

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук*

на правах рукописи

Центр физики наногетероструктур
Лаборатория полупроводниковой люминесценции
и инжекционных излучателей

Соболева Ольга Сергеевна

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Специальность: 1.3.11 Физика полупроводников

Научный руководитель:
к.ф.-м.н., ст.н.с. Слипченко Сергей Олегович

Санкт-Петербург

2022

Содержание

Введение.....	4
Анализ литературы	11
1. Описание модели низковольтных лазер-тиристоров на основе гетероструктурAlGaAs/GaAs с InGaAs квантовой ямой	28
2. Экспериментальные исследования эффективности оптической обратной связи в лазер- тиристорах с активной областью на основе InGaAs квантовой ямы	36
3. Моделирование электрооптических характеристик низковольтных лазер-тиристоров с различными конструкциями областей объемного заряда на основе гетероструктурAlGaAs/GaAs.....	41
3.1 Моделирование статических электрических характеристик низковольтных лазер-тиристоров на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур	41
3.2 Моделирование динамических электрических характеристик и оптимизация конструкций AlGaAs/GaAs гетероструктур низковольтных лазер-тиристоров.....	48
3.2.1. Гетероструктура лазер-тиристора с областью объемного заряда, сформированной в p-GaAs базе.....	50
3.2.2 Гетероструктура лазер-тиристора с областью объемного заряда, сформированной в p ₀ -GaAs базе и n ₀ -GaAs/AlGaAs коллекторе.....	69
3.2.3 Гетероструктура лазер-тиристора с областью объемного заряда, сформированной в n ₀ -GaAs/AlGaAs коллекторе.	86

3.3 Влияние оптической обратной связи и ударной ионизации на характеристики низковольтных лазер-тириستоров на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур	100
4. Экспериментальные исследования характеристик низковольтных лазер-тиристоров на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур с InGaAs квантовой ямой (длина волны лазерной генерации 900нм) и сопоставление с результатами моделирования	115
Заключение.....	132
Условные обозначения и сокращения.....	136
Список использованной литературы.....	137
Список работ, опубликованных автором по теме исследования	143

Введение

Актуальность работы

Импульсное лазерное излучение в инфракрасном диапазоне с длиной волны 850-910 нм мощностью в десятки и Вт, длительностью импульса порядка нескольких десятков наносекунд востребовано во многих сферах науки, промышленности и техники, к примеру, при обработке материалов, в лазерной дальнометрии, нелинейном преобразовании частоты, в медицинских аппаратах, передаче энергии в свободном пространстве. Одной из наиболее перспективных сфер применения являются лидарные комплексы для беспилотных транспортных средств. С развитием полупроводниковых технологий в данных сферах стало возможным применение полупроводниковых лазеров, в которых были получены мощности более 50 Вт при длительности импульса до 100 нс с единичного излучателя [1].

В сравнении с твердотельными, полупроводниковые лазеры обладают рядом преимуществ – высокой энергоэффективностью (КПД 60% и выше), экономичностью, компактностью и возможностью изменения длины волны излучения в широком диапазоне за счет изменения состава полупроводниковых кристаллов. В то же время, с ростом оптической мощности для накачки полупроводниковых лазеров необходимы более сложные и мощные внешние импульсные источники тока. Такие источники питания являются достаточно дорогими, громоздкими (в сравнении с лазерным кристаллом) приборами, в них присутствуют паразитные индуктивные связи, ухудшающие динамические характеристики и энергетическую эффективность системы. Кроме того, токовые генераторы высокой мощности должны учитывать согласование нелинейной низкоомной нагрузки – полупроводникового лазера [2], значительно усложняется задача масштабирования для генерации тока с амплитудой порядка килоампер и выше. Данные факты лишают полупроводниковые лазеры части их преимуществ, а в некоторых отраслях являются критическим препятствием для широкого распространения лазерных диодов (к примеру, лидары для автомобилей с автопилотом не могут широко применяться из-за их дороговизны).

Возможен и другой подход в генерации лазерных импульсов без использования внешних импульсных источников питания высокой мощности, который основан на эпитаксиальной интеграции лазерной гетероструктуры и низковольтного токового ключа в одном кристалле. При такой реализации сохраняются все преимущества полупроводниковых лазеров с переходом к высоким мощностям: снижаются потери на

паразитных индуктивностях, сохраняется компактность прибора, низкая стоимость. Стоит отметить, что в данной работе исследуется низковольтный лазер-тиристор, так как это более оптимальный вариант как с технологической точки зрения, так и с точки зрения применения в конечных приборных комплексах. В работе исследуется прибор, реализующий данный принцип – лазер-тиристор, на текущий момент показана возможность экспериментальной реализации прибора [3-5].

Исследование сосредоточено на разработке одномерной динамической модели мощного лазер-тиристора, учитывающей оптическую обратную связь и наличие лазерной генерации. Это необходимо для понимания основных физических процессов, определяющих работу прибора и проведения теоретического анализа влияния параметров гетероструктуры на выходные электрооптические характеристики лазер-тиристора (такие как скорость перехода во включенное состояние, максимальная амплитуда генерируемых импульсов тока и оптической мощности, динамика тока, напряжения и оптической мощности, максимальное напряжение блокировки). В ходе работы была проведена верификация модели, получено хорошее соответствие с экспериментальными данными. Основной целью разработки модели является, в конечном итоге, оптимизация прибора для генерации оптических импульсов высокой мощности с длительностью импульса 1-100 нс. На основании проведенного теоретического анализа и оптимизации гетероструктуры лазер-тиристора представлена экспериментальная реализация прибора и проведены исследования статических и динамических электрооптических характеристик.

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. Продemonстрировано, что скорость перехода лазер-тиристора во включенное состояние и форма переднего фронта импульса тока не зависят 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 р-базу (концентрация примеси р-типа менее 10^{16} см^{-3}) и сильнолегированный коллектор (концентрация примеси п-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 р-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 лазеров-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.

Публикации

По результатам диссертации опубликовано 7 работ.

1A. 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.

2A. 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.

3A. 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.

4A. 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.

5A. 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.

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. – Т. 119. – №. 12. – С. 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. – С. R3-9-R3-9.

Анализ литературы

Предпосылкой разработки гетероструктур мощных лазер-тиристоров является проблема накачки мощных (излучающих мощности в десятки ватт) лазерных диодов, работающих в импульсном режиме с длительностями импульсов порядка 10-100 нс. Традиционно, для накачки полупроводниковых лазеров используются внешние источники тока. Примеров подобных решений множество [6-11]. К примеру, в [6] демонстрируется оптическая мощность с единичного излучателя в 124 Вт (с шириной полоска 200 мкм) при использовании внешнего источника питания и токовой накачке с амплитудой 240 А. В [7, 12] так же демонстрируется высокая оптическая мощность в лазерных диодах при длительностях импульса порядка 100 нс, в [11] для накачки лазерных диодов предлагается использование высоковольтных (300-500 В) транзисторных и тиристорных структур на основе Si и GaAs, работающих в режиме ударной ионизации и обеспечивающих высокие скорости переходных процессов и амплитуды импульсов тока с длительностью 100 пс. Недостатками таких подходов является дискретность, необходимость согласования с нелинейной низкоомной нагрузкой в виде лазерного диода, высокие потери на паразитных индуктивных связях. Такие приборы довольно громоздки, дороги, обладают низкой энергоэффективностью и снижают компактность системы лазерный диод – источник питания.

За счет интеграции низковольтного тиристорного ключа и лазерной гетероструктуры возможно уйти от использования внешних импульсных источников тока. При конструировании гетероструктуры необходимо сохранить эффективность как лазерного диода, так и тиристорного токового ключа. Идея лазер-тиристора является логическим развитием предложенных в ранних работах [13-19] структур токовых переключателей с оптической обратной связью. Оптическая обратная связь позволяет сохранить эффективность лазерного диода, так как в случае лазер-тиристора использование классической тиристорной обратной связи по току привело бы к токовым утечкам носителей из активной области лазерного диода. Кроме того, наиболее эффективные на данный момент лазерные гетероструктуры с раздельным двойным ограничением (РОДГС) предполагают наличие гетеропереходов, ограничивающих прямой транспорт носителей одного типа через структуру. Также включение тиристорного ключа оптическим сигналом за счет встроенного источника спонтанного излучения (активная область лазерного диода в допороговом режиме является источником спонтанного излучения, а при достижении порога лазерной генерации – является источником как спонтанного излучения, так и стимулированного) является более удобным и оптимальным

решением, так как внешнее управление структурой осуществляется подачей электрического импульса. Более подробно принцип внутренней оптической обратной связи описан в 1 главе. Другим подходом может быть использование туннельного перехода.

Выбор низковольтного тиристора в качестве токового ключа позволяет прибору находиться в двух стабильных состояниях – включенном, с низким сопротивлением, и выключенном с высоким сопротивлением, а также осуществлять малосигнальное управление. Так как разрабатываемая структура мощного лазер-тиристора является новым типом прибора в обзоре приведены работы, где исследуются транзисторные и тиристорные структуры с оптической связью, структуры опто-тириستоров, лазеры-транзисторы и лазеры-тиристоры низкой мощности (в диапазоне мощностей от ~ 1 мкВт до ~ 1 мВт) для различных интегральных оптоэлектронных схем, т.е. то, что было сделано в выбранном направлении исследований на момент начала данной работы по низковольтным мощным лазер-тиристорам. Отдельно рассмотрены некоторые работы по мощным полупроводниковым лазерам, для демонстрации получаемых результатов в данной области на данный момент и их сопоставления в дальнейшем с получаемыми характеристиками мощных лазер-тиристоров. Так как данная работа фокусируется на моделировании физических принципов работы лазер-тиристора, отдельное внимание уделено теоретическим работам, в том числе описывающих транспорт в транзисторных и тиристорных структурах при высоких плотностях протекаемого тока и наличии ударной ионизации.

1. История создания первых транзисторных и тиристорных гетероструктур.

Считается, что биполярный транзистор был изобретен и получен впервые группой ученых Bell Lab Бардиным, Шокли и Браттейном из неудачных попыток создать полевой транзистор. Об изобретении стало известно 30 июня 1948 года на открытой презентации транзистора в Нью-Йорке, приуроченной к выходу статей [20]. Однако независимо от BellLab примерно в то же время над триодными структурами так же работали Герберт Матаре и Генрих Велкер [21] и советский ученый О.В. Лосев [22], который работал над твердотельным (на основе кристаллов SiC) аналогом трех-электродной радиолампы в 29-31 гг. 20 века. К сожалению, данные работы Лосева, не были опубликованы.

