

На правах рукописи  
УДК 535.374:621.375.8

Мифтахутдинов Дмитрий Раисович

Катастрофическая оптическая деградация в мощных  
поперечно-одномодовых полупроводниковых лазерах

Специальность: 01.04.21 — лазерная физика

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук  
«Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Богатов Александр Петрович  
(ФИАН)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
Засавицкий Иван Иванович  
(ФИАН)

кандидат физико-математических наук,  
Коняев Вадим Павлович  
(НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образо-  
вательное учреждение высшего профессиональ-  
ного образования «Национальный исследователь-  
ский ядерный университет «МИФИ»

Защита состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2010 года в \_\_\_\_ часов на заседании дис-  
сертационного совета Д 002.023.03 в Физическом институте им. П. Н. Лебе-  
дева РАН (ФИАН) по адресу: Москва, Ленинский просп., 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

Шиканов А. С.

# Общая характеристика работы

## Актуальность работы

Современные полупроводниковые лазеры являются примером наукоемкого и высокотехнологичного продукта, находящего свое применение в самых различных областях: в системах открытой и волоконной оптической связи, в качестве оптической накачки других типов лазеров, в оптических устройствах хранения информации, в системах оптической локации.

Основной проблемой, стоящей на пути дальнейшего увеличения мощности полупроводниковых лазеров, является не столько само увеличение мощности, сколько сохранение при этом приемлемого срока службы. Основным фактором, вызывающим сокращение срока службы мощных полупроводниковых лазеров, является катастрофическая оптическая деградация (КОД). Это явление заключается в практически мгновенном нарастании температуры в небольшой области лазера (обычно вблизи выходной грани) до температуры плавления и дальнейшем разрушении такой области.

В широких лазерах КОД происходит постепенно: сначала разрушается небольшой участок выходной грани, где максимальна оптическая мощность или имеется какой-либо дефект; затем, после перераспределения оптического поля может разрушиться новый участок. При этом весь процесс деградации может состоять из целого ряда отдельных актов, существенно разнесенных во времени. Для поперечно-одномодовых лазеров, ширина активной области которых не превышает нескольких микрометров, явление КОД происходит в наиболее чистом виде (в виде однократного резкого падения мощности), чем и объясняется выбор таких лазеров в качестве объекта исследований.

Само по себе явление КОД известно практически с самого момента создания полупроводниковых лазеров и было исследовано в множестве как экспериментальных, так и теоретических работ. Однако до настоящего момента нет полного понимания этого процесса; по-прежнему КОД является объектом множества исследований. Важное место среди этих исследований занимает моделирование КОД. Практически во всех современных теоретических

рассмотрениях явление КОД представляется как процесс с положительной обратной связью. Схема возникновения такой обратной связи показана на рисунке 1.



Рис. 1: Возникновение положительной обратной связи, приводящей к КОД

обратная связь в достаточной степени возобладает над отрицательной, возникнет неустойчивость, приводящая к моментальному возрастанию температуры и разрушению лазера – то есть, к КОД. Такой взгляд на явление КОД в настоящее время принят в большинстве работ, однако существует неясность относительно играющих роль в процессе КОД механизмов разогрева, величины их вклада в этот процесс и корректного их рассмотрения.

## Цель работы

Целью настоящей работы являлось экспериментальное изучение динамики процесса КОД мощных полупроводниковых лазеров с различным характером обработки выходной грани после скола, а также численное моделирование разогрева приповерхностной области лазера в стационарной задаче,

Помимо положительной обратной связи существует и отрицательная обратная связь, которую создает уменьшение лазерной мощности с разогревом. Это обстоятельство делает необходимым самосогласованное рассмотрение лазерных и тепловых соотношений при моделировании КОД. В случае, когда отрицательная обратная связь преобладает над положительной, наблюдается снижение выходной мощности с ростом тока накачки (явление, носящее в англоязычной литературе название «rollover»). Если же положительная

нахождение критической мощности КОД и моделирование динамики разогрева для мощностей, превышающих критический уровень.

### **Научная новизна**

1. Разработана оригинальная методика экспериментального исследования явления КОД в мощных поперечно-одномодовых полупроводниковых лазерах, включающая в себя измерение временной зависимости выходной мощности лазера в процессе развития КОД. Показано, что время падения выходной мощности от критического значения до значения, в несколько раз меньшего (после чего скорость падения резко замедляется) составляет от 50 нс до сотен наносекунд, причем наибольшее время соответствует наиболее защищенной выходной грани.
2. Показано, что явление КОД может сопровождаться возникновением шунтирующего канала с сопротивлением не более величины порядка  $\sim 1$  Ом. Время от начала падения выходной мощности до возникновения такого канала может составлять от практически мгновенного (менее 100 нс) до превышающего, по меньшей мере, несколько мкс. Шунтирующий канал может возникать и в тех случаях, когда выходная грань претерпевшего КОД лазера не несет видимых следов разрушения.
3. Разработана физическая модель процесса КОД в мощных поперечно-одномодовых полупроводниковых лазерах, наиболее полно в сравнении с предыдущими моделями включающая в себя как применяемые для увеличения порога КОД конструктивные особенности резонатора лазера, так и механизмы разогрева области вблизи выходного зеркала. В частности, впервые в модель включено поглощение излучения в широкозонных (ширина запрещенной зоны больше энергии кванта лазерного излучения) обкладочных слоях. Также впервые в модели показано возникновение взаимосвязи между явлениями медленной и катастрофической деградации, связанной в диффузией приповерхностных дефектов вглубь резонатора лазера в процессе медленной деградации, что приво-

дит к снижению порога КОД. Модель позволяет определить следующие физические величины:

- температуру внутри резонатора лазера (в частности, на поверхности выходного зеркала или его защитного покрытия) при разных значениях постоянного тока накачки;
- ватт-амперную характеристику лазера при постоянном токе накачки;
- уровень выходной мощности лазера, при котором наступает КОД;
- скорость разогрева приповерхностной области лазера при импульсном режиме накачки.

