

на правах рукописи

Соболева Ольга Сергеевна

**Мощные полупроводниковые низковольтные лазер-тиристоры на основе
гетероструктур AlGaAs/GaAs**

1.3.11 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель:

Слипченко Сергей Олегович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаб. «Полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей» ФГБУН ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

Официальные оппоненты:

Фирсов Дмитрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы, заведующий кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург

Василевский Иван Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике, доцент НИЯУ МИФИ, Москва

Ведущая организация:

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт прикладной физики Российской академии наук», Нижний Новгород

Защита состоится _____ 2022 г. в “__” часов на заседании совета 34.01.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу:

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Автореферат разослан “__” _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 34.01.02

доктор физико-математических наук

Л.М. Сорокин

Актуальность темы

Задача генерации лазерных импульсов длительностью десятки наносекунд в диапазоне мощностей в несколько десятков ватт в инфракрасном диапазоне часто решается с помощью полупроводниковых лазеров. Лазерные диоды имеют ряд неоспоримых преимуществ, в том числе немаловажную роль играет их более низкая стоимость, компактные размеры и высокая эффективность. Кроме того, для многих практических приложений принципиально важно использование мощных источников лазерного излучения, к примеру, разработка различных лидарных комплексов, нелинейное преобразование частоты, прецизионная дальнометрия, передача информации в свободном пространстве, обработка металлов. Одной из перспективных областей применения являются лидарные комплексы для беспилотных транспортных средств.

Классическим способом генерации мощных оптических импульсов в полупроводниковых лазерах является накачка внешним импульсным источником тока высокой мощности [1-4]. Для получения импульсов тока высокой амплитуды (в десятки ампер) и длительностью десятки наносекунд необходимы генераторы, обеспечивающие согласование нелинейной нагрузки в виде полупроводникового лазера. Существенным ограничением использования таких источников являются паразитные индуктивные связи [5]. Такие приборы довольно дороги и значительно увеличивают габариты конечного источника. Данные факторы снижают экономичность и эффективность полупроводниковых лазеров при переходе к высоким мощностям (десятки ватт в импульсном режиме).

Одним из решений указанных проблем может быть интеграция функций мощного тиристорного токового ключа и мощного лазерного излучателя в одной гетероструктуре лазер-тиристора (на основе системы материалов GaAs/AlGaAs/InGaAs) [6]. В такой реализации значительно снижаются паразитные индукционные потери, и в то же время не требуется использование внешних импульсных источников питания высокой мощности. Таким образом, снижается стоимость конечных приборов на основе лазерных диодов, при повышении их энергоэффективности и уменьшении габаритов.

Разработка нового типа приборов не возможна без понимания основных физических процессов, определяющих их выходные характеристики, а процесс роста гетероструктур и изготовления экспериментальных образцов является достаточно дорогим и трудоемким. Таким образом, крайне актуальной становится задача построения модели лазер-тиристора и моделирования его статических и динамических электрооптических характеристик. Это в свою очередь позволит найти наиболее оптимальную конструкцию гетероструктуры низковольтного лазер-тиристора для решения задачи генерации лазерных импульсов

длительностью десятки наносекунд в диапазоне мощностей в десятки ватт в спектральном диапазоне 850-910 нм.

Цель работы

Основная цель заключалась в 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.

Задачи

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

I. Разработка одномерной модели низковольтного лазер-тиристора на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs с InGaAs квантовой ямой, учитывающей ударную ионизацию, эффекты транспорта носителей заряда в сильных электрических полях, а также экспериментальные зависимости эффективности оптической обратной связи от внешних условий и режимов работы прибора.

II. Проведение теоретического анализа с использованием разработанной модели, интерпретирующего влияние параметров гетероструктуры лазер-тиристора на динамику лазерных и токовых импульсов. Исследование влияния основных физических процессов (ударная ионизация, оптическая обратная связь), на условия формирования быстрого фронта включения лазер-тиристора.

III Оптимизация AlGaAs/GaAs гетероструктуры с InGaAs квантовой ямой низковольтного лазер-тиристора с помощью разработанной модели для решения задачи генерации мощных лазерных импульсов длительностью десятки наносекунд и пиковой мощностью десятки ватт.

IV. Проведение экспериментальных исследований статических и динамических электрооптических характеристик низковольтных AlGaAs/GaAs лазер-тиристоров с InGaAs квантовой ямой, таких как: пиковая оптическая мощность, максимальное блокирующее напряжение, амплитуда тока, длительность токовых и оптических импульсов, длительности фронтов нарастания тока и оптической мощности в импульсах.

Научная новизна

1. Показано, что динамика электрических и оптических характеристик мощных лазер-тиристоров может быть описана в рамках разработанной модели, где прибор представлен как оптопара лазерный диод-фототранзистор. В модели отсутствует сквозная инжекция носителей заряда из лазерной части в базу фототранзистора, что связано с отдельным ограничением в конструкции лазерной части, а обратная связь реализуется за счет

фотогенерации в коллекторной и базовой области фототранзистора и тока коллектора, который накачивает лазерную часть.

2. Показано, что динамика электрических и оптических характеристик, а также пиковое значение выходной оптической мощности лазер-тиристоров определяются как эффективностью лазерной части гетероструктуры, связанной с внутренним квантовым выходом и оптическими потерями, так и конструкцией фототранзисторной части, которая определяет параметры процессов генерации и рекомбинации избыточных носителей заряда в базовой области. При этом основными процессами генерации избыточных носителей заряда в базовой области являются фотогенерация, связанная с поглощением части спонтанного излучения InGaAs квантовой ямы лазерной части в коллекторной и базовой области, и, ударная ионизация в области домена электрического поля, сформированного в области коллекторного p-n перехода фототранзистора.

3. Показано, что минимальное остаточное напряжение лазер-тиристоров во включенном состоянии обеспечивается наличием оптической обратной связи, реализуемой за счет поглощения части спонтанного излучения InGaAs квантовой ямы лазерной части прибора. При этом включение лазер-тиристора может быть реализовано за счет накачки только лазерной части импульсом тока амплитудой меньше порогового тока лазерной генерации

4. Продемонстрировано, что скорость перехода лазер-тиристора во включенное состояние и форма переднего фронта импульса тока не зависит от формы и амплитуды малосигнального импульса управления и определяется пространственным распределением и амплитудой напряженности электрического поля в области объемного заряда коллекторного p-n перехода во время включения лазер-тиристора.

Практическая значимость

С использованием разработанных моделей выполнено детальное численное исследование работы мощных низковольтных лазер-тиристоров и получено хорошее соответствие динамики тока и напряжения лазер-тиристора с экспериментальными данными. Проведен теоретический анализ, интерпретирующий влияние параметров гетероструктуры лазер-тиристора на динамические и мощностные характеристики генерируемых лазерных импульсов.

Проведена оптимизация гетероструктур мощных полупроводниковых лазер-тиристоров, позволяющая улучшить выходные электрооптические характеристики. Показано, что наибольшие скорости перехода из блокирующего состояния во включенное реализуются в конструкциях с n-p-n гетерофототранзистором, имеющего оптическую обратную связь с лазерной частью прибора, для которой спектр спонтанного излучения

перекрывается со спектром поглощения базы гетерофототранзистора. Показано, что для лазер-тиристоров, излучающих на длине волны 900 нм, оптическая обратная связь может быть усилена за счет использования активной области на основе InGaAs квантовой ямы, расположенной в GaAs спейсерах, а также конструкции гетерофототранзистора с p-GaAs базой и n-AlGaAs коллектором.

Показано, что профили легирования коллекторной и базовой областей n-p-n гетерофототранзистора определяют динамику переходных процессов. Использование слаболегированных областей коллектора приводит к повышению максимального блокирующего напряжения. Однако, при включении с напряжений питания меньших, чем максимальное значение, наблюдается увеличение времени переходного процесса, которое сопровождается увеличением длительности импульса, снижением амплитуд пикового тока и пиковой мощности лазерных импульсов.

Показано, что для лазер-тиристоров максимальные пиковые оптические мощности лазерного излучения, а также скорости электрических и оптических переходных процессов достигаются в структурах с оптической обратной связью и конструкцией гетерофототранзистора, включающей слаболегированную p-базу (концентрация примеси p-типа менее 10^{16} см^{-3}) и сильнолегированный коллектор (концентрация примеси n-типа более 10^{17} см^{-3}).

