

На правах рукописи

БОРЩЁВ Кирилл Станиславович

**Стимулированная рекомбинация в полупроводниковых
лазерах ближнего ИК-диапазона при высоких уровнях
токовой накачки**

Специальность: 01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2007

Работа выполнена в ГУО ВПО «Воронежский государственный университет» и Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор
Домашевская Эвелина Павловна,
доктор технических наук, профессор
Арсентьев Иван Никитич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Иванов Сергей Викторович,
Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе РАН;
доктор физико-математических наук, профессор
Фирсов Дмитрий Анатольевич,
Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет.

Ведущая организация – Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет.

Защита состоится “24” сентября 2007 года в “15” часов на заседании
диссертационного совета К-002.205.02 при Физико-техническом институте
им. А.Ф.Иоффе РАН по адресу:
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического
института им. А.Ф.Иоффе РАН.

Автореферат разослан “23” августа 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета К-002.205.02
кандидат физико-математических наук

Куликов Г.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Полупроводниковые лазеры имеют огромное значение в современной оптоэлектронной технике. Начиная с 60-х годов прошлого века, быстро увеличивался объём исследований по полупроводниковым лазерам, и изучение приборов на *p-n*-переходах представляло собой одну из наиболее быстро развивающихся областей электроники. Изучение лазеров с целью улучшения их основных выходных параметров является одной из основных задач мировой науки – всё большее применение находят лазеры в нашей жизни. В настоящее время мощные лазерные диоды активно используются для накачки волоконных усилителей, твердотельных лазеров, в электронной технике, в медицине, в спектроскопии, в частности, для анализа атмосферных слоёв.

Первоочередными задачами в разработке полупроводниковых лазеров являются увеличение выходной оптической мощности, повышение эффективности и надёжности данных приборов. Оптическая мощность излучения является одной из важнейших характеристик лазерного диода. Однако с увеличением тока накачки происходит эффект насыщения ватт-амперной характеристики.

В этой связи тема работы, направленная на изучение стимулированной рекомбинации, которая определяет выходную мощность оптического излучения, в лазерных гетероструктурах ближнего инфракрасного (ИК) диапазона при высоких уровнях токовой накачки, является актуальной как с научной, так и с практической точек зрения.

Основная цель работы заключалась в исследовании стимулированной рекомбинации в квантово-размерных структурах при высоких уровнях возбуждения при комнатной температуре и разработке мощных импульсных источников излучения в ближнем ИК-диапазоне.

Для выполнения поставленной цели решались следующие основные задачи:

1. Исследования излучательных характеристик (ватт-амперных, спектральных и угловых) полупроводниковых лазеров ближнего ИК-

диапазона при высоком уровне возбуждения (до 100 кА/см^2) в импульсном режиме (длительность импульса – 100 нс, частота повторения импульсов – 10 кГц) и плотности оптического излучения на грани резонатора до 75 МВт/см^2 .

2. Определение фундаментальных причин насыщения ватт-амперных характеристик и расширения спектра генерации полупроводниковых лазеров ближнего ИК-диапазона.
3. Разработка и создание мощных импульсных многомодовых полупроводниковых лазеров с одно- и двухполосной генерацией в квантово-размерной активной области гетероструктуры раздельного ограничения.

Научная новизна работы определяется тем, что в ней:

1. Проведены теоретические и экспериментальные исследования излучательных характеристик гетеролазеров при высоких уровнях токовой импульсной накачки (до 100 кА/см^2).
2. Теоретически и экспериментально определено, что конечная величина времени рассеяния энергии электронов на неравновесных оптических фонах является причиной насыщения мощностных характеристик гетеролазеров.
3. Обнаружен рост концентрации носителей в активной области гетеролазера за порогом генерации.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. В мощных полупроводниковых лазерах, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии на основе ассиметричных квантово-размерных гетероструктур раздельного ограничения с толстым волноводом, достигнута оптическая мощность излучения 145 Вт с лазерного диода с 100 мкм апертурой в импульсном режиме токовой накачки.
2. Получены сравнимые по интенсивности две полосы генерации излучения на длинах волн 1.06 и 0.98 мкм из квантовой ямы лазерного диода.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Скорость стимулированной рекомбинации в квантовых ямах активной области полупроводниковых лазеров ограничена конечной величиной

времени рассеяния энергии электронов на неравновесных оптических фононах.