Благодаря этому с помощью сравнения расчетных значений температуры выходной грани и ватт-амперной характеристики с экспериментально измеренными для конкретного образца во время его наработки, можно сделать выводы о процессе медленной деградации лазера и спрогнозировать срок службы лазера до наступления КОД. Также можно сделать прогноз относительно надежности работы лазера в импульсном режиме.

4. С помощью разработанной физической модели проведено изучение вклада различных физических процессов в разогрев приповерхностной области лазера вблизи выходной грани. Показано, что токовое ограничение увеличивает критическую мощность КОД лишь незначительно (на величину порядка  $\sim 10\%$ ). Также рассчитаны пороги «включения» различных процессов тепловыделения (то есть значения, начиная с которых данный процесс оказывает существенное влияние на порог КОД). Показано, что скорость нарастания температуры во время КОД составляет порядка  $\sim 50$  К/нс.

### **Практическая значимость работы**

- Создано программное обеспечение, позволяющее производить расчеты в рамках разработанной модели КОД. С его помощью возможно про-

ведение расчетов поля температур в резонаторе мощного поперечно-однододового лазера (в частности, на поверхности выходного зеркала или его защитного покрытия) и ватт-амперной характеристики.

- Намечены пути оптимизации мощных полупроводниковых лазеров относительно явления КОД: разработанная модель позволяет указать пороги «включения» разных механизмов, приводящих к разогреву выходной грани лазера, что позволяет найти те пределы, за которыми дальнейшее улучшение той или иной характеристики уже не приводит к улучшению лазера в целом.
- Намечены пути создания методик прогнозирования срока службы мощных полупроводниковых лазеров с помощью ускоренных тестов наработки путем сравнения наблюдаемых и моделируемых ватт-амперных характеристик и температуры выходной грани. С помощью такого сравнения могут быть определены значения используемых в модели параметров и спрогнозировано дальнейшее их изменение и падение пороговой мощности КОД.

### **Апробация работы**

Результаты работы докладывались на 6-ом Белорусско-Российском семинаре «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе» (4–8 июня 2007 г., Минск, Беларусь), семинарах отдела оптоэлектроники ОКРФ ФИАН и 3-ей Всероссийской молодежной школе-семинаре с международным участием «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики» (25-30 октября 2009 г., Троицк–Москва, Россия).

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Развитая в настоящей работе методика экспериментальных исследований процесса КОД позволяет измерять зависимость выходной мощности полупроводникового лазера от времени с временным разрешением, достаточным для регистрации особенностей динамики КОД. Результатом

применения методики являются данные в цифровой форме, удобной для последующей обработки.

2. Следствием процесса КОД является возникновение шунтирующего канала. Интервал времени между началом падения выходной мощности (возникновением КОД) и созданием шунтирующего канала составляет от 100 нс до величины, превышающей несколько микросекунд. Сопротивление такого канала не превышает значения порядка  $\sim 1$  Ом. Шунтирующий канал может возникать и в том случае, когда поверхность выходной грани претерпевшего КОД лазера не имеет видимых повреждений.
3. Разработанная в диссертации модель КОД поперечно-одномодовых полупроводниковых лазеров наиболее полно в сравнении с предыдущими работами учитывает как механизмы разогрева, так и конструктивные особенности резонатора и позволяет рассчитывать профили температуры внутри резонатора лазера, его ватт-амперную характеристику и критическую мощность КОД. Развитая методика расчетов в рамках разработанной модели позволяет производить расчеты с необходимой точностью без использования значительных вычислительных ресурсов.
4. В зависимости от значений параметров модели температура в наиболее разогретой области вблизи КОД составляет порядка  $250\text{--}500^\circ\text{C}$ , а размер этой области (по полувысоте распределения температуры) составляет примерно  $1 \times 3 \times 1$  мкм по осям  $x$  (перпендикулярно слоям),  $y$  (в плоскости слоев перпендикулярно оси лазера) и  $z$  (вдоль оси лазера) соответственно. Разогрев области вблизи выходной грани до точки плавления при импульсной накачке происходит за время от  $\sim 15$  нс (для пятикратного превышения выходной мощности над порогом КОД непрерывного режима работы лазера) до  $\sim 25$  мкс (для десятипроцентного превышения). Скорость нарастания температуры вблизи точки плавления составляет при этом не менее  $\sim 50$  К/нс.



5. В рамках разработанной модели связь между скоростью медленной деградации и величиной порога КОД позволяет установить значения параметров деградировавшей области  $\alpha_0^{deg}$  и  $z_0$  и их эволюцию с помощью тестов наработки.

## **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 63 наименований, изложена на 111 страницах и проиллюстрирована 42 рисунками и 4 таблицами.

## **Краткое содержание диссертации**

*Во введении* обоснована актуальность экспериментальных и теоретических исследований явления КОД, показана важность моделирования являющегося причиной КОД разогрева области вблизи выходного зеркала лазера как для понимания процессов деградации, так и для оптимизации конструкции перспективных лазеров, сформулированы цели работы и решаемые для достижения этих целей задачи, представлены выносимые на защиту положения и показана их научная новизна и практическая ценность.