Экспериментально показано, что использование лазер-тиристора, на основе гетероструктуры, включающей часть гетерофототранзистора n-AlGaAs/p-GaAs/n-AlGaAs и лазерную часть на основе GaAs/AlGaAs гетероструктуры с InGaAs квантовой ямой, обеспечивает максимальное блокирующее напряжение до 25 В, при концентрации p-типа в GaAs-базе 10^{16} см^{-3} . В предложенной конструкции лазер-тиристора реализована генерация лазерных импульсов с пиковой мощностью 55 Вт при длительности импульса порядка 100 нс на полувысоте и 8 Вт при длительности импульса 10 нс на длине волны 900 нм, при управляемом включении импульсами тока амплитудой от 0.1 мА.

Достоверность результатов

Достоверность полученных в работе экспериментальных результатов подтверждается воспроизводимостью результатов по измерению пиковой оптической мощности, а также исследований спектров поглощения и спонтанного излучения; проведением экспериментальных исследований в одинаковых условиях. Измеренные спектры поглощения хорошо согласуются с данными литературных источников. Для верификации модели было проведено сопоставление модельных электрических динамических характеристик лазер-тиристора с экспериментальными результатами, которое показало хорошее соответствие результатов моделирования экспериментальным данным.

Представляемые к защите научные положения

1. Электрооптические динамические характеристики мощных низковольтных GaAs/AlGaAs лазер-тиристоров могут быть описаны моделью, рассматривающей прибор как оптопару: лазерный диод – фототранзистор. В модели отсутствует сквозная инжекция носителей заряда из лазерной в транзисторную часть, а обратная связь реализуется за счет поглощения спонтанного излучения InGaAs активной области лазерной части в допороговом режиме, приводящего к появлению критической концентрации неравновесных носителей заряда в базе фототранзистора.

2. Пиковое значение выходной оптической мощности лазер-тиристора с лазерной частью на основе двойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs с отдельным ограничением носителей заряда, расположенной со стороны анодного контакта, определяется максимальным током, который способна коммутировать структура во включенном состоянии, причем его величина зависит от остаточного напряжения во включенном состоянии, определяемого скоростью генерации неравновесных носителей заряда в базе фототранзистора, как за счет фотогенерации, так и ударной ионизации.

3. Форма переднего фронта импульсов тока и оптической мощности низковольтного лазер-тиристора при переходе из блокирующего состояния во включенное определяется изменением пространственного распределения и амплитуды электрического поля в области объемного заряда коллекторного p-n перехода лазер-тиристора.

4. Снижение времени задержки включения и энергии импульса тока управления мощных лазер-тиристоров на основе GaAs/AlGaAs низковольтных гетероструктур достигаются посредством увеличения интеграла перекрытия спектров спонтанного излучения активной области лазерной части и поглощения p-базы фототранзистора.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на конференциях: XIV Российская конференция по физике полупроводников, санаторий «Сосновка», Новосибирск, Российская Федерация, 9-13 сентября 2019 г.; International Conference Laser Optics, St. Petersburg; Russian Federation: (27 June - 1 July 2016), (4 - 8 June, 2018); Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXIV, (March 4, 2016), San Francisco, California, United States; на 5-ый и 6-ой Российском симпозиуме с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология» (Санкт-Петербург, Российская Федерация) - (15–18 ноября 2016 г.), (13 – 16 ноября 2018г.); на Международной Зимней Школе по физике полупроводников (Зеленогорск, Российская Федерация) в 2017, 2018 и 2019 годах.

Личный вклад

Соискатель принимала непосредственное участие в разработке динамической модели низковольтных лазер-тиристоров, проведении численного моделирования электрооптических характеристик низковольтных лазер-тиристоров на основе различных конструкций гетероструктур AlGaAs/GaAs с InGaAs квантовой ямой, а также анализе полученных результатов.

Соискателем были проведены экспериментальные исследования оптической обратной связи, а также статических и динамических электрооптических характеристик экспериментальных образцов низковольтных лазер-тиристоров на основе оптимизированной AlGaAs/GaAs гетероструктуры с InGaAs квантовой ямой, излучающей на длине волны 900 нм.

Соискатель принимала участие в апробации работ на конференциях, семинарах и подготовке результатов исследований к публикациям. Постановка задач и целей работы осуществлялась совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа имеет общий объем в 143 страницы, содержит 71 рисунок, 2 таблицы и 87 литературных источников.

Краткое содержание работы

Во введении описана актуальность темы диссертации, приведены основные цели проводимого исследования и показана его научная новизна и практическая ценность.

В разделе «Анализ литературы» приведен обзор и анализ литературных источников, посвященных разработке и созданию транзисторных и тиристорных гетероструктур на основе GaAs/AlGaAs с возможностью генерации спонтанного или вынужденного излучения, в том числе лазер-транзисторов и лазер-тиристоров. Первая часть посвящена истории создания первых транзисторных структур на основе полупроводниковых гетероструктур, показана важность создания первых стабильных гетероструктур GaAs/AlGaAs Ж.И. Алферовым и его группой. Во второй части приведен обзор литературных источников, где рассматриваются различные конструкции транзисторного или тиристорного типа с оптической связью, а также с возможностью генерировать спонтанное или вынужденное излучение. В третьей части приведен анализ литературы по тематике диссертации, а также некоторые из наиболее новых работ, где представлены различные конструкции лазер-транзисторов и лазер-тиристоров низкой мощности. Анализ литературы показал, что все известные исследования по тематике лазер-тиристоров связаны с разработкой маломощных источников, при этом отсутствуют какие-либо работы, посвященные созданию и исследованию мощных источников импульсного

лазерного излучения на основе низковольтных гетероструктур GaAs/AlGaAs лазер-тиристоров.

В первой главе приведено описание модели основных физических процессов, протекающих в гетероструктуре лазер-тиристора. На рис. 1 схематически представлена структура лазер-тиристора, которую можно условно разделить на две части – лазерный диод и фототранзистор. В данной структуре лазерная часть расположена со стороны анодного контакта, а фототранзисторная n-p-n часть расположена со стороны катодного контакта. Таким образом транспорт в структуре происходит за счет тока электронов в области фототранзистора, что более эффективно благодаря более высокой подвижности электронов относительно дырок. Особенностью прибора является его способность находится в двух стабильных состояниях – выключенном, с высоким сопротивлением, и включенном, с низким сопротивлением. Во включенном состоянии через лазер-тиристор протекает ток и генерируется лазерное излучение с пиковой мощностью в десятки ватт. Для перевода лазер-тиристора во включенное состояние достаточно подачи импульса управления с амплитудой в единицы миллиампер. Таким образом, для генерации лазерного излучения нет необходимости в использовании внешних импульсных источников высокой мощности, в отличие от классических подходов к накачке мощных лазерных диодов. В то же время лазер-тиристор отличается от традиционных тиристоров, т.к. в нем отсутствует электрическая обратная связь, которую заменяет оптическая обратная связь (ООС). ООС возникает при поглощении части спонтанного излучения лазерного диода, через который протекает ток управления, в базе лазер-тиристора. За счет фотогенерации в базе лазер-тиристора накапливаются неравновесные дырки, и при накоплении их критической концентрации происходит переход прибора во включенное состояние.

