

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу И. М. Гаджиева «Пикосекундные гетеролазеры с поглощающими и дифракционными элементами», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности
1.3.11 – Физика полупроводников.

Диссертационная работа И. М. Гаджиева посвящена разработке и анализу характеристик пикосекундных полупроводниковых лазерных диодов различных конструкций. В настоящее время генерация пикосекундных и субпикосекундных лазерных импульсов является весьма важным направлением развития лазерной техники, связанным с многочисленными применениями таких приборов в медицине, химической промышленности, в лидарах, терагерцовой оптоэлектронике, спектрометрии и других областях. Традиционно генерация пикосекундных импульсов достигается с помощью лазеров на легированных оптических кристаллах в сочетании с достаточно громоздкой оптической схемой. Однако всё возрастающее требование компактности подобных источников света приводит к необходимости перехода к полупроводниковым лазерным диодам. Поскольку неизменным элементом пикосекундных лазеров является насыщающийся поглотитель, его интеграция с самим лазером на единой подложке и оптимизация конструкции пикосекундного лазера в целом представляет собой сложную научно-техническую задачу, до конца ещё не решённую. В связи с этим **актуальность** темы диссертационной работы И. М. Гаджиева не вызывает сомнения.

Научная новизна работы И. М. Гаджиева обусловлена следующими представленными в ней результатами:

- Теоретическим обоснованием и экспериментальной демонстрацией возможности использования нерезонансной дифракционной решётки для эффективного вывода излучения лазера и одновременно сверхнизкого паразитного отражения лазерной моды от секции дифракционного вывода света. Это, в частности, позволило сформировать базу для экспериментального получения пикосекундных лазерных импульсов с длиной волны, перестраиваемой в диапазоне более, чем 100 нм.
- Разработкой и оптимизацией нового метода создания распределённого насыщающегося поглотителя путём имплантации тяжёлых ионов через маску на эпитаксиальной поверхности лазерной гетероструктуры.
- Экспериментальной демонстрацией возможности генерации полупроводниковыми лазерными диодами сверхкоротких (1.3-4.0 пс) лазерных импульсов, приближающихся к границе субпикосекундной области.
- Теоретическим обоснованием и экспериментальной демонстрацией возможности существенного понижения обратного смещения на поглощающей секции лазера при использовании в качестве активной области туннельно-связанных квантовых ям.

С точки зрения **практической значимости** диссертационной работы И. М. Гаджиева, на мой взгляд, основным её достижением является комплексное изучение пикосекундных лазерных диодов самых различных конструкций как самой секции, генерирующей лазерные импульсы, включая эпитаксиальную структуру (с квантовыми ямами или квантовыми точками), так и секции насыщающегося поглотителя. В результате такого широкого охвата различных подходов к созданию пикосекундных лазеров становится возможным выбрать именно ту конструкцию, которая является оптимальной по критериям, вытекающим из конкретных областей применения таких приборов (ширина спектральной линии, длитель-

ность импульса, частота повторения, мощность излучения и т. д.). Такое исследование, выполненное в одной и той же лаборатории с помощью одних и тех же экспериментальных методик, представлено впервые.

Среди других **практически важных** результатов следует отметить следующие:

- Реализацию эффективного вывода света из лазеров с оптимизированной нерезонансной дифракционной решёткой, позволяющего получить малую расходимость пучка (в обоих ортогональных направлениях), пригодную для работы лазера со внешним резонатором, и апробацию этого подхода в компактной оптической схеме.
- Демонстрацию возможности получения в вышеуказанной схеме существенной перестройки длины волны лазерной генерации: более, чем на 100 нм вблизи длины волны 980 нм и более, чем на 50 нм вблизи длины волны 1510 нм.
- Разработку и обоснование методики оценки малых коэффициентов отражения от зеркал лазерного Фабри-Перо резонатора с использованием решений стационарных скоростных уравнений.
- Разработку и экспериментальную апробацию конструкций лазерных диодов на основе туннельно-связанных квантовых ям и квантовых точек для получения сверхкоротких (1.3-4.0 пс) лазерных импульсов.
- Экспериментальную демонстрацию пути создания пикосекундным лазерных импульсов в кольцевом волоконном резонаторе с лазерным диодом, работающим в режиме оптического усилителя.