Идея использования гетероструктур для создания биполярных транзисторов родилась очень давно, сразу же при появлении первых концепций биполярных транзисторов [23]. По сравнению с изотипными материалами, в которых возможно изменение типа проводимости и концентрации легирующей примеси, гетероструктуры дают гораздо большую возможность управления свойствами материалов, таких как

эффективная масса носителей в кристалле и их подвижность, показатель преломления, ширина запрещенной зоны. Таким образом, применение гетероструктур в полупроводниковой электронике способно значительно улучшить параметры множества приборов. Свойства полупроводниковых соединений типа АIII-BV исследовались теоретически и экспериментально в 50-х годах 20 века Г. Велькером [24], а также независимо Н.А. Горюновой с А.Р. Регелем в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН [25-27]. Использование полупроводниковых гетероструктур для создания полупроводниковых приборов было предложено в 1963 г. независимо Ж.И. Алферовым с Р.Ф. Казариновым [28] и Г. Кремером [29]. Однако, на первом этапе исследований теоретические работы продвигались значительно быстрее и технологические сложности не позволяли получить идеальный гетеропереход, происходил поиск системы материалов, в которой возможно создание гетероструктур доступными на тот момент методами. В 1960-1962 годах Р.Л. Андерсон проводил первые экспериментальные работы по изучению свойств гетероперехода Ge-GaAs [30-31]. В 1967 группой советских ученых под руководством Ж.И. Алферова был получен первый практически идеальный гетеропереход, была найдена система материалов (GaAs AlGaAs) в которой совпадают постоянные кристаллических решеток и коэффициенты теплового расширения с достаточной точностью [32]. Независимо, те же результаты были получены Х. Руппертом и Дж. Вудолом в исследовательском центре IBM [33]. Экспериментальное подтверждение свойств гетеропереходов положило начало быстрому развитию полупроводниковой электроники на гетероструктурах.

2. История развития транзисторных и тиристорных гетероструктур с излучательной рекомбинацией и оптической связью

В 1972 г. в [34] впервые рассмотрена четырехслойная p-n-p-n структура на основе материалов GaAs/AlAs, выращенная методом жидкофазной эпитаксии и продемонстрировано наличие излучательной рекомбинации в структурах такого типа, исследовались спектры генерируемого излучения. Структура состояла из широкозонных эмиттеров, одна из базовых областей была узкозонной (GaAs), в которой и происходила стимулированная рекомбинация. Толщины p или n базы составляли порядка 1-2 мкм. Рассматриваемая структура обладала s-образной ВАХ и напряжениями включения в диапазоне 6 – 20 В. Времена переключения структуры в проводящее состояние составляли порядка 30 нс. Приведенные в работе изменения спектров показывают переход от спонтанной рекомбинации к вынужденной при достижении порогового тока при температурах 300 К и 77 К. При 300 К в структурах с узкозонной базой p-типа пороговые плотности тока составляли 4-7 кА/см². Авторы отмечали что в структурах с узкозонной

базой n-типа удавалось получить более низкие пороговые плотности тока, порядка 2 кА/см^2 . Пик стимулированной рекомбинации приходился на 1.42 эВ при 300 К и 1.51 эВ при 77К. Обратная связь в данных тиристорных структурах, по всей видимости, осуществлялась по электрическому каналу, что приводило к снижению эффективности лазерной генерации, так и обратной связи в тиристоре (за счет более высоких потерь на стимулированную рекомбинацию).

В отечественных работах [13, 19, 35-37] рассматривались различные транзисторные и тиристорные структуры, где использовалась оптическая связь для эффективного переключения приборов в проводящее состояние. Полупроводниковые высоковольтные транзисторные структуры, в которых использовалась оптическая связь, были предложены в 1983 г [35], в данных структурах оптическая связь реализовалось за счет преобразования эмиттерного тока в излучение и последующее обратное преобразование. Толщины низколегированных областей в рассматриваемых структурах составляли порядка 30-60мкм, а блокирующие напряжения достигали 300-1000В в зависимости от типа структуры. В [36] описаны физические основы работы данного типа приборов, предложена статическая модель на основе уравнений диффузии и непрерывности. Авторы приводят, как одно из преимуществ приборов нового типа, большую область начального включения прибора за счет оптической связи, в сравнении с классическими тиристорными структурами. Прибор состоит из Р-р-N гетеро-светодиода с объемной узкозонной активной областью и N-n₀-р-N транзисторной структуры, при этом широкозонный N эмиттер светодиода является коллектором транзисторной структуры. При подаче тока к N-части светодиода в его активной области генерируется спонтанное излучение, поглощающееся в n₀-р узкозонных слоях транзисторной части структуры, что в итоге приводит к накоплению неравновесных дырок в р-базе и переключению прибора в проводящее состояние (при условии лавинного роста сквозного тока и поддержания прибора за его счет во включенном состоянии) и генерации импульса тока (так реализуется преобразование эмиттерного тока в излучение и последующее обратное преобразование в ток, или, другими словами, оптическая связь). Представлена модель, описывающая поведение структуры во включенном и в выключенном состояниях на основе уравнений диффузии и непрерывности для носителей заряда и закона поглощения Бугера для описания фотогенерации. Однако, данная модель статическая, соответственно, не рассматривает переходные и динамические характеристики прибора, кроме того авторы рассматривают два приближения – условие низкого уровня инжекции и условие насыщения, что неприменимо для переходных процессов. Так же в работе не уделяется внимание влиянию характеристик оптического излучения на обратную связь и не

рассматриваются особенности транспорта носителей в гетероструктуре, не учитывается дрейфовая составляющая тока. В работе [13] авторы рассматривают интегральные гетероструктуры транзистора с фотонно-инжекционной связью р-п переходов на основе GaAs/AlGaAs, исследовалась стабильность включения подобных приборов. В [19] исследовались остаточные напряжения подобных структур.

В 2011 г. [37] теми же авторами предложена тиристорная структура с полностью оптической связью, за счет объединения двух транзисторных структур с «оптической передачей эмиттерного тока» с рабочими напряжениями до 600-800 В [37]. Авторы предполагают, что данный подход позволит улучшить частотные характеристики приборов, увеличить площадь начального включения, скорость нарастания анодного тока и снизить время включения.

В [38] рассматривается структура P-n-p-N GaAs/AlGaAs опто-тиристора на двойной гетероструктуре с 2-мя электродами. Структура была выращена методом МВЕ на р-GaAsбуферном слое толщиной 600 нм, на котором последовательно были выращены следующие слои: р-AlGaAs 10^{18} см^{-3} толщиной 500нм и n-GaAs $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, р-GaAs $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, n-AlGaAs 10^{18} см^{-3} , n-GaAs $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ все толщиной по 250нм. Структура обладала s-образной вольтамперной характеристикой и блокирующим напряжением порядка 11 В. Авторы отмечают такие особенности прибора как возможность выключения за счет приложения соответствующего (отрицательного) напряжения к анодному контакту, быстрое время перехода в выключенное состояние (7 нс). Более быстрое время перехода в выключенное состояние в сравнении с традиционными тиристорами на двойных гетероструктурах авторы объясняли смыканием переходов в P-n-p слоях до пробоя прибора.

Однако в приведенных выше работах [13, 19, 34-38] не предлагалось использовать тиристорные и транзисторные структуры для генерации спонтанного (светодиод) или вынужденного (лазер) излучения. В то же время, в ряде работ рассматривались различные гетероструктуры, в которых функции токового ключа на основе биполярных транзисторных и тиристорных структур (а также полевых транзисторов) и генератора спонтанного или когерентного излучения сочетались в одном кристалле. В основном для данных приборов предлагалось применение в различных оптоэлектронных интегральных системах, что предполагало низкие уровни оптической мощности (порядка мкВт – мВт).

В [39] рассматривается структура лазера-транзистора на основе материалов InGaAsP/InP, где узкозонная InGaAsP р-база транзистора является одновременно объемной активной областью лазера (толщиной 0.2 мкм и с длиной волны излучения 1.3мкм). Структура изготавливалась методом частичного заращивания, мезоструктура

состоит из InP коллектора толщиной 5мкм, p-InGaAsP базы толщиной 0.2мкм и n-InP эмиттера толщиной 4мкм с контактными n+ InP слоем толщиной 0.5мкм. Ширина базового слоя после травления и зарастивания составляла 4мкм, со стороны управляющих контактов структура зарастивалась p-InP до глубины порядка 6мкм, данная планарная структура может обеспечивать поставку дырок в базу и служить латеральным ограничением для фотонов в области базы. Длина Фабри-Перо резонатора составляла 300мкм. Показатель преломления базы выше, чем в InP эмиттере и коллекторе, что создает волноводный эффект. В данной структуре получена оптическая мощность в 3 мВт при пороговом токе в 40мА при температуре 2 °С. Показаны скорости перехода во включенное состояние порядка 1 нс, как по напряжению, так и по оптическому сигналу, продемонстрирована лазерная генерация в непрерывном режиме при температурах вплоть до 19.7 °С. Предлагаемая сфера применения – оптоэлектронные интегрированные схемы. С помощью изменения амплитуды базового тока в данном приборе предлагается управлять интенсивностью излучения.

В [16] также предлагается токовый переключатель с возможностью генерации спонтанного излучения в системе материалов GaAs/AlGaAs в включенном состоянии, авторы предполагают, что представленный ими прибор может генерировать лазерное излучение при условии создания подходящего волновода. Прибор основан на «BICFET» (биполярный полевой транзистор с инвертированным каналом) N-n-р-гетероструктуре с ультратонким 40-60ангстрем⁺ слоем в области N-n гетероперехода (авторы называют новый тип структур “DOES (Double-heterostructure Opto-Electronic Switch”). Гетероструктура выращена методом MBE на p-GaAs подложке, на которой располагался p-GaAs буферный слой (300 нм), затем P-AlGaAs слой (500 нм), коллекторный n GaAs слой с легированием 10^{17}см^{-3} (1000 нм), далее располагался барьерный n AlGaAs слой (40 нм) также с легированием 10^{17}см^{-3} , между коллекторным и барьерным слоем располагался ультратонкий p+ слой, контактный n-GaAs слой располагался над барьерным слоем (500 нм). Прибор демонстрирует s-образную вольтамперную характеристику с максимальным блокирующим напряжением 3.3 В и может находиться в двух состояниях: выключенном, с высоким сопротивлением и отсутствием спонтанного излучения, и включенном, с низким сопротивлением и наличием спонтанного излучения (при протекающем токе более 3 мА), управление может осуществляться по электрическому или же по оптическому каналу. При возрастании интенсивности падающего на прибор лазерного излучения в диапазоне 0-46мкВт наблюдалось снижение блокирующего напряжения и при максимальной мощности на ВАХ уже не регистрировалось участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

В [40] рассматривается бистабильная тиристорная GaAs/AlGaAs структура (похожая на DOES[16]) с лазерным излучением во включенном состоянии на длине волны 875 нм. Структура была выращена методом МБЕ на n-GaAs подложке, состояла из: буферного n-GaAs слоя толщиной 0.5мкм с легированием $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, катодного n-AlGaAs (40%) слоя толщиной 1мкм и с легированием $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, ультратонкого p-AlGaAs (25%) толщиной 50 Å с легированием 10^{19} см^{-3} , нелегированной активной GaAs области толщиной 0.1мкм, расположенной между AlGaAs (25%) волноводными слоями толщинами по 0.3 и 0.1мкм, n-AlGaAs слоя толщиной 0.5мкм с легированием 10^{17} см^{-3} , p-AlGaAs (40%) анодного слоя с легированием $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и контактного p-GaAs слоя толщиной 0.5мкм и с легированием 10^{19} см^{-3} . Структура обладала-образной вольт-амперной характеристикой с максимальным блокирующим напряжением 4.1В и выходной оптической мощностью порядка 10 мВт. Включение осуществлялось с помощью оптического сигнала, во включенном состоянии наблюдалась лазерная генерация до момента выключения с помощью электрического импульса. Предложено создание вертикального вывода излучения с помощью интеграции в структуру зеркала, под углом в 45° к направлению распространения излучения, зеркала создавались за счет ионного травления. Именно данная особенность позволила создать структуры типа *VSTEP* “vertical to surface interface”, где входное и выходное излучение лежат в разных плоскостях.