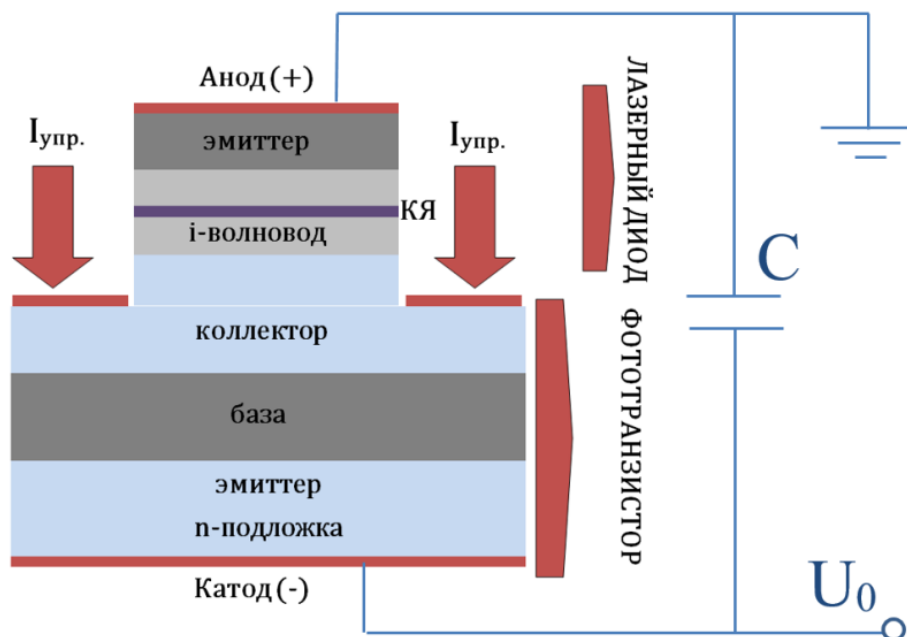


Рисунок 1 – Схематическое изображение лазер-тиристора

Представленная одномерная модель основана на дрейф-диффузионном транспорте электронов и дырок, учитываются эффекты транспорта носителей в сильных электрических полях, возникающих в области коллекторного перехода лазер-тиристора, а также ударная ионизация и отрицательная дифференциальная подвижность электронов в GaAs и OOC в лазер-тиристор. Результатом решения заданной системы дифференциальных уравнений является динамика тока и напряжения в структуре лазер-тиристора, а также распределения концентраций носителей, токов и напряженности электрического поля в исследуемой гетероструктуре в различные моменты времени. Модель сосредоточена на описании процессов транспорта носителей в фототранзисторной части структуры лазер-тиристора, однако в данной главе приведена простая система скоростных уравнений для лазерной части прибора, с помощью которой можно получить оптическую выходную мощность прибора. Более подробно модель лазер-тиристора описана в работах [1А], [2А].

Во второй главе подробно рассматривается оптическая обратная связь, приведены результаты экспериментальных исследований по оценке эффективности оптической обратной связи. Эффективность оптической обратной связи показывает, какая доля спонтанного излучения из активной области лазерного диода поглощается в базе лазер-тиристора. В результате эксперимента получены спектры и интенсивность спонтанного излучения лазерного диода при различных токах накачки, продемонстрировано увеличение интенсивности спонтанного излучения в запороговом режиме лазерного

диода, а также смещение спектра спонтанного излучения в коротковолновую область (из-за конструкции активной области исследуемой лазерной структуры). Измерены длинноволновые края спектров поглощения базы лазер-тиристора при различных напряжениях на структуре, показано смещение спектра поглощения в длинноволновую область с ростом напряжения на структуре. Полученная в эксперименте полезная доля спонтанного излучения из активной области лазерного диода использовалась при построении модели лазер-тиристора. На основе экспериментальных исследований оптической обратной связи в лазер-тиристорах, описанных в главе 2, опубликованы следующие работы: [3А], [4А].

В третьей главе приведены основные теоретические результаты работы, полученные в разработанной модели лазер-тиристора, где прибор представлен как оптопара лазерный диод-фототранзистор, и, учитывающей отсутствие стандартной для тиристорov электрической обратной связи, наличие оптической обратной связи, дрейф-диффузионный транспорт, ударную ионизацию, насыщение скорость дрейфа в сильных электрических полях, лазерную генерацию. Глава включает три части: первая – посвящена анализу статических характеристик низковольтных лазер-тиристорov, во второй части, в трех параграфах, представлены теоретические исследования динамических характеристик трех типов конструкций AlGaAs/GaAs гетероструктур низковольтных лазер-тиристорov с InGaAs квантовой ямой, а третья часть описывает влияние ударной ионизации и оптической обратной связи на характеристики прибора.

В первой части рассмотрены результаты статического моделирования, показана зависимость максимального блокирующего напряжения структуры от толщины низколегированной области базы (именно в низколегированной области в лазер-тиристоре, как и в классических транзисторных и тиристорных структурах, падает внешнее напряжение питания) и степени ее легирования (рис. 2). Найдены оптимальные толщины низколегированной базовой области в зависимости от ее легирования, обеспечивающие максимальное блокирующее напряжение при минимальной толщине. Также рассмотрены конструкции базовой области с составным легированием, показано, что внесение в области базы со стороны эмиттера тонкого p_+ слоя позволяет достичь больших блокирующих напряжений при меньшей толщине базы, в сравнении с однородно-легированной базой (рис. 2). Здесь, и в дальнейшем p_+ предполагает легирование на уровне $10^{17} - 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а p_+ порядка $10^{15} - 3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

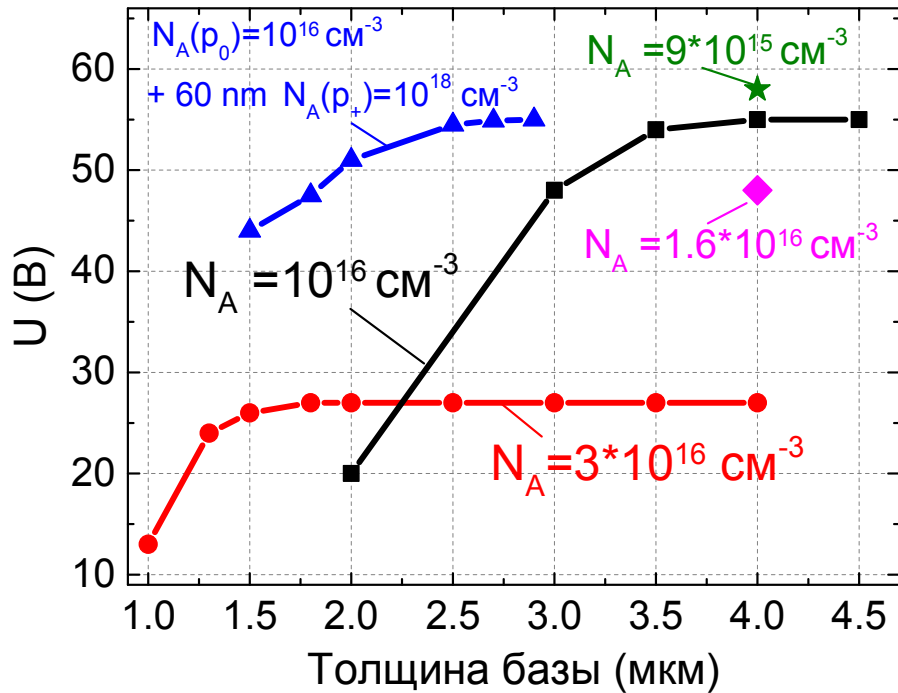


Рисунок 2 – Зависимость максимального блокирующего напряжения от толщины базы для гетероструктур лазер-тиристора с различным профилем легирования базы

Вторая часть посвящена анализу результатов моделирования динамики электрических характеристик для различных типов конструкций гетероструктуры лазер-тиристора и разбита на несколько параграфов.

Исследуемые гетероструктуры лазер-тиристора были разделены на три типа, по положению слаболегированных ($N_A = 10^{15} - 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) слоев, формирующих ООЗ (область объемного заряда): в первом случае ООЗ была расположена в р-базе, во втором – в р-базе и в п-коллекторе, и в третьем – в п-коллекторе. Каждый тип структур характеризуется своими особенностями динамики тока и напряжения при включении лазер-тиристора и физическими процессами, определяющими эту динамику. В общем случае толщина и легирование низколегированных слоев, где расположена основная часть ООЗ определяют максимальное блокирующее напряжение в структуре.

В первом параграфе рассмотрены структуры с ООЗ, сформированной в р-базе наиболее оптимальными конструкциями являются структуры с однородно-легированной базой толщиной 4 мкм и с $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ или же с составной р+/р₀ базой, состоящей из низколегированной р₀ ($N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) части толщиной 1.8 – 2.5 мкм, и р+ части, расположенной со стороны эмиттера, толщиной ~0.05 мкм ($N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). При этом, интересной является структура с составной базой, которая демонстрирует более высокие скорости перехода во включенное состояние при относительно невысоких напряжениях

питания (напряжение питания лазер-тиристора в данном случае составляет ~ 20 В при максимальных блокирующих напряжениях данных структур ~ 50 В) и более низкие остаточные напряжения (рис. 3). Добавление высоколегированного p_+ слоя обеспечивает уменьшение объема области накопления неравновесных дырок (p_0 слоя) при сохранении максимального блокирующего напряжения, что снижает омическое сопротивление структуры и способствует более быстрому накоплению критической концентрации неравновесных дырок и, следовательно, более быстрому переходу во включенное состояние. Важной особенностью данного типа структур (при относительно невысоких напряжениях питания ~ 20 В) является обеспечение высокой скорости переходных процессов при преобладании фотогенерации, а не ударной ионизации, как в структурах с однородно-легированной базой большей толщины. В то же время, структура с однородно легированной базой толщиной 4 мкм более проста с технологической точки зрения, и также показывает достаточно высокую эффективность в широком диапазоне напряжений питания.

