

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Институт физики микроструктур РАН — филиал
Федерального государственного бюджетного учреждения
науки «Институт прикладной физики Российской
академии наук»,
ГСП-105, Нижний Новгород, Россия, 603950
Тел.: (831) 417-94-65 | Факс: (831) 417-94-64
director@ipmras.ru | <http://ipmras.ru/>

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института физики
микроструктур РАН, доктор
физико-математических наук,

_____ Новиков А. В.

«___» _____ 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации - Института физики микроструктур РАН — филиала
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт прикладной
физики Российской академии наук» - на диссертацию Соболевой Ольги Сергеевны» на
тему: «Мощные полупроводниковые низковольтные лазер-тиристоры на основе
гетероструктур AlGaAs/GaAs», представленную на соискание ученой степени кандидата
физико- математических наук по специальности 1.3.11 - Физика полупроводников

Диссертационная работа Соболевой О. С. посвящена разработке подходов для
моделирования физических процессов в AlGaAs гетероструктурах низковольтных лазер-
тиристоров с InGaAs квантовой ямой, позволяющих генерировать оптические импульсы
длительностью десятки наносекунд, пиковой мощностью в десятки ватт в диапазоне длин
волн 850-910 нм.

Актуальность диссертационной работы.

В работе Соболевой О.С. объектом исследования является полупроводниковый
прибор - лазер-тиристор. Создание данного прибора представляет собой один из способов в
генерации мощных (десятки ватт) лазерных импульсов (длительностью в десятки
наносекунд) в полупроводниковых AlGaAs/GaAs структурах за счет интегрированных на
эпитаксиальном уровне лазерного диода и фототранзистора. При таком подходе не нужно
использовать внешние импульсные источники тока, которые снижают экономичность и
эффективность конечных приборов на основе полупроводниковых лазеров, а также требуют
согласования нелинейной нагрузки в виде лазерного диода, также существенным
ограничением использования таких источников являются паразитные индуктивные связи
(превышающие таковые в лазер-тиристорах). Диссертационная работа сосредоточена на
моделировании физических процессов, определяющих работу данного типа приборов и, в
конечном итоге, с практической точки зрения — на оптимизации конструкции
гетероструктуры лазер-тиристора, а также экспериментальные исследования его

мощностных импульсных характеристик.

Решаемые в диссертационной работе Соболевой О.С. задачи по разработке подходов для моделирования физических процессов в AlGaAs гетероструктурах низковольтных лазер-тиристоров с InGaAs квантовой ямой и по оптимизации структуры лазер-тиристора, являются актуальными и востребованными в современной физике полупроводников.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, подтверждается примененными автором подходами к решению задач исследования, заключающимися в экспериментальном и теоретическом анализе исследуемой проблемы стандартными методами, использовании общепризнанных физических моделей для описания транспорта носителей в лазер-тиристоре и обоснования внесенных в модель дополнений, отвечающих за особенности работы лазер-тиристора, которые основаны в том числе на экспериментальных исследованиях оптической обратной связи. Надежность моделирования также обеспечивается применением обоснованным выбором параметров моделирования, описывающих свойства материалов. Приведены ссылки на источники, по которым определялись значения параметров. В работе приведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными исследованиями динамических оптических характеристик лазер-тиристора, получено хорошее качественное совпадение по форме оптических импульсов, а также хорошее количественное совпадение для более высоких рабочих напряжений. Автор объясняет количественные расхождения принципиальными ограничениями рассматриваемой одномерной модели.

Структурно диссертация состоит из введения, анализа литературы, 4 глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы и списка публикаций по теме исследования. Общий объем диссертации составляет 143 страницы, включая 71 рисунок, 2 таблицы, 87 литературных источников.

Во введении перечислены сформулированные положения, описаны и обоснованы цели и задачи работы, представлены основные научные и практические результаты.

В главе «Анализ литературы» проведен подробный анализ литературы по теме диссертации - различным подходам в генерации оптических импульсов в структурах транзисторного и тиристорного типа.

В первой главе приведено подробное описание модели лазер-тиристора. Приведены формулы, необходимые для понимания основных принципов работы лазер-тиристора и его оптимизации.

Во второй главе приведены результаты экспериментального исследования оптической обратной связи в лазер-тиристорах, заменяющей в данном приборе классическую для тиристоров электрическую обратную связь. Данные результаты

использовались в дальнейшем в модели лазер-тиристора.

Третья глава посвящена моделированию электрооптических характеристик лазер-тиристора: статических и динамических. Последние включают в себя оптимизацию гетероструктуры лазер-тиристора и исследование влияния повышенного уровня эффективности оптической обратной связи на динамику электрических характеристик. Показано, что форма распределения электрического поля в области объемного заряда при включении лазер-тиристора существенным образом влияет на форму переднего фронта импульса тока и оптической мощности. Показано, что оптимальной структурой для генерации импульсов высокой мощности в широком диапазоне рабочих напряжений и одновременно наиболее простой в технологическом исполнении является гетероструктура лазер-тиристора с широкой низколегированной р-базой, при этом область объемного заряда полностью расположена в базе, база легированная однородно и имеет относительно низкую концентрацию легирующей примеси.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований оптических динамических характеристик лазер-тиристора.

В заключении диссертации подробно перечислены основные результаты работы.

