимметричного волновода, в котором активная область лазера расположена вдали от максимума интенсивности поперечной волноводной моды (позволяет контролировать селекцию поперечных мод в волноводе) и в) волновода с дополнительной «оптической полостью». В настоящее время концепция расширенного волновода с той или иной степенью асимметрии, диктуемой конкретными приложениями, стала основной для мощных ЛД.

Основные модификации конструкции лазерного чипа направлены на уменьшение поглощения света вблизи выходного зеркала резонатора для повышения порога КРЗ: создание непоглощающих зеркал (узкой области вблизи зеркала, где отсутствует поглощение стимулированного излучения), травление области вблизи выходного зеркала с последующим её зарастиванием для формирования волновода с расширенной областью локализации поперечной моды и формирование сегментированного контакта к ЛД с возможностью приложения различных напряжений к разным сегментам контакта.

Глава 3. Анализ работы и оптимизация характеристик мощных ЛД на основе симметричных и асимметричных ЛГС со сверхнизкими оптическими потерями.

Расчеты характеристик ЛД и ЛГС проводились на основе программного пакета SiLENSe, анализирующего зонные диаграммы прибора, распределения в ГС концентраций неравновесных НЗ и электромагнитного поля волноводной моды. На основе этой информации вычислялся пороговый ток ЛД и коэффициент оптических потерь, связанных с поглощением света на свободных НЗ. Расчет волноводных свойств, оптических потерь, пороговой плотности тока и ДКЭ проводился по следующему алгоритму:

1. Расчет распределения напряженности электрического поля для основной ТЕ-моды осуществлялся путем решения волнового уравнения. Распределение показателя преломления вычислялось по известному распределению состава твердого раствора AlGaAs;
2. Расчет фактора оптического ограничения и внутренних оптических потерь на свободных НЗ вне активной области проводился с учетом распределения электромагнитного поля по ГС. Концентрация НЗ в каждом слое полагалась постоянной и задавалась с учетом результатов расчета зонных диаграмм и инжекции НЗ;
3. Пороговая концентрация неравновесных НЗ в активной области находилась из условия равенства коэффициента усиления и суммарных потерь, состоящих из излучательных потерь, потерь на рассеяние света и потерь на свободных НЗ внутри и снаружи активной области. Пороговая плотность тока определялась путем расчета скорости спонтанной и безызлучательной рекомбинации при пороговой концентрации носителей;
4. Расчет диаграммы направленности излучения в плоскости, перпендикулярной р-п переходу, проводился с учетом ближнего поля волноводной моды и эффективности ее преобразования в моду излучения на торце ЛД.

После детального рассмотрения работы мощных ЛД, изготовленных на основе базовой ЛГС (В) была проведена оптимизация с помощью моделирования характеристик мощных ЛД

на основе квантово-размерных ЛГС с симметричным волноводом и уменьшенным, по крайней мере в 2 раза, фактором оптического ограничения по сравнению с базовой ГС. Критерием оптимизации было одновременное достижение следующих основных параметров: фактор оптического ограничения (Γ) менее 2%; коэффициент оптических потерь (α_{int}) менее $1,5 \text{ см}^{-1}$; плотность порогового тока (J_{th}) менее 500 А/см^2 ; ДКЭ (η_{D}) более 1 Вт/А ; ширина диаграммы направленности излучения FWHM ($\Delta\phi$) менее 40 градусов. Подробно рассмотрены 6 различных ГС с симметричным волноводом: структура с расширенным прямоугольным волноводом (R1), структура с расширенным градиентным волноводом (G1), структура с двумя активными областями (A1), структура с блокирующим электронным слоем (R2), низкосоставная градиентная структура (G2), низкосоставная градиентная структура с зауженным волноводным слоем (G3). ЛД на основе этих ГС демонстрируют сходные между собой характеристики, однако наиболее перспективными среди них являются структуры G1 и G2, обеспечивающие наименьшую концентрацию неравновесных НЗ, инжектированных в волноводные слои.

Введение асимметрии в лазерные ГС с расширенным волноводом позволяет исключить образование поперечных волноводных мод высшего порядка и снизить внутренние оптические потери по сравнению с симметричным волноводом [7]. Поэтому было проведено моделирование работы мощных ЛД на основе 9 различных ГС: структуры с асимметричным прямоугольным волноводом (R3), структуры с инвертированным асимметричным прямоугольным волноводом (R4), структуры с асимметричным градиентным волноводом (G4), структуры с инвертированным асимметричным градиентным волноводом (G5), модифицированных структур (R3D, R4D, G2D, G4D, G5D). Параметры мощных ЛД на основе ЛГС полученные в результате моделирования представлены в Таблице 1.

Таблица 1 Сравнение характеристик мощных ЛД на основе ЛГС с симметричными и асимметричными волноводами по результатам моделирования

	Γ (%)	L_{opt} (мм)	J_{th} (А/см ²)	I_{op} (А) @ 6W	η_{D} (Вт/А)	α_{int} (см ⁻¹)	$\Delta\phi$ (град)	η_{int}	ρ (Ом см ²)	Экстра-моды
B	3.30	0.85	336	6.12	1.05	1.53	40	0.83	1.5×10^{-4}	—
A1	1.65	0.8	522	6.68	1.03	1.62	51	0.81	2.1×10^{-4}	✓
R1	1.73	1.0	479	7.54	0.91	1.71	39	0.77	2.1×10^{-4}	✓
R2	1.67	1.3	354	7.58	0.90	1.32	23	0.76	1.5×10^{-4}	—
R3	1.71	1.0	468	7.48	0.92	1.71	30	0.77	7.4×10^{-5}	—
R3D	1.71	1.0	461	7.41	0.92	1.67	30	0.78	7.4×10^{-5}	—
R4	1.71	0.9	506	7.49	0.91	1.96	30	0.77	1.2×10^{-4}	—
R4D	1.71	0.9	494	7.35	0.93	1.90	30	0.78	1.2×10^{-4}	—
G1	1.70	1.4	293	7.10	0.96	0.75	29	0.76	9.8×10^{-5}	✓/?
G2	1.48	1.4	390	7.81	0.89	1.37	16	0.77	1.4×10^{-4}	—
G2D	1.63	1.0	467	7.31	0.94	1.52	15	0.78	1.4×10^{-4}	—
G3	1.0	1.4	622	8.93	0.83	1.46	7	0.72	1.3×10^{-4}	—
G4	1.73	1.0	406	7.27	0.94	1.34	25	0.78	1.2×10^{-4}	—
G4D	1.73	1.0	401	7.18	0.95	1.22	25	0.78	1.2×10^{-4}	—
G5	1.73	0.9	467	7.16	0.95	1.61	26	0.78	2.0×10^{-4}	—
G5D	1.73	0.9	461	7.09	0.96	1.57	26	0.78	2.0×10^{-4}	—

Обозначения в таблице: L_{opt} – оптимальная длина резонатора, $I_{op} @ 6W$ – рабочий ток при выходной мощности 6 Вт, η_{int} – внутренний квантовый выход излучательной рекомбинации, ρ – удельное омическое сопротивление.

Сравнение ЛГС проводилось по трем основным параметрам: ДКЭ, коэффициенту суммарных оптических потерь и полуширине диаграммы направленности излучения. Наиболее перспективными по критерию ДКЭ = 0.95 Вт/А оказались структура G1 с симметричным волноводом и модифицированная структура G4D с асимметричным волноводом. По результатам сравнительного анализа были разработаны и защищены патентами РФ оптимизированные варианты симметричной и асимметричной ГС [A18, A19]. Следует подчеркнуть, что существует достаточно много различных вариантов ЛГС, основанных на симметричных или асимметричных волноводах и обеспечивающих высокую мощность излучения ЛД. Выбор конкретного варианта ЛГС зависит от полного набора требуемых параметров мощного ЛД, способа выращивания ЛГС, используемого ростового оборудования, перечня и качества используемых материалов, конструкции лазерного чипа и условий эксплуатации ЛД.