Достоверность результатов, полученных И. М. Гаджиевым, подтверждается их хорошей воспроизводимостью, качественной согласованностью с экспериментальными данными, полученными в других исследовательских группах, использованием современных методов исследования и современного оборудования для проведения экспериментов, а также внутренней согласованностью результатов, полученных при использовании различных экспериментальных образцов и лазерных диодов с альтернативными конструкциями.

В качестве положительного аспекта хочется также отметить относительную сложность создания экспериментальной установки для характеристики пикосекундных лазеров и измерения их параметров, с которой И. М. Гаджиев с успехом справился.

Диссертационная работа И. М. Гаджиева, к сожалению, не свободна от недостатков.

1. Общая структура диссертационной работы не вполне удачна. Из-за обилия материала литературный обзор по теме диссертации оказался разбит по отдельным главам и не отделён явным образом от изложения оригинальных результатов, что затрудняет их восприятие. Кроме того, в диссертации достаточно много опечаток и необъяснённого «технического» жаргона, который в силу специфики темы диссертации может быть не всегда понятным её читателям.

2. В разделе 3.3 при оценке величины поперечного электрического поля в насыщающемся поглотителе используется модель однородного слоя, которая пренебрегает локализацией электронов и дырок в квантовых ямах. В результате этого оцениваемый фототок оказывается зависимым только от транспортных параметров типа дрейфовой скорости носителей. На самом деле, скорость разделения носителей электрическим полем при их локализации в квантовых ямах лимитируется туннельной прозрачностью треугольных барьеров, сформированных этим полем, различной для электронов и дырок, что является совершенно иным механизмом. Поэтому теоретическая оценка для электрического поля, приведённая в разделе 3.3 представляется не вполне корректной.

3. Рассматривая эффективность лазерных диодов, автор относит экспериментально оцениваемые оптические потери к поглощению света на свободных носителях. На самом деле, такое поглощение редко когда определяет величину потерь, так как доминирующим каналом потерь, как правило, является рассеяние лазерной моды на оптических неоднородностях – шероховатости границ полоска и флуктуациях показателя преломления. В этом плане было бы весьма полезно выявить и роль потерь света в зазоре между усиливающей секцией лазера и насыщающимся поглотителем.

В качестве пожелания для будущих исследований хотелось бы ещё отметить следующий момент. В разделе 4.5 автором обсуждается туннельная связь между двумя квантовыми ямами с узким разделяющим их барьером, а резонансный характер этой связи считается ответственным за пик поглощения на Рис.4.16, который исчезает в случае широких барьеров. Данный вывод делается на основе анализа поведения волновых функций носителей (предположительно электронов) при изменении приложенного электрического поля. В то же время, из-за разницы эффективных масс движения уровней размерного квантования с изменением поля и число этих уровней будет различным в случае электронов и дырок. В силу этого условия появления резонансного поведения также окажутся различными. Поэтому представляется весьма интересным проанализировать общие закономерности появления резонансного поглощения применительно к различным системам материалов, которые могут быть использованы для изготовления пикосекундных лазерных диодов. И, наконец, хотелось бы также понять как туннельная связь между ямами может повлиять на спектры и величину оптического усиления лазера.

Отмеченные недостатки никак не влияют на общее весьма положительное впечатление от диссертационной работы И. М. Гаджиева. Полученные им результаты прошли детальную апробацию на многочисленных отечественных и международных конференциях, а основные результаты опубликованы в 29 статьях в рецензируемых научных изданиях. Считаю, что диссертация И. М. Гаджиева соответствует требованиям положения о присуждении учёных степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Гаджиев Идрис Мирзехалович, вполне заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 «Физика полупроводников».

Ведущий инженер-физик
ООО «Софт-Импакт»

(С. Ю. Карпов)

10 января 2024 г.

Логин

И. Гаджиев

Софт-Импакт

С. Ю. Карпов