2. Ограничение скорости стимулированной рекомбинации приводит к увеличению концентрации носителей заряда в квантово-размерной активной области полупроводникового лазера за порогом генерации.
3. Рост концентрации носителей заряда в квантово-размерной активной области полупроводникового лазера при высоких уровнях токовой накачки ведёт к появлению второй полосы генерации в коротковолновой области спектра.

Приоритет результатов

Представленные в диссертации результаты исследования излучательных характеристик (ватт-амперных, спектральных и угловых) полупроводниковых лазеров ближнего ИК-диапазона при высоком уровне возбуждения (до 100 кА/см^2) в импульсном режиме (длительность импульса – 100 нс, частота повторения импульсов – 10 кГц) и плотности оптического излучения на грани резонатора до 75 МВт/см^2 получены впервые. Достигнутая выходная пиковая мощность (величина 145 Вт) с одиночного лазерного диода со 100 мкм апертурой является рекордным значением в мире на момент написания работы.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на VII Российской конференции по физике полупроводников «Полупроводники 2005» (Москва, сентябрь 2005г), на XII международной конференции «Laser Optics – 2006» (Санкт-Петербург, Россия, июнь 2006), на Международной конференции «High Power Laser Beams – 2006» (Нижний Новгород, Россия, июль 2006), на Международной конференции ICONO / LAT 2007 (Минск, Беларусь, май-июнь 2007), а также на научных семинарах лаборатории “Полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей” ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН.

Публикации

По результатам исследований опубликовано всего 14 научных работ, из них 6 непосредственно по теме диссертационной работы. Список этих работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 96 наименований; содержит 114 страниц машинописного текста, включая 35 рисунков и 1 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определена цель работы, показаны ее научная новизна, практическая ценность и приоритет результатов, приведены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава посвящена обзору литературных данных по гетероструктурам в системе твердых растворов InGaAs/GaAs/AlGaAs, лазерам на их основе и причинам, ограничивающим выходную оптическую мощность таких лазеров.

Во второй главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований ватт-амперных и спектральных характеристик лазерных диодов на основе квантово-размерной двойной гетероструктуры раздельного ограничения (КР РОДГС) InGaAs/GaAs ($\lambda = 1.04$ мкм) вплоть до высоких уровней возбуждения (до 100 кА/см²). [A1]

В первом параграфе описываются методы изготовления образцов, обсуждается выбор конструкции гетероструктуры для измерений, а также представлены использованные в работе методы исследования ватт-амперных и спектральных характеристик. Для измерений были выбраны лазерные диоды на основе асимметричной КР РОДГС с расширенным волноводом. Именно при использовании такой гетероструктуры в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН была получена в непрерывном режиме генерации максимально достижимая мощность оптического излучения в ближнем ИК-диапазоне [1,2]. Однако в непрерывном режиме генерации все полупроводниковые лазеры имеют насыщающуюся ватт-амперную характеристику, характеризующуюся снижением дифференциальной квантовой эффективностью. Такое снижение наблюдается во всех полупроводниковых лазерах независимо от состава используемых твердых растворов, диапазона длин волн, уровня эпитаксиальной технологии и

оптимизации конструкции полупроводниковой гетероструктуры. Известно, что в непрерывном режиме генерации происходит увеличение температуры активной области при пропускании больших токов накачки. Для исключения перегрева полупроводникового лазера был использован импульсный генератор тока с длительностью импульса менее 100 нс, силой тока до 200 А и частотой повторений 10 кГц. Использование такого режима при токах накачки 20 - 25 А практически полностью исключает перегрев лазерного кристалла. В исследуемых лазерных диодах активная область представляет собой напряженную квантовую яму из InGaAs толщиной 70 Å, сдвинутую на 0,2 мкм от центра GaAs волновода толщиной 1,7 мкм, и составом, соответствующим длине волны излучения в ближнем инфракрасном диапазоне (около 1.04 мкм).