Глава 4. Анализ и пути оптимизации конструкции теплоотводов для мощных ЛД.

Одним из основных факторов, лимитирующих выходную мощность ЛД, работающих в непрерывном режиме, является отвод тепла от активной области. Естественной мерой эффективности отвода тепла является тепловое сопротивление ЛД (R_{th}), являющееся коэффициентом пропорциональности между мощностью тепловыделения в лазере P_h и перегревом его активной области ΔT . В современных ЛД существенен вклад в тепловое сопротивление каждого элемента конструкции, включая ГС, металлические контакты, слои припоя, обеспечивающие посадку ЛД на теплоотвод, сам теплоотвод, корпус ЛД и т.д. Типичная конструкция мощного ЛД показана на Рис. 8,а. Область контакта лазерного чипа и теплоотвода показана детально на Рис. 8,б. Распределение температуры в ЛД находилось из решения уравнения теплопроводности в пренебрежении радиационным оттоком тепла через свободные поверхности конструкции. Основной проблемой тепловых расчётов была разномасштабность задачи: от десятков нанометров (типичная толщина активной области ЛД) до нескольких сантиметров (типичный поперечный размер основания на Рис. 8,а).

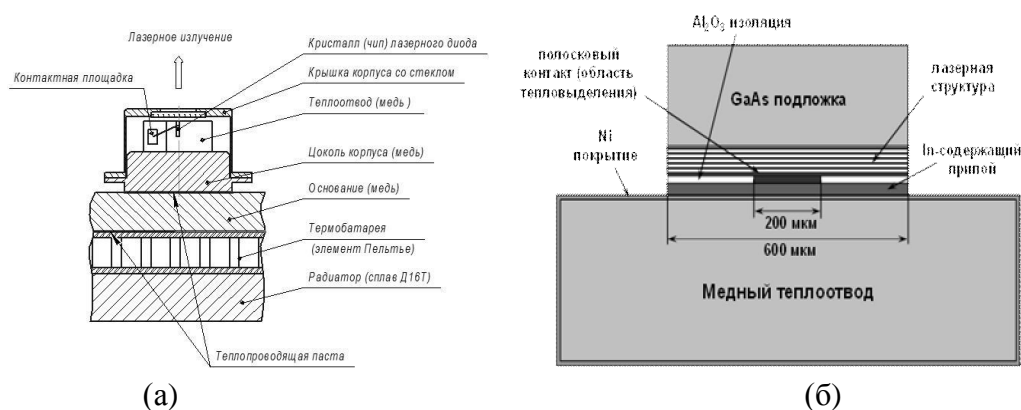


Рисунок 8 - Схематическое изображение базовой конструкции ЛД (а) и области контакта чипа ЛД с теплоотводом (б). Ширина полоскового контакта ЛД $W=200$ мкм, ширина чипа ЛД 600 мкм

Поэтому теплоперенос в лазерном чипе, где он носит преимущественно одномерный характер, и в теплоотводе, корпусе ЛД и основании, где существенна 3D геометрия конструкции, анализировались отдельно.

Анализ показал, что теплоотвод даёт доминирующий вклад в тепловое сопротивление ЛД. Чтобы понять, как его геометрические размеры влияют на R_{th} , были проведены серийные трёхмерные расчёты, варьируя размеры теплоотвода: ширину D_{HS} (от 6 до 10 мм) и толщину t_{HS} (от 2 до 4 мм). Детальный анализ результатов этих расчётов показал, что значения получаемых при этом тепловых сопротивлений с ошибкой, не превышающей $\sim 7\%$, описываются аналитической формулой

$$R_{th} = \frac{1}{\pi\kappa L} \cdot \ln\left(\frac{\pi\sqrt{2}D_{HS}}{W}\right) + \frac{t_{HS}}{\kappa D_{HS}^2}, \quad (1)$$

по своей сути соответствующей двум включённым последовательно тепловым сопротивлениям, связанным с двумерным боковым растеканием тепла в теплоотводе и переносом тепла от внешней к внутренней поверхности теплоотвода. Аппроксимация (1) показывает, что тепловое сопротивление не является функцией площади полоскового контакта (произведения WL), как в случае одномерного переноса тепла, но зависит различным образом от его длины (более сильно) и ширины (более слабо). Это означает, что относительные вклады ГС, металлических слоёв и теплоотвода в полное тепловое сопротивление ЛД меняются при изменении геометрических размеров лазерного чипа.

На Рис. 9 показана зависимость полного теплового сопротивления и вкладов в него различных элементов конструкции ЛД от длины L полоскового контакта при фиксированном $W = 200$ мкм для случая использования CuW термокомпенсатора (сабмаунта) толщиной 250 мкм и без него.

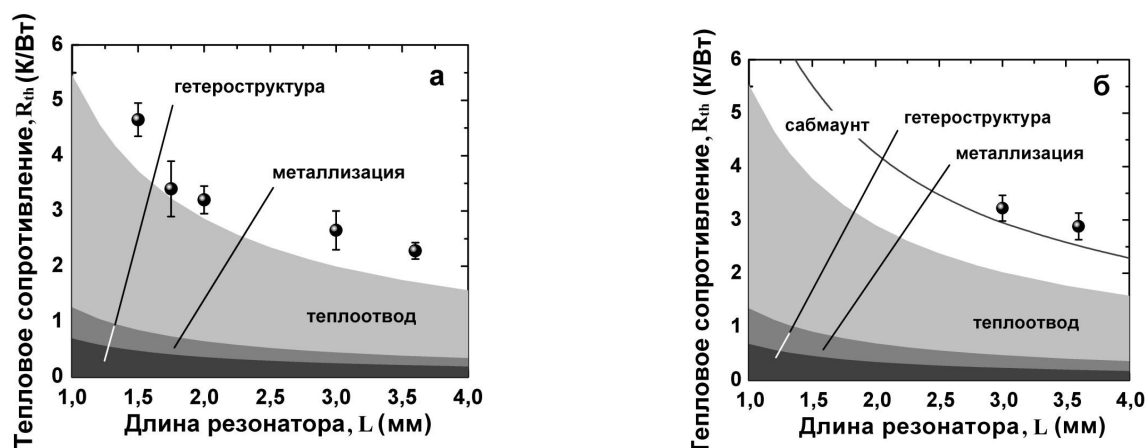


Рисунок 9 - Зависимость теплового сопротивления и вкладов в него различных элементов базовой конструкции ЛД от длины полоскового контакта L при $W = 200$ мкм, рассчитанная для различных вариантов посадки чипа на теплоотвод: (а) чип смонтирован непосредственно на теплоотвод посредством индий-содержащего припоя и (б) чип смонтирован на сабмаунт посредством AuSn припоя, сабмаунт припаян к теплоотводу через SnPb припой. Линии – результаты расчёта, символы – экспериментальные точки с разбросом данных, полученных в этих точках на разных образцах (по 5 шт.)

Символы показывают значения теплового сопротивления, измеренные на различных образцах ЛД. Рис. 9 показывает, что доминирующий вклад в тепловое сопротивление прибора R_{th} даёт теплоотвод, затем – корпус лазера и в наименьшей степени – ЛГС и металлические электроды. Для снижения теплового сопротивления нами было проведено численное моделирование модифицированной конструкции ЛД, в которой выходное зеркало ЛД располагалось у стенки, наклонённой под углом 45° к плоскости основания. Однако геометрическая оптимизация теплоотвода относительно его базовой конструкции оказалась малоэффективной. Причиной этому является сильная локализация области тепловыделения, происходящая на расстояниях десятков и сотен микрометров, и двумерный характер теплопереноса вблизи этой области, дающий доминирующий вклад в тепловое сопротивление ЛД. В то же время, модифицированная конструкция теплоотвода обеспечила заметное (более чем в 1.5 раза) понижение температуры выходного зеркала ЛД за счёт наклона стенки теплоотвода, полученные для полной мощности тепловыделения 10 Вт.