*В первой главе* проведены экспериментальные исследования динамики КОД для четырех групп образцов, изготовленных из одной гетероструктуры (таблица 1), но различающихся характером обработки выходных граней (таблица 2). Исследования проводились на оригинальной установке, регистрировавшей выходную мощность лазера и ток его накачки с временным разрешением 2 нс/отсчет. Лазеры накачивались однократным пилообразным импульсом длительностью около 5 мкс. Амплитуда импульса была достаточной для того, чтобы лазеры претерпели необратимое разрушение вследствие КОД.

Излучение лазерного диода с помощью объектива фокусировалось на скоростном фотоприемнике ЛФД-3. Далее сигнал с фотодиода поступал на цифровой осциллограф TDS-2022, соединенный с персональным компьюте-

Таблица 1: Состав слоев исследованных образцов

№	Состав	х, у	Толщина d, мкм	Показатель преломления
1	P <sup>+</sup> -GaAs	–	0,35	3,6436
2	P-Al <sub>y</sub> Ga <sub>1-y</sub> As	0,37	1,95	3,3557
3	Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0,31	0,12	3,3956
4	GaAs	–	0,009	3,6436
5	Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0,31	0,12	3,3956
6	N-Al <sub>y</sub> Ga <sub>1-y</sub> As	0,37	2,74	3,3557
7	n-GaAs	–	100	3,529

Таблица 2: Характер покрытия выходных граней образцов разных групп

Группа	Наличие слоя ZnSe	Просветляющее покрытие
А	нет	нет
Б	нет	есть, ~7%
В	есть	нет
Г	есть	есть, ~5%

ром. На другой канал осциллографа поступал сигнал от генератора импульсов накачки. Оба сигнала, зарегистрированных осциллографом, передавались на компьютер для сохранения и обработки.

Результаты таких измерений представлены на рисунке 2. Представлены наиболее типичные кривые для каждой из групп исследуемых образцов.

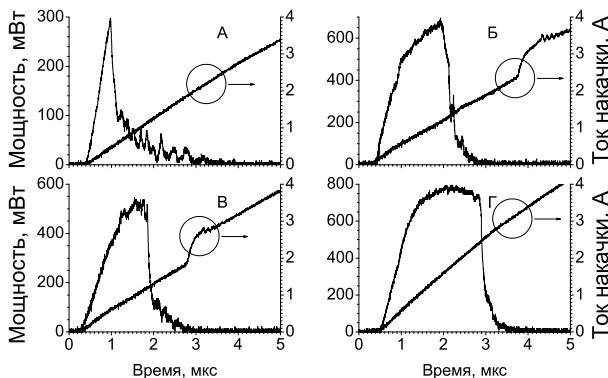


Рис. 2: Выходная мощность и ток накачки в «квaziнепрерывном» режиме накачки

Фактически эти кривые представляют собой ватт-амперные характеристики образцов в неявном виде, представленные параметрически как зависимости выходной мощности и тока накачки от времени. Поскольку за исключением небольшого участка, о котором речь пойдет ниже, ток накачки зависит от времени практически линейно, сама зависимость выходной мощности от

времени может рассматриваться как ВТАХ.

Резкий спад выходной мощности выражает собой процесс КОД, представляющий из себя обычно оптическое разрушение выходной грани (микрофотографии образцов из групп А–Г, претерпевших КОД, — по одному из каждой группы — показаны на рисунке 3). Длительность такого падения составляла от 50–80 нс для образцов группы А до примерно 200 нс для образцов группы Г. Выходная мощность в момент, непосредственно предшествующий резкому ее падению, является критической мощностью КОД. Несмотря на то, что на микрофотографии выходной грани образца группы В не видно следов оптического разрушения, из осциллограмм на рисунке 2в ясно, что он также претерпел КОД. Такое поведение не является общим и типичным для образцов группы В: в большинстве своем на микрофотографиях их выходных граней тоже видно разрушение, аналогичное представленному на рисунках 7б и 7г. Аналогичное отсутствие видимых повреждений выходной грани изредка наблюдалось и для образцов серий Б и Г. Общим свойством всех образцов, претерпевших КОД без видимых повреждений выходной грани, является несколько более низкое значение пороговой мощности КОД по сравнению с другими образцами той же группы.

После КОД может происходить скачок тока накачки (рисунки 2б и 2в), после которого ток вновь меняется линейно, но уже с некоторым новым значением наклона. При повторных импульсах накачки ток также возрастает с этим самым новым значением наклона. Поскольку источник питания лазера представляет собой источник напряжения, нагруженный последовательно измерительным сопротивлением и лазерным диодом, такой скачок объясня-

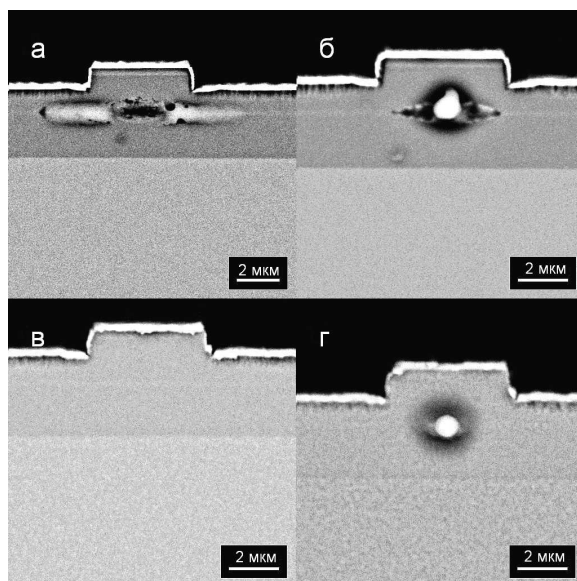


Рис. 3: Микрофотографии выходных граней образцов, претерпевших КОД

ется снижением эффективного сопротивления лазера из-за необратимого создания шунтирующего диод канала. Таким шунтирующим каналом может служить переобогащенная элементами III группы область разрушения. Это подтверждается тем фактом, что скачок тока всегда происходил после КОД (с временным интервалом от примерно 100 нс до по меньшей мере нескольких микросекунд). Сопротивление такого канала, по оценкам, не превышало величину порядка 1 Ом. Скачок тока наблюдался также и в случаях, когда выходная грань лазера не имела видимых повреждений. На некоторых образцах скачок тока не наблюдался.

