

## ОТЗЫВ

официального оппонента

о диссертационной работе Тер-Мартirosяна Александра Леоновича «Мощные источники лазерного излучения на основе квантоворазмерных гетероструктур», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Лазерные диоды наряду с фотодиодами и светодиодами составляют элементную базу современной оптоэлектроники. Мощные лазерные диоды, линейки и матрицы открывают новые перспективы в разработке и создании нового поколения твердотельных лазеров, лазерных и оптоэлектронных приборов и технологий. Сегодня они широко используются для целого ряда гражданских и специальных применений. Использование полупроводниковых лазеров обеспечивает высокую энергоэффективность, эксплуатационную надёжность и долговечность приборов при минимальных весогабаритных характеристиках. Сказанное определяет необходимость наличия современного динамично развивающегося производства мощных полупроводниковых лазеров на территории Союзного государства, что, в свою очередь, невозможно реализовать без постоянного поступательного развития ростовых технологий создания наноразмерных лазерных гетероструктур, планарных технологий изготовления лазерных чипов и технологий сборки готовых изделий. В этой связи, тема диссертационной работы Тер-Мартirosяна А.Л. «Мощные источники лазерного излучения на основе квантоворазмерных гетероструктур», посвященной разработке мощных лазерных диодов, линеек и матриц для накачки твердотельных лазеров, медицины, обработки материалов, полиграфии, оптической связи и целого ряда специальных применений является актуальной.

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка цитируемой литературы, включающего 179 наименований, изложена на 331 странице, содержит 158 рисунков и 34 таблицы.

Во **введении** излагается актуальность затронутых в работе проблем, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы. Сформулирована цель и основные решаемые задачи, приведены положения, выносимые на защиту, а также указан личный вклад автора.

В **первой** главе диссертационной работы проведен обзор литературы по теме исследований: рассмотрены фундаментальные факторы, а также сложности технического и технологического характера, ограничивающие возможности работы мощных диодных лазеров; рассмотрены особенности использования мощных лазерных диодов и линеек для накачки твердотельных лазеров; обсуждены технологические аспекты изготовления мощных лазерных диодов и линеек.

**Вторая** глава посвящена анализу основных механизмов, ограничивающих выходную мощность полупроводниковых лазеров: катастрофического разрушения зеркал и тепловых эффектов, приводящих к сублинейности ватт-амперных характеристик. Показано, что наиболее эффективными путями повышения мощности излучения лазерных диодов можно считать использование гетероструктур с расширенным волноводом, защиту зеркал резонатора лазера и улучшение отвода тепла. Исследования, проведенные Тер-Мартirosяном А.Л., показали, что в отсутствие катастрофического разрушения зеркал, ограничение мощности излучения лазерных диодов связано с накоплением неравновесных носителей заряда в волноводных слоях гетероструктуры. Оригинальным представляется предложение, сформулированное автором, о снижении влияния этого эффекта в связи с понижением суммарного поглощения на свободных носителях в волноводных слоях за

счёт их намеренного легирования примесями *n*-типа или стимуляции переноса носителей в нелегированных волноводных слоях за счёт наличия встроенного электрического поля в градиентных многокомпонентных соединениях. Автором также показано, что если теплоотвод не даёт доминирующего вклада в тепловое сопротивление лазерного диода, то гетероструктуры на основе твёрдых растворов InAlGaAs имеют преимущество по тепловому сопротивлению относительно безалюминиевых структур, содержащих твердые растворы InGaAsP, из-за более высокой теплопроводности используемых материалов.

В **третьей** главе диссертации содержится детальная информация о результатах математического моделирования более 10 различных наноразмерных лазерных гетероструктур с симметричным и асимметричным волноводами, предназначенных для мощных диодных лазеров. Тер-Мартirosяном А.Л. определены рекомендации по оптимизации характеристик гетероструктур, а также подробно описаны оптимизированные гетероструктуры, защищенные патентами Российской Федерации. Анализ работы гетероструктур показал, что простое расширение волновода, направленное на снижение оптической нагрузки на выходное зеркало прибора, сопровождается ростом утечки неравновесных электронов из гетероструктуры. Эта тенденция является достаточно общей, не зависит от конкретной конструкции гетероструктуры и определяет фундаментальное ограничение для ширины используемого в лазерной структуре волновода.