Альтернативным способом решения проблемы локализации тепла вблизи лазерного чипа является использование в качестве теплоотвода или, по крайней мере, в качестве сабмаунта материала с теплопроводностью, заметно превышающей теплопроводность меди. В настоящей работе мы выбрали алмаз, как материал, имеющий максимально возможную теплопроводность и являющийся предметом практических исследований. Расчёты показали, что R_{th} ЛД с сабмаунтом толщиной 100 мкм, с шириной и длиной на 0.2 мм превышающими ширину и длину лазерного чипа не намного меньше значений R_{th} , получаемых без алмазного сабмаунта. В то же время, увеличение ширины и длины сабмаунта до размеров самого теплоотвода (ширина 12 мм, длина 6 мм) дало заметно больший выигрыш в тепловом сопротивлении. Сравнение характеристик теплоотводов базовой, модифицированной конструкции с использованием алмазных сабмаунтов показано на Рис. 10.

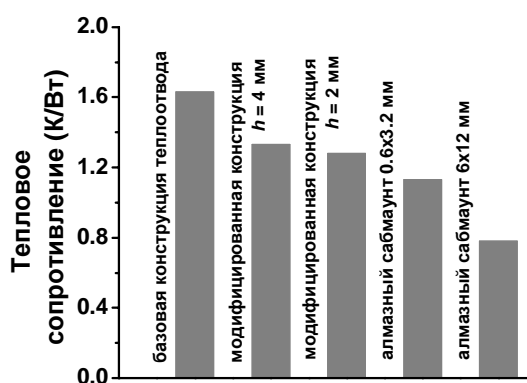


Рисунок 10 - Сравнение тепловых сопротивлений теплоотводов различных конструкций, h – толщина теплоотвода

Причиной столь сильного влияния размеров сабмаунта на R_{th} является усиленное боковое растекание тепла в нём. Будучи распределённым по большой площади в латеральном направлении, тепло затем эффективно отводится через теплоотвод модифицированной конструкции. Тем самым, алмазный сабмаунт работает как слой, обеспечивающий сильное боковое растекание тепла, изменяя характер отвода тепла в целом.

Глава 5. Исследование излучательных характеристик мощных лазерных диодов.

В настоящей главе детально рассмотрены основные технические требования к технологическому процессу, перечень технологических операций, входящих в технологический процесс изготовления кристаллов и сборки мощных непрерывных ЛД. На основе асимметричной InAlGaAs/AlGaAs/GaAs ЛГС, подробно описанной в главе 3 были изготовлены образцы непрерывных ЛД мощностью 15 Вт (излучающая апертура 400 мкм, Рис. 11,а).

Рис. 11,б демонстрирует типичные зависимости выходной оптической мощности и КПД от тока накачки мощного непрерывного ЛД. Расходимость излучения ЛД в двух плоскостях составила 7 x 36 градусов. На основе симметричной InAlGaAs/AlGaAs/GaAs ЛГС были изготовлены квазинепрерывные ЛЛ, представляющие собой набор полосковых излучателей с шириной излучающей области 160 мкм (период 200 мкм), интегрированных на одной подложке, но не связанных между собой оптически.

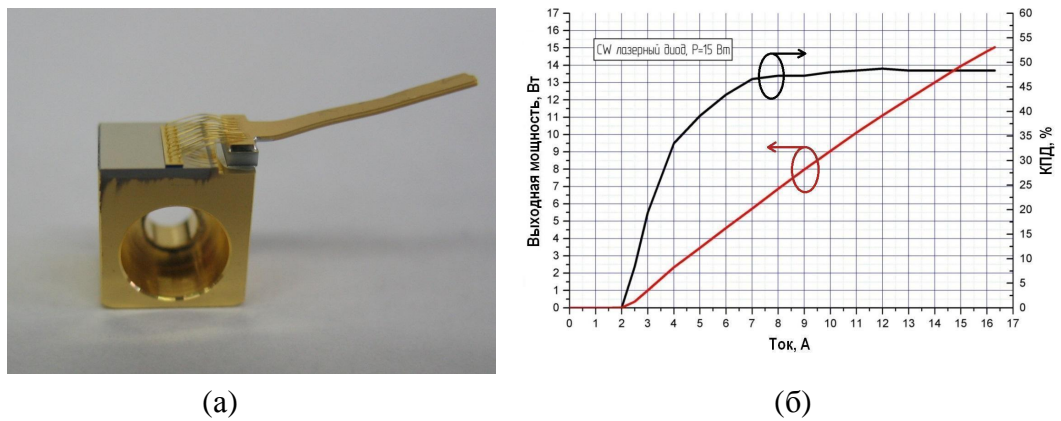


Рисунок 11 (а) Фотография непрерывного ЛД мощностью 15 Вт и (б) типичные зависимости выходной оптической мощности и КПД от тока накачки мощного непрерывного ЛД

На Рис. 12,а представлена типичная ватт-амперная характеристика ЛЛ с выходной оптической мощностью 200 Вт (излучающая апертура 10 мм, Рис. 12,б). Для сборки ЛЛ в матрицу были разработаны конструкции теплоотводов, которые позволили последовательно соединять от 2 до 50 шт. ЛЛ с размерами излучающей апертуры 6 и 10 мм в матрицы с выходной оптической мощностью 2,5 кВт (излучающая апертура 6x42,5 мм, Рис. 13,а) и 10 кВт (излучающая апертура 10x126,5 мм, Рис. 13,б).

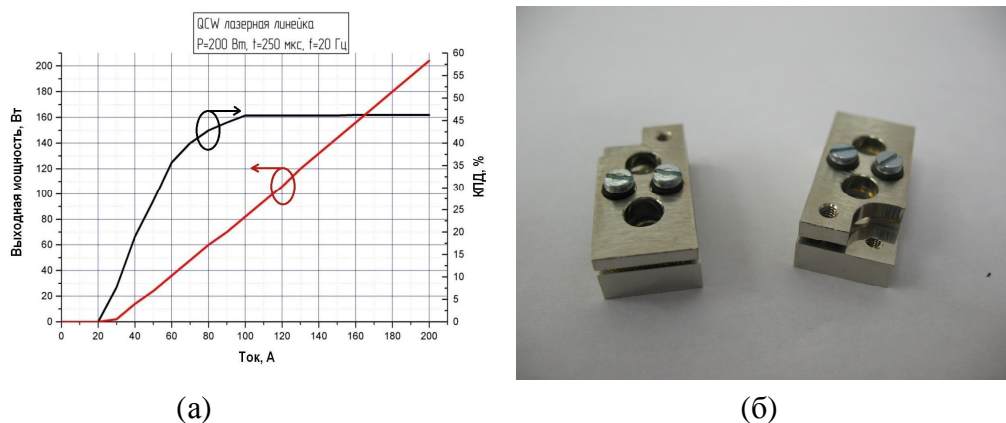


Рисунок 12 (а) - Типичные зависимости выходной оптической мощности и КПД от тока накачки ЛЛ (длительность импульса 250 мкс, частота повторения 20 Гц); (б) - фотография квазинепрерывных ЛЛ

Срок службы ЛЛ составляет не менее $5 \cdot 10^8$ импульсов (длительность импульсов 250 мкс, частота повторения 20 Гц).

На основе InGaAs/AlGaAs/GaAs ЛГС с квантово-размерной активной областью были разработаны и изготовлены мощные непрерывные ЛД и квазинепрерывные ЛЛ, излучающие в спектральном диапазоне $0.94 \div 0.96$ мкм. Непрерывные ЛД с выходной оптической мощностью 2,5 Вт при излучающей площадке 100 мкм и длине волны генерации 945 нм, имели высокую ДКЭ (более 65%), низкую плотность порогового тока (100 А/см^2) и время жизни при мощности 1,0 Вт - более 10 000 часов.