В [41] рассматривался GaAs/AlGaAs полевой транзистор, который может работать и в режиме лазера, и в режиме транзистора. Когда к затвору приложено прямое смещение относительно стока или истока и p-n переход полностью выпрямлен, в GaAs активную область инжектируются носители из AlGaAs эмиттеров и наблюдается лазерная генерация. Когда затвор смещен в обратном направлении прибор работает как транзистор и находится в выключенном состоянии, когда к затвору приложено небольшое прямое смещение прибор также работает как полевой транзистор и находится во включенном состоянии. Активная область лазерной структуры является одновременно и каналом полевого транзистора. ДГС лазерная структура выращена методом МОС-гидридной эпитаксии на полуизолирующей подложке, а планарная структура полевого транзистора формировалась путем химического травления и последующего частичного зарастивания. Со стороны подложки последовательно располагались нелегированный волноводный слой n-AlGaAs (45%), активная n-GaAs область толщиной 0.1мкм и с $N_D = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, p-AlGaAs волноводный слой с $N_A = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ толщиной 1мкм и контактный тонкий p-GaAs слой. Ширина излучающей апертуры 5мкм. Уровень выходной оптической мощности данной структуры порядка единиц мВт в импульсном режиме работы, пороговая плотность тока 45мА.

В [17] развивается идея DOES структуры [16], где уже рассматривается прибор с генерацией лазерного излучения, выращенный методом МВЕ в системе материалов GaAs/AlGaAs. Лазерный диод реализован в структуре с квантовой ямой, как активной областью, и волноводом с градиентом по составу. Максимальное блокирующее напряжение в данной структуре составляет 12 В, создан управляющий контакт для активации прибора с помощью импульса тока низкой амплитуды (0.8 А/см^2). В структуре с шириной апертуры излучения 10 мкм и длиной резонатора 500 мкм в импульсном режиме пороговый ток составлял 30мА, дифференциальная квантовая эффективность равнялась 52%, выходная оптическая мощность составляла единицы милливатт.

В [42] предлагалась структура AlGaAs/GaAs опто-тиристора (рис. 1), где лазерные гетероструктуры (или светодиодные) должны располагаться на том же кристалле, что и тиристор, (предположительно с помощью монтирования лазерных структур (ДГС) на краях глубоко стравленного (20-30 мкм) опто-тиристора, которые будут располагаться на полуизолирующей подложке). Полуизолирующая GaAs подложка толщиной 0.5 – 5 мм в предложенной структуре выполняет роль базового блокирующего слоя и может обеспечить блокирующие напряжения в единицы киловатт. С одной стороны подложки располагались слои P-AlGaAs, N₊AlGaAs и n₊GaAs, с другой стороны, где должны располагаться лазерные диоды, были выращены N-AlGaAs, P₊AlGaAs и p₊GaAs. Лазерные диоды имели GaAs активную область с широкозонными AlGaAs эмиттерами и расположены таким образом, чтобы излучение из активной области поглощалось в нелегированной базе (ее части).

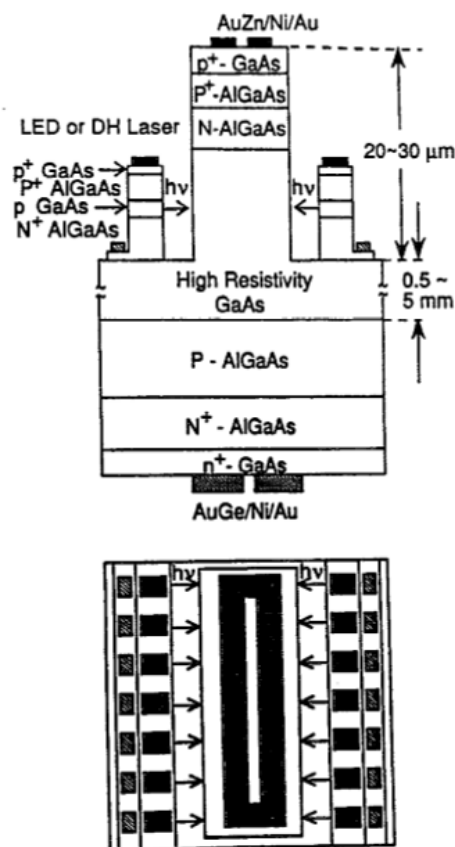


Рисунок 1– Структура AlGaAs/GaAs опто-тиристора из [42]

Лазерные структуры в данном случае использовались для активации опто-тиристора и их активные области располагались в плоскости базы тиристора. По предположению авторов, такая конструкция делает систему опто-тиристор – триггер для управления более энергоэффективной, более компактной и увеличивает срок службы прибора. В данной работе не проводилось подробного теоретического анализа или же экспериментальных исследований предложенной структуры. Экспериментальные исследования приведены для опто-тиристорных структур с активацией внешним источником излучения, показаны блокирующие напряжения 2-3 кВ.

В [43] представлен GaAs/AlGaAs вертикально-излучающий лазер-тиристор с использованием термодесорбции и метода повторного роста для соединений в параллельных оптических схемах. Выходная оптическая мощность порядка 1 мВт, длина волны излучения – 992 нм в активной области $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$. Пороговая плотность тока представленного лазер-тиристора в импульсном (длительность импульса 2 мкс) режиме работы при комнатной температуре составляла 0.8 мА, дифференциальная квантовая эффективность 0.25 Вт/А, блокирующее напряжение составляло 4.9 В. Прибор служит для детектирования излучения и лазерной генерации одновременно, как и в [44], но имеет

более сложную планарную структуру («пиксельную»), что позволило разделить функции фототранзистора и лазера и оптимизировать их отдельно.

В [45] впервые предлагается структура опто-электронного ключа с возможностью лазерной генерации на основе материалов InGaP/InGaAsP на основе “DOES” структуры [4616] и [47] – “LOES (Lasing Opto-Electronic Switch)”. Структура состоит из p(InP)- δn (InP)-p(InGaAsP)-n(InP) слоев, δn (InP) – ультратонкий (10 нм) высоколегированный ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) слой, создающий барьер для дырок. Активная область в данном приборе представляет собой 4 напряженные InGaAsP квантовые ямы, пороговая плотность тока 6933 А/см^2 при температуре 298 К, длина волны лазерной генерации 1.5 мкм. На вольтамперной характеристике наблюдалась область с отрицательным дифференциальным сопротивлением, при этом прибор мог находиться в двух стабильных состояниях, включенном, с относительно низким сопротивлением 4 Ом и напряжением на структуре 1.6 В, и выключенном, с сопротивлением 150 Ом и напряжением 6.8 В.

В [48] предлагается GaAs/AlGaAs структура опто-тиристора, способного так же работать как вертикально-излучающий светодиод во включенном состоянии, особенностью структуры является наличие MQW (множественных квантовых ям), увеличивающих детектирующую способность прибора и являющихся центрами спонтанной рекомбинации в режиме светодиода. MQW слой располагался между AlGaAs P₊ анодом и AlGaAs N₊ катодом, сам слой MQW состоял из p и n частей с GaAs квантовыми ямами. Блокирующее напряжение структуры составляло порядка 6В. Предполагаемое применение прибора – связь в свободном пространстве по оптическому каналу. В результате моделирования показаны преимущества предложенной структуры в сравнении с классическими с точки зрения снижения требуемой для активации энергии и более высокая возможная скорость передачи данных. В целом, в работе получено хорошее соответствие модельной и экспериментальной ВАХ в области отрицательного дифференциального сопротивления, однако модель рассматривает упрощенную структуру, использует подгоночные параметры из эксперимента (ток насыщения, рекомбинационное время жизни и ток утечки) и основана на сосредоточенных уравнениях диффузии, что не дает полного представления о процессах, происходящих в приборе.

В [49] рассматривается структура InGaAs/InP P-n-p-N тиристора с возможностью генерации спонтанного излучения на длине волны 1.55 мкм. Области поглощения и испускания спонтанного излучения являлись InGaAs 12 квантовых ям толщиной 7нм, разделенных InP барьерами толщиной 10нм, 6 квантовых ям p-типа и 6 n-типа. Структура была выращена методом MOCVD на InP подложке, на которой последовательно

располагались следующие слои: N^+ InP толщиной 500 нм с легированием $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, P InP толщиной 300 нм с легированием $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, активная область р типа, активная область n типа, N InP толщиной 300 нм и с легированием $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, P^+ InP толщиной 500 нм с легированием $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и контактный P^+ InP толщиной 100 нм с легированием 10^{19} см^{-3} . Прибор обладал s-образной вольт-амперной характеристикой, и мог находиться в двух стабильных состояниях – включенном и выключенном. Напряжение переключения подобных структур порядка единиц вольт (2-4 В).

В [50] представлено теоретическое описание принципов работы лазерных структур, сочетающих в себе функции токовых ключей (“DOES” структуры с ультратонким слоем заряда на одном из гетеропереходов). Модель лазерной генерации основана на скоростных уравнениях, а электрическая модель на уравнении сохранения заряда и непрерывности для электронов и дырок. Приведено численное и аналитическое решение. Показано преимущество предложенной структуры в сравнении с обычным лазерным диодом с точки зрения эффективности и порогового тока, получено соответствие с экспериментальными данными. Недостатком модели является тот факт, что модель подходит только для включенного состояния прибора и не описывает динамику перехода во включенное состояние, также модель сосредоточенная. В [51] для таких структур представлена модель, описывающая вольтамперные характеристики, в [52] подробно описаны механизмы и условия перехода структуры во включенное состояние, приведены минимальные уровни плотности энергии активации ($1\text{-}10 \text{ фДж/мкм}^2$).

В [53] предложена структура лазер-транзистора, излучающего на длину волны 1006 нм в непрерывном режиме при комнатной температуре (25°C) и созданного на основе GaAs/AlGaAs/InGaP биполярного транзистора и лазера с InGaAs квантовой ямой с Фабри-Перо резонатором. В качестве токового ключа в данном случае выступал транзистор, поэтому для поддержания прибора во включенном состоянии необходимо поддерживать требуемый уровень тока управления (в представленной работе минимальный ток управления (ток базы) составлял 40 мА). Квантоворазмерная InGaAs активная область лазера располагалась в p^+ GaAs базе толщиной 98 нм. На n-GaAs подложке располагались «нижние» волноводные слои, затем n^+ GaAs коллекторный слой, p^+ GaAs база, n GaAs эмиттер и «верхние» волноводные слои. Волноводные слои состояли из нескольких AlGaAs слоев различного состава. Длина Фабри-Перо резонатора составляла 850 мкм. Одной из особенностей рассматриваемой структуры является резкое снижение усиления транзистора с увеличением тока базы, при токах базы, выше 40 мА, когда начинается лазерная генерация и увеличивается скорость рекомбинации носителей в базе.