Во втором параграфе проведены исследования ватт-амперных характеристик лазерных диодов на основе описанной выше гетероструктуры. При токах накачки около 20 А в непрерывном режиме наблюдается насыщение ватт-амперной характеристики, а в импульсном режиме при таких же токах признаков насыщения не отмечено. Простые расчеты и эксперименты по определению перегрева активной области в непрерывном режиме генерации дают величину в 50-100 °С, в зависимости от длины резонатора (2-4 мм) и силы тока (15-25 А). Сделан вывод о том, что температурный разогрев полупроводникового лазера в непрерывном режиме генерации является основной причиной насыщения ватт-амперной характеристики. Все остальные причины: выброс носителей в волновод, увеличение внутренних оптических потерь, а, следовательно, и рост порогового тока – являются производными такого разогрева. Однако и при импульсном режиме накачки в диапазоне токов 100-200 А (в зависимости от конструктивных особенностей лазерной гетероструктуры и лазерного диода), когда перегрев активной области значительно ниже, чем в непрерывном режиме, в ватт-амперных зависимостях наблюдается снижение дифференциальной квантовой эффективности.

В третьем параграфе представлены результаты исследования спектральных характеристик InGaAs/GaAs лазерных диодов с 70 Å квантовой ямой. На рис.1 приведены спектры генерации

полупроводникового лазера в зависимости от тока накачки в импульсном режиме. С ростом тока накачки в развитии спектра обнаружено несколько особенностей. Во-первых, наблюдается смещение длинноволновой границы спектра, обусловленное разогревом активной области за время импульса тока накачки. Во-вторых, коротковолновая граница спектра генерации также смещается с ростом тока накачки. При токах накачки 80-100 кА/см² в некоторых случаях ширина спектра генерации достигает 60 нм. Еще одной важной особенностью является насыщение максимума интенсивности спектра излучения. После достижения некоторой величины тока накачки интенсивность излучения прекращает расти, и наблюдается только уширение спектра генерации.

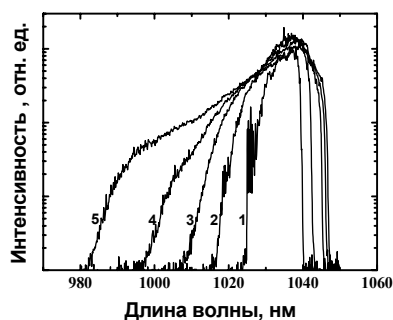


Рис.1. Спектры генерации в импульсном режиме при различных плотностях тока накачки для лазерного диода с длиной резонатора $L=1.5$ мм и шириной полоска 100мкм, кА/см²:
1 – 13, 2 – 40, 3 – 67, 4 – 73, 5 – 80.

В четвертом параграфе проводится анализ и сравнение полученных данных. Сделана попытка объяснить наблюдаемый эффект расширения спектра и падения дифференциальной квантовой эффективности следующим образом. За порогом генерации с увеличением тока накачки происходит уменьшение времен жизни носителей заряда, участвующих в стимулированной излучательной рекомбинации, и интенсивность излучения растет. При некотором токе накачки время жизни носителей заряда, участвующих в стимулированной излучательной рекомбинации, сравнивается со временем рассеяния энергии электронов в квантовой яме активной области, и для определенной группы энергетических переходов наступает насыщение скорости стимулированной излучательной рекомбинации. С увеличением тока

накачки возрастает концентрация носителей (электронов) на уровнях размерного квантования, лежащих выше по энергии, и достигает порогового значения. Спектр генерации расширяется. Далее с ростом тока накачки процедура повторяется. При этом с ростом концентрации в активной области увеличивается выброс электронов в волноводные слои. Экспериментально это подтверждается ростом интенсивности излучения из волноводных слоев. Затем при некотором токе накачки концентрация выброшенных носителей достигает пороговой в части волноводного слоя и наблюдается генерация излучения из волноводного слоя. Это означает, что открывается эффективный канал утечек рекомбинационного тока из активной области. На ватт-амперной характеристике наблюдается излом и снижение дифференциальной квантовой эффективности (рис.2).

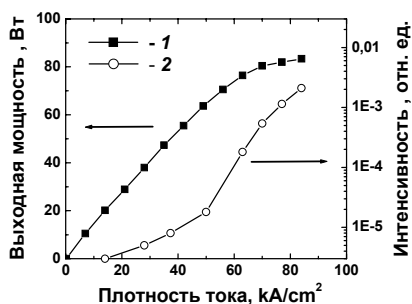


Рис.2. Зависимости выходной оптической мощности (1) и интенсивности максимума спектра люминесценции волноводного слоя (2) от плотности тока накачки для лазерного диода с длиной резонатора $L=1.5\text{мм}$ и шириной полоска 100мкм в импульсном режиме генерации при температуре 20°C .