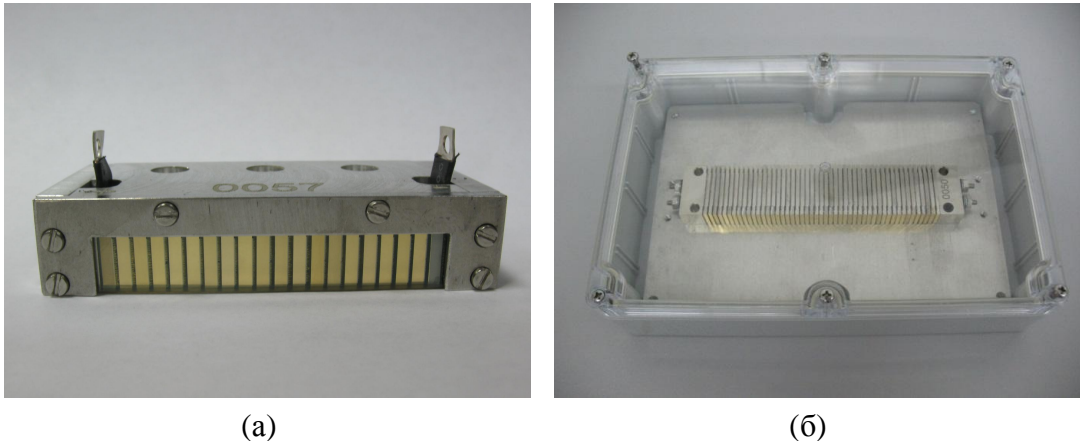


Рисунок 13 - Фотографии лазерных матриц: а - излучающая апертура 6x42,5 мм, выходная оптическая мощность 2,5 кВт; б - излучающая апертура 10x126,5 мм; выходная оптическая мощность 10 кВт

Квазинепрерывные ЛЛ при длительности импульса тока накачки 5 мс демонстрировали выходную оптическую мощность 100 Вт, ДКЭ 72%, максимальный КПД 47%. Исследования излучательных характеристик ЛЛ в широком диапазоне температур показали уменьшение выходной оптической мощности от 110 Вт до 80 Вт и увеличение ширины на половине интенсивности (FWHM) спектров генерации с 3,5 нм до 5,6 нм при изменении температуры от -40 до $+85^\circ\text{C}$. Надежное функционирование разработанных ЛЛ (ресурс работы при $T = +25^\circ\text{C}$ составляет 10^9 импульсов) в широком диапазоне температур обеспечивает возможность их использования для накачки ТТЛ на основе Yb-Er без системы стабилизации температуры.

На основе фосфор-содержащих ЛГС с квантовой ямой GaInP были разработаны и изготовлены ЛД конструкции «мелкая меза с дополнительной изоляцией». При изготовлении лазерного кристалла были сформированы стабильные во времени каналы протекания тока, что позволило улучшить пространственно-временную стабильность характеристик излучения ЛД. Лазеры демонстрировали в непрерывном режиме выходную оптическую мощность до 2 Вт при длине волны генерации 670 нм. Ширина спектра FWHM составила около 1 нм, оптические шумы в диапазоне частот 30 Гц – 20 МГц не превышали 0,5%, срок службы при мощности 1,3 Вт – более 10000 часов. Высокая выходная мощность излучения, температурная и пространственно-временная стабильность работы и большой срок службы позволяют использовать разработанные ЛД в качестве источников излучения для ФДТ.

Глава 6. Разработка твердотельных лазеров с накачкой мощными лазерными диодами и линейками.

Накачка ТТЛ является одним из основных областей применения мощных ЛД, линеек и матриц. Ниже приведены примеры использования мощных ЛД и ЛЛ, результаты испытаний которых приведены в главе 5, в качестве источников торцевой (ЛД) и боковой (ЛЛ) накачки ТТЛ для технологических и информационных применений.

При разработке импульсного ТТЛ для технологических применений использовались ЛД с выходной оптической мощностью излучения 15 Вт в непрерывном режиме генерации. Структурная схема оптической части ТТЛ включала задающий генератор (ЗГ), оптический усилитель (ОУ) и выходной телескоп (Т). ЗГ ТТЛ был собран на основе активного элемента (АЭ) на кристалле YAG:Nd. Двухсторонняя торцевая накачка АЭ осуществлялась с помощью двух ЛД, излучение каждого из них фокусировалось с помощью микролинзы. ЗГ обеспечивал генерацию лазерного излучения высокого качества с длиной волны 1,064 мкм, которое поступало в ОУ. ОУ также был собран на АЭ с двусторонней накачкой, предназначен для усиления оптической мощности входящего лазерного излучения и имел коэффициент усиления $1,5 \div 2$. Для достижения требуемой выходной мощности излучения оптическая схема ТТЛ позволяла включать несколько оптических усилителей, расположенных последовательно. На выходе ТТЛ был расположен телескоп, обеспечивающий фокусировку лазерного излучения на поверхности обрабатываемого материала в пятно требуемого диаметра (Рис. 14,а).

Импульсный ТТЛ для технологических применений продемонстрировал следующие основные параметры: максимальная средняя мощность лазера 10 Вт, энергия в импульсе 1,5 мДж, полный КПД прибора $4 \div 5$ % при длительности импульса 15-20 нс частоте до 10 кГц. Лазер показал хорошие результаты при маркировке поверхностей из пластика, органического стекла, дерева, полупроводников и различных металлов. Достоинствами этого прибора являются высокое качество лазерного пучка, сравнительно невысокая стоимость и удобство в эксплуатации.

На Рис. 14,б изображен компактный лазерный излучатель для дальномеров на основе твердотельного лазера с диодной накачкой с длиной волны генерации 1,57 мкм и энергией в импульсе 10 мДж. Лазер работает в безопасном для глаз спектральном диапазоне излучения, и предназначен для комплектации наблюдательных приборов – визуальных систем наблюдения, различных оптико-электронных станций, снабженных лазерным каналом измерения дистанции.



Рисунок 14 (а) - Внешний вид ТТЛ для технологических применений с блоком питания, (б) – Внешний вид ТТЛ для дальномеров, работающий в безопасном для глаз диапазоне спектра.

При создании лазерного излучателя были использованы специально разработанные сверхмощные квазинепрерывные ЛЛ с выходной оптической мощностью 125 Вт, длиной волны генерации 808 нм, шириной спектра излучения FWHM 3 нм, максимальным КПД 45% и шириной излучающей площадки 6 мм. Энергия оптического импульса диодной накачки составляла 120 мДж. Накачка активного элемента лазерного излучателя осуществлялась по боковой схеме, причем излучение ЛЛ, концентрировалось в АЭ благодаря использованию отражателя, образующего замкнутую полость вокруг АЭ. Для сборки твердотельного лазера были изготовлены активные элементы YAG:Nd, в качестве оптического затвора применены насыщающиеся поглотители на основе кристалла GSGG:Cr⁴⁺. В лазере использовано внутриврезонаторное параметрическое преобразование в кристалле КТР. Выходная энергия лазера на длине волны 1.57 мкм составляла 10 мДж, частота повторения импульсов до 20 Гц, расходимость излучения на выходе 7-кратного формирующего телескопа 0.7 мрад. Лазер работает в диапазоне температур от -55 до +55 °С, имеет герметичный корпус, устойчив к механическим воздействиям и полностью пригоден для использования в составе дальномера безопасного для глаз спектрального диапазона.

Глава 7. Создание специализированных медицинских аппаратов на основе мощных лазерных диодов и устройства для диагностики онкологических заболеваний.