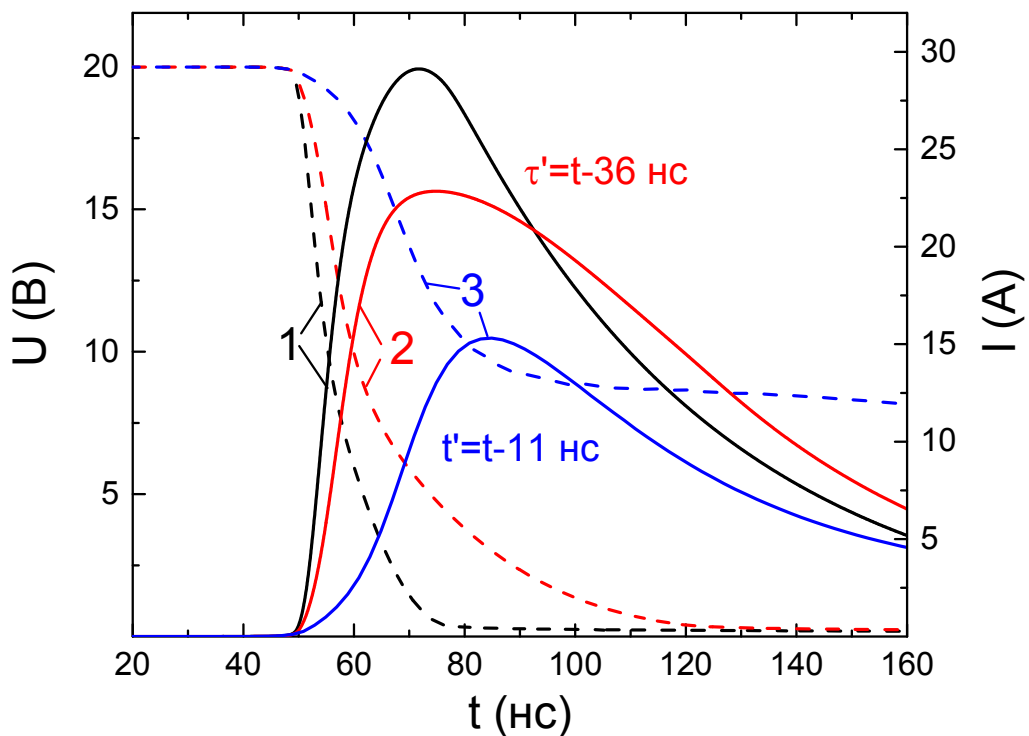


Рисунок 3 – Динамика тока и напряжения при включении лазер-тиристоров с различными профилями легирования и толщинами базовой области: 1) база с GaAs p_+ слоем толщиной 0.05 мкм со стороны эмиттера и p_0 GaAs слоем толщиной 1.8 мкм; 2) база с GaAs p_+ слоем толщиной 0.05 мкм со стороны эмиттера и p_0 GaAs слоем толщиной 2.5 мкм; 3) однородно легированная GaAs p_0 база толщиной 4. Для p_+ слоев $N_A = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, для p_0 слоев $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Для каждой структуры отдельно указана задержка включения (τ) относительно динамики включения структуры 1 типа

Во втором параграфе рассмотрены гетероструктуры лазер-тиристора с ООЗ, сформированной в базе и коллекторе. Преимуществом данного типа структур являются высокие максимальные блокирующие напряжения до 72 – 110 В в зависимости от легирования базы и коллектора, при этом максимальные напряжения достигаются при более низких уровнях легирования: $N_A=N_D=10^{15}$ см⁻³. Структуры данного типа характеризуются особенностями динамики тока и напряжения, которые наиболее ярко выражены при толщинах низколегированного коллектора 2 мкм и более и при напряжениях питания значительно ниже максимального. Особенности динамики тока и напряжения проявляются в виде наличия «полки» или участков с более медленными переходными процессами на динамике тока и напряжения, а также присутствия на динамике напряжения локальных минимумов (рис. 4а). Данные особенности объясняется перераспределением напряженности электрического поля, в ходе которого происходит снижение максимальной напряженности поля и, следовательно, интенсивности ударной ионизации и скорости генерации неравновесных носителей. Также, при включении лазер-тиристора при напряжении питания, значительно ниже блокирующего напряжения может наблюдаться медленное включение на начальном этапе из-за низкой напряженности поля в структуре, и переход к более быстрому включению при формировании домена. Для эффективного включения гетероструктур данного типа напряжение питания U_0 должно быть близко к максимальному блокирующему напряжению, при этом ширина низколегированной части коллектора не должна превышать 2 мкм. Наибольший интерес структуры лазер-тиристора с ООЗ в базе и коллекторе типа $N_+/p_+/p_0/n_0/N_+$ с внесением тонкого p_+ слоя в базу со стороны эмиттера) представляют для генерации наносекундных лазерных импульсов высокой мощности. В структурах данного типа была продемонстрирована возможность генерации импульсов тока с амплитудой в десятки ампер при длительности менее 10 нс по основанию (110 А при длительности 8 нс и 20 А при 2 нс) – рис. 4б.

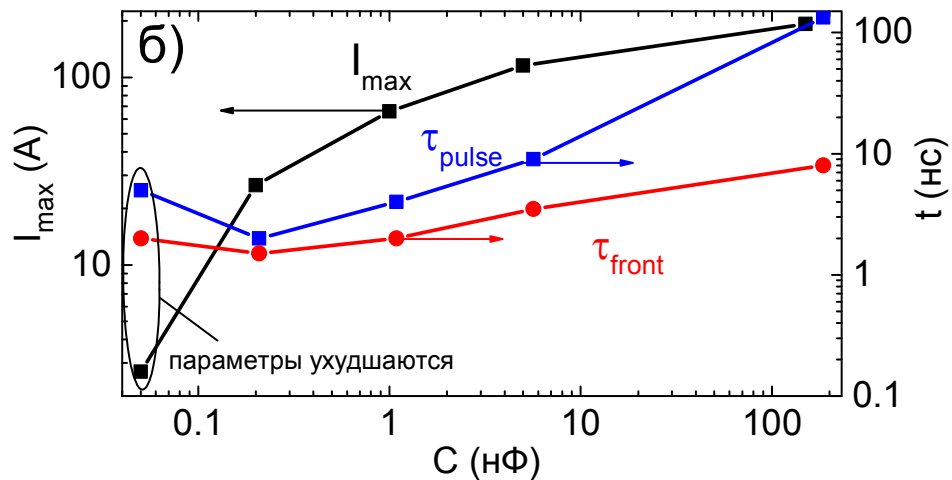
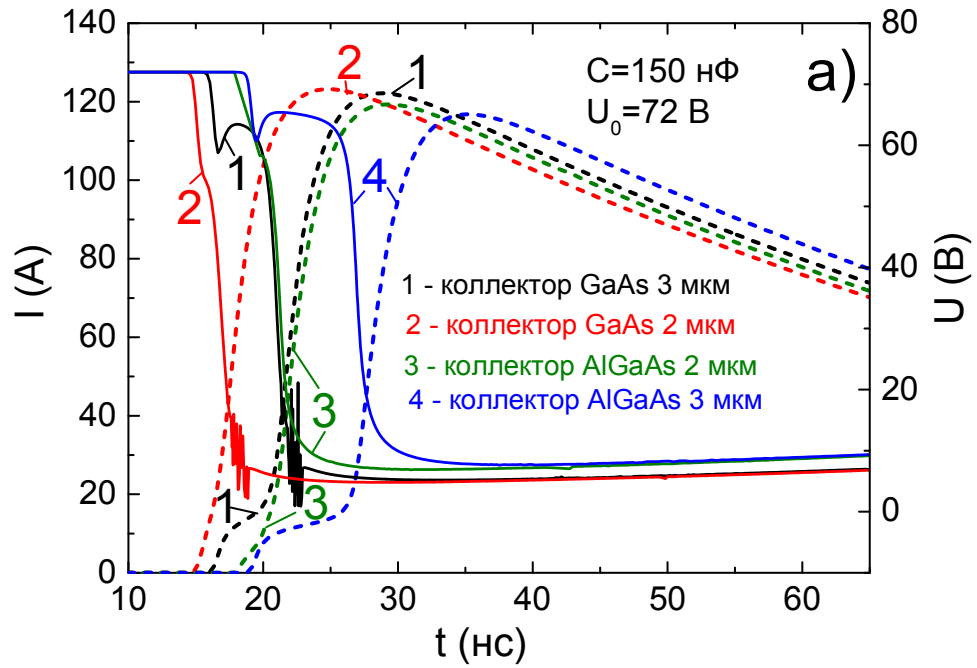