В третьей главе представлены результаты расчётов времени рассеяния энергии носителей тока и времени жизни стимулированных излучательных переходов в активной области, а также расчёт концентрации и температуры электронов в активной области в зависимости от плотности тока накачки [A1, A3, A4].

Первый параграф начинается с расчёта времени рассеяния энергии носителей тока. Используя материалы работ [3,4], была проведена оценка времени рассеяния энергии электронов в исследуемой лазерной гетероструктуре. В расчете учитывалось неравновесное распределение

полярных оптических фононов N_q , приводящее к эффекту их накопления. Необходимо отметить, что время рассеяния энергии электронов имеет тенденцию роста с увеличением концентрации электронов [3]. Другими словами, на пороге генерации и при высоких уровнях накачки время рассеяния энергии электронов может различаться. Из оценки времени рассеяния энергии электронов в квантовой яме следует, что электроны доставляются на энергетические уровни с конечной скоростью за время $(2 - 8) 10^{-11}$ с. Дырки в этих же условиях из-за большей массы успевают термализоваться.

Далее в параграфе рассмотрено время жизни носителей заряда или скорость стимулированной излучательной рекомбинации, которая определяется как $R_{stim} = N / \tau_{stim}$, где N - концентрация электронов в активной области. Используя связь тока накачки с мощностью излучения в режиме генерации [5], построена зависимость времени жизни носителей тока, участвующих в стимулированной излучательной рекомбинации, от мощности излучения полупроводникового лазера. Полученный результат указывает, что в идеальном полупроводниковом лазере с ростом тока накачки время жизни стимулированной излучательной рекомбинации уменьшается независимо от величины тока.

Также в этом параграфе представлена рассчитанная из экспериментальных данных зависимость времени стимулированной излучательной рекомбинации от мощности оптического излучения полупроводникового лазера. Для построения этой зависимости использовались экспериментальная ватт-амперная характеристика (рис.2) и зависимость усиления от концентрации. Затем, применяя выражение

$$\tau_{stim} = \frac{N}{gV_{gr}N_{ph}\Gamma}, \quad (1)$$

где g - коэффициент усиления, V_{gr} - групповая скорость световой волны, N_{ph} - концентрация фотонов в резонаторе и Γ - фактор оптического ограничения активной области, было рассчитано время жизни носителей заряда, участвующих в стимулированной излучательной рекомбинации в

зависимости от оптической мощности полупроводникового лазера. При достижении величины $5 \cdot 10^{-11}$ с происходит стабилизация времени стимулированной излучательной рекомбинации при мощности оптического излучения 20-30 Вт.

Во втором параграфе представлены результаты исследований роста концентрации электронов и их температуры как функции тока в режиме спонтанного излучения инжекционных лазеров. Приводится рассчитанная спектральная зависимость интенсивности спонтанного излучения для разных токов накачки. Для построения этой зависимости необходимо знать концентрацию горячих носителей заряда n_s в квантовой яме и их температуру T_e . n_s и T_e были найдены из совместного решения системы двух уравнений для баланса числа частиц и баланса мощности в стационарном режиме. Отмечено удовлетворительное согласие экспериментально найденных и рассчитанных спектров и их зависимости от плотности тока.

В третьем параграфе даются расчёты концентрации электронов в квантовой яме и степени их разогрева при стимулированном излучении лазеров. Показано, что только при относительно небольших токах накачки j наблюдается стабилизация концентрации носителей заряда. При более высоких токах, превышающих пороговый более чем на порядок, концентрация и температура электронов и дырок начинают расти. Замедление роста T_e от j при $j > 60$ кА/см² связано с увеличением концентрации n_s .