**Четвертая** глава диссертационной работы посвящена анализу и оптимизации конструкции пассивных теплоотводов для мощных непрерывных лазерных диодов. Выполнено детальное численное моделирование процесса отвода тепла в конструкции лазерного диодного чипа в корпусе теплоотвода. Определены оптимальные размеры тела теплоотвода по отношению к размерам лазерного чипа. Проведен анализ по геометрической оптимизации конструкции теплоотвода. Предложена модифицированная конструкция теплоотвода, заключающаяся в расположении выходного зеркала лазерного диода у стенки, наклоненной под углом  $45^\circ$  к плоскости основания, что позволит снизить температуру выходного зеркала. Показано, что использование алмазного сабмаунта, усиливающего латеральное растекание тепла, оказалось эффективным только в том случае, когда ширина сабмаунта на порядок превышает ширину полоскового контакта лазера. Основным фактором, сдерживающим применение таких сабмаунтов на практике, является их стоимость.

В **пятой** главе описана разработанная Тер-Мартirosяном А.Л. технология постростовой обработки лазерных гетероструктур и сборки полупроводниковых лазеров, позволяющая изготавливать мощные непрерывные лазерные диоды и квазинепрерывные лазерные линейки и матрицы. Автором подробно исследованы основные характеристики разработанных излучателей – выходная оптическая мощность, длина волны генерации, расходимость излучения в двух перпендикулярных плоскостях, срок службы. Для изготовления лазерных диодов красного диапазона спектра автором предложена специальная конструкция лазерных чипов - “мелкая меза с дополнительной изоляцией”, которая обеспечивает высокую температурную и пространственно-временную стабильность излучения в ближнем и дальнем полях, большой срок службы и низкий уровень шумов. Исследование характеристик лазерных линеек с длиной волны 940 – 960 нм, выполненное Тер-Мартirosяном А.Л. показало, что они способны устойчиво работать в диапазоне температур от  $-40$  до  $+85^\circ\text{C}$ , причем срок службы лазерных линеек составляет более  $10^9$  импульсов (при температуре  $+25^\circ\text{C}$ ) и более  $10^8$  импульсов (при температуре  $+85^\circ\text{C}$ ). Это позволяет использовать их для накачки Yb-Er твердотельных лазеров без термостабилизации системы накачки, обеспечивая низкое потребление энергии, простоту конструкции и высокую надежность.

**Шестая** глава посвящена исследованию излучательных характеристик компактных импульсных твердотельных лазеров с диодной накачкой для технологических применений и дальнометрии. Для их разработки Тер-Мартirosяном А.Л. были использованы мощные непрерывные лазерные диоды и квазинепрерывные лазерные линейки, созданные в рамках выполнения настоящей диссертационной работы.

В **седьмой** главе описаны основные технические решения, использованные при создании медицинских лазерных аппаратов для хирургии и ФДТ и разработанные под руководством Тер-Мартirosяна А.Л. в качестве главного конструктора. Разработанные лазерные аппараты широко применяются в медицинских учреждениях Российской Федерации для лечения различных заболеваний. Для диагностики наиболее социально значимых онкологических заболеваний автором предложено уникальное устройство, обеспечивающее визуализацию и автоматический количественный анализ пространственного распределения флуоресценции фотосенсибилизатора в реальном масштабе времени при проведении фотодинамической терапии. Пространственное распределение флуоресценции впервые реализовано в форме псевдо-трехмерной гистограммы, что позволяет точно определять границы новообразования, требуемую дозу облучения и момент окончания процедуры лечения.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить высокую степень научной новизны и высокий научно-технический уровень полученных результатов. Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, являются новыми. Они относятся к развитию новых подходов в разработке мощных лазерных диодов, линеек и матриц и создании на их основе твердотельных лазеров, устройств и приборов для медицинских, технологических и специальных применений. К наиболее важным научным результатам относятся следующие:

- С помощью математического моделирования показано, что уменьшение концентрации носителей заряда, инжектированных в волноводный слой мощных непрерывных лазерных диодов и, следовательно, снижение поглощения на свободных носителях заряда 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 носителей заряда в гетероструктуре;

- Показано, что при непрерывной инжекционной накачке лазерного диода, napаянного эпитаксиальными слоями вниз, температура активной области определяется тепловым сопротивлением эмиттера и тепловым сопротивлением теплоотвода. Если теплоотвод не дает доминирующего вклада в тепловое сопротивление лазерного диода, то лазерные гетероструктуры, выполненные из твердых растворов AlGaAs имеют преимущество по тепловому сопротивлению относительно безалюминиевых гетероструктур на основе InGaAsP, из-за более высокой теплопроводности используемых материалов;