Рисунок 4 – а) Динамика тока и напряжения при $U_0=72$ В для гетероструктуры лазер-тиристора с формированием ООЗ в базе и коллекторе, толщина базовой низколегированной ($N_A=10^{16}$ см $^{-3}$) GaAs области 3 мкм, толщина и состав низколегированного ($N_D=10^{16}$ см $^{-3}$) коллекторного слоя изменялись как указано на рисунке; б) Зависимость длительности импульса тока, времени нарастания тока и максимальной амплитуды тока от значения емкости конденсатора в цепи для гетероструктур типа $N_+/p_+/p_0/n_0/N_+$. Уровень легирования коллектора и базы составлял $N_A=N_D=10^{15}$ см $^{-3}$, толщина базы и коллектора составляла 2 мкм для каждого слоя

В третьем параграфе рассматриваются гетероструктуры с ООЗ, сформированной в коллекторе, в которых также, как и в структурах с ООЗ в базе и коллекторе, присутствует зависимость динамики тока и напряжения от процессов перераспределения напряженности электрического поля и наблюдаются характерные особенности – «полки»

на динамике тока, локальные минимумы на динамике напряжения и участки с более медленными скоростями переходных процессов. В целом, данный тип структур лазер-тиристора обладает несколько меньшей эффективностью в сравнении с рассмотренными в первых двух параграфах. Наблюдается сильная зависимость динамики тока и напряжения, эффективности включения прибора от толщины и уровня легирования p_+ базы, которая вносит рекомбинационные потери. Максимальные блокирующие напряжения составляют 50 В для структур с $N_D=10^{16} \text{ см}^{-3}$ и 100 В при $N_D=10^{15} \text{ см}^{-3}$. При более низком легировании части коллекторного слоя ($N_D=10^{15} \text{ см}^{-3}$), где расположена ООЗ, в структурах данного типа была продемонстрирована возможность генерации токовых импульсов с амплитудой тока 60 А и длительностью 4 нс по основанию, что сопоставимо с результатами, полученными в структуре с ООЗ, расположенной в базе и коллекторе.

В заключение можно выделить общие закономерности, которые определяют эффективность работы лазер-тиристоров и обеспечивают высокие скорости переходных процессов. Во-первых, так как высокие скорости перехода во включенное состояние определяются ударной ионизацией, необходимо, чтобы на протяжении всего этапа включения прибора поддерживался высокий темп ударной ионизации, данное условие может не выполняться при а) перераспределении электрического поля в случаях с низколегированным коллектором, когда толщина низколегированной части коллектора превышает 2 мкм; б) при низком легировании слоев, где сформирована ООЗ, когда градиент напряженности электрического поля близок к нулю и напряжении питания ниже максимального. Во-вторых, более высокие скорости включения и более низкие остаточные напряжения могут быть получены в структурах с меньшей толщиной низколегированной p_0 -базы (n_0 -коллектора) при внесении тонкого p_+ слоя в базу. В-третьих, для каждого типа структуры необходимо определение наиболее оптимальных толщин низколегированных слоев и легирования для обеспечения необходимых значений максимального блокирующего напряжения, в целом для лазер-тиристоров легирование p_0/n_0 областей должно быть равно $5 \cdot 10^{16}$ и ниже, при этом чем выше легирование, тем меньше толщина данных областей. Толщина низколегированных областей не должна превышать 5 мкм.

Были рассмотрены 3 типа конструкций лазер-тиристора, различающихся профилями легирования и, соответственно, по формированию ООЗ (что определяет форму и положение областей с высокой напряженностью электрического поля). Наиболее оптимальной в широком диапазоне рабочих напряжений является структура с ООЗ в p -базе. Структуры с ООЗ в p -базе и n -коллекторе оптимальны для генерации наносекундных импульсов тока с высокой амплитудой. Однако, при переходе к напряжениям ниже

максимального в структурах данного типа снижается эффективность включения, в том числе из-за особенностей распределения напряженности электрического поля в низколегированных областях при переходе лазер-тиристора во включенное состояние. Структуры с ООЗ в p-коллекторе в целом похожи на структуры с ООЗ в p-базе и p-коллекторе, однако эффективность их работы ещё ниже. С основными результатами работы, представленными в 3 главе, можно ознакомиться в [1А], [2А], [5А].

В третьей части исследуется влияние ударной генерации и оптической обратной связи (в том числе в случае повышенной эффективности ООС) на динамику тока и напряжения в модели лазер-тиристора.

Показано, что ударная ионизация в структурах лазер-тиристора значительно повышает скорость перехода во включенное состояние (рис. 5), а в некоторых случаях определяет и эффективность включения лазер-тиристора. Низкая эффективность оптической обратной связи в лазер-тиристоре приводит к значительному снижению эффективности включения прибора за счет роста остаточного напряжения и снижения максимальной амплитуды тока (рис. 5). Также в данном случае наблюдается значительное увеличение задержки включения лазер-тиристора (до нескольких микросекунд).

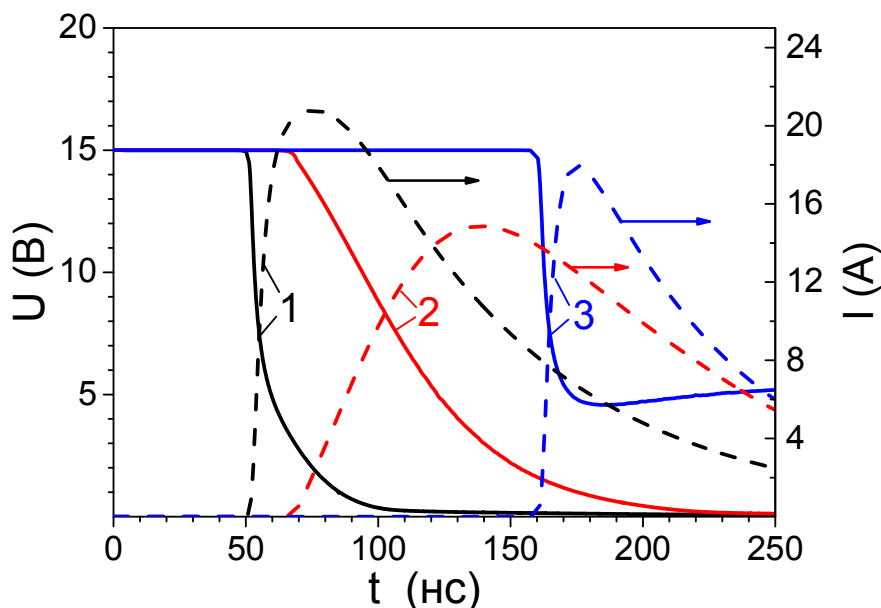


Рисунок 5 – Зависимости тока (пунктирная линия) и напряжения (сплошная) от времени, полученные для блокирующего напряжения 15 В, рассчитанные с учетом (1) фотогенерации и ударной ионизации, (2) только фотогенерации, (3) малоэффективной фотогенерации (поглощение в p-базе ниже в 7 раз) и ударной ионизации. Моменты включения на данном графике совмещены для удобства, однако качественно отражают увеличение задержки включения при выключении ударной ионизации и снижении эффективности оптической обратной связи

Значительное повышение эффективности оптической обратной связи в лазер-тиристоре (к примеру, за счет увеличения числа квантовых ям в лазерной части) может обеспечивать довольно высокие скорости переключения. Данный эффект рассмотрен на примере структуры с формированием ООЗ в базе и коллекторе, при этом материал коллектора более широкозонный, чем база и не поглощает спонтанное излучение. Увеличение эффективности ООС в данной структуре в целом привело к более гладкой форме импульса тока и позволило уйти от наличия полки на динамике тока, наблюдавшейся при стандартном уровне фотоактивации (рис. 4а). В структурах лазер-тиристора с ООЗ в GaAs базе повышение эффективности ООС приводит к более эффективному включению, амплитуда тока увеличилась на 17% от 60А до 70А (рис. 6).

