

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.02
ПРИ ФЕДЕРАЛЬНОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ БЮДЖЕТНОМ УЧРЕЖДЕНИИ НАУКИ ФИЗИКО-
ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

Аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от 20.10.2022 № 7

О присуждении Соболевой Ольге Сергеевне, гражданке РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Мощные полупроводниковые низковольтные лазер-тиристоры на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs», по специальности 1.3.11 – физика полупроводников – принята к защите «1» августа 2022 г., протокол № 4, диссертационным советом ФТИ 34.01.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, утвержденным 12 июля 2019 г. приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75.

Соискательница Соболева Ольга Сергеевна, 1991 года рождения, в 2015 г. с отличием окончила программу специалитета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова по направлению 200206 «Приборы и системы лучевой энергетики». С 2015 по 2019 гг. проходила обучение по специальности 1.3.11 – «физика полупроводников» в аспирантуре при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. В настоящее время занимает должность младшего научного сотрудника в лаборатории полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей Центра физики наногетероструктур ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

Научный руководитель – Слипченко Сергей Олегович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей Центра физики наногетероструктур ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Официальные оппоненты:

1. Доктор физико-математических наук, Фирсов Дмитрий Анатольевич, профессор Высшей инженерно-физической школы ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251
2. Доктор физико-математических наук, Васильевский Иван Сергеевич, профессор Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике, доцент НИЯУ МИФИ, 115409, Москва,

Официальные оппоненты дали положительные отзывы на диссертацию и отметили высокий уровень диссертационной работы.

Вопросы и замечания официального оппонента, д.ф.м.-н., Фирсова Дмитрия Анатольевича:

1. На схематическом изображении лазер-тиристора в диссертации (рис. 4 и 5) показано, что разрядная емкость включена в цепь источника питания последовательно с прибором. Насколько это корректно?
2. При моделировании в качестве функции распределения электронов по состояниям использовалась функция распределения Ферми-Дирака. Учитывался ли при этом разогрев носителей заряда в сильном электрическом поле?
3. В исследуемых структурах присутствуют слои GaAs в сильном электрическом поле. Учитывалась ли в расчетах возможность возникновения ганновских доменов?
4. По-видимому, все расчеты были выполнены в предположении одиночных импульсов. Каким образом частота повторения импульсов может влиять на работу прибора? Существуют ли ограничения по частоте повторения?
5. В диссертации присутствует заметное число опечаток и стилистических погрешностей.

Вопросы и замечания официального оппонента, д.ф.м.-н., Васильевского Ивана Сергеевича:

1. В структурах лазер-тиристора присутствуют узкие домены электрического поля, при этом в работе не учитывался разогрев носителей. Насколько данный эффект мог бы повлиять на результаты?
2. Не указано, в чем причина заметного различия рабочих напряжений в оптимизированной структуре лазер-тиристора в модели (около 50 вольт) и в экспериментальных результатах (максимальное напряжение 24 В).
3. В работе не обсуждается, каким образом паразитная индуктивность цепи, отображенная на схемах лазер-тиристора и электрической цепи, влияет на результаты моделирования. На основании каких соображений выбиралось значение индуктивности в разделе 5, где приведено сопоставление с результатами эксперимента?

Ведущая организация Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт прикладной физики Российской академии наук» (603950, Россия, Нижний Новгород, ГСП-105) в своем заключении, подписанном директором института физики микроструктур РАН, доктором физико-математических наук Новиковым Алексеем Витальевичем, утвержденном доктором физико-математических наук, членом корреспондентом РАН, руководителем научного направления «Физика микро- и наноструктур» ИФМ РАН Красильником Захарием Фишелевичем, дала положительный отзыв и отметила, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и представляет собой завершённое научное исследование, соответствующее профилю совета 34.01.02 (специальность 1.3.11 – «физика полупроводников»). **В отзыве содержатся следующие замечания:**

1. В пункте «Практическая значимость» приводится 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.

Отмечено, что указанные замечания не снижают общую высокую оценку диссертации. Результаты работы обладают научной и практической ценностью, обоснованы и достоверны. Исследования, результаты которых представлены в диссертационной работе, являются актуальными и своевременными. Результаты диссертации апробированы на многочисленных международных и всероссийских научных конференциях, опубликованы в семи научных статьях в рецензируемых журналах, отвечающих требованиям ВАК.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям Положения Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Соболева Ольга Сергеевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «физика полупроводников».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обусловливается их высокой квалификацией, а также сходством тематик работ, проводимых ведущей организацией и оппонентами, с тематикой диссертационной работы. На все замечания соискателем даны исчерпывающие квалифицированные ответы.