Одним из основных применений мощных ЛД является лазерная медицина. Медицинские лазерные аппараты на основе ЛД отличаются компактностью, простотой обслуживания, отсутствием высокого напряжения питания и водяного охлаждения, возможностью оказывать термическое воздействие на глубоко расположенные биообъекты. Это позволяет использовать такие аппараты для бесконтактной и интерстициальной коагуляции, иссечения и гипертермии тканей, как при стационарном, так и при амбулаторном лечении. Другим перспективным методом лазерного лечения онкологических и ряда других заболеваний является ФДТ. Мощные и яркие ЛД, описанные в главе 5 и обеспечивающие высокое качество и стабильность лазерного излучения во всех требуемых диапазонах длин волн (670, 808 и 950 нм), были использованы для создания компактных и высокоэффективных медицинских лазерных аппаратов для хирургии и ФДТ. Для обеспечения компактности, высокой эффективности и надежности, удобства для медицинских применений был предложен целый ряд научно-технических решений, защищенных свидетельствами на полезные модели РФ [А6, А8, А11].

В 2000 г. был разработан и выведен на российский рынок один из первых медицинских лазерных аппаратов - «Аткус-15» (см. Рис. 15,а) с выходной оптической мощностью 15 Вт в непрерывном режиме для гипертермии новообразований кожи и хирургии. Совместно с ФГБУ «НИИ онкологии им. Н.Н. Петрова» МЗ РФ (С.-Петербург) был разработан уникальный метод селективной лазерной гипертермии для лечения злокачественных новообразований (защищен патентами [А7, А9, А10, А12]). В 2006 г. была разработана серия медицинских лазерных аппаратов «Латус» с широким спектром применения – для гипертермии, ФДТ, коагуляции и иссечения тканей (Рис. 15,б). Высокая выходная оптическая мощность (30 Вт при длинах волн 810, 940 и 970 нм и 5 Вт при длине волны 660 нм) позволяет использовать аппараты «Латус» для большинства известных медицинских применений. Удаление опухолей хирургическим лазером уменьшает число рецидивов и осложнений, сокращает сроки заживления ран, позволяет

обеспечить одноэтапность процедуры и дает хороший косметический эффект.



Рис. 15 - Медицинские лазерные аппараты «Аткус-15» (а) и «Латус» (б)

Важным техническим параметром лазеров с волоконным выводом излучения в этих применениях становится температура торца оптического волокна (ОВ), неконтролируемое повышение которой может представлять угрозу, как для пациента, так и для самой аппаратуры. Для контроля температуры рабочего торца ОВ было разработано специальное устройство, которое легко интегрируется как в медицинские лазерные аппараты (защищено свидетельством на полезную модель [А30]). Устройство представляет собой оптоволоконный пирометрический сенсор, в качестве чувствительного элемента которого использован $\text{In}_x\text{As}_{1-x}\text{Sb}$ фотодиод (ФД) среднего ИК-диапазона типа PD19Su/Sr, разработанный в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Максимум чувствительности ФД соответствует длине волны $\lambda_{\text{max}} = 1.9$ мкм при относительно узкой спектральной полосе чувствительности ($\Delta\lambda \sim 0.2$ мкм), что оптимально подходит для создания детекторов теплового излучения (пирометров) различного назначения. Выходной сигнал пирометрического сенсора, несущий информацию о температуре рабочего торца оптоволоконного кабеля, использовался как дополнительный управляющий сигнал для источника тока накачки ЛД. Оптический разветвитель, выполненный в виде простейшего бескорпусного сплавного Y-образного отрезка ОВ обеспечивал однонаправленный отвод порядка 20% мощности теплового излучения, распространяющегося по ОВ в направлении, противоположном распространению излучения лазера. Испытания лазерного аппарата «Латус» со встроенным пирометрическим сенсором доказали возможность измерения, расчета и передачи данных, соответствующих температуре торца оптоволоконного кабеля диаметром 400 мкм в диапазоне 600-1000 °С с точностью не хуже 1% от измеренного значения при быстроедействии не менее 1000 отсчетов/секунду. Характеристики устройства соответствуют лучшим мировым образцам пирометров и обеспечивают новые функциональные возможности медицинского лазерного аппарата – измерение, управление и стабилизацию температуры объекта на торце ОВ, что не только увеличивает его срок службы, но и обеспечивает равномерный и качественный разрез биоткани.

ФДТ представляет собой метод диагностики и лечения злокачественных раковых опухолей, основанный на способности специальных препаратов (фотосенсибилизаторов) избирательно накапливаться в пораженных тканях и одновременно взаимодействовать с электромагнитным излучением видимого или ближнего ИК диапазона, приводя к развитию фотохимической реакции, разрушающей опухолевые клетки, за счет чего достигается лечебный эффект. Этот процесс сопровождается флуоресценцией препарата в длинноволновой области спектра. Картина пространственного распределения флуоресценции дает информацию о

размерах опухоли и концентрации препарата, а ее изменение во времени позволяет получить количественную информацию о необходимой дозе облучения. Данный эффект может использоваться как при лечении, так и при диагностике онкологических заболеваний различных локализаций на ранних стадиях. Для получения и визуализации картины пространственного распределения флуоресценции фотосенсибилизатора был разработан и изготовлен опытный образец спектрально-селективного цифрового устройства «Флуовизор». «Флуовизор» позволяет наблюдать псевдо-трехмерную гистограмму распределения яркости флуоресценции по двум координатам, отображаемую рядом с реальной картиной, получаемой с цифровой монохромной видеокамеры с разрешением 752×582 пикселя. Устройство обеспечивает визуализацию (с возможностью фиксации) распределения флуоресценции в наиболее удобной для наблюдения форме, осуществляет автоматический количественный анализ изображения флуоресценции в реальном времени и позволяет отстроиться от фонового излучения, поэтому изображение новообразования на мониторе имеет весьма четкие границы. Это позволяет точно определить необходимую для последующего лечения дозу облучения, наблюдать в реальном времени процесс взаимодействия накопленного в биоткани фотосенсибилизатора с оптическим излучением, определить момент окончания процедуры и избежать передозировки при проведении сеанса ФДТ. Начата клиническая апробация «Флуовизора» в ведущих медицинских учреждениях РФ (ФГБУ «ГНЦ лазерной медицины ФМБА», г. Москва, ФГБУ «МРНЦ» МЗ РФ, г. Обнинск, ФГБУ «НИИ онкологии им. Н.Н. Петрова» МЗ РФ, г. С.-Петербург).

В Заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

1. Проведено исследование основных механизмов ограничения выходной оптической мощности ЛД с длиной волны излучения 808 нм и определены возможные пути ее увеличения: использование ГС с расширенным волноводом, защита зеркал резонатора ЛД и улучшение отвода тепла из ГС.
2. Произведен расчет основных характеристик мощных ЛД на основе различных вариантов симметричных и асимметричных ЛГС. Определены и защищены патентами РФ №2309501 и №2309502 ЛГС со сверхнизкими оптическими потерями на свободных НЗ, обеспечивающие высокую ДКЭ, низкие рабочий ток и расходимость излучения в вертикальной плоскости.
3. Проведен детальный тепловой анализ традиционных теплоотводов для мощных ЛД, работающих в непрерывном режиме генерации. Определены варианты оптимизации конструкции и материала теплоотвода, обеспечивающие минимизацию теплового сопротивления ЛД.
4. Исследованы излучательные характеристики мощных непрерывных ЛД ($P=2,0$ Вт, $\lambda=670$ нм; $P=15$ Вт, $\lambda=808$ нм; $P=2,5$ Вт, $\lambda=950$ нм). Подтверждено, что использование конструкции “мелкая меза с дополнительной изоляцией” (защищена патентом РФ №2110874) в ЛД обеспечивает высокую температурную и пространственно-временную стабильность излучения в ближнем и дальнем полях, большой срок службы и низкий уровень шумов.
5. Исследованы излучательные характеристики мощных квазинепрерывных ЛЛ ($P=200$ Вт, $\lambda=808$ нм; $P=100$ Вт, $\lambda=950$ нм) и матриц на их основе ($P=5$ кВт, $\lambda=808$ нм). Подтверждено, что ЛЛ ($P=100$ Вт, $\lambda=950$ нм) способны работать в диапазоне температур от -40 до $+85$ °С, что позволяет использовать их для накачки ТТЛ на основе Yb-Er без термостабилизации системы

накачки, обеспечивает низкое потребление энергии, простоту конструкции и высокую надежность.