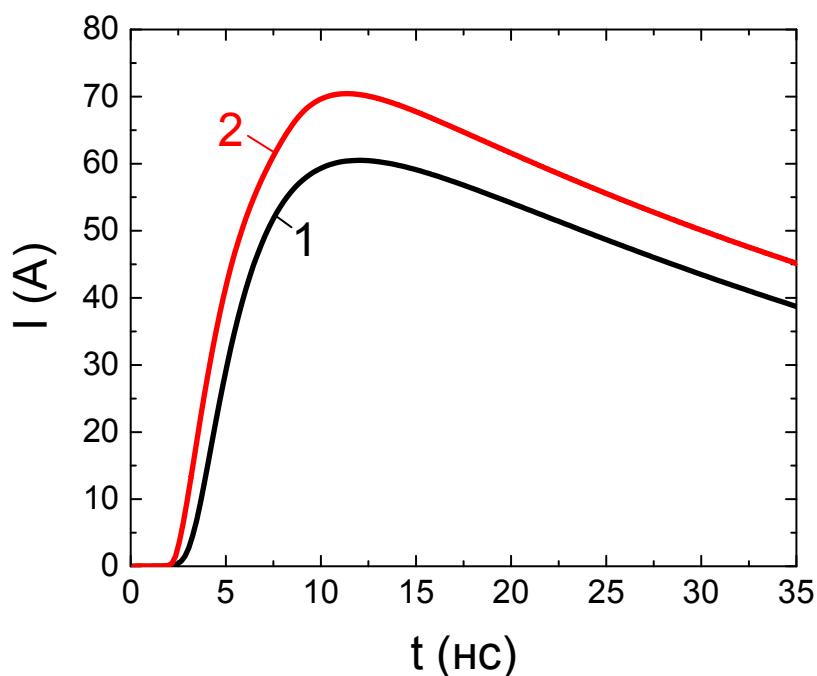


Рисунок 6 – Сравнительная токовая динамика в структурах с (1) стандартной и (2) повышенной эффективностью оптической обратной связи с формированием ООЗ в р-GaAs базе. Увеличение эффективности оптической обратной связи реализовано за счет увеличения числа квантовых ям с 1 до 3 в активной области лазерной части прибора

В четвертой главе приведены экспериментальные результаты измерений мощностных характеристик оптимизированной конструкции лазер-тиристора с формированием ООЗ в базе и однородно-легированной базовой областью ($N_A=10^{16} \text{ см}^{-3}$).

Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными измерениями динамики оптической мощности в лазер-тиристоре. В данной главе также приведена характеристика лазерной части прибора, которая в том числе показывает, что в гетероструктуре лазер-тиристора внесение дополнительных слоев за счет интеграции с

тиристорным ключом не оказывает негативного влияния на эффективность генерации лазерных импульсов, то есть полученная ватт-амперная характеристика лазерной гетероструктуры, идентичной лазерной части лазер-тиристора, совпадает с ватт-амперной характеристикой лазер-тиристора (рис. 7).

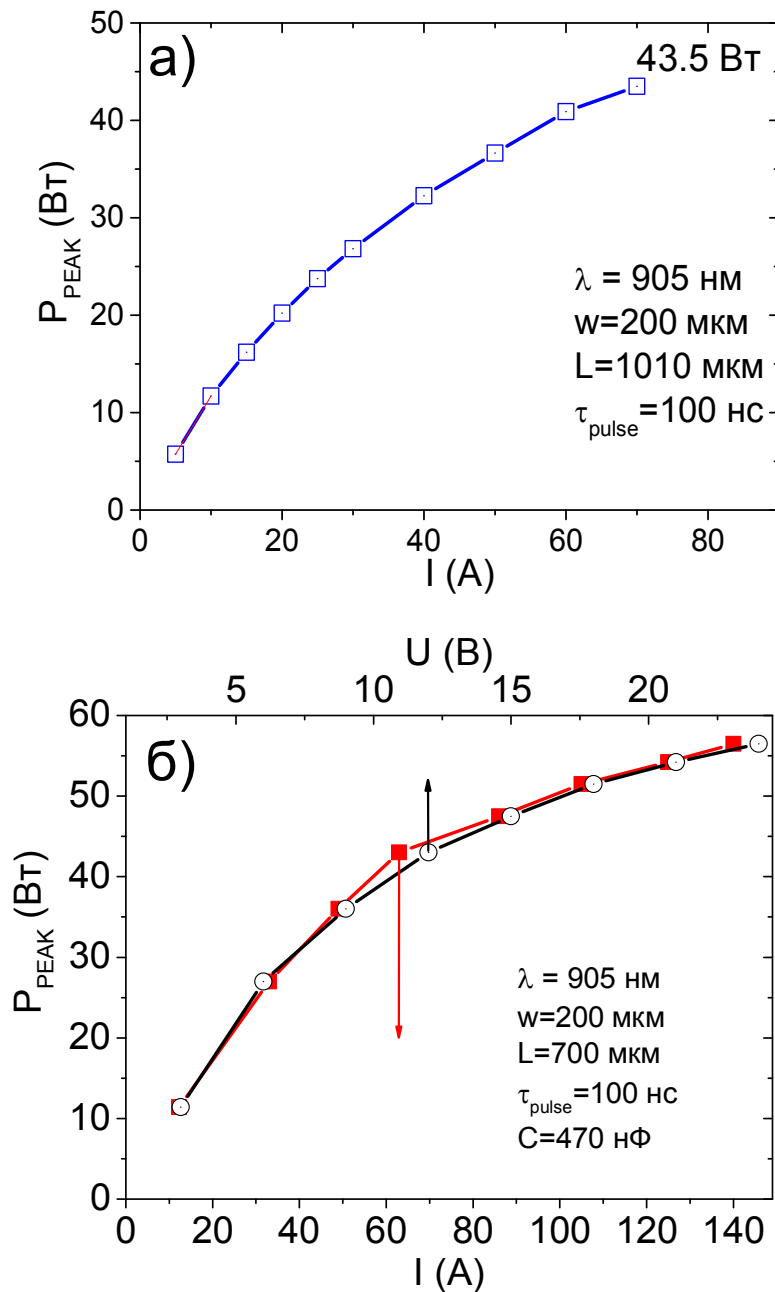


Рисунок 7 – а) Импульсная ватт-амперная характеристика лазерной части лазер-тиристора при накачке внешним источником тока с длительностью импульса 100 нс; б) импульсная ватт-амперная характеристика лазер-тиристора при длительности импульса 100 нс

Проведено моделирование лазерной части прибора, рассчитана ВтАХ, которая приведена на рис. 8 в сравнении с экспериментальной. Получено хорошее соответствие с экспериментальной ВтАХ.