- Определены варианты оптимизации конструкции и материала теплоотвода, обеспечивающие минимизацию теплового сопротивления лазерного диода. Показано, что использование алмазного термокомпенсатора (сабмаунта), усиливающего латеральное растекание тепла, оказывается эффективным в том случае, когда ширина сабмаунта заметно превышает ширину полоскового контакта мощного лазерного диода;

- Визуализация пространственного распределения флуоресценции при диагностике и лечении методами фотодинамической терапии 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 значимость определяется тем, что большинство разработанных приборов запущено в серийное производство, прошло независимое тестирование в

российских и зарубежных компаниях и поставляется целому ряду потребителей. Высокая научная и практическая значимость полученных результатов, отражена также в значительном количестве оригинальных технических решений, защищенных 15 патентами. К числу практически значимых результатов можно отнести следующие:

- Разработаны оптимизированные варианты лазерных гетероструктур со сверхнизкими оптическими потерями на свободных носителях заряда, обеспечивающие высокую дифференциальную квантовую эффективность, низкие рабочий ток и расходимость излучения в вертикальной плоскости;

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

- Разработаны медицинские лазерные аппараты для хирургии и фотодинамической терапии, проведена их сертификация в Минздраве Российской Федерации;

- Разработаны опытные образцы твердотельных лазеров для технологических применений и дальнометрии. В качестве источников накачки в твердотельных лазерах используются разработанные ранее лазерные диоды и линейки;

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

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

Социальная значимость результатов диссертационной работы определяется важностью для общества применения новых медицинских методов, приборов и устройств, разработанных, созданных и внедренных в практику для диагностики и лечения широкого ряда заболеваний методами фотодинамической терапии и лазерной хирургии.

Апробация основных результатов диссертационной работы имела место в докладах и при обсуждении на международных и всероссийских конференциях и семинарах, таких как Международная конференция Laser Optics (Санкт-Петербург, 1998 и 2008 г.), 1-м, 2-м и 3-м Симпозиумы «Полупроводниковые лазеры: физика и технология» (Санкт-Петербург, 2008, 2010 и 2012 г.), Российско-Германский семинар-совещание по вопросам внедрения лазерных технологий в промышленность (Санкт-Петербург, 2008 г.) XI Международная конференция (Лазерная физика и оптические технологии) (Минск, Беларусь, 2012 г.) и др.

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятии ЗАО «Полупроводниковые приборы», реализованы при разработке и создании новых образцов приборов и технологий, нашли применение при создании и внедрении в серийное производство (ООО «Актус») и широкую медицинскую практику ряда медицинских лазерных аппаратов с новыми методиками их использования. Возможности практического применения результатов отражены также в 15 патентах.

Представленные в диссертационной работе материалы, положения и выводы опубликованы в 20 статьях отечественных и зарубежных изданий, таких как *Письма в ЖТФ*, *Semicond. Sci. Technol.*, *Квантовая электроника*, *Научное приборостроение* и др., а также в 8 тезисах. 15 статей опубликованы в научных журналах и периодических изданиях, удовлетворяющих требованию ВАК Российской Федерации. Основные научно-технические результаты защищены 15 патентами Российской Федерации. Материалы,

опубликованные в перечисленных работах, достаточно полно отражают основные защищаемые положения и выводы, научные и практические результаты диссертации. Название диссертации полностью отражает ее содержание.

Результаты диссертационной работы А.Л. Тер-Мартirosяна вносят весомый вклад в развитие элементной базы современной отечественной оптоэлектроники и оптоэлектронного приборостроения, включая разработку методов и технологий создания мощных лазерных диодов, линеек и матриц; разработку и создание твердотельных лазеров с диодной накачкой, а также приборов и аппаратуры технологического и специального назначения; разработку и создание новой медицинской аппаратуры для диагностики и лечения широкого ряда заболеваний методами фотодинамической терапии и лазерной хирургии, что позволило существенно развить направление оптоэлектронного приборостроения, связанное с решением комплекса важных задач от исследования и разработки лазерных диодов до разработки и создания целого ряда лазерных приборов и систем.