Рабочие напряжения прибора составляют 2-3 В. Показана возможность прямой токовой модуляции лазерного излучения на частоте 3 ГГц, однако в работе сообщается, что представленная конструкция не оптимальна (в сравнении с традиционными биполярными гетеро-транзисторами) и возможно обладает большим потенциалом. В [54] теми же авторами было проведено моделирование распределения неосновных носителей заряда в предложенной структуре, рассчитаны вольтамперные характеристики и «эффективное» время жизни носителей в базе. Для моделирования использовались уравнения непрерывности и скоростные уравнения, для получения времени жизни использовалась модель контроля заряда. Показано наличие очень короткого времени жизни носителей в базе (единицы пикосекунд), сравнимого с временем жизни фотонов в резонаторе, что приводит к большей ширине линии модуляции. В [55] авторы представили структуру лазер-транзистора с туннельным переходом в области коллектора. Так как активная область лазерной структуры расположена в базе, то коллекторный переход в данном случае служит и для поставки дырок в р-базу в дополнение к классическому току базы, а также и увеличивает долю электронов, переносимых в коллектор из базы. В предложенной структуре, помимо стандартной модуляции выходного сигнала током базы возможна и напряжением модуляция с использованием туннельного перехода коллектора.

В [56] представлена структура InGaAs/InGaAsP PnpN лазер-тиристора, с распределенной обратной связью и MQW структурой для генерации лазерного излучения. Данная работа является развитием представленной в [57] структуры. Управление подавалось перпендикулярно слоям гетероструктуры, тогда как выходное лазерное излучение с длиной волны 1570 нм было направлено также, как и в классических полосковых лазерах. Авторы используют методы численного моделирования (метод конечных разностей), что позволило добиться оптимизации структуры. Модель основана на дрейф-диффузионном приближении (уравнения Пуассона и непрерывности) и включала ударную ионизацию и рекомбинацию Шокли-Рида-Холла (для более точных результатов моделирования, по предположению авторов), полученная система уравнений решалась методом Ньютона. Авторы не упоминают, оказывала ли ударная ионизация какое-либо влияние на работу прибора и не уточняют, как описывались токи в гетероструктуре и не приводят выражений для токов диффузии и дрейфа. Недостатками модели является отсутствие описания особенностей транспорта, возможность исследования только статических характеристик, также не учитывается лазерная генерация. В сравнении с предыдущей структурой [57], в предложенной структуре за счет перпендикулярного слоям введения управляющего лазерного излучения отсутствует утечка части входного оптического сигнала (~1550 нм) в выходной сигнал, также снижена

чувствительность к длине волны подаваемого на вход сигнала. В предложенной структуре показана s-образная вольтамперная характеристика с максимальным блокирующим напряжением 3.36 В, уровни энергии управляющего сигнала менее 1 нДж. Пороговый ток лазерной генерации составлял 131 мА, выходная оптическая мощность при токе 200мА составляла ~1.6мВт. Предлагаемая сфера применения – различные системы оптических коммуникаций.

В [58] рассматривается вертикально-излучающий лазер с интегрированной тиристорной структурой в системе материалов GaAs/AlGaAs (рис. 2) с длиной волны 850 нм для оптических систем связи и обработки сигналов, изготовленный с помощью MOCVDи селективного окисления. Активная область представляла собой MQW структуру. Между DBR зеркалами располагалась собственно тиристорная структура, состоящая из N⁺AlGaAs (40%) катодного слоя толщиной 240 нм с легированием $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, P-AlGaAs (15%) слоя толщиной 200нм с легированием $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, активной области из 3-х GaAs квантовых ям толщинами 7нм и разделенными AlGaAs (30%) барьерами толщиной 10нм, N AlGaAs (15%) слоя толщиной 200нм с легированием $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и P⁺AlGaAs (40%) анодного слоя толщиной 240 нм с легированием $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

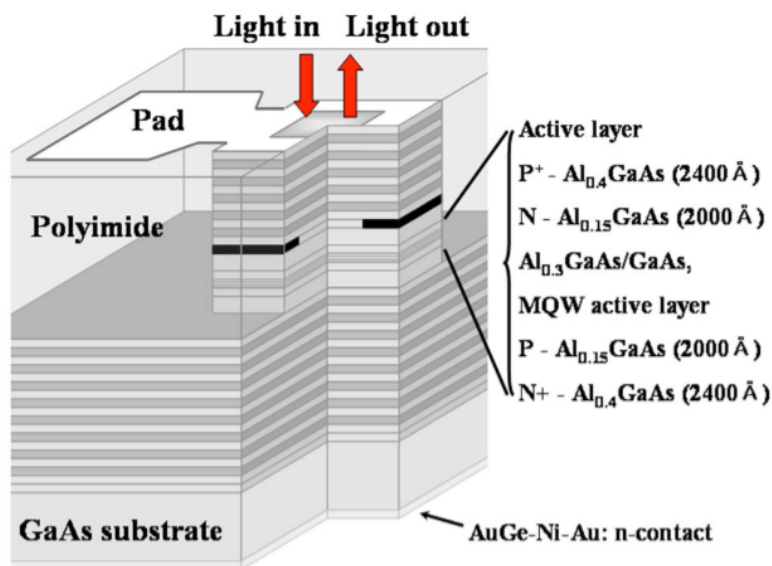


Рисунок 2 – Сечение вертикально-излучающего лазера с интегрированной тиристорной структурой в системе материалов GaAs/AlGaAs из [58]

Прибор демонстрировал нелинейную s-образную вольтамперную характеристику, лазерную генерацию с мощностями менее 1 мВт при токах в 3-6 мА, низкий пороговый ток – 0.65 мА, максимальное блокирующее напряжение составляло 5.24 В. В [59] и [60] продемонстрирована возможность реализации на основе предложенной структуры

логического элемента. В [60] также проведено моделирование при помощи уравнений непрерывности и уравнения Пуассона для оптимизации структуры, модель так же включала ударную ионизацию и рекомбинацию Шокли-Рида Холла. Была оптимизирована ВАХ структуры за счет изменения толщин волноводных слоев. За счет оптимизации DBR зеркала была увеличена дифференциальная квантовая эффективность лазера до 0.43 мВт/мА. Чтобы достичь как более высокой чувствительности к входному оптическому сигналу, так и более низкого порогового тока, авторы предложили использовать небольшую центральную область для генерации лазерного излучения, а также более широкую область для детектирования за счет использования селективного окисления.

3. Анализ современных работ (2010 -2020гг.) и публикационной активности

В то же время, интерес к приборам на основе гетероструктур транзисторного и тиристорного типа с использованием оптической связи, а также способных генерировать оптическое спонтанное и лазерное излучение в последнее время растет (рис. 3). Рассмотрим основные работы, посвященные данному классу приборов, опубликованные с 2010 года. Большая часть работ является продолжением серий работ, описанных ранее, также большее значение в работах придается конкретным практическим приложениям разработанных структур и их оптимизации. Как и ранее, все предложенные приборы разрабатываются для различных интегральных оптических схем, выходные оптические мощности составляют от мкВт до единиц мВт, в том случае если структуры используются как излучатели.

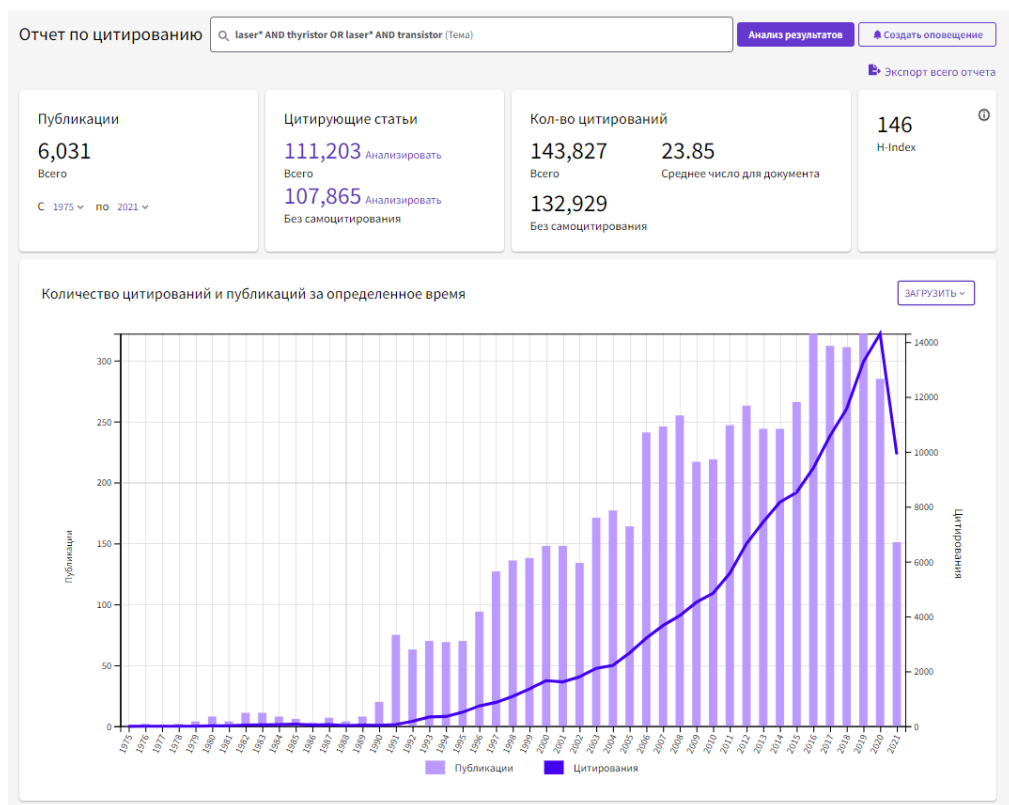


Рисунок 3—Количество публикаций по тематике “лазер тиристор” и “лазер транзистор” в Web of Science Core Collection. В данную подборку могут попадать приборы в различных сферах применения и опто-тиристоры

В [61] представлен лазер-тиристор на основе GaAs/InGaAs PiNiN гетероструктуры. Структура выращена методом MOCVD на n-GaAs подложке. Между двумя нелегированными активными областями, каждая из которых состояла из двух InGaAs квантовых ям толщиной 5 нм с GaAs барьером толщиной 8 нм, располагался тонкий (25 нм) высоколегированный (10^{19} см^{-3}) N₊GaAs слой. По одну сторону от активных областей со стороны подложки был расположен N₊AlGaAs слой толщиной ~2 мкм, а с другой нелегированный AlGaAs слой примерно такой же толщины и контактный p-GaAs тонкий слой. Показано наличие s-образной вольтамперной характеристики и лазерной генерации на длине волны 1.055 мкм при комнатной температуре с мощностью 30 мВт при токе 200 мА в импульсном режиме работы. Максимальное блокирующее напряжение при прямом смещении составляло 5 В, а в обратном 30 В. В [62] также представлена PiNiN структура с лазерной генерацией и s-образной характеристикой, в данной структуре между двумя активными областями располагался туннельный переход для увеличения выходной оптической мощности. Лазер имеет сверхширокий спектр генерации - 51 нм с центральной длиной волны 1.06 мкм, оптическую мощность излучения 790 мВт, что соответствует высокой средней плотности спектральной мощности 15.5 мВт/нм в импульсном режиме при токах в единицы Ампер. Уширение спектра и его смещение в

длинноволновую область с ростом тока авторы связывают с увеличением напряженности электрического поля в активных областях.

В [63] рассмотрена гетероструктура GaAs/AlGaAs/InGaP/InGaAs биполярного лазера-транзистора с активной областью на основе InGaAs MQW в области базы. Авторы приводят теоретический анализ особенностей транспорта в области базы на основе простой модели «контроля заряда», включающей скоростные уравнения и соотношения для токов (рассматривается только диффузионная составляющая) в транзисторной структуре с использованием коэффициента усиления тока по базе (отношение тока коллектора к току эмиттера). В работе приводятся соотношения между коэффициентом усиления тока в базе и временем жизни носителей, получены аналитические выражения для времени захвата носителей в квантовую яму, времени жизни носителей в базе и базовое время «транспорта» как функция от коэффициента усиления по току и параметров прибора. Авторами получено хорошее соответствие между экспериментальными данными и моделью по оптическому выходному сигналу.

В работе [64] представлен теоретический частотный анализ GaAs/AlGaAs гетероструктуры биполярного транзистора с интегрированной лазерной структурой на основе MQW структуры, при этом активная область лазера располагалась в базовой p^+ области. На основе скоростных уравнений построена динамическая модель данной структуры и исследовано распределение концентраций носителей в квантовых ямах, выбрано наиболее оптимальное число квантовых ям в различных режимах работы, в том числе при высоких уровнях плотности тока (в данном случае единицы kA/cm^2) с точки зрения скорости переключения (времена переключения составляли порядка 200-400 пс), выходной мощности и эффективности. К недостаткам представленных в [63] и [64] моделей можно отнести отсутствие учета транспорта носителей заряда, т.к. модель основана только на скоростных уравнениях.

Как видно из приведенных источников не решена задача генерации мощного (десятки Вт) лазерного излучения за счет интеграции токового ключа и лазерной гетероструктуры в одном кристалле и без использования внешних импульсных источников питания.

Приведенные в обзоре гетероструктуры лазеров-транзисторов и лазер-тиристоров предполагают их применение в интегральных оптических схемах, генерируемые оптические мощности низкие – порядка мкВт – мВт. В решаемой в представленной диссертационной работе уровень мощностей выше на несколько порядков, что предполагает совершенно другие условия транспорта носителей, используемых моделей и

возможных конструкций прибора. Принципы оптической обратной связи были продемонстрированы в [1, 5, 35-37, 50, 65]. В то же время необходимо разработать более точную модель, описывающую обратную связь в структуре лазер-тиристор, которая будет учитывать пороговый характер лазерной генерации и может быть включена в транспортную модель. Одной из основных задач является описание переходных процессов в гетероструктуре лазер-тиристор, что подразумевает использование динамической модели, что также не рассматривалось ранее.

Модель транспорта должна учитывать условие протекания высоких плотностей тока и областей сильного электрического поля, что предполагает наличие ударной ионизации. Ударная ионизация учитывалась в работах [56, 57], однако авторы не говорят о том, какую роль она играет в работе прибора, кроме того рассматриваются низкие уровни плотностей тока. Модель транспорта в тиристорных структурах при наличии ударной ионизации, формировании областей с сильным электрическим полем и при высоких плотностях протекаемого тока описана, к примеру, в [11, 66], но она не включает особенности, отвечающие за оптическую обратную связь и лазерную генерацию.

1. Описание модели низковольтных лазер-тириستоров на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs с InGaAs квантовой ямой

Разработка модели лазер-тиристора необходима для понимания основных принципов работы лазер-тиристора и оптимизации прибора, так как многие процессы нельзя отследить на основании одного лишь эксперимента, а создание экспериментальных образцов трудозатратный и длительный процесс. Для начала рассмотрим кратко основные физические принципы работы лазер-тиристора на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs. На катодный контакт лазер-тиристора подается постоянное напряжение питания отрицательной полярности (U_0), при этом параллельно с прибором в цепь включен конденсатор (рис. 4), в цепь разрядки конденсатора может быть включено сопротивление для измерения тока. Для управления лазер-тиристором на соответствующий электрод, сформированный к п-коллектору (рис. 4), подается управляющий сигнал с отрицательной полярностью, при этом достаточно единиц –десятков миллиампер для включения прибора.

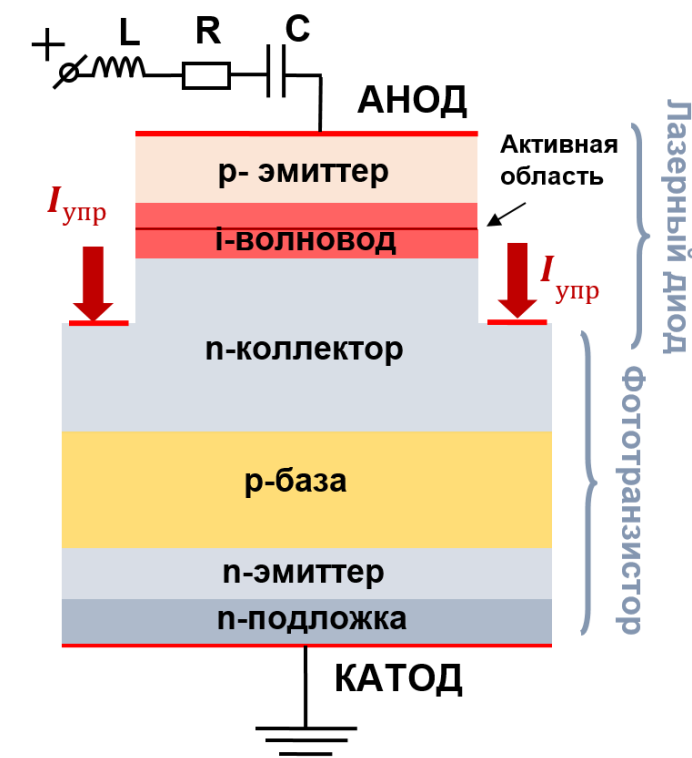


Рисунок 4 – Схематическое изображение лазер-тиристора ($I_{упр}$ – ток управления)

Ток управления протекает через лазерную часть лазер-тиристора (рис. 4), где возникает спонтанная рекомбинация, в то же время на данном этапе отсутствует лазерная генерация, т.к. ток управления значительно ниже порогового. Спонтанное излучение из активной области лазерного диода на основе InGaAs квантовой ямы распространяется во

всех направлениях и частично поглощается в базе и коллекторе лазер-тиристора, т.к. спектр спонтанного излучения активной области частично перекрывается со спектром поглощения базовой и коллекторной области. На рис. 5 показано схематическое изображение лазер-тиристора, а также потоки спонтанного излучения, электронов и дырок. Поглощение спонтанного излучения в базе и коллекторе приводит к появлению и накоплению неравновесных носителей за счет фотогенерации в данной области. Для переключения лазер-тиристора в проводящее состояние необходимо накопление критической концентрации неравновесных дырок в базе, когда происходит понижение потенциального барьера эмиттер/база в фототранзисторной части прибора и из эмиттера начинается активная инжекция электронов, которые в дальнейшем за счет дрейфа попадают в n-коллектор. Таким образом, лазер-тиристор переходит во включенное состояние и происходит рост тока, протекаемого через структуру, и, соответственно, рост потока спонтанного излучения из активной области и фотогенерации носителей в базе и коллекторе – данные процессы и определяют **оптическую обратную связь (ООС)** в лазер-тиристоре. Стоит отметить, что классическая для тириستоров электрическая обратная связь в лазер-тиристоре отсутствует из-за наличия гетеробарьеров в лазерной части.

Так как фототранзисторная часть представляет собой n-p-n транзистор, транспорт в структуре происходит за счет тока электронов, подвижность которых на порядок выше подвижности дырок. При протекании тока через ООЗ (область объемного заряда) коллекторного перехода, где падает основная часть внешнего постоянного напряжения (рис. 5) и образуется область с высокой напряженностью электрического поля, возникает ударная ионизация. Генерация носителей за счет ударной ионизации приводит к быстрому накоплению критической концентрации неравновесных носителей в базе и высокой скорости переключения лазер-тиристора в проводящее состояние. При включении прибора, когда ток достигает порогового значения для лазерного диода, начинается процесс лазерной генерации, в то же время снижается скорость роста интенсивности спонтанного излучения и на зависимости интенсивности спонтанного излучения от тока наблюдается излом. Увеличение интенсивности спонтанного излучения с током за порогом лазерной генерации [65, 67-69] обеспечивает эффективную оптическую обратную связь в лазер-тиристоре. В то же время, классическая для тириستоров [66, 70] электрическая обратная связь в лазер-тиристоре отсутствует из-за ограничения сквозного транспорта дырок гетеробарьером в интегрированной лазерной двойной гетероструктуре раздельного ограничения (РОДГС) (рис. 5). Длительность оптического импульса, генерируемого лазер-тиристорм, определяется величиной емкости конденсатора (рис. 5),

и, когда через структуру протекает ток конденсатор разряжается. При снижении тока через лазер-тиристор ниже тока удержания прибор переходит в выключенное состояние.

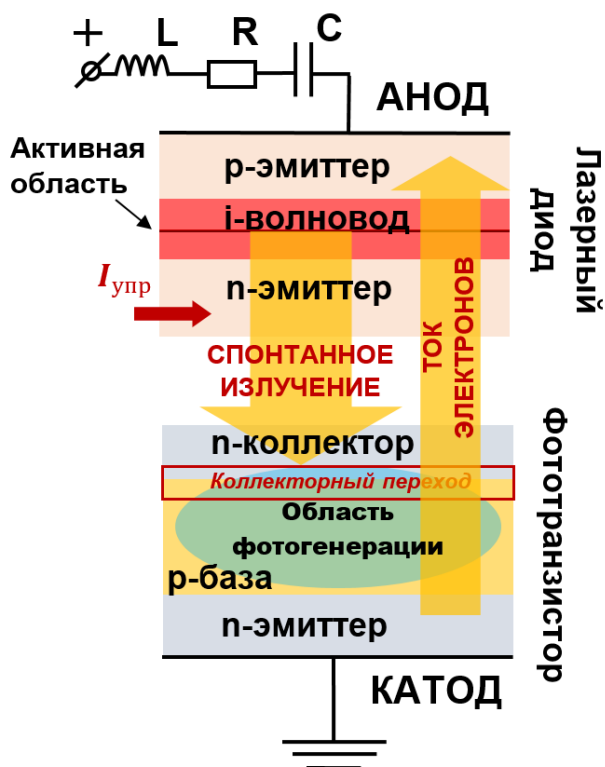


Рисунок 5 – Схематическое изображение лазер-тиристора, потоков носителей и спонтанного излучения

Рассмотрим кратко **структуру модели** лазер-тиристора. В лазер-тиристоре отсутствует классическая для тириستоров обратная связь по току из-за ограничения сквозного транспорта дырок гетеропереходом волновод/эмиттер встроенной РОДГС лазерной структуры и ее функцию выполняет оптическая обратная связь. В данном случае можно представить прибор как оптопару лазерный диод – фототранзистор и считать, что ток, протекающий через фототранзистор, равен току через лазерный диод, а активация фототранзистора осуществляется за счет спонтанного излучения лазерного диода. Учитывая характер зависимости спонтанного излучения от плотности тока в лазерных диодах, в том числе при достижении порога лазерной генерации, и экспериментальные характеристики спонтанного излучения и поглощения в базе и коллекторе фототранзистора возможно построение модели оптической обратной связи. Модель транспорта в структуре фототранзистора основана на дрейф-диффузионном приближении и дополнена уравнением, описывающим внешнюю электрическую цепь в виде конденсатора, индуктивности и сопротивления (рис. 4). Так как в структуре лазер-тиристора протекают высокие плотности тока и присутствуют сильные электрические поля в транспортную модель включена ударная ионизация и зависимости подвижностей носителей от электрического поля. Получив с помощью моделей оптической обратной

связи лазер-тиристора и дрейф-диффузии динамику тока и напряжения лазер-тиристора за время единичного импульса, возможно рассчитать по импульсу тока оптическую мощность лазерного диода с помощью сосредоточенной модели скоростных уравнений. Таким образом, в модели лазер-тиристора возможно проведение оптимизации фототранзисторной структуры отдельно от лазерного диода.

Рассмотрим более подробно модель оптической обратной связи (ООС). На рис. 5 представлены схематически потоки носителей и спонтанного излучения для демонстрации принципов ООС. При подаче импульса управления ток управления протекает через лазерный диод, не достигая при этом пороговых значений. Спонтанное излучение из InGaAs активной области лазера распространяется по всем направлениям, при этом частично поглощается в области базы и коллектора, так как спектры спонтанного излучения лазерного диода и поглощения в базе и коллекторе частично перекрываются. Фотогенерация в области базы и коллектора, которая происходит за счет поглощенного спонтанного излучения, описывается с помощью выражения (1), а интенсивность спонтанного излучения пропорциональна квадрату концентрации носителей в активной области лазерного диода – (2).

$$G_{ph}(x) = \kappa \cdot F \cdot e^{-\kappa \cdot x} \quad (1)$$

$$F = 1/2 \cdot \beta \cdot d_{QW} \cdot B \cdot n_{QW}^2 \quad (2)$$

где G_{ph} – скорость фотогенерации, F – поток спонтанного излучения на границе базы и коллектора фототранзистора, κ – коэффициент поглощения материала, из которого состоит базовая область, d_{QW} – толщина квантовой ямы, B – коэффициент излучательной рекомбинации, n_{QW} – концентрация неравновесных носителей в квантовой яме лазерного диода, коэффициент $1/2$ введен в предположении, что только половина спонтанного излучения распространяется в направлении базы, данное предположение достаточно уместно для случая, когда активная область лазерного диода с полосковым контактом шириной 200 мкм находится на расстоянии в несколько мкм от базы фототранзистора. Коэффициент β показывает долю интенсивности спонтанного излучения, поглощенного в области базы и зависит от перекрытия спектра спонтанного излучения лазерного диода и спектра поглощения в базе фототранзистора. Также модель учитывает рост концентрации носителей в активной области лазерного диода за порогом лазерной генерации, который приводит к росту интенсивности спонтанного излучения и является следствием таких эффектов как спектральное и пространственное выжигание дырок [67], насыщение усиления [68], конечное время энергетической релаксации энергии [69], рост внутренних

оптических потерь с ростом тока [71, 72] (данный эффект является основным при высоких плотностях тока, более 10 кА/см²).

При выражении интенсивности спонтанного излучения, как излучательной части рекомбинационного тока можно записать выражение (2) через анодный ток (I_A), общий для лазерной и фототранзисторной частей лазер-тиристора (3а, б). При интегрировании по толщине базы выражения для фотогенерации (1), получаем уравнение (4).

$$F(I_A) = \begin{cases} \beta \cdot \frac{(\sqrt{1 + I_A \cdot M/q \cdot S} - 1)^2}{M}, & I_A < I_{th} \\ \gamma \cdot \frac{I_A - I_{th}}{I_{th}} \cdot \beta \cdot \frac{(\sqrt{1 + I_{th} \cdot M/q \cdot S} - 1)^2}{M}, & I_A \geq I_{th} \end{cases} \quad (3a)$$

$$M = 4 \cdot \frac{B \cdot \tau_{LD}^2}{d_{QW}} \quad (3б)$$

$$G_{ph} = \kappa \cdot F(I_A) \cdot (1 - \exp(-\kappa \cdot w_b)) \quad (4)$$

где τ_{LD} – безызлучательное время жизни носителей в квантовой яме лазерного диода, w_b – толщина базовой области фототранзистора, S – площадь поперечного сечения области протекания тока, I_{th} – пороговый ток лазерного диода, I_A – ток анода, q – единичный заряд, γ – коэффициент, определяющий рост интенсивности спонтанного излучения при токах выше порога лазерной генерации.

Дрейф-диффузионная модель для описания транспорта носителей в фототранзисторной части лазер-тиристора включает в себя уравнения непрерывности для электронов и дырок, уравнения для плотности потоков носителей и уравнение Пуассона:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial J_n}{\partial x} + \alpha_n \cdot |J_n| + \alpha_p \cdot |J_p| + G_{ph} - R_{SRH} \quad (5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial J_p}{\partial x} + \alpha_n \cdot |J_n| + \alpha_p \cdot |J_p| + G_{ph} - R_{SRH} \quad (6)$$

$$J_n = -\mu_n \cdot n \cdot E - D_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad (7)$$

$$J_p = \mu_p \cdot p \cdot E - D_p \frac{\partial p}{\partial x} \quad (8)$$

$$\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{dE}{dx} = -q \cdot (N_D - N_A + p - n) \quad (9)$$

G_{ph} – скорость генерации носителей за счет фотогенерации (4); α_n , α_p – коэффициенты ударной ионизации электронов и дырок соответственно; n , p – концентрации электронов и дырок соответственно; J_n , J_p – плотности потоков электронов и дырок соответственно; ε , ε_0 – диэлектрическая константа среды и диэлектрическая постоянная; E – напряженность

электрического поля (в данном случае в уравнении Пуассона изменен знак для удобства представления распределения напряженности электрического поля); N_D , N_A – концентрации легирующих донорных и акцепторных примесей соответственно; μ_n , μ_p – подвижности электронов и дырок, соответственно, зависящие от напряженности электрического поля; D_n , D_p – коэффициенты диффузии электронов и дырок соответственно. При моделировании транспорта рассматривалась статистика Ферми-Дирака. В данном случае соотношения Эйнштейна для коэффициента диффузии выглядят следующим образом:

В предлагаемой модели учитывалась ударная ионизация, т.к. в исследуемой структуре лазер-тиристора могут существовать электрические поля со значениями напряженности $1 \cdot 10^5$ В/см и более в области коллекторного перехода фототранзистора в условиях протекания высоких плотностей тока (1-100 кА/см² и более). Ударная ионизации ограничивалась областью р-п перехода база – коллектор, где падает основная часть внешнего напряжения и исключалась вблизи узких пиков электрического поля гетеропереходов, т.к. дрейф-диффузионная модель в данных областях неприменима (скорость пролета носителей в данной области сильного электрического поля сопоставима с временем энергетической релаксации носителей). Для описания зависимости коэффициентов ударной ионизации от напряженности электрического поля использовалась модель Зельберхерра:

$$\alpha_{n,p}(E) = A_{n,p} \cdot \exp\left(-(B_{n,p}/E)^\beta\right) \quad (12)$$

где коэффициенты $A_{n,p}$, $B_{n,p}$ и β – параметры модели и взяты на основе [73].

В GaAs для электронов учитывалась отрицательная дифференциальная подвижность:

$$\mu_n = \frac{\mu_{n0} + \frac{v_{ns}}{E} \cdot \left(\frac{E}{E_t}\right)^4 \cdot \Omega(E)}{1 + \left(\frac{E}{E_t}\right)^4} \quad (13)$$

где E_t – параметр модели, обозначающий пороговую напряженность электрического поля, член $\Omega(E) = 0.4689 + 0.5 \cdot \exp(6207 - E/2.9 \cdot 10^5)$ взят на основе [74] для учета влияния сильных электрических полей, μ_{n0} и μ_{p0} – значения подвижности электронов и дырок, соответственно, в слабых электрических полях, v_{ps} и v_{ns} – насыщенные скорости для электронов и дырок, соответственно.

В GaAs и AlGaAs для дырок использовалась более простая зависимость подвижности от напряженности электрического поля:

$$\mu_p = \frac{\mu_{n0,p0}}{\left(1 + (E \cdot \mu_{n0,p0}/v_{ns,ps})^{\beta_{n,p}}\right)^{1/\beta_{n,p}}} \quad (14)$$

где β_n, β_p – параметры модели.

Параметры в модели подвижности для GaAs выбирались на основании [75]. Подвижность электронов в AlGaAs описывались с помощью выражения (8) только член $\Omega(E)$ в (8) был равен 1, другие коэффициенты выбирались в соответствии с [76].

Данная система уравнений была дополнена уравнением, описывающим внешнюю электрическую цепь, которая в сравнении с представленной на рис. 4 ограничивается конденсатором, сопротивлением и индуктивностью (без внешнего источника постоянного тока), что позволяет рассчитывать динамику тока и напряжения в лазер-тиристоре за время единичного импульса (до разрядки конденсатора).

$$L \cdot \frac{d^2 I_C}{dt^2} + R \frac{dI_C}{dt} + \frac{I_C}{C_0} = - \frac{dU_{LT}}{dt} \quad (15)$$

где L – паразитная индуктивность цепи (1 нГн), R – сопротивление цепи, C_0 – емкость конденсатора в цепи, I и U_{LT} – ток в цепи и напряжение между катодом и анодом лазер-тиристора.

Данное уравнение связано с уравнениями транспорта через выражение (16), описывающее падение напряжения в структуре гетерофототранзистора, рассматриваемого в модели транспорта, полученное интегрированием выражения для тока смещения.

$$\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{W} \frac{\partial U_H}{\partial t} = \frac{I_C}{S} - q \cdot (J_n + J_p) \quad (16)$$

где W – толщина структуры гетеро-фототранзистора, S – площадь сечения области протекания тока структуры (площадь контакта), U_H – падение напряжения в структуре фототранзистора. Предполагая, что падением напряжения в области лазерного диода можно пренебречь, $U_H = U_{LT}$. Ток анода, используемый в (3а и 4) связан с I_C следующим образом: $I_A = I_C + I_{dr}$, где I_{dr} – ток управления.

Также с моделью лазер-тиристора можно ознакомиться в работах [1А], [2А]. Описанная выше модель позволяет моделировать динамику тока и напряжения в лазер-тиристоре, проводить оптимизацию фототранзисторной части прибора независимо от лазерной. Данная работа концентрируется на исследовании электрических и динамических характеристиках лазер-тиристора, таких как скоростей перехода из блокирующего во включенное состояние, генерируемые амплитуды и длительности импульсов тока, блокирующие напряжения. Таким образом, в диссертации в основном рассматривается конструкция фототранзисторной части прибора, определяющая процессы генерации и рекомбинации избыточных носителей заряда в базовой области, которые, в

свою очередь, влияют на электрические характеристики прибора. Для расчета лазерной генерации и оптической мощности по полученным импульсам тока лазер-тиристора при условии заданной структуры лазерного диода в данной работе использовалось сосредоточенное скоростное уравнение для фотонов (17). В работе не проводилось оптимизации и исследования лазерной части прибора, и данная часть необходима лишь для сопоставления полученных импульсов тока и генерируемой оптической мощности.

$$\frac{dS}{dt} = \left(\frac{c}{n_{eff}} \cdot G(n) \cdot \Gamma - \frac{1}{\tau_{ph}} - R_{fc} \right) \cdot S + \beta_{sp} \cdot \frac{n}{\tau_{sp}(n)} \cdot \Gamma \quad (17)$$

S – концентрация фотонов в резонаторе; $G(n)$ – функция, описывающая величину усредненного по плоскости гетероструктуры кристалла материального усиления; β_{sp} – коэффициент спонтанного излучения; n_{eff} – эффективный показатель преломления для заданной модовой структуры; c – скорость света в вакууме, $v_g = c/n_{eff}$ – групповая скорость фотонов; $\Gamma = V_{qw}/V_{ph}$ – фактор оптического ограничения активной области лазера; V_{qw} – объем активной области, V_{ph} – объем резонатора; $\tau_{ph} = \left(v_g \cdot (\alpha_i + \alpha_{out}) \right)^{-1}$ – время жизни фотонов лазерной моды; R_{fc} – потери на свободных носителях.

С помощью волнового уравнения (18) вычислялась форма лазерной моды (ТЕ мода):

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \omega^2 \mu_0 \varepsilon E_y = \beta^2 E_y \quad (18)$$

где E_y – электрическая компонента поля электромагнитной волны, x – ось, перпендикулярная слоям лазерной гетероструктуры, ω – частота, β – константа распространения, ε – диэлектрическая постоянная и μ_0 – магнитная проницаемость вакуума. Модель усиления задавалась на основе экспериментальных данных и имела вид (19), где g_0 и N_{tr} – параметры модели.

$$G(n) = g_0 \cdot \ln \left(\frac{n}{N_{tr}} \right) \quad (19)$$

Оптическая мощность P вычислялась по следующей формуле:

$$P = \eta_i \cdot \left(\frac{\alpha_{out}}{\alpha_i + \alpha_{out}} \right) \cdot \frac{h \cdot \nu}{q} \cdot (I - I_{th}) \quad (20)$$

где α_{out} – потери на вывод излучения из лазерного резонатора; α_i – внутренние оптические потери. Потери на свободных носителях определялись следующим образом, как и в [72]:

$$R_{fc} = \sigma_n n + \sigma_p p \quad (20)$$

где σ_n, σ_p – сечения поглощения для электронов и дырок.

2. Экспериментальные исследования эффективности оптической обратной связи в лазер-тиристорах с активной областью на основе InGaAs квантовой ямы

В структурах лазер-тириستоров обратная связь осуществляется по оптическому каналу, в то время как электрическая оптическая связь разорвана из-за наличия гетеробарьера волновод/эмиттер в интегрированной РОДГС структуре. Оптическая обратная связь осуществляется за счет частичного поглощения спонтанного излучения из активной области лазерного диода в GaAs базовой и коллекторных частях фототранзисторной части прибора. Спектр спонтанного излучения активной области частично перекрывается со спектром поглощения GaAs базовой области. При этом с увеличением плотности тока накачки меняется форма спектра и интенсивность спонтанного излучения, а с изменением внешнего напряжения на структуре лазер-тиристора происходит сдвиг спектра поглощения в GaAs в длинноволновую область из-за эффекта Франца-Келдыша. Было проведено исследование особенностей оптической обратной связи [4, 65], рассмотрим кратко основные результаты, полученные в экспериментальном исследовании и использованные при построении модели.

На первом этапе проводилось исследование спектров и интенсивности спонтанного излучения в лазерной части лазер-тиристора при различных амплитудах тока накачки. Для проведения исследования были изготовлены образцы методом МОС–гидридной эпитаксии, представляющие собой лазерный диод той же конструкции, что и в лазер-тиристоре. Конструкция исследуемой лазерной гетероструктуры состояла из следующих слоев: высоколегированного $n\text{-Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ эмиттера толщиной 1.5 мкм, нелегированного узкого $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ волновода толщиной 0.4 мкм, квантовой ямы InGaAs толщиной 10 нм и расположенной по центру волновода с GaAs спейсерами толщиной также 10 нм и высоколегированного $p\text{-Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ эмиттера толщиной 1.5 мкм. InGaAs квантоворазмерная активная область обеспечивала лазерную генерацию на длине волны ~900 нм. Структуры имели полосковую конструкцию, ширина полоска составляла 200 мкм. Методика исследования и более подробное описание экспериментальных образцов приведены в [4] и [65, 77].

При увеличении плотности тока накачки наблюдалось смещение края спектра спонтанного излучения в длинноволновую область (рис. 6), при этом при изменении плотности тока от $\sim 50 \text{ А/см}^2$ наблюдается смещение пика интенсивности в коротковолновую область (рис. 6), при росте плотности тока выше пороговой форма спектра практически не изменялась. Как видно из рис. 6 интенсивность спонтанного

излучения резко возрастает до порога лазерной генерации и продолжает плавно расти за порогом.

Смещение края спектра спонтанного излучения в длинноволновую область связано с заужением ширины запрещенной зоны при увеличении концентрации носителей в активной области лазерного диода из-за экранировки межатомных потенциалов квантовой яме [78, 79]. Смещение пика интенсивности спектра спонтанного излучения в коротковолновую область объясняется наличием GaAs спейсеров и их заполнением носителями заряда с ростом плотности тока накачки [65]. Рост интенсивности спонтанного излучения за порогом лазерной генерации важен для поддержания эффективной оптической обратной связи в лазер-тиристоре.

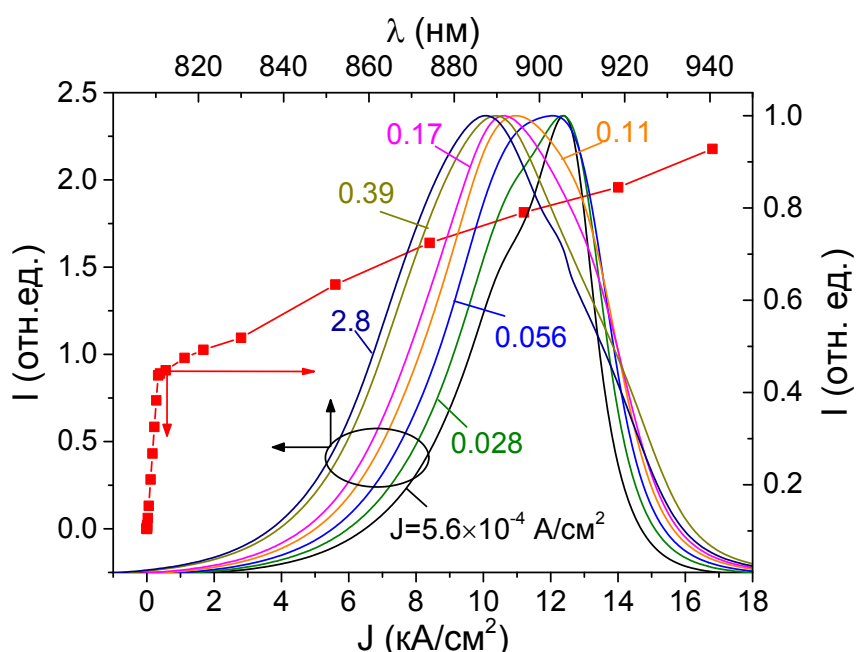


Рисунок 6 – Спектры спонтанного излучения лазерной части лазер-тиристора при различных токах накачки

Для определения доли спонтанного излучения, поглощенного в GaAs базе и коллекторе лазер-тиристора, изготавливались образцы, представляющие собой транзисторную часть прибора методом частичного травления структур лазер-тиристора. Образцы состояли из следующих слоев: высоколегированного $N\text{-Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ эмиттера (0.3 мкм), низколегированной ($N_D = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) $p\text{-GaAs}$ базы (2 мкм) и высоколегированного составного $n\text{-GaAs}$ (0.24 мкм) и $N\text{-Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ (1.5 мкм) коллектора. Источником спонтанного излучения служила лазерная часть лазер-тиристора, работающая в допороговом режиме. Спонтанное излучение вводилось в кристалл транзистора и проходило в поглощающей среде (GaAs) расстояние ~ 140 мкм. С помощью данной методики [65] были исследованы спектры поглощения при различных

напряжениях на транзисторной структуре у длинноволнового края спектра поглощения (рис.7), т.е. в той области, которая представляет наибольшую важность для работы лазер-тиристора. Далее, спектры поглощения аппроксимировались [65] на основе данных литературных источников (рис. 7) и вычислялся интеграл перекрытия спектров поглощения и спектров спонтанного излучения который показывает долю спонтанного излучения, поглощенную в узкозонной GaAs базе и GaAs части коллектора лазер-тиристора (рис. 7 вставка, рис. 8). Полученные в ходе представленных экспериментальных исследований коэффициенты использовались в модели, при этом коэффициент γ (уравнение 3а) (≈ 0.13) показывает наклон зависимости интенсивности спонтанного излучения от плотности тока при токах выше порогового (рис. 8), а коэффициент β характеризует долю спонтанного излучения, поглощаемого в базе в допороговом режиме и был принят равным ~ 0.1 и не зависел от тока (это оправдано тем, что при включении лазер-тиристора достижение пороговой плотности происходит за время порядка единиц нс и менее). Зависимость доли спонтанного излучения, поглощаемого в GaAs части транзистора от напряжения, не включалась в модель на данном этапе, т.к. эксперимент не позволяет оценить зависимость данного коэффициента от напряженности поля в области GaAs базы и коллектора. Включение зависимости коэффициента поглощения от поля на основании литературных данных значительно усложнило бы модель, т.к. коэффициент поглощения изменялся бы постоянно со временем и в пространстве (вдоль оси x , с изменением напряженности поля), поэтому данное решение обусловлено так же экономией вычислительных ресурсов. В то же время, полученные зависимости позволяют судить о том, что с напряжением на структуре лазер-тиристора будет влиять на задержку включения прибора, которая будет снижаться с ростом напряжения за счет увеличения интегралов перекрытия спектров спонтанного излучения и поглощения, и, как следствие, увеличения эффективности оптической обратной связи, что было показано экспериментально [4].

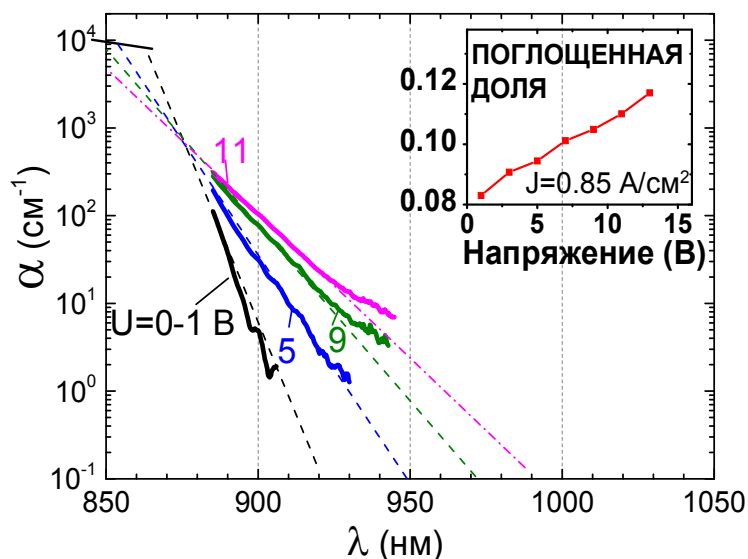


Рисунок 7 – Спектры поглощения в GaAs базе и GaAs области коллектора в транзисторной части лазер-тиристора при различных значениях внешнего напряжения. На вставке показано отношение поглощенной к полной интенсивности спонтанного излучения при плотности тока накачки лазерного диода 0.85 A/cm^2 при изменении напряжения на структуре лазер-тиристора

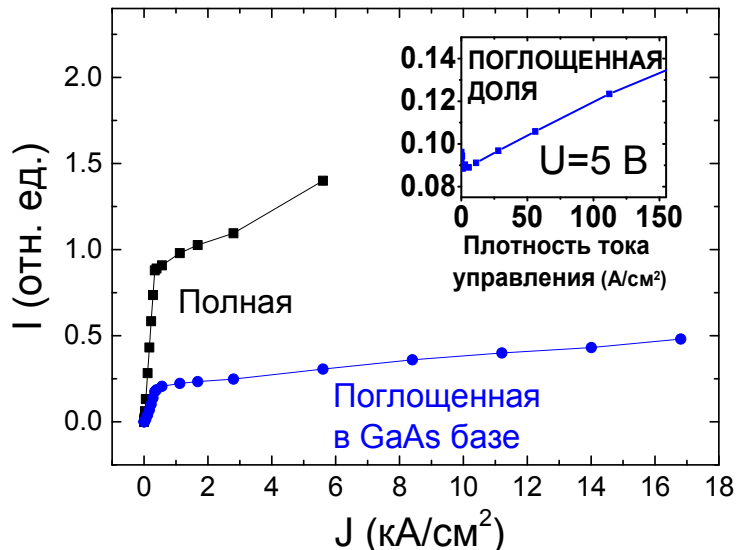


Рисунок 8 – Изменение интенсивности спонтанного излучения активной области лазерной части лазер-тиристора и поглощенной части в p-GaAs базе лазер-тиристора. На вставке показано отношение поглощенной к полной интенсивности спонтанного излучения при напряжении на структуре лазер-тиристора 5 В при изменении плотности тока накачки лазерного диода (которая в лазере-тиристоре является плотностью тока управления)

Выводы.

В результате экспериментальных исследований ООС получены спектры и интенсивность спонтанного излучения лазерного диода при различных токах накачки, в

режиме за порогом лазерной генерации продемонстрировано увеличение интенсивности спонтанного излучения, а также смещение спектра спонтанного излучения в коротковолновую область (из-за особенностей 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 за счет эффекта Франца-Келдыша. На основе полученных данных построены зависимости поглощенной в базе доли спонтанного излучения (полезной доли), характеризующей эффективность спонтанного излучения от тока и напряжения. Полученная в эксперименте полезная доля спонтанного излучения из активной области лазерного диода использовалась при построении модели. Важным моментом является рост интенсивности спонтанного излучения за порогом лазерной генерации, что приводит к усилению оптической обратной связи в лазер-тиристоре во включенном состоянии. На основе экспериментальных исследований оптической обратной связи в лазер-тиристорах, описанных в данной главе, опубликованы следующие работы: [3А], [4А].

3. Моделирование электрооптических характеристик низковольтных лазер-тиристоров с различными конструкциями областей объемного заряда на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs

3.1. Моделирование статических электрических характеристик низковольтных лазер-тиристоров на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур

На первом этапе теоретического исследования было проведено моделирование максимального напряжения блокировки в структурах лазер-тиристора с различной шириной низколегированной базовой области р-типа и с различной степенью ее легирования в статической модели. Это необходимо для определения оптимальной толщины базы при заданной степени легирования, т.к. в структуре с более толстой базой выше сопротивление, что отрицательно влияет на эффективность генерации лазерного излучения, а при недостаточной толщине базы может наблюдаться эффект смыкания переходов, что приводит к снижению напряжения блокировки и, соответственно, к снижению амплитуды генерируемых лазером-тиристором импульсов тока и пиковой мощности оптических импульсов. Для решения поставленной задачи в уравнениях (5) и (6) производная по времени приравнивалась к нулю и находились максимальные напряжения блокировки (при которых не происходит пробоя и перехода лазер-тиристора во включенное состояние без воздействия тока управления). На рис. 9 схематически представлена исследуемая транзисторная гетероструктура, в которой лазерная часть расположена со стороны анодного контакта, а фототранзисторная п-р-п 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. Степень легирования базы принималась равной $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, толщина базовой области менялась в пределах от 1 до 4.5 мкм, эмиттер состоял из слоя $\text{N-Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ толщиной 0.3 мкм, коллектор из слоев n-GaAs и $\text{N-Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ толщинами 0.24 и 1 мкм соответственно, концентрация легирующей примеси в слоях коллектора и эмиттера была равна $1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

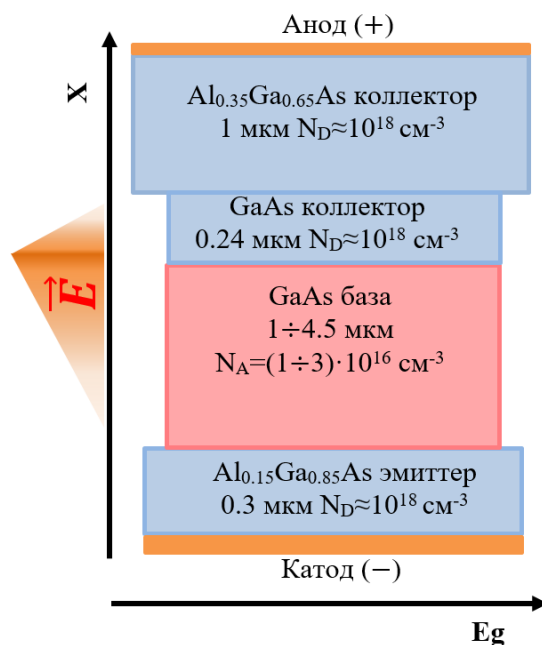


Рисунок 9– Схематическое изображение исследуемой гетероструктуры

Используемые при моделировании параметры приведены в табл. 1

Таблица 1– Параметры транспортной модели

Параметр	Описание	Значение
B	Коэффициент спонтанной рекомбинации	$2 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$
γ	Фактор оптического ограничения квантовой ямы	1.56%
g_0	Коэффициент модели усиления (19)	2600 см^{-1}
N_{tr}	Коэффициент модели усиления (19)	$2.15 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
τ_{SRH}	Время жизни носителей в модели рекомбинации Шокли-Рида-Хола в p-GaAs базе	20 нс
μ_n/μ_p , n-emitter	Подвижность электронов/дырок в n-эмиттере	$700/60 \text{ см}^2\text{Вс}^{-1}$
μ_n/μ_p , p-emitter	Подвижность электронов/дырок в p-эмиттере	$1400/90 \text{ см}^2\text{Вс}^{-1}$
μ_n/μ_p , waveguide	Подвижность электронов/дырок в волноводе	$2000/160 \text{ см}^2\text{Вс}^{-1}$
μ_n/μ_p , contact	Подвижность электронов/дырок в контактных слоях	$4000/200 \text{ см}^2\text{Вс}^{-1}$

Результат статического моделирования блокирующих напряжений представлен на рис. 10. Для каждой степени легирования существует некая оптимальная толщина базы, при этом при увеличении толщины базовой области более оптимальной, блокирующее напряжение не меняется, т.к. в данном случае напряженность электрического поля на коллекторном переходе достигает критических значений, и транзисторная структура

переходит во включенное состояние за счет ударной ионизации. Стоит различать напряжение пробоя, которое является характеристикой материала, и максимальное напряжение блокировки транзисторной структуры, которое является характеристикой прибора. Последнее определяется параметрами прибора, т.к. в данном случае переход во включенное состояние транзистора происходит в том случае, когда в базовой области накапливается достаточная концентрация неравновесных носителей (дырок), сгенерированных за счет ударной ионизации в области коллекторного перехода, а скорость ударной ионизации в свою очередь зависит от напряженности электрического поля и темнового тока, протекающего в приборе в выключенном состоянии и в отсутствии внешних воздействий.

Из полученного результата следует, что максимально возможное блокирующее напряжение в структурах лазер-тиристора сильно зависит от концентрации легирующей примеси в базе, так, при увеличении легирования базы от 10^{16} см^{-3} до $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ максимальное блокирующее напряжение снижается от 55 В до 27 В (практически в два раза). Так как толщина ООЗ уменьшается с увеличением легирования, то оптимальная толщина базы при $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в базе составляет 4 мкм, а при $N_A = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ – 2 мкм (рис. 10). При уменьшении толщины базы от оптимальной блокирующее напряжение на структуре постепенно снижается, т.к. толщина области ООЗ становится сравнимой с толщиной базы или превышает ее и происходит смыкание переходов (коллекторного и эмиттерного). На рис. 11 демонстрируется зависимость блокирующего напряжения лазер-тиристора от концентрации легирующей примеси в базе толщиной 4 мкм, видно, что максимальное блокирующее напряжение на структуре линейно зависит от легирования базы.

Можно сделать вывод, что для обеспечения более высокого блокирующего напряжения необходимо снижать легирование базовой области, однако, для снижения толщины базы и общей толщины структуры, а, следовательно, и ее последовательного сопротивления, возможно внесение тонкого высоколегированного p_+ слоя в область базы со стороны эмиттера во избежание эффекта смыкания переходов. На рис. 10 показано, что при внесении в базу со стороны эмиттера p_+ -GaAs слоя толщиной 60 нм и легированием 10^{18} см^{-3} напряжение блокировки в 55 В достигается уже при толщинах p_0 -GaAs с легированием 10^{16} см^{-3} слоя 2.5 – 3 мкм, при этом с уменьшением толщины слаболегированного p_0 -GaAs слоя блокирующее напряжение снижается медленнее, чем в структурах с однородно-легированной базой. Стоит отметить, что для эффективной работы лазер-тиристора и решения поставленных задач (генерация лазерных импульсов

мощностью десятки Вт при длительности 10-100нс на полувысоте) нет необходимости в очень высоких напряжениях питания.