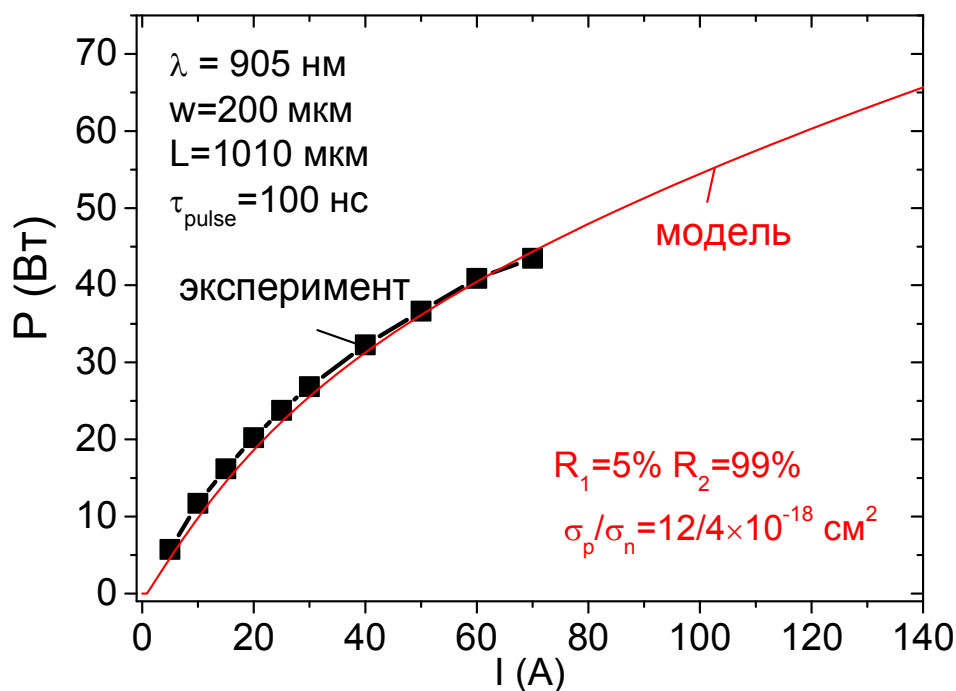


Рисунок 8 – Сравнение модельной и экспериментальной ВтАХ

При помощи рассчитанной ВтАХ была определена динамика оптической мощности по полученным ранее импульсам тока для структуры с формированием ООЗ в базе и однородно-легированной базой 4 мкм при $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, при этом считалось что при длительности импульса порядка 100 нс можно пренебречь эффектами динамики лазерной генерации и использовать статическое приближение для лазерной части прибора. По результатам сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными (рис. 9), можно сказать что представленная в работе модель хорошо описывает полученные в эксперименте импульсы оптической мощности, как качественно, так и количественно (в случае более высоких напряжений – более 18 В). Наблюдаемые различия в амплитуде оптической мощности могут объясняться ограничениями рассматриваемой одномерной модели, не учитывающей пространственные эффекты. Так, при меньших напряжениях мы получаем заметно меньшую скорость включения в модели и меньшую амплитуду оптической мощности, что может объясняться наличием локализации тока и применением простой одномерной модели ударной ионизации, которая присутствует в структурах с ударной ионизацией [7]. Данные факторы могут приводить к недооценке вклада ударной ионизации в области более низких напряжений.

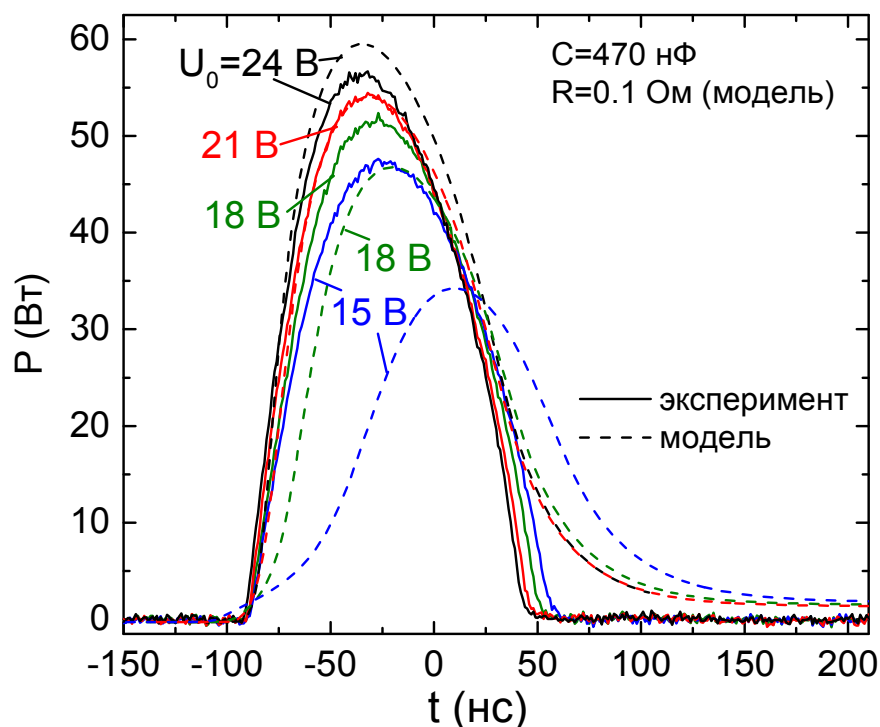


Рисунок 9 – Динамика оптической мощности в структуре лазер-тиристора при длительности импульса ~ 100 нс на полувывоте, сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования. Структура лазер-тиристора с формированием ООЗ в базе и однородно-легированной базой $4 \text{ мкм } N_A=10^{16} \text{ см}^{-3}$

На рис. 10 показаны экспериментальные данные по измерениям динамики напряжения и оптической мощности при различных длительностях импульса (длительность импульса изменялась за счет изменения значения емкости конденсатора в цепи). В экспериментальных образцах лазер-тиристора получена максимальная пиковая мощность 55 Вт при длительности импульса ~ 100 нс на полувывоте (рис. 10а). При генерации коротких импульсов была получена максимальная пиковая мощность 8 Вт при длительности импульса ~ 10 нс на полувывоте (рис. 10 б). Основные экспериментальные результаты по исследованию электрических и оптических характеристик лазер-тиристорov, а также описание методик исследования представлены в [6А], [7А].

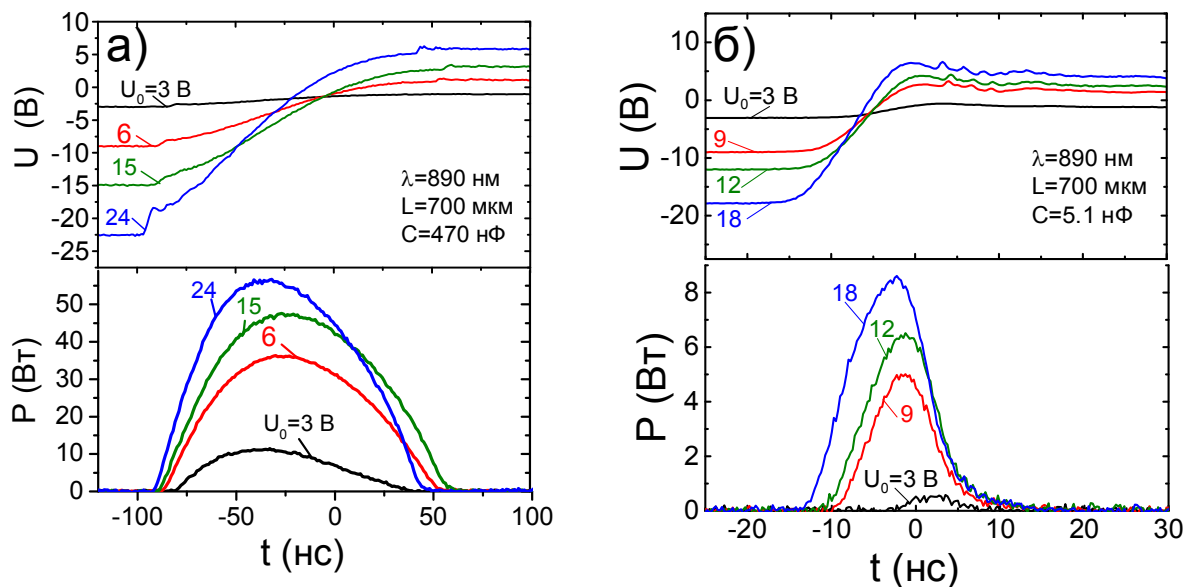


Рисунок 10 – Динамика напряжения и оптической мощности в структуре лазер-тиристора при длительности импульса а) ~100 нс на полувысоте и б) ~10 нс на полувысоте

В заключении диссертации представлены основные результаты проведенного исследования.

1) Представлена модель, описывающая динамические электрооптические характеристики мощных лазер-тиристоров. В модельном представлении исследуемый прибор состоит из оптопары лазерный диод-фототранзистор, модель учитывает оптическую обратную связь, ударную ионизацию, эффекты транспорта в сильных электрических полях и пороговый характер лазерной генерации. С использованием разработанной модели проведен теоретический анализ, интерпретирующий влияние параметров гетероструктуры лазер-тиристора на его динамические электрооптические характеристики.

2) Показано, что переход лазер-тиристора во включенное состояние обеспечивается наличием оптической обратной связи, реализуемой за счет поглощения части спонтанного излучения, генерируемого активной областью лазерной части прибора, при этом импульс управления обеспечивает накачку лазерной части прибора в допороговом режиме. Электрическая обратная связь в структурах лазер-тиристора подавлена, т.к. сквозной транспорт носителей заряда (дырок) ограничен гетеробарьером волновод/эмиттер в лазерной части прибора.

3) Пиковые значения выходной оптической мощности и динамика электрических и оптических характеристик лазер-тиристора определяются как конструкцией лазерной части прибора, определяющей такие характеристики как внутренний квантовый выход и оптические потери, так и конструкцией

фототранзисторной части прибора, которая определяет амплитуду импульса тока, генерируемого лазер-тиристором и скорость перехода во включенное состояние. Амплитуда тока при этом определяется как напряжением блокировки, так и остаточным напряжением во включенном состоянии.