Четвертая глава посвящена рассмотрению вопроса о причинах насыщения ватт-амперных характеристик гетеролазеров на основе твердых растворов InGaAsP/InP и AlInGaAs/InP ($\lambda = 1.5 - 1.8$ мкм), а также рассмотрена возможность создания гетероструктуры для получения на её основе лазерных диодов с двумя линиями генерации из активной области. [A2, A5, A6]

В первом параграфе представлены результаты исследований процессов насыщения ватт-амперных характеристик гетеролазеров на подложках InP при высоких уровнях накачки. В лазерах на подложках InP переход к импульсному режиму накачки позволил, как и в случае лазеров

на подложке GaAs, значительно увеличить излучаемую оптическую мощность по сравнению с непрерывным режимом генерации. В то же время зарегистрированные в импульсном режиме оптические мощности в лазерах на подложке фосфида индия в несколько раз ниже, чем в лазерах на подложках арсенида галлия. В первую очередь это связано с тем, что величина внутренних оптических потерь (около $2-7 \text{ см}^{-1}$) в лазерах на подложках InP на порядок больше, чем в лазерах на подложках GaAs, как в непрерывном, так и в импульсном режимах генерации. Как следствие, в лазерах на основе твердых растворов AlInGaAs/InP и InGaAsP/InP внешняя дифференциальная квантовая эффективность не превышает 35-50% за порогом генерации. Одновременно с низким значением величины дифференциальной квантовой эффективности на пороге генерации в лазерах на подложках InP наблюдается быстрое насыщение ватт-амперных характеристик с увеличением тока накачки в импульсном режиме. Как и в лазерах на подложках GaAs, в спектрах излучения обнаружено три особенности: расширение спектра с током накачки в длинноволновую и в коротковолновую области, и при достижении некоторой мощности излучения насыщение интенсивности максимума спектра излучения. Наблюдаемая картина полностью соответствует результатам аналогичных исследований лазеров на подложках GaAs. Обнаруженное поведение спектров и насыщение максимума интенсивности излучения в режиме генерации носит принципиальный характер и обусловлено насыщением скорости стимулированной излучательной рекомбинации вследствие конечной величины времени рассеяния энергии носителей заряда в активной области.

Также в этом параграфе с помощью экспериментально полученных зависимостей пороговой плотности тока от длины волны генерации был проведён расчёт концентрации носителей заряда в активной области лазеров на подложках GaAs и подложках InP в режиме стимулированной рекомбинации. Для оценки пороговой плотности тока для высокоэнергетических уровней в спектре генерации исследовались лазеры с разной длиной резонатора Фабри–Перо, что обеспечивало изменение оптических потерь на выход. Увеличение оптических потерь на выход

приводит к росту пороговой плотности тока и смещению длины волны генерации в коротковолновую область. Показано, что в импульсном режиме генерации концентрация носителей заряда в активной области за порогом генерации возрастает в 3-4 раза и может достигать 10^{19}см^{-3} при плотностях тока накачки более 80кА/см^2 . Ход полученной зависимости роста концентрации от плотности тока совпадает с аналогичной зависимостью, теоретически полученной в третьем параграфе главы 3. Значение концентрации, полученное из экспериментальных данных, в 3 раза выше, чем в расчётах, сделанных там же. Связано это с тем, что при расчётах не учитывались различные виды потерь, которые дают свой вклад в эксперименте.

Второй параграф посвящён разработке конструкции гетероструктуры для получения одновременно двух линий генерации из активной области и исследованию лазерных диодов на основе такой гетероструктуры. В главах 2 и 3 было показано, что в полупроводниковых лазерах раздельного ограничения концентрация электронов при высоких уровнях возбуждения импульсным током накачки растёт как в активной области, так и в волноводной кулоновской яме. На этом основании сделан вывод о том, что если в активной области существует два электронных уровня, то есть вероятность достижения двухполосной генерации в одном полупроводниковом лазере.

Проведенный расчёт показал, что для исследуемой системы в структуре с толщиной активной области меньше 90Å квантовая яма содержит один электронный энергетический уровень, а с толщиной активной области больше 90Å – два электронных энергетических уровня. Энергетическое положение уровней размерного квантования определялось из уравнения Шредингера для потенциальной ямы конечной глубины. Учитывалось отличие эффективных масс электронов и тяжелых дырок в квантовой яме и окружающем ее волноводе. Результаты исследования гетероструктуры с одним электронным уровнем представлены в главе 2.

При разработке конструкции тестовых лазерных диодов учитывалась необходимость выращивания активной области с толщиной, не превышающей критическую. Оценка критической толщины проводилась

путем расчета по формуле, приведенной в [6]. Для активной области с составом $\text{In}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}$ критическая толщина при температуре эпитаксии составляет 105 \AA . Поэтому в экспериментах использовались структуры, изготовленные методом МОС – гидридной эпитаксии, с толщиной активной области 100 \AA .