На автореферат поступило 4 отзыва, все они положительные.

1. Отзыв доктора технических наук Тарасова Сергея Анатольевича, заведующего кафедрой фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5). Замечания и вопросы к автореферату:

- 1) На рис. 1 показана упрощенная схема, на которой не приведена зарядная емкость, которая должна присутствовать.
- 2) В автореферате не дано пояснение, почему ухудшаются параметры выходных характеристик лазер-тиристора при уменьшении емкости (рис. 4б).

2. Отзыв доктора технических наук Карачинского Леонида Яковлевича, генерального директора ООО «Коннектор Оптикс» (194292, Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, 16). Отзыв положительный, без замечаний.

3. Отзыв доктора физико-математических наук Цацульникова Андрея Федоровича, заместителя директора по научной работе федерального государственного бюджетного учреждения науки Научно-технологического центра микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук (194021, СПб, ул. Политехническая, д. 26). Отзыв положительный, без замечаний.

4. Отзыв кандидата физико-математических наук Гордеева Никиты Юрьевича, старшего научного сотрудника лаб. физики полупроводниковых гетероструктур ФТИ им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (194021, СПб, ул. Политехническая, д. 26). Отзыв положительный, Замечания и вопросы к автореферату:

- 1) Из текста непонятно, почему исследуются лазер-тиристоры только с длиной волны около 900 нм.
- 2) Не совсем ясна методика самого численного моделирования, использовались ли для этого какие-то программные пакеты?

Научная и практическая значимость работы.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискательницей работ по теоретическому и экспериментальному исследованию электрооптических динамических характеристик мощных полупроводниковых низковольтных лазер-тиристоров на основе GaAs/AlGaAs были получены следующие основные результаты:

1. Показано, что переход лазер-тиристора во включенное состояние обеспечивается наличием оптической обратной связи (ООС). Электрическая обратная связь в структурах лазер-тиристора подавлена, т.к. сквозной транспорт носителей заряда (дырок) ограничен гетеробарьером волновод/эмиттер в лазерной части.

2. Представлена модель, в которой исследуемый прибор представлен как оптопара: лазерный диод – фототранзистор. Модель основана на дрейф-диффузионном приближении и учитывает оптическую обратную связь, ударную ионизацию, эффекты транспорта в сильных электрических полях и пороговый характер лазерной генерации. Проведен теоретический анализ, интерпретирующий влияние параметров гетероструктуры лазер-тиристора на его динамические электрооптические характеристики.

3. Показано, что пиковое значение выходной оптической мощности лазер-тиристора определяется максимальным током, который способна коммутировать структура во включенном состоянии. Величина максимального тока зависит от остаточного напряжения во включенном состоянии, определяемого скоростью генерации неравновесных носителей заряда в базе фототранзистора, как за счет фотогенерации, так и за счет ударной ионизации.

4. 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. Это приводит к меньшим задержкам включения лазер-тиристоров и минимальной энергии импульса управления, требуемой для активации прибора.

5. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Показано, что модель хорошо описывает экспериментальную динамику оптической мощности как качественно, так и количественно в диапазоне напряжений более 18 В.

Практическая значимость работы состоит в оптимизации гетероструктур лазер-тиристоров и поиске наиболее подходящих применений для каждого типа гетероструктур лазер-тиристоров. Можно выделить следующие основные практические результаты:

1. 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, имеющим 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.

2. Показано, что профили легирования коллекторной и базовой областей n-p-n гетерофототранзистора определяют динамику как оптических, так и электрических переходных процессов. Использование слабелегированных областей коллектора приводит к повышению максимального блокирующего напряжения. Однако, при включении при напряжениях питания меньших, чем максимальное значение, наблюдается увеличение времени переходного процесса, увеличение длительности импульса, снижение пикового тока и пиковой мощности лазерных импульсов.

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

4. 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 легирующей примеси в p-GaAs базе равной 10^{16} см^{-3} . В предложенной конструкции лазер-тиристора получена пиковая мощность 55 Вт при длительности импульса порядка 100 нс на полувывоте и 8 Вт при длительности импульса 10 нс. Длина волны излучения равнялась 900 нм, включение производилось импульсами тока амплитудой от 0.1 мА.

Результаты, представленные в диссертации, являются оригинальными, а сама работа законченной и имеющей как фундаментальное, так и прикладное значение.

Достоверность и надежность результатов

Основные положения и выводы диссертации надежно обоснованы. Достоверность полученных в работе экспериментальных результатов подтверждается воспроизводимостью результатов по измерению пиковой оптической мощности, а также исследований спектров поглощения и спонтанного излучения. 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.