При проведении анализа диссертационной работы Тер-Мартirosяна А.Л. появилось несколько вопросов и замечаний:

1. Во второй главе выявлены основные механизмы, ограничивающие выходную оптическую мощность непрерывных лазерных диодов: катастрофическое разрушение зеркал и тепловые эффекты (перегрев). В пятой главе приведены основные характеристики лазерного диода с максимальной выходной мощностью 15 Вт и длиной волны 808 нм. Вместе с тем не указано, какой из вышеперечисленных механизмов ответственен за невозможность дальнейшего увеличения оптической мощности этих приборов?

2. Вывод по защищаемому положению 3 на стр.19 основывается на материале, представленном в главе 4, параграф 4.3. В частности в подразделе 4.3.2 на стр. 219 на основе результатов численного эксперимента приводится математическое выражение (4.1), описывающее в хорошем приближении коэффициент теплового сопротивления анализируемой конструкции лазерного диода. К сожалению, в тексте не приведены какие-либо условия, положенные в основу этой формулы, которые, в свою очередь, могли бы определить границы ее применения. В тоже время присутствующая логарифмическая зависимость говорит о том, что это выражение не всегда будет описывать реальный физический процесс. Поэтому приведенные на основании формулы (4.1) выводы требуют уточнения по границам их справедливости для того, чтобы служить основой для обобщений, в частности, вывод в защищаемом положении 3 о том, что «для уменьшения теплового сопротивления предпочтительным является увеличение длины резонатора». В тексте главы 4 на стр. 219 также говорится о «двумерном боковом растекании тепла», которое сопоставляется со случаем «одномерного переноса тепла», а затем это сопоставление выносится в защищаемое положение 3. Если речь идет о сравнении между гиперболической зависимостью коэффициента теплового сопротивления от двух переменных  $L$  и  $W$  (упомянутой в диссертации как «одномерный перенос тепла, зависящий от площади полоскового контакта») и приведенной на стр. 219 формулой (4.1), то в обоих случаях это функции двух независимых переменных. Поэтому не ясно, какой смысл здесь вкладывается в слова «двумерный» и «одномерный» перенос тепла?

3. В пятой главе на рис. 5.5. приведены сравнительные результаты наработки на отказ лазерных диодов, собранных как с помощью жесткого припоя и термокомпенсатора, так и с помощью мягкого припоя. Результаты показали, что в пределах 1000 часов наработки приборы ведут себя одинаково. Из текста не понятно, какой из вариантов монтажа лазерных диодов является более предпочтительным?

В тексте диссертации имеются неточности и опечатки:

- на стр. 15 – 16 в формулировке результата 2, раскрывающем суть научной новизны, после слов «Если теплоотвод не дает доминирующего вклада в тепловое сопротивление ЛД,» пропущена частица «то» и далее по тексту «лазерные ГС...»;
- на стр. 16 (7-я строка снизу) в слове «варианты» вместо буквы «а» написано «е»;
- на стр. 19 в защищаемом положении 3, по-видимому, имеет место описка и вместо слов «но зависит...» было бы правильно писать «оно зависит...».
- на стр. 19 в защищаемом положении 6 деепричастный оборот «накопленного в биоткани при проведении сеанса фотодинамической терапии» следует выделить запятыми;
- на стр. 213 (4-я строка снизу) вместо слова «вертикальной» и далее «стенкой теплоотвода с точностью  $\pm 5$  мкм», по-видимому, следует писать «верхней»;
- на стр. 224 (4-я строка сверху) в слове «качества» окончание «а» следует поменять на окончание «е», т.е. «качестве».
- на стр. 225 в подписи к рисунку 4.7 в слове «поверхности» не правильное окончание, следует писать «поверхность»;

Высказанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. Автореферат и опубликованные автором работы полностью отражает содержание диссертационного исследования, его структуру, основные положения и выводы. Результаты, полученные автором, докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях и симпозиумах. Тема диссертации и ее содержание полностью соответствуют специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики, и отрасли «технические науки».

Диссертационная работа «Мощные источники лазерного излучения на основе квантоворазмерных гетероструктур» полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям согласно критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Тер-Мартirosян Александр Леонович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией оптоэлектроники и голографии  
ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси»  
доктор физико-математических наук

 В.В. Кабанов

« 03 » ноября 2014 г.

Подпись В.В. Кабанова заверяю

Ученый секретарь

ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси»  
кандидат физико-математических наук



 Р.Г. Шуляковский