Таблица 3: Мощностные характеристики оптического пробоя

Группа	$P_{max}$ , мВт	$P_{кр}$ , мВт	$P_{вн}$ , мВт	$S_{вн}$ , $10^7$ Вт/см <sup>2</sup>
А	300	300	557	4,64
Б	670	470	530	4,42
В	540	540	1000	8,33
Г	750	650	732	6,10

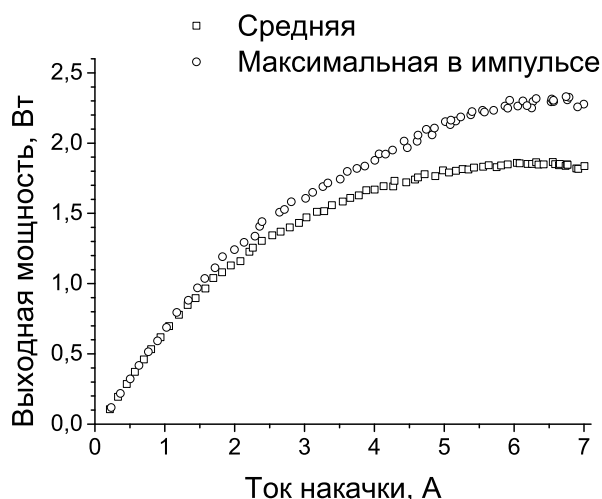


Рис. 4: Ватт-амперная характеристика при накачке однократными импульсами с длительностью 100 нс

Значения максимальной и критической выходной мощности, а также критической мощности и оценки ее плотности (исходя из расчета поперечного распределения поля внутри резонатора с помощью метода эффективного показателя преломления) внутри лазера вблизи выходной грани в момент КОД, приведены в таблице 3.

Образцы группы Г также исследовались в режиме накачки прямоугольными импульсами длительностью от 30 до 100 нс.

На рисунке 4 показана ВтАХ одного из лазеров при накачке однократным

импульсом длительностью в 100 нс. В течение импульса выходная мощность лазера слегка снижалась, несмотря на некоторое возрастание тока накачки в течение импульса, что связано с искажениями поперечной моды (измерения спектров показали, что нагрев лазера незначителен), поэтому на рисунке представлены максимальная и средняя по импульсу мощности. Видно, что даже при средней мощности около 1,8 Вт лазер не подвергся КОД в течение одного импульса накачки.

Во второй главе диссертации представлена физическая модель процесса КОД. Явление КОД связано с возникновением положительной обратной связи. В формировании такой связи играют роль несколько процессов, происходящих при увеличении температуры:

- уменьшение коэффициента теплопроводности, приводящее к ухудшению теплоотвода в толщу лазера;
- рост вклада безызлучательной рекомбинации, приводящий к увеличению тепловыделения.
- рост поглощения в полупроводнике, также увеличивающий тепловыделение.

Вместе с тем, существует и отрицательная обратная связь. К ней приводит уменьшение мощности излучения лазера (а значит, и уменьшение тепловыделения за счет поглощения внутриврезонаторного излучения) за счет падения полного модового усиления, к которому могут привести уменьшение материального усиления и рост поглощения из-за разогрева или ухудшение волноводных свойств лазера в латеральном направлении. Для последовательного учета такой отрицательной обратной связи необходимо самосогласованное решение тепловой и лазерной задач.

Область счета и выбранные оси координат показаны на рисунке 5. Сложная структура составляющих лазер слоев в модели заменена всего тремя слоями: двумя одинаковыми обкладочными и находящимся между ними активным слоем. При этом структура симметрична относительно плоскости  $x = 0$ .

Также пренебрегалось изменением состава вдоль оси  $y$  (то есть гребнем лазера). Такие упрощения оправдываются тем фактом, что тепловые свойства слоев реального лазера не очень сильно различаются, так что без значительной потери точности эти слои можно заменить двумя эффективными слоями, симметричными относительно активной области.

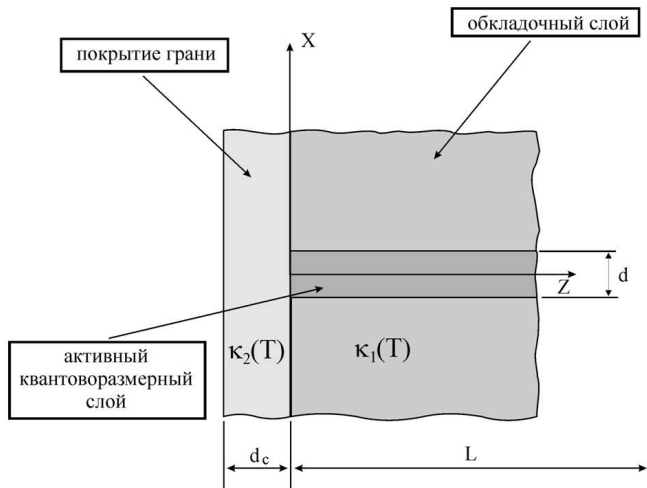


Рис. 5: Область расчета модели КОД

Размеры расчетной области в плоскости  $xu$  составляют  $50 \times 50$  мкм. Поскольку модель симметрична относительно плоскостей  $x = 0$  и  $y = 0$ , в действительности расчеты проводятся только в первом квадранте плоскости  $xu$  ( $x \geq 0, y \geq 0$ ). Толщина активной области (порядка  $100 \text{ \AA}$ ) много меньше размеров области счета, а также и характерных расстояний, на которых

существенно меняется температура, поэтому в расчетах активная область предполагается бесконечно тонкой; объемные источники тепловыделения в ней заменяются поверхностным потоком тепла.