Далее представлены результаты исследования ватт-амперных и спектральных характеристик. Обнаружено, что интегральная выходная мощность оптического излучения из лазера со 100 \AA квантовой ямой значительно выше, чем для лазера с толщиной квантовой ямы 70 \AA . Показано, что при высоких уровнях токовой накачки спектр излучения полупроводникового лазера с толщиной активной области 100 \AA и двумя электронными уровнями размерного квантования состоит из двух полос генерации (рис.3).

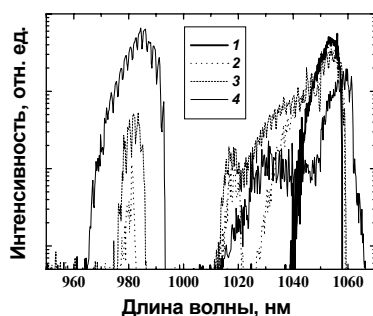


Рис. 3. Спектры двух полос генерации лазерного диода с толщиной квантовой ямы 100 \AA , длиной резонатора $1,5 \text{ мм}$ и шириной полоска 100 мкм в импульсном режиме при различных плотностях тока накачки, кА/см^2 : 1 – 13; 2 – 35; 3 – 60; 4 – 105.

В третьем параграфе даны результаты исследований, целью которых являлось достижение максимальной мощности в импульсном режиме генерации лазеров на основе GaAs, и исследованы угловые характеристики (распределение интенсивности излучения в ближней и дальней зоне) этих лазеров при высоких уровнях токовой накачки.

Для достижения максимальной мощности излучения при импульсном режиме накачки были изготовлены лазеры, на основе гетероструктуры, описанной во втором параграфе главы 4 (асимметричная КР РОДГС InGaAs/GaAs с толщиной волновода $1,7 \text{ мкм}$ и активной областью 100 \AA). Благодаря низким оптическим потерям в данной гетероструктуре, можно

сделать эффективные лазеры с длинами резонаторов 3 мм, что позволяет, наряду с увеличением объема активной области, по сравнению с лазерами с толщиной активной области 70 \AA (рис.2), увеличить выходную оптическую мощность излучения. Максимальная пиковая мощность излучения одного лазерного диода со 100 мкм апертурой в импульсном режиме генерации составила 145 ватт (рис.4).

Далее были проведены исследования зависимости распределения интенсивности излучения от тока накачки в ближней и дальней зоне лазерного диода при использовании импульсного режима возбуждения. Излучение в ближней зоне лазерного диода с ростом тока накачки становится более равномерным. В дальней зоне в плоскости, параллельной p-n переходу, с увеличением тока накачки наблюдается появление мод высшего порядка. При больших плотностях тока возбуждения (50 кА/см^2) сохраняется одномодовый характер генерации в плоскости, перпендикулярной p-n переходу.

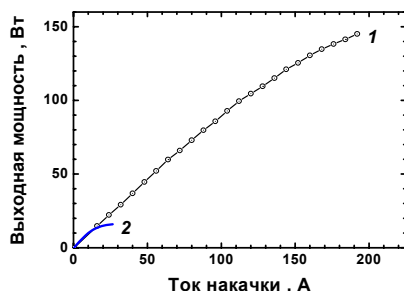


Рис.4. Ватт-амперная характеристика лазерного диода с шириной полоска 100 мкм , длиной резонатора 3 мм при импульсном (1) и непрерывном (2) режимах накачки.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Определено, что конечная величина времени рассеяния энергии электронов на неравновесных оптических фонах является причиной насыщения мощностных характеристик гетеролазеров.
2. Проведена экспериментальная оценка времени рассеяния энергии электронов в квантово-размерных областях лазерных гетероструктур

раздельного ограничения, которая составила величину порядка 0.5 – 1 пс.