Все основные результаты проведенных автором исследований, представленные в диссертационной работе, опубликованы в 7 научных работах, из них 3 работы, опубликованы по материалам докладов конференций. Все работы опубликованы в журналах, индексируемых в международных научных базах (Scopus, Web of Science) и ВАК. Результаты работы представлялись на 3 российских и международных научных конференциях по тематике исследования.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Результаты работы могут найти свое применение при моделировании, конструировании, оптимизации и изготовлении мощных полупроводниковых лазер-тиристоров на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs, а также могут быть интересны при исследовании и разработке конструкций гетероструктур лазер-тиристоров в других системах твердых растворов, при исследовании мощных транзисторных структур, в основе работы которых лежит ударная ионизация. Среди всех представленных результатов можно выделить следующие наиболее ценные:

1. Разработана модель лазер-тиристора, представляющая прибор как оптопару лазерный диод - фототранзистор, и позволяющая описывать электрические динамические характеристики прибора. Данная модель позволяет описывать различные типы конструкций лазер-тиристора, отличающиеся профилями легирования и формированием области объемного заряда.

2. Экспериментально показано, что перекрытие спектров спонтанного

излучения (активной области лазерной части прибора) и поглощения (базы фототранзисторной части) влияет на характеристики прибора, а именно приводит к снижению задержки включения и необходимой энергии малосигнального импульса управления.

3. Показано, что максимальная эффективность работы лазер-тиристора, а именно получение максимальных амплитуд тока, которые способна коммутировать структура во включенном состоянии, зависит от остаточного напряжения. Последнее, в свою очередь, определяется скоростью генерации носителей заряда в базе фототранзисторной части прибора за счет ударной ионизации и фотогенерации.

4. В результате оптимизации гетероструктуры лазер-тиристора показано, какой тип структуры позволяет получить эффективное включение в широком диапазоне рабочих напряжений обладая при этом простотой в технологическом исполнении.

5. Показано, что форма напряженности электрического поля и его перераспределение значительно влияют на форму переднего фронта импульса тока при включении лазер-тиристора.

6. В экспериментальных исследованиях получены выходные пиковые оптические мощности 55/8 Вт при длительностях импульса 100/10 нс на полувысоте.

7. Продемонстрировано хорошее качественное совпадение результатов моделирования и экспериментальных данных, и хорошее количественное соответствие в области высоких рабочих напряжений. Расхождение количественных результатов объясняется ограничениями модели - ее одномерностью.

Рекомендации для использования результатов и выводов диссертационной работы.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при разработке и оптимизации конструкций гетероструктур лазер-тиристора, что позволит улучшить мощностные характеристики и энергоэффективность подобного типа приборов, разрабатываемые в научно-исследовательских организациях: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Институт физики микроструктур РАН, Университет ИТМО, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Академический университет им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха, Новосибирский государственный технический университет и др.

По материалам диссертационной работы имеются вопросы и замечания:

1. В пункте «Практическая значимость» приводятся значение максимальной мощности, достигнутой в рассматриваемом лазере-тиристоре, однако не приводятся

значения длины и ширины лазерного резонатора. Общеизвестно, что мощность лазера сильно зависит от этих характеристик.

2. Из литературных данных известно, что мощности и КПД полупроводниковых лазеров данного диапазона длин волн значительно превышают аналогичные характеристики лазера-тиристора. Однако более корректно учесть общее КПД мощного лазера и внешнего импульсного источника тока. Было бы полезно сравнить КПД предложенного лазера-тиристора с КПД традиционного мощного лазера в связке с источником тока.

Вышеуказанные замечания не снижают общую высокую оценку диссертации. Результаты работы обладают научной и практической ценностью, обоснованы и достоверны. Все основные результаты работы опубликованы в отечественной и зарубежной печати в профильных журналах, докладывались на ведущих всероссийских и международных конференциях и знакомы специалистам, занимающимся физикой полупроводников. В работе виден решающий вклад автора в полученные результаты.

Общая оценка диссертационной работы.

Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, связанную с исследованием причин ограничения выходной оптической мощности в мощных полупроводниковых лазерах и представляющую в настоящее время как научный, так и практический интерес. Автором применены надежные методы моделирования и экспериментального исследования, обобщены результаты всех проведенных исследований, четко сформулированы и обоснованы основные научные выводы диссертационной работы.

Заключение.

Диссертационная работа Соболевой Ольги Сергеевны на тему: «Мощные полупроводниковые низковольтные лазер-тиристоры на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 - физика полупроводников, является законченной научно-квалификационной работой и представляет собой целостное и самостоятельное исследование, выполненное по актуальной тематике на высоком научном уровне. Автореферат диссертации правильно и полно отражает основное содержание диссертационной работы.

Работа соответствует специальности 1.3.11 физика полупроводников и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а соискатель, Соболева Ольга Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-

математических наук.

Диссертационная работа О.С. Соболевой была рассмотрена и обсуждалась на семинаре Института физики микроструктур РАН — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт прикладной физики Российской академии наук».

Настоящий отзыв рассмотрен и принят на заседании семинара по физике полупроводников Института физики микроструктур РАН 13 сентября 2022 г. На заседании присутствовали 53 человека.

Председатель семинара по физике
полупроводников Института физики
микроструктур РАН, _____ Красильник З.Ф.
д.ф.-м.н., член-корр. РАН, профессор
Секретарь семинара по физике
полупроводников Института физики _____ Красильникова Л.В.
микроструктур РАН, к.ф.-м.н.
Отзыв составил:
Старший научный сотрудник Института _____ Дубинов А.А.
физики микроструктур РАН, к.ф.-м.н.

Сведения о составителе отзыва:

Дубинов Александр Алексеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела 811О Института физики микроструктур РАН, e-mail: sanya@ipmras.ru, тел. (831) 417-94-82 (+234)