Важной составной частью модели является покрытие выходной грани. Параметры этого покрытия (теплопроводность  $\kappa_2(T)$  и толщину  $d_c$ ) можно варьировать для изучения его влияния на разогрев выходной грани.

В показанной на рисунке 5 области решалось стационарное уравнение теплопроводности

$$\nabla [\kappa(\vec{r}, T) \cdot \nabla T] + F(\vec{r}, T) = 0, \quad (1)$$

где  $T$  — температура,  $\kappa$  — коэффициент теплопроводности для разных областей расчета (рисунок 5), а  $F(\vec{r}, T)$  — зависящая от координат  $\vec{r} = (x, y, z)$  и температуры  $T$  плотность мощности источников тепла. Последняя представлялась в виде суммы шести членов ( $F(\vec{r}, T) = \sum_{i=1}^6 F_i(\vec{r}, T)$ ), отвечающих

рассматриваемым процессам тепловыделения:

1. термализация инжектированных носителей;
2. термализация носителей, образовавшихся в результате возникающего в разогретой области резонансного поглощения лазерного излучения;
3. безызлучательная рекомбинация;
4. оптическое поглощение в дефектной приповерхностной области

$$\alpha^{deg} = \alpha_0^{deg} \exp(-z/z_0); \quad (2)$$

5. поверхностная безызлучательная рекомбинация;
6. оптическое поглощение в широкозонных обкладочных слоях.

Впервые здесь рассмотрено оптическое поглощение в дефектной приповерхностной области и в обкладочных слоях. Поскольку нет возможности расчета поглощения в дефектной области из первых принципов, поглощение аппроксимировалось экспоненциальным выражением (2). Через параметры  $\alpha_0^{deg}$  и  $z_0$  явление КОД связывается таким образом с явлением медленной деградации (как показали многочисленные исследования, медленная деградация сопровождается диффузией дефектов вглубь лазера). Что касается поглощения в обкладочных слоях, то в предыдущих работах упоминалась возможная роль такого поглощения в процессе КОД, но в моделях оно прежде не учитывалось.

Граничными условиями тепловой задачи были: нулевой поток тепла через торцы лазера и равенство температуры его боковых граней температуре окружающей среды.

В лазерной задаче распространение поля предполагалось поперечно-одномодовым:

$$I(x,y,z) = u(x)v(y) (P^+(z) + P^-(z)). \quad (3)$$

Здесь  $I(x,y,z)$  — плотность потока мощности внутри резонатора,  $u(x)$  и  $v(y)$  — нормированное поперечное распределение поля ( $\int u(x) dx = 1$  и  $\int v(y) dy =$

$= 1$ ), а  $P^+(z)$  и  $P^-(z)$  — мощности волн, распространяющихся соответственно в положительном и отрицательном направлении оси  $z$ .

В связи с одномерным рассмотрением лазерной задачи (см. (3)), стандартные лазерные уравнения интегрируются по плоскости  $xy$ :

$$0 = \frac{dn}{dt} = \frac{j}{ed}\phi(z) - \frac{n}{\tau}(1 + \eta) - \frac{Qn}{\lambda} \exp(-z/\lambda) - \Gamma \frac{P^+ + P^-}{\hbar\omega dw} \sigma_0 (\beta n - \gamma n_0) \quad (4)$$

$$\frac{dP^\pm}{dz} = \pm [\Gamma \sigma_0 (\beta n - \gamma n_0) - \alpha_{int} - \xi \alpha_g - \alpha^{deg}] P^\pm, \quad (5)$$

где в уравнении для носителей  $n$  (4) первый член в правой части соответствует накачке ( $\phi(z)$  отвечает за диффузионное расплывание в области токового ограничения), второй — спонтанной и безызлучательной рекомбинации ( $\eta$  — отношение скоростей безызлучательной и излучательной рекомбинаций), третий — поверхностной рекомбинации и четвертый — стимулированному излучению. В уравнении для оптического потока (5) члены правой части отвечают соответственно за стимулированное излучение, рассеяние света на неоднородностях внутри резонатора лазера, поглощению в обкладочных слоях и поглощению в деградировавшей области.

Уравнение (4) является простым алгебраическим уравнением относительно  $n$ , а для дифференциального уравнения (5) использовались граничные условия на зеркалах:  $P^+(0) = R_1 P^-(0)$  и  $P^-(L) = R_2 P^+(L)$ .

Также для оценки динамики КОД применялась нестационарная модель. В отличие от стационарной модели, в этом случае не учитывались лазерные уравнения. Поскольку, как показали расчеты стационарной модели, приповерхностная разогретая область очень мала, разогрев (сопровождающийся ростом поглощения и безызлучательной рекомбинации) не влияет практически на концентрацию носителей и внутрирезонаторную оптическую мощность. Для решения нестационарной тепловой задачи брались следующие значения тока накачки  $J$ , концентрации носителей  $n$  и световой мощности  $P^\pm(z)$



(индексом  $кр$  обозначены величины для критической точки):

$$J = K J_{кр}, \quad n = n_{кр} \quad \text{и} \quad P^{\pm}(z) = K P_{кр}^{\pm}(z), \quad (6)$$

где  $K$  — коэффициент, больший единицы. При этом решалось нестационарное уравнение теплопроводности

$$C(\vec{r}) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla [\kappa(\vec{r}, T) \cdot \nabla T] + F(\vec{r}, T). \quad (7)$$

Во *третьей главе* описана методика решения уравнений представленной во второй главе модели, позволяющая эффективно находить распределение температур внутри резонатора лазера, ватт-амперную характеристику и критическую мощность КОД, а также результаты расчетов. Для самосогласованного решения тепловых и лазерных уравнений использовался итерационный подход: сначала решались лазерные уравнения, затем тепловые, после чего последовательность повторялась до тех пор, пока новый шаг не переставал приводить к существенному изменению результатов расчетов (относительное изменение лазерной мощности составляло не более  $10^{-6}$ , а изменение температуры — не более  $10^{-3}$ ).