3. Теоретически и экспериментально показано, что концентрация носителей заряда растет в активной области гетеролазера за порогом генерации.
4. Достигнута оптическая мощность излучения 145 Вт с лазерного диода, на основе асимметричной квантово-размерной гетероструктуры раздельного ограничения с толстым волноводом, полученной методом МОС-гидридной эпитаксии, с 100 мкм апертурой в импульсном режиме токовой накачки на длине волны генерации 1.06 мкм.
5. Получены сравнимые по интенсивности две полосы генерации излучения на длинах волн 1.06 и 0.98 мкм из одиночной квантовой ямы лазерного диода.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

- A1. С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.А. Пихтин, К.С. Борщёв, Д.А. Винокуров, И.С. Тарасов, «Конечное время рассеяния энергии носителей заряда как причина ограничения оптической мощности полупроводниковых лазеров», ФТП, 2006, т.40, вып.8, стр.1017-1023.
- A2. Д.А.Винокуров, В.А.Капитонов, А.В.Лютецкий, Д.Н.Николаев, Н.А.Пихтин, А.В.Рожков, Н.А.Рудова, С.О.Слипченко, А.Л.Станкевич, Н.В.Фетисова, М.А.Хомылев, В.В.Шамахов, К.С.Борщёв, И.С.Тарасов, «Исследование характеристик полупроводниковых лазеров на основе асимметричных гетероструктур со сверхтолстым волноводом ($\lambda=1060$ нм) при импульсном режиме накачки», Письма в ЖТФ, 2006, т.32, вып.16, стр. 47-55.
- A3. S.O.Slipchenko, N.A.Pikhtin, K.S.Borschev, I.N.Arsentyev, D.A.Vinokurov, A.V.Lyutetskiy, Z.N.Sokolova, I.S.Tarasov, «Reason of maximal output optical power limitation in semiconductor laser at

- superhigh excitation levels», XII Conference on Laser Optics (LO'2006), Russia, St.Petersburg, 2006, June 26 – 30, Tech. Digest p.29.
- A4. N. A. Pikhin, S. O. Slipchenko, K. S. Borschev, A. D. Bondarev, D. A. Vinokurov, A. V. Lyutetskiy, I. S. Tarasov, «Origin of output optical power limitation in semiconductor laser at superhigh drive currents», Summaries of the International Conference on High Power Laser Beams, Russia, Nizhny Novgorod , 2006, July 3 – 8, p.86.
- A5. Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, М.А. Хомылев, В.В. Шамахов, К.С. Борщёв, И.Н.Арсентьев, И.С. Тарасов, «Насыщение ватт-амперных характеристик мощных лазеров ($\lambda=1.0-1.8$ мкм) в импульсном режиме генерации», ФТП, 2007, т.41, вып.8, стр.1003 – 1008.
- A6. Д.А. Винокуров, С.А. Зорина, В.А.Капитонов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Т.А. Налет, Д.Н.Николаев, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, А.Л.Станкевич, Н.А. Рудова, Н.В.Фетисова, М.А. Хомылев, В.В. Шамахов, К.С. Борщёв, И.Н. Арсентьев, А.Д. Бондарев, М.К. Трукан, И.С. Тарасов, «Двухполосная генерация в квантово-размерной активной области полупроводникового лазера при высоких уровнях накачки», ФТП, 2007, т.41, вып.10, стр.1247 – 1250.

Цитируемая литература

- [1] Н.А.Пихтин, С.О.Слипченко, З.Н.Соколова, И.С.Тарасов. ФТП, 2004, т.38, вып.3, стр. 374 – 381.
- [2] С.О.Слипченко, Д.А.Винокуров, Н.А.Пихтин, З.Н.Соколова, А.Л.Станкевич, И.С.Тарасов, Ж.И.Алферов. ФТП, 2004, т.38, вып.12, стр. 1477 – 1486.
- [3] Л.Е.Воробьев, С.Н.Данилов, В.Л.Зерова, Д.А.Фирсов. ФТП, 2003, т.37, вып.5, стр. 604 – 611.

- [4] Л.Е. Воробьев, С.Н. Данилов, Е.Л. Ивченко, М.Е. Левинштейн, Д.А. Фирсов, В.А. Шалыгин. *Кинетические и оптические явления в сильных электрических полях в полупроводниковых наноструктурах* (СПб, Наука, 2000).
- [5] L.A. Coldren, S.W. Corzine. *Diode lasers and photonic integrated circuits* (John Wiley and Sons inc., 1995).
- [6]. Peter.S.Zory. *Quantum Well Lasers* (Academic Press, 1993).