4) Показано, что в лазер-тиристорах максимальные значения пиковой мощности лазерного излучения и скорости перехода во включенное состояние достигаются в структурах, где лазерная часть прибора расположена со стороны анодного силового контакта в области р-п, перехода, а фототранзисторная п-р-п часть расположена вблизи катодного силового контакта. В данной конструкции гетероструктуры, скорость переходных процессов в лазер-тиристорах определяется скоростью накопления неравновесных носителей в р-базе, которая определяется процессами фотогенерации и ударной ионизации. Скорость генерации носителей посредством ударной ионизации определяется амплитудой и формой напряженности электрического поля, которые могут изменяться в процессе включения прибора, влияя таким образом на форму фронта и амплитуду импульса тока.

5) Были исследованы различные конструкции гетероструктуры лазер-тиристоров. Наиболее оптимальной конструкцией для генерации оптических импульсов мощностью в десятки ватт длительностью порядка 100 нс и единицы ватт длительностью 1-10 нс в широком диапазоне рабочих напряжений является гетероструктура лазер-тиристора с ООЗ (областью объемного заряда) в базе. В структурах такого типа с низколегированной ($N_A=10^{16}$ см⁻³) GaAs р-базой толщиной 2 – 2.5 мкм и с наличием запирающего тонкого р₊ GaAs слоя со стороны эмиттера показана высокая скорость переходных процессов – включение за 10 нс до амплитуды тока 40-80 А. Структуры с ООЗ в базе и однородно-легированной базой также показали высокую эффективность включения в широком диапазоне рабочих напряжений, и они более просты с технологической точки зрения. Для генерации лазерных импульсов длительностью единицы наносекунд мощностью в десятки ватт наиболее оптимальной является гетероструктура типа с ООЗ в базе и коллекторе. В структуре такого типа возможна генерация импульсов тока длительностью 2 нс и амплитудой более 50 А. Однако, данная структура работает эффективно только в режимах с напряжением питания близким к максимальному, а при переходе к более низким напряжениям скорость перехода во включенное состояние снижается из-за особенностей распределения напряженности электрического поля в структуре при включении. Структуры с ООЗ в коллекторе похожи по своим характеристикам на структуры с ООЗ в базе и коллекторе и имеют те же

особенности, но в целом напряжения удержания и максимальные амплитуды тока в данных структурах ниже.

6) Увеличение интенсивности потока спонтанного излучения, генерируемого в активной области интегрированного лазерного диода за порогом лазерной генерации в лазер-тиристорах, способствует увеличению скорости перехода прибора во включенное состояние и снижению остаточного напряжения. При увеличении интеграла перекрытия спектров спонтанного излучения активной области лазерной части прибора и спектра поглощения р-базы, как и при увеличении интенсивности спонтанного излучения растет эффективность оптической обратной связи, что приводит к меньшим задержкам включения лазер-тиристоров и минимальной энергии импульса управления, требуемой для активации прибора.

7) Проведено сравнение результатов моделирования, включающих модель лазерной генерации, с экспериментальными данными на примере оптимизированной структуры с ООЗ в базе, показано, что модель хорошо описывает экспериментальную динамику оптической мощности как качественно, так и количественно в диапазоне более высоких напряжений (более 18 В). Количественное расхождение амплитуды оптической мощности для более низких напряжений объясняется ограничениями одномерной модели, не учитывающей пространственные эффекты. В результате экспериментальных исследований показано, что лазер-тиристоры высокой мощности, основанные на гетероструктуре с n-AlGaAs/p-GaAs/n-AlGaAs фототранзисторной частью, с однородно легированной р-GaAs базой толщиной 4 мкм ($N_A=10^{16}$ см⁻³) и GaAs/AlGaAs/InGaAs лазерной частью, обеспечивают максимальное блокирующее напряжение до 25 В. В исследованных лазер-тиристорах получены лазерные импульсы с пиковой мощностью 55 Вт при длительности импульса 100 нс на полувысоте и 8 Вт при длительности импульса 10 нс, длина волны генерируемого лазерного излучения равнялась 900 нм, амплитуда импульса тока управления составляла 0.1 мА и более.

Список используемой литературы

1. Wang X. et al. Root-cause analysis of peak power saturation in pulse-pumped 1100 nm broad area single emitter diode lasers //IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2010. – Т. 46. – № 5. – С. 658-665.
2. A study of epitaxially stacked tunnel-junction semiconductor lasers grown by MOCVD/ D. A. Vinokurov, V. P. Konyaev, M. A. Ladugin et. al. //Semiconductors. – 2010. – Т. 44. – № 2. – С. 238-242
3. J. Piprek and Z.-M. Li. What causes the pulse power saturation of GaAs-based broad-area lasers? //IEEE Photonics Technology Letters. – 2018 – Т. 30. – № 10. – С. 963–966.

4. D. A. Veselov, et.al. Saturation of light – current characteristics of high-power lasers ($\lambda = 1 - 1.1$ mm) in pulsed regime. //Quantum Electronics. – 2014 – Т. 44. – №. 11 – С. 993–996.
5. Krause V. et al. Brilliant high-power diode lasers based on broad area lasers //High-Power Diode Laser Technology and Applications VI. – International Society for Optics and Photonics. – 2008. – Т. 6876. – С. 687615.
6. Slipchenko S. O. et al. High-power pulse semiconductor laser-thyristor emitting at 900-nm wavelength //IEEE Photonics Technology Letters. – 2013. – Т. 25. – №. 17. – С. 1664-1667.
7. S. N. Vainshtein, V. S. Yuferev, J. Kostamovaara. Nondestructive current localization upon high-current nanosecond switching of an avalanche transistor //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2003. – Т. 50, – № 9, – С. 1988-1990.

Публикации

По результатам диссертации опубликовано 7 работ.

- 1А. Yuferev V. S., Podoskin A. A., Soboleva O. S., Pikhtin N. A., Tarasov I. S., Slipchenko S.O. Specific features of the injection processes dynamics in high-power laser thyristor //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2015. – Т. 62. – №. 12. – С. 4091-4096.
- 2А. Slipchenko S. O., Podoskin A. A., Soboleva O. S., Pikhtin N. A., Tarasov I. Y., Yuferev V. S. Dynamic model of pulsed laser generators based on multi-junction NpNiP heterostructures //Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXIV. – International Society for Optics and Photonics, 2016. – Т. 9742. – С. 97420I.
- 3А. Podoskin A. A., Soboleva O. S., Zakharov M. S, Veselov D. A., Zolotarev V. V., Pikhtin N. A., Tarasov I. S., Bagaev T. A., Ladugin M. A., Marmalyuk A. A, Simakov V. A. Optical feedback in 905 nm power laser-thyristors based on AlGaAs/GaAs heterostructures //Semiconductor science and technology. – 2015. – Т. 30. – №. 12. – С. 125011.
- 4А. Soboleva O. S., Podoskin A. A., Golovin V. S., Gavrina P. S., Zolotarev V. V., Pikhtin N. A., Slipchenko S. O., Bagaev T. A., Ladugin M. A., Marmalyuk A. A., Simakov V. A. Temperature Dependence of the Turn-On Delay Time of High-Power Lasers–Thyristors //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2019. – Т. 66. – №. 4. – С. 1827-1830.
- 5А. Soboleva O. S., Podoskin A. A., Yuferev V. S, Pikhtin N. A., Slipchenko S. O., Tarasov I. S. Dynamic model of laser-thyristor based on AlGaAs/GaAs heterostructure

for subnanosecond optical pulse generation //2016 International Conference Laser Optics (LO). – IEEE, 2016. – C. R3-39-R3-39.

- 6A. Slipchenko S. O., Podoskin A. A., Soboleva O. S., Pikhtin N. A., Bagaev T. A., Ladugin M. A., Marmalyuk A. A., Simakov V. A., Tarasov I. S. Spatial dynamics of high current turn-on in low-voltage AlGaAs/GaAs phototransistors //Journal of Applied Physics. – 2016. – T. 119. – №. 12. – C. 124513.
- 7A. Podoskin A. A., Soboleva O. S., Zolotarev V. V., Veselov D. A., Pikhtin N. A., Tarasov I. S., Bagaev T. A., Ladugin M. A., Marmalyuk A. A., Simakov V. A., Slipchenko S. O. Laser-thyristors as a source of high-power laser pulses with a pulse width of 1–100 ns //2016 International Conference Laser Optics (LO). – IEEE, 2016. – C. R3-9-R3-9.