После того, как описанный процесс сходился для некоторого значения тока накачки, ток увеличивался. Если положительная обратная связь, о которой шла речь выше, в достаточной степени превышает отрицательную, возникает неустойчивость, которая и означает КОД. В стационарной модели этому случаю соответствует отсутствие решения. Таким образом, если после очередного (небольшого) увеличения тока итерационный процесс переставал сходиться, это и означало развитие означенной неустойчивости. Таким образом, предыдущий ток накачки соответствует критической точке КОД с точностью до шага тока накачки.

Для изучения вклада отдельных механизмов тепловыделения в процесс КОД был использован следующий подход: сначала был выбран так называемый базовый набор параметров, с типичными для полупроводниковых лазеров ближнего ИК диапазона значениями, а затем параметры, ответственные

за соответствующие механизмы, варьировались.

Рисунок 6а демонстрирует, как с ростом тока накачки для одного набора параметров происходит рост температуры выходной грани. Параметром кривых является глубина деградировавшей области  $z_0$ . Хорошо видно, что сначала температура растет практически линейно с выходной мощностью, но затем рост становится все более быстрым. Крайние точки на кривых (помечены  $P_{кр}$ ) — это последние точки, при которых удалось найти решение задачи; эти точки соответствуют порогу КОД. Хорошо видно, как пороговая мощность КОД уменьшается с глубиной деградации. Эта зависимость отдельно представлена на рисунке 6б. Цифры у точек на этом рисунке соответствуют наработке в тыс. ч. Видно, что с выходной мощностью 0,5 Вт лазер с рассмотренными параметрами проработает порядка 3 тыс. ч.

На рисунке 7 показано распределение температуры внутри резонатора лазера для базовых параметров. Видно, что размер разогретой области составляет около  $1 \times 3 \times 1$  мкм по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно. Максимальный разогрев при этом составляет около  $430$  °С.

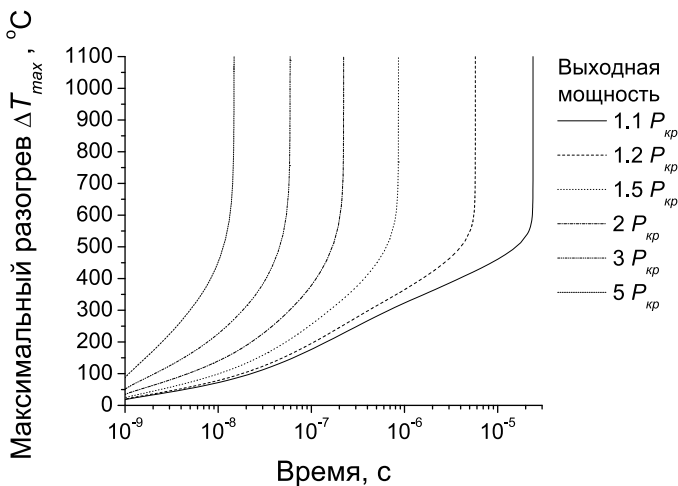


Рис. 8: Динамика развития КОД

может быть разделен на два участка: медленный разогрев примерно на  $500$  °С и практически мгновенный дальнейший разогрев, скорость которого не ниже величины порядка  $\sim 50$  К/нс. Время медленного разогрева составляет 15 нс

Динамика разогрева (превышение максимальной температуры внутри резонатора над температурой окружающей среды) показана на рисунке 8. Этот рисунок дополнительно доказывает то, что отсутствие решения за критической точкой обусловлено неустойчивостью физической задачи, а не методикой ее решения. Хорошо видно также, что процесс разогрева выходной грани