Личный вклад автора

Соискательница 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.

Соискательницей 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.

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

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- ом и 6-ом 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.

По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, опубликовано 7 статей в рецензируемых журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus (в скобках указан личный вклад автора):

1. 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.

(Участие в разработке динамической модели лазер-тиристора в виде оптопары полупроводниковый лазер – фототранзистор с оптической обратной связью, проведение экспериментальных исследований динамических характеристик образцов лазер-тиристор: лазерного излучения, напряжения на гетероструктуре и тока через прибор, подготовка публикации.)

2. 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.

(Исследование динамики накопления неравновесных носителей в области р-базы при наносекундных временах перехода лазер-тиристора во включенное состояние; теоретический анализ конструкции лазер-тиристора на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs с расширенной р-базой для реализации условий повышения блокирующего напряжения, экспериментальные и теоретические исследования динамики переходных процессов в структуре лазер-тиристора при генерации токовых и лазерных импульсов наносекундной длительности, моделирование лазерной генерации суб-наносекундных оптических импульсов при накачке импульсами тока наносекундной длительности. Анализ результатов экспериментов и подготовка публикации.)

3. 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.

(Проведение экспериментальных исследований спектров спонтанного излучения для различных уровней токов накачки лазерной части образцов с активной областью на основе InGaAs квантовой ямы в GaAs спейсерах, исследование эффекта нетеплового смещения длинноволнового края спектра. Экспериментальные исследования эффекта длинноволнового смещения края спектра поглощения коллекторного перехода в зависимости от напряженности электрического поля в области гетероперехода р-GaAs/n-AlGaAs образцов фототранзисторной части лазер-тиристора. Определение доли поглощенного спонтанного излучения из активной области в базе лазер-тиристора для динамической модели лазер-тиристора. Анализ экспериментальных результатов (аппроксимация спектров поглощения коллекторного перехода на основе литературных источников и расчет интегралов перекрытия спектров спонтанного излучения и поглощения в зависимости от тока накачки и напряжения). Подготовка публикации.

4. 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.

(Экспериментальные исследования задержки включения и эффективности фотогенерации избыточных носителей заряда в p-GaAs базе для лазер-тиристора с лазерной частью, включающей активную область на основе InGaAs квантовой ямы, излучающей на 900 нм, расположенной в GaAs спейсерах. Определено влияние электрического поля в области коллекторного p-n перехода, температуры и амплитуды тока управления на эффективность оптической обратной связи в лазер-тиристоре и задержку включения. Определение и уточнение доли поглощенного спонтанного излучения из активной области в базе лазер-тиристора для динамической модели лазер-тиристора. Анализ экспериментальных данных, написание и подготовка публикации.)

5. 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. – С. R3-39-R3-39.

(Проведение моделирования токовых импульсов лазер-тиристора в структуре с расширенной базовой областью для повышения максимального напряжения удержания. Моделирование лазерной генерации суб-наносекундных оптических импульсов в режиме модуляции усиления при накачке импульсами тока наносекундной длительности. Исследуемая в данной работе гетероструктура выбрана на основе оптимизации, проведенной в ходе работы над диссертацией. Написание и подготовка публикации.)

6. 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. – Т. 119. – №. 12. – С. 124513.

(Проведение экспериментальных исследований динамики включения фототранзисторной части лазер-тиристора на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs в зависимости от величины блокирующего напряжения, пиковой мощности и длины волны импульса фотоактивации, анализ экспериментальных данных и подготовка публикации.)

7. 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. – С. R3-9-R3-9.

(Разработка конструкции гетероструктуры лазер-тиристора, исследуемого в данной работе, экспериментальные исследования.)

На заседании 20 октября 2022 г. диссертационный совет принял решение присудить Соболевой Ольге Сергеевне ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении голосования диссертационного совета в количестве 20 человек из 25 членов совета из них

14 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, очно проголосовали 14:

За присуждение Соболевой Ольге Сергеевне ученой степени кандидата физико-математических наук

подано голосов – (14)

Против – 0.

Недействительных бюллетеней – 0.

Из 6 членов совета, участвовавших дистанционно, за присуждение Соболевой Ольге Сергеевне ученой степени кандидата физико-математических наук проголосовали:

«за» - 6

«против» - 0

«воздержались» - 0.

Итого: Из 25 членов совета участвовали в очно-заочном голосовании 20. За: - 20

Против: - 0

Воздержались: - 0

Председатель диссертационного совета,
академик РАН,

Сурис Роберт Арнольдович

Ученый секретарь диссертационного совета,
д. ф.-м. н.

Сорокин Лев Михайлович

20 октября 2022 г.