6. Разработана оптическая схема, изготовлен опытный образец и исследованы излучательные характеристики импульсного ТТЛ с торцевой накачкой мощными ЛД для технологических применений с энергией в импульсе 1,5 мДж ($\lambda=1,06$ мкм) и максимальной средней мощностью 10 Вт при длительности импульса 15-20 нс и частоте до 10 кГц.

7. Разработана оптическая схема, изготовлен опытный образец и исследованы излучательные характеристики компактного импульсного ТТЛ с боковой диодной накачкой для информационных систем (дальнометрии) с энергией в импульсе 10 мДж, работающего в безопасном для глаз диапазоне спектра ($\lambda=1,57$ мкм), диапазоне температур от -55 до +55 °С. ТТЛ имеет герметичный корпус, устойчив к механическим воздействиям и полностью пригоден для использования в составе дальномера безопасного для глаз спектрального диапазона.

8. Разработана оптическая схема и организовано серийное производство медицинских лазерных аппаратов (защищены свидетельствами на полезные модели №№8524, 9091, 14407) для хирургии ($P=30$ Вт, $\lambda=808, 940, 970$ нм) и фотодинамической терапии ($P=5$ Вт, $\lambda=670$ нм). Лазерные аппараты зарегистрированы в МЗ РФ (регистрационное удостоверение № ФС 022а2006/3307-06 от 16.06.2006, сертификат соответствия РОСС RU.ME01.BO6196) и широко применяются в медицинских учреждениях РФ для лечения различных заболеваний. Разработан и защищен патентами РФ №№2122452, 2134603 и патентом РСТ №756224 метод селективной лазерной гипертермии для лечения новообразований.

9. Разработано и защищено патентом на полезную модель №130476 устройство для контроля температуры рабочего торца оптоволокна лазерных модулей с волоконным выводом излучения. Оснащение медицинской лазерной аппаратуры подобным устройством позволяет исключить неконтролируемый разогрев оптоволокна до температур, приводящих к его деформации и разрушению, а также обеспечивает возможность управления температурой лазерного «скальпеля» для оптимизации процесса коагуляции биоткани.

10. Разработана блок-схема и изготовлен опытный образец цифрового устройства для визуализации пространственного распределения флуоресценции злокачественных новообразований при ФДТ, которое осуществляет автоматический количественный анализ изображения флуоресценции в реальном времени. Распределение флуоресценции впервые реализовано в форме псевдо-трехмерной гистограммы, что позволяет точно определять границы новообразования, требуемую дозу облучения и момент окончания процедуры лечения методом ФДТ.

Список цитируемой литературы:

1. Пихтин, А.Н. Оптическая и квантовая электроника [Текст] / А.Н. Пихтин - М.: «Высшая школа», 2001.
2. Botez, D. Design considerations and analytical approximations for high continuous-wave power, broad-waveguide diode lasers [Text] / D. Botez // Appl. Phys. Lett., 1999. – P. 74, 3102.
3. Henry, С.Н. Catastrophic damage of $Al_xGa_{1-x}As$ double-heterostructure laser material [Text] / С.Н. Henry, Р.М. Petroff, R.A. Logan, F.R. Merritt // Appl. Phys. Lett., 1979. - V. 50. - P. 3721–3732.
4. URL: <http://www.str-soft.com/SimuLED/SiLENSe>

5. Гарбузов, Д.З. Экспериментальное и теоретическое исследование особенностей пороговых и мощностных характеристик РО ДГС InGaAsP/InP лазеров ($\lambda = 1.3$ мкм) [Текст] / Д.З. Гарбузов, А.В. Овчинников, Н.А. Пихтин, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов, В.Б. Халфин // ФТП. - 1991. - Т. 25.- С. 928–933.
6. Eliseev, P.G. Optical strength of semiconductor laser materials [Text] / P.G. Eliseev // Prog. Quant. Electron, 1996. - V. 20. - P. 1–82.
7. Тарасов, И.С. Мощные полупроводниковые лазеры на основе гетероструктур раздельного ограничения [Текст] / И.С. Тарасов // Квантовая электроника. - 2010. - Т. 40. - С. 661–681.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

Статьи и патенты:

- A1. Карпов, С.Ю. Линейки мощных полупроводниковых лазеров изготовленных методом молекулярно-пучковой эпитаксии [Текст] / С.Ю. Карпов, Г. де ла Круз, В.Е. Мячин, А.Ю. Островский, Ю.В. Погорельский, И.Ю. Русанович, И.А. Соколов, Н.А. Стругов, **А.Л. Тер-Мартirosян**, Г.А. Фокин, В.П. Чалый, А.П. Шкурко, М.И. Этинберг // Письма в ЖТФ. -1991. Т.17. -В.7. -С.31-34.
- A2. Chaly, V.P. The Degradation Rate Study of MBE-Grown High Power AlGaAs Laser Diode [Text] / V.P. Chaly, M.I. Etingberg, G.A. Fokin, S.Yu. Karpov, V.E. Myachin, A.Yu. Ostrovsky, Yu.V. Pogorelsky, I.Yu. Rusanovich, I.A. Sokolov, A.P. Shkurko, N.A. Strugov, **A.L. Ter-Martirosyan** // Semicond. Sci. Technol., -1994. -V.8, -N.2. -P.1-8.
- A3. Демидов, Д.М. Лазерные диоды с рабочей выходной оптической мощностью 3 Вт ($\lambda=0,81$ мкм) на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур, работающие в непрерывном режиме, со сроком службы 2000 часов [Текст] / Д.М. Демидов, Н.И. Кацавец, Р.В. Леус, **А.Л. Тер-Мартirosян**, В.П. Чалый // Письма в ЖТФ. - 1997. - Т. 23. В. 8. - С. 90-94.
- A4. Демидов, Д.М. Мощные высокостабильные лазерные диоды для накачки твердотельных лазеров [Текст] / Д.М. Демидов, Н.И. Кацавец, **А.Л. Тер-Мартirosян**, В.П. Чалый // Квантовая электроника. - 1998. - Т. 25. В. 9. - С. 789-791.
- A5. Пат. 2110874 Российская Федерация, МПК 6 Н 01 S 3/19. Инжекционный полупроводниковый лазер [Текст] / Демидов Д.М., **Тер-Мартirosян А.Л.**, Чалый В.П., Шкурко А.П.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Полупроводниковые приборы». - № 96108212/25; заявл. 24.04.96; опубл. 10.05.98, Бюл. № 13.
- A6. Свидетельство на полезную модель № 8524 Российская Федерация, МПК 6 Н 01 L 23/00. Устройство для отвода тепла от полупроводникового прибора [Текст] / **Тер-Мартirosян А.Л.**, Чалый В.П.; заявитель и обладатель свидетельства ЗАО «Полупроводниковые приборы». - № 98106014/20; заявл. 27.03.98; опубл. 16.11.98, Бюл. № 11.
- A7. Пат. 2122452 Российская Федерация, МПК 6 А 61 N 5/06. Способ лечения новообразований [Текст] / Гельфонд М.Л., Венков А.А., **Тер-Мартirosян А.Л.**, Чалый В.П., Баллюзек Ф.В., Мизгирев И.В.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Полупроводниковые приборы». - № 97120048/14; заявл. 21.11.97; опубл. 27.11.98, Бюл. № 33.
- A8. Свидетельство на полезную модель № 9098 Российская Федерация, МПК 6 Н 01 S 3/00. Лазерный излучатель [Текст] / **Тер-Мартirosян А.Л.**, Чалый В.П.; заявитель и обладатель

свидетельства ЗАО «Полупроводниковые приборы». - № 98112398/20; заявл. 18.06.98; опубл. 16.01.99, Бюл. № 1.