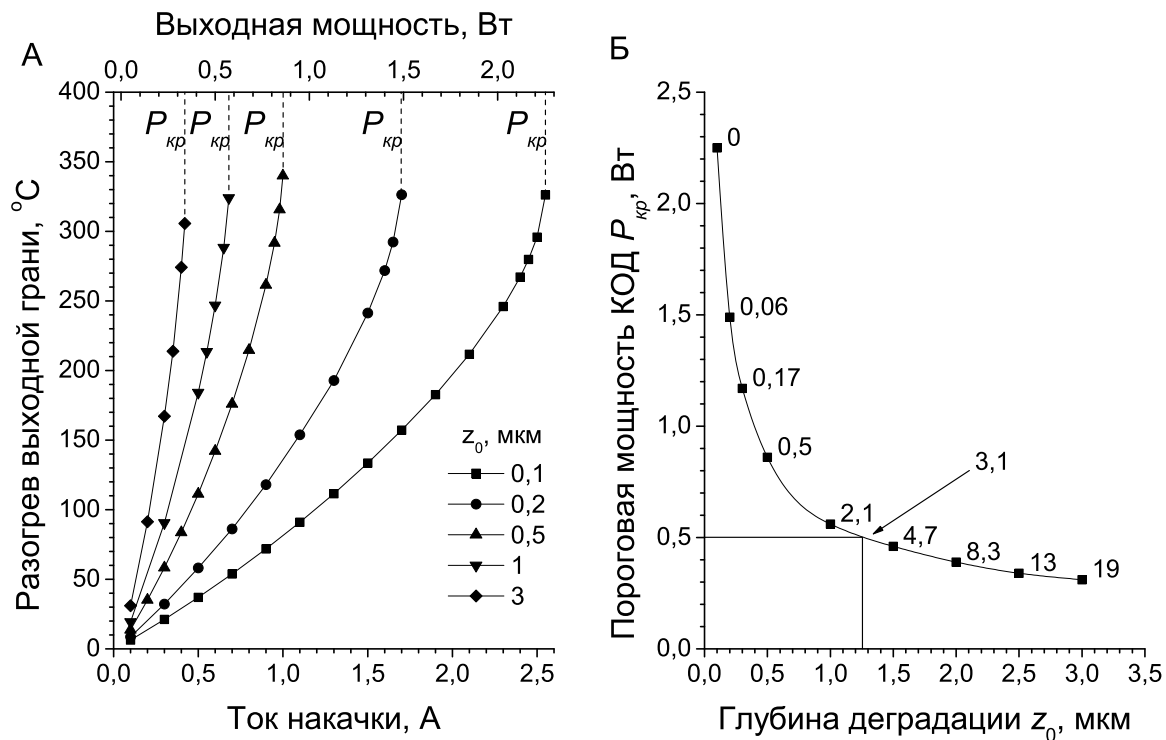


Рис. 6: Зависимость разогрева выходной грани от тока накачки (выходной мощности) для разных значений  $z_0$  (а) и зависимость пороговой мощности КОД от  $z_0$  (б)

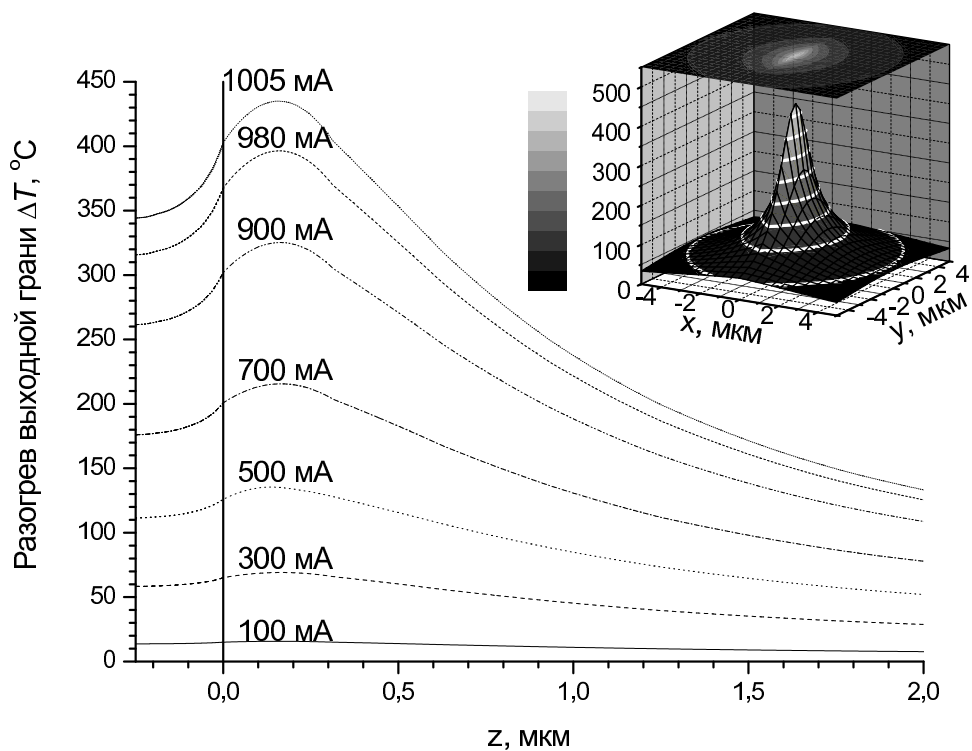


Рис. 7: Распределение температуры по оси  $z$  для разных токов накачки и (на вставке) в плоскости  $z = const$  для тока накачки 1 А в области максимального разогрева

для пятикратного превышения накачки над порогом КОД и 25 мкс для десятипроцентного превышения.

С помощью варьирования параметров было показано, что наибольший вклад в развитие КОД вносит температурная зависимость коэффициента теплопроводности. Также были определены пороги «включения» различных физических механизмов, то есть те величины их характерных параметров, начиная с которых дальнейшее увеличение (уменьшение) этих параметров приводит к существенному уменьшению критической мощности КОД. Кроме того, было показано, что токовое ограничение вблизи выходной грани на глубину 20 мкм привело к увеличению порога КОД лишь на 10%. Такое малое увеличение объясняется тем, что несмотря на токовое ограничение, концентрация носителей вблизи выходной грани остается высокой за счет резонансного поглощения излучения в разогретой активной области вблизи выходной грани.

## Основные результаты

По результатам настоящей работы могут быть сделаны следующие выводы:

1. Создана установка для экспериментального исследования процесса КОД с цифровой регистрацией выходной мощности полупроводниковых лазеров с высоким временным разрешением, позволяющая определять величину критической мощности КОД и получать данные о динамике выходной мощности лазера во время развития КОД (наиболее быстрый, начальный этап падения выходной мощности представляется при этом по меньшей мере 40 отсчетами).
2. Проведены исследования явления КОД в образцах с различным характером обработки выходной грани после скола кристалла. Показано, что процесс падения выходной мощности от критического до в несколько раз меньшего значения занимает по времени от десятков до сотен наносекунд.