A9. Пат. 756224 Patent Cooperation Treaty, МПК А 61 N 005/06. Method for treating tumour growth [Text] / Gelfond M.L., Venkov A.A., **Ter-Martirosyan A.L.**, Chaly V.P., Balluzek F.V., Mizgirev I.V.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Полупроводниковые приборы». - № AU 199872416/98 B2; заявл. 21.11.97; опубл. 15.06.99.

A10. Пат. 2134603 Российская Федерация, МПК б А 61 N 5/06. Способ лечения новообразований [Текст] / **Тер-Мартиросян А.Л.**, Чалый В.П., Гельфонд М.Л., Барчук А.С.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Полупроводниковые приборы». - № 98114518/14; заявл. 29.07.98; опубл. 20.08.99, Бюл. № 23.

A11. Свидетельство на полезную модель №14407 Российская Федерация, МПК 7 Н 01 S 3/101. Оптическое устройство для суммирования лучей двух и более лазеров [Текст] / **Тер-Мартиросян, А.Л.**, Чалый, В.П., Батов, Ю.Н., Иванов, Е.В., Малинин, С.М.; заявитель и обладатель свидетельства ЗАО «Полупроводниковые приборы». - № 98111223/20; заявл. 04.06.98; опубл. 20.07.00, Бюл. № 20.

A12. Gelfond, M.L. Selective laser hyperthermia of malignant neoplasms: experimental and clinical research [Text] / M.L. Gelfond, I.V. Mizgirev, A.S. Barchuk, V.V. Hudoley, D.V. Vasilyev, F.V. Balluzek, A.A. Venkov, V.P. Chaly, **A.L. Ter-Martirosyan** // Proceedings of SPIE "Laser use in oncology II", Vol. 4059 (2000). P. 13-24.

A13. Demidov, D.M. High power laser diodes: new design provides reliability and stability [Text] / D.M. Demidov, N.I. Katsavets, **A.L. Ter-Martirosyan**, D. Croupsky // Proceedings of SPIE "Laser use in oncology II", Vol. 4059 (2000). P. 225-228.

A14. Демидов, Д.М. 100 ваттные лазерные линейки на основе фазированных решеток [Текст] / Д.М. Демидов, А.Н. Ивкин, Н.И. Кацавец, С.В. Кокин, Р.В. Леус, **А.Л. Тер-Мартиросян**, В.П. Чалый // Письма в ЖТФ. - 2001. - Т. 27. В. 2. - С. 36-41.

A15. Александров, С.В. Мощные низкопороговые лазерные диоды ($\lambda=0,94$ мкм) на основе $\text{In}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}/\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ гетероструктур, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии [Текст] / С.В. Александров, А.Н. Алексеев, Д.М. Демидов, А.Л. Дудин, Н.И. Кацавец, И.В. Коган, Ю.В. Погорельский, **А.Л. Тер-Мартиросян**, Э.Г. Соколов, В.П. Чалый, А.П. Шкурко // Письма в ЖТФ. - 2002. - Т. 28. В. 16. - С. 71-78.

A16. Кацавец, Н.И. Мощные высокоэффективные квазинепрерывные лазерные линейки для накачки твердотельных лазеров на основе Yb-содержащих активных сред [Текст] / Н.И. Кацавец, В.А. Бученков, Д.М. Демидов, Р.В. Леус, М.О. Искандаров, А.А. Никитичев, **А.Л. Тер-Мартиросян** // Письма в ЖТФ. - 2004. - Т. 30. В. 24. - С. 43-48.

A17. Bulashevich, K.A. Effect of free-carrier absorption on performance of 808 nm AlGaAs-based high-power laser diodes [Text] / K.A. Bulashevich, V.F. Mymrin, S.Yu. Karpov, D.M. Demidov, **A.L. Ter-Martirosyan** // Semicond. Sci. Technol. - 2007. - V. 22. - P. 502-510.

A18. Пат. 2309501 Российская Федерация, МПК Н 01 S 5/32. Инжекционный полупроводниковый лазер [Текст] / Демидов Д.М., Карпов С.Ю., Мымрин В.Ф., **Тер-Мартиросян А.Л.**; заявитель и патентообладатель ЗАО «Полупроводниковые приборы». - № 2006133217/28; заявл. 06.09.06; опубл. 27.10.07, Бюл. № 30.

A19. Пат. 2309502 Российская Федерация, МПК Н 01 S 5/32. Полупроводниковый

инжекционный лазер [Текст] / Демидов Д.М., Карпов С.Ю., Мырнин В.Ф., **Тер-Мартиросян А.Л.**; заявитель и патентообладатель ЗАО «Полупроводниковые приборы». - № 2006133220/28; заявл. 06.09.06; опубл. 27.10.07, Бюл. № 30.

A20. Кацавец, Н.И. Высокomoщные полупроводниковые источники излучения на основе 100 W лазерных линеек, предназначенные для накачки твердотельных лазеров [Текст] / Н.И. Кацавец, В.А. Бученков, М.О. Искандаров, А.А. Никитичев, Э.Г. Соколов, **А.Л. Тер-Мартиросян** // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34. В. 2. - С. 6-10.

A21. Katsavets, N.I. High power long pulse width QCW laser diode bars for optical pumping of Yb-Er glass solid state lasers [Text] / N.I. Katsavets, V.A. Buchenkov, **A.L. Ter-Martirosyan** // "High-Power and Femtosecond Lasers", Properties, Materials and Applications (Lasers and Electro-optics Research and Technology), Nova Science Pub Inc. – 2009. – 07. - P. 355.

A22. Воробьев, Л.Е. Лазерные диоды для фотодинамической терапии [Текст] / Л.Е. Воробьев, А.Н. Софронов, Д.А. Фирсов, Д.М. Демидов, Р.В. Леус, М.А. Сврдлов, **А.Л. Тер-Мартиросян** // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. - 2011. - №2(122). - С. 80-84.

A23. Пат. 112458 Российская Федерация, МКП G 02 F 1/00. Устройство для формирования смесителя мод [Текст] / Махнюк, В.П., **Тер-Мартиросян, А.Л.**; заявитель и патентообладатель ООО «Аткус». - № 2011135961/28; заявл. 26.08.11; опубл. 10.01.12, Бюл. № 1.

A24. Пат. 117189 Российская Федерация, МКП G 02 B 6/14. Устройство для формирования смесителя мод [Текст] / Демидов, Д.М., **Тер-Мартиросян, А.Л.**, Софронов, А.Н.; заявители и патентообладатели ФГБОУ ВПО «СПбГПУ», ЗАО «Полупроводниковые приборы». - № 2012103372/28; заявл. 31.01.12; опубл. 20.06.12, Бюл. № 17.

A25. Пат. 117191 Российская Федерация, МКП G 02 F 1/00. Устройство для формирования смесителя мод [Текст] / Демидов, Д.М., **Тер-Мартиросян, А.Л.**, Софронов, А.Н.; заявители и патентообладатели ФГБОУ ВПО «СПбГПУ», ЗАО «Полупроводниковые приборы». - № 2012103371/28; заявл. 31.01.12; опубл. 20.06.12, Бюл. № 17.

A26. Аникеева, М.С. Цифровая система визуализации для фотодинамической терапии [Текст] / М.С. Аникеева, А.Н. Софронов, С.С. Дремов, **А.Л. Тер-Мартиросян** // "Научно-технические Ведомости СПбГПУ" серия "Информатика. Телекоммуникации. Управление". - 2012. - №6 (162). Раздел "Приборы, информационно-измерительные системы". - С.159-164.

A27. Демидов, Д.М. Мощные лазерные диоды с длиной волны излучения 808 нм. I. Термические механизмы ограничения выходной мощности [Текст] / Д.М. Демидов, **А.Л. Тер-Мартиросян**, К.А. Булашевич, О.В. Хохлев, С.Ю. Карпов // Научное приборостроение. – 2012. - Т. 22. № 3. - С. 78-86.

A28. Демидов, Д.М. Мощные лазерные диоды с длиной волны излучения 808 нм. II. Нетермические механизмы ограничения мощности излучения [Текст] / Д.М. Демидов, **А.Л. Тер-Мартиросян**, К.А. Булашевич, О.В. Хохлев, С.Ю. Карпов // Научное приборостроение. – 2012. - Т. 22. № 4. - С. 19-25.

A29. Пат. 125075 Российская Федерация, МКП А 61 М 16/04. Эндотрахеальная трубка [Текст] / Ганичева, В.А., Гельфонд, М.Л., Махнюк, В.П., Савин, А.Н., **Тер-Мартиросян, А.Л.**, Чураков, А.В.; заявитель и патентообладатель ООО «Аткус». - № 2012140145/14; заявл. 19.09.12; опубл. 27.02.13, Бюл. № 6.

- A30. Пат. 130456 Российская Федерация, МПК Н 01 S 5/06. Драйвер полупроводникового лазера [Текст] / Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Сотникова Г.Ю., **Тер-Мартirosян А.Л.**; заявитель и патентообладатель ЗАО «Полупроводниковые приборы». - № 2013110620/28; заявл. 07.03.13; опубл. 20.07.13, Бюл. № 20.
- A31. Пат. 2497471 Российская Федерация, МКП А 61 В 17/24, А 61 В 18/20, А 61 N 5/067. Способ лечения доброкачественных новообразований гортани [Текст] / Ганичева, В.А., Гельфонд, М.Л., Махнюк, В.П., Савин, А.Н., **Тер-Мартirosян, А.Л.**, Чураков, А.В.; заявитель и патентообладатель ООО «Аткус» -№ 2012140147/14; заявл.19.09.12; опубл.10.11.13, Бюл. №31.
- A32. Демидов, Д.М. Мощные лазерные диоды с длиной волны излучения 808 нм. III. Пути повышения мощности излучения [Текст] / Д.М. Демидов, **А.Л. Тер-Мартirosян**, К.А. Булашевич, О.В. Хохлев, С.Ю. Карпов // Научное приборостроение. - 2013. - Т. 23. № 2. - С. 129-138.
- A33. **Тер-Мартirosян, А.Л.** Анализ и оптимизация конструкции теплоотводов для мощных лазерных диодов. I. Теплоотвод традиционной конструкции [Текст] / **А.Л. Тер-Мартirosян**, Д.М. Демидов, М.А. Свердлов, А.В. Кулик, С.Ю. Карпов // Научное приборостроение. – 2013. - Т. 23. № 4. - С. 40-44.
- A34. **Тер-Мартirosян, А.Л.** Анализ и оптимизация конструкции теплоотводов для мощных лазерных диодов. II. Пути улучшения отвода тепла [Текст] / **А.Л. Тер-Мартirosян**, Д.М. Демидов, М.А. Свердлов, А.В. Кулик, С.Ю. Карпов // Научное приборостроение. – 2013. - Т. 23. № 4. - С. 45-49.
- A35. Александров, С.Е. Система контроля температуры рабочего торца оптоволокна лазерных модулей с волоконным выводом излучения для медицинской аппаратуры [Текст] / С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, Г.Ю. Сотникова, **А.Л. Тер-Мартirosян** // ФТП. - 2014. - Т. 48. В. 1. - С. 135-141.

Тезисы докладов

- A36. Grepel, H. Requirements of pump diodes for diode-pumped solid state lasers [Text] / H. Grepel, N.I. Katsavets, D.M. Demidov, **A.L. Ter-Martirosyan**, Ch.V. Kopylov. // Proceeding of SPIE. V. 3682. Materials of the Ninth Conference on Laser Optics (LO'98). - St.Petersburg. 1998. - P. 47-50.
- A37. Buchenkov, V.A. High power laser diodes, bars and stack arrays for solid-state laser pumping [Text] / V.A. Buchenkov, V.P. Chaly, D.M. Demidov, N.I. Katsavets, V.P. Machnyuk, S.N. Rodin, **A.L. Ter-Martirosyan** // Laser Optics. – 2008. St.-Petersburg. 2008. Technical program of international conference. - P.36.
- A38. Кацавец, Н.И. Высокомощные полупроводниковые лазерные линейки для накачки твердотельных лазеров на основе иттербий-эрбиевого стекла [Текст] / Н.И. Кацавец, **А.Л. Тер-Мартirosян** // Симпозиум «Полупроводниковые лазеры: физика и технология». - Санкт-Петербург. - 2008.
- A39. Махнюк, В.П. Компактный импульсный твердотельный лазер с диодной накачкой для маркировки [Текст] / В.П. Махнюк, **А.Л. Тер-Мартirosян**, С.А. Будишевский, С.С. Дремов //

Российско-германский семинар-совещание по вопросам внедрения лазерных технологий в промышленность 27-28 ноября 2008 г.

А40. Гельфонд, М.Л. Мощные непрерывные диодные лазеры красного диапазона спектра для лечения онкологических заболеваний методом фотодинамической терапии [Текст] / М.Л. Гельфонд, Д.М. Демидов, Р.В. Леус, С.Н. Родин, **А.Л. Тер-Мартirosян** // 2-й Симпозиум «Полупроводниковые лазеры: физика и технология». - Санкт-Петербург. - 2010.

А41. Сотникова, Г.Ю. Встроенная система контроля температуры объекта, нагреваемого излучением мощных твердотельных, волоконных или диодных лазеров с волоконным выходом [Текст] / Г.Ю. Сотникова, С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, А.А. Капралов, **А.Л. Тер-Мартirosян** // Сборник тезисов 3-го симпозиума «Полупроводниковые лазеры: физика и технология». – СПб. - 13-16.11.2012. - С. 48.

А42. Демидов, Д.М. Механизмы ограничения и пути повышения мощности излучения мощных лазерных диодов с длиной волны 808 нм [Текст] / Д.М. Демидов, **А.Л. Тер-Мартirosян**, К.А. Булашевич, О.В. Хохлев, С.Ю. Карпов // Сборник тезисов IX международной конференции «Лазерная физика и оптические технологии». – 2012. - С. 5.

А43. Будишевский, С.А. Компактный импульсный твердотельный лазер с накачкой мощными лазерными диодами для технологических применений [Текст] / С.А. Будишевский, В.П. Махнюк, **А.Л. Тер-Мартirosян** // Сборник статей 9 Белорусско-Российского семинара «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе». - Минск, Беларусь. - 2013. - С. 60 – 63.

Благодарности

Автор считает своим приятным долгом выразить глубокую благодарность своим коллегам: научному консультанту Курочкину В.Е. за помощь в выборе направлений исследований и обсуждении результатов, Карпову С.Ю. за помощь в анализе основных механизмов ограничения выходной мощности ЛД и осуществлении моделирования работы ЛГС и теплоотводов, Демидову Д.М., Дремову С.С., Махнюку В.П., Кацавцу Н.И., Никитичеву А.А., Сотниковой Г.Ю., Софронову А.Н. за помощь в проведении экспериментов и в практической реализации идей и разработок, а также Тер-Мартirosян Н.А. за помощь в оформлении диссертации.