кунд. Продемонстрировано, что в импульсном режиме накачки с длиной импульса 100 нс порог КОД превышает по меньшей мере в 3 раза порог КОД для непрерывного режима.

3. Показано, что следствием КОД является возникновение шунтирующего канала, состоящего из переобогащенного элементами III группы состава. Возникновение такого канала может происходить как практически сразу после начала падения выходной мощности (за время менее 100 нс), так и спустя по меньшей мере несколько микросекунд. Сопротивление такого канала не превышает значения порядка  $\sim 1$  Ом. Шунтирующий канал может возникать и в том случае, когда поверхность выходной грани претерпевшего КОД лазера не имеет видимых повреждений.
4. Создана модель процесса катастрофической оптической деградации, самосогласованно учитывающая лазерные и тепловые соотношения. Модель отличается от ранее известных моделей как полнотой рассмотренных физических механизмов, влияющих на разогрев приповерхностной области, так и учетом часто применяющихся на практике для увеличения порога КОД конструктивных особенностей мощных полупроводниковых лазеров: защитного покрытия выходной грани и токового ограничения вблизи нее.
5. Была разработана численная реализация модели, позволяющая эффективно производить расчеты как стационарной, так и временной задачи. С ее помощью были произведены расчеты ватт-амперных характеристик и зависимостей температуры передней грани от выходной мощности для базовых параметров. С помощью вариации параметров была проведена оценка влияния различных механизмов на процесс КОД:
  - Основной вклад в возникновение положительной обратной связи, приводящей к КОД, вносит уменьшение коэффициента теплопроводности с ростом температуры.
  - Различные механизмы, влияющие на развитие КОД, «включаются»

при следующих пороговых значениях параметров:

### **Приповерхностная безызлучательная рекомбинация**

Критическая мощность КОД начинает снижаться при коэффициенте поверхностной рекомбинации  $Q > 3 \times 10^4$  см/с.

### **Безызлучательная рекомбинация в объеме**

Критическая мощность КОД начинает снижаться для значений характеристической температуры  $T_{nr} < 100$  К.

### **Оптическое поглощение в обкладочных слоях**

Критическая мощность КОД начинает снижаться при уровне поглощения в обкладочных слоях  $\alpha^{cl} > 10$  см<sup>-1</sup> при разогреве на 400°C.

### **Теплоотвод защитным покрытием**

Увеличение толщины защитного покрытия перестает приводить к существенному возрастанию критической мощности КОД для толщины  $d_c > 1,5$  мкм.

- Токовое ограничение увеличивает критическую мощность КОД лишь незначительно (на величину порядка  $\sim 10\%$ ).

6. В зависимости от значений параметров модели максимальный разогрев внутри резонатора лазера составляет 250–500 °С. При этом область разогрева (по поперечной высоте поля температур) составляет  $1 \times 3 \times 1$  мкм по осям  $x$  (перпендикулярно слоям),  $y$  (в плоскости слоев перпендикулярно оси лазера) и  $z$  (вдоль оси лазера) соответственно.
7. Разогрев приповерхностной области до точки плавления происходит за время от  $\sim 15$  нс (для пятикратного превышения выходной мощности над порогом КОД непрерывного режима работы лазера) до  $\sim 25$  мкс (для десятипроцентного превышения). Скорость нарастания температуры вблизи точки плавления составляет при этом величину не менее  $\sim 50$  К/нс.
8. В рамках модели установлена связь между скоростью медленной деградации и величиной порога КОД через параметры деградировавшей об-

ласти  $\alpha_0^{deg}$  и  $z_0$ . Оценки показывают, что для скорости медленной деградации  $2 \times 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$  при  $P_{кр} = 850 \text{ мВт}$  (плотность потока  $S_{кр} = 6 \times 10^7 \text{ Вт/см}^2$ ) после наработки 500 ч значения этих параметров составляют  $\alpha_0^{deg} = 2 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$  и  $z_0 = 0,5 \text{ мкм}$ . После наработки 2000 ч в таких условиях критическая мощность составит не более  $P_{кр} \leq 560 \text{ мВт}$  ( $S_{кр} \leq 4 \times 10^7 \text{ Вт/см}^2$ )

**Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. Д. Р. Мифтахутдинов, Н. В. Дьячков, В. В. Поповичев, А. П. Некрасов, А. Е. Дракин, А. П. Богатов, «Оптическое разрушение выходного зеркала в мощных поперечно-одномодовых гребневых лазерах на основе AlGaAs-гетероструктур», *6-й Белорусско-Российский семинар «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе»*, Минск, 4–8 июня 2007, стр. 23–27
2. Д. Р. Мифтахутдинов, И. В. Акимова, А. П. Богатов, Т. И. Гущик, А. Е. Дракин, Н. В. Дьячков, В. В. Поповичев, А. П. Некрасов, «Излучательные характеристики гребневых лазеров при больших токах накачки», *Квантовая электроника*, **38**(11):993–1000 (2008)
3. Д. Р. Мифтахутдинов, А. П. Богатов, А. Е. Дракин, «Катастрофическая оптическая деградация (КОД) выходной грани мощных поперечно-одномодовых диодных лазеров. Часть I. Физическая модель», *Квантовая электроника*, **40**(7):583–588 (2010)
4. Д. Р. Мифтахутдинов, А. П. Богатов, А. Е. Дракин, «Катастрофическая оптическая деградация (КОД) выходной грани мощных поперечно-одномодовых диодных лазеров. Часть II. Расчет пространственного распределения температуры и порога КОД», *Квантовая электроника*, **40**(7): 589–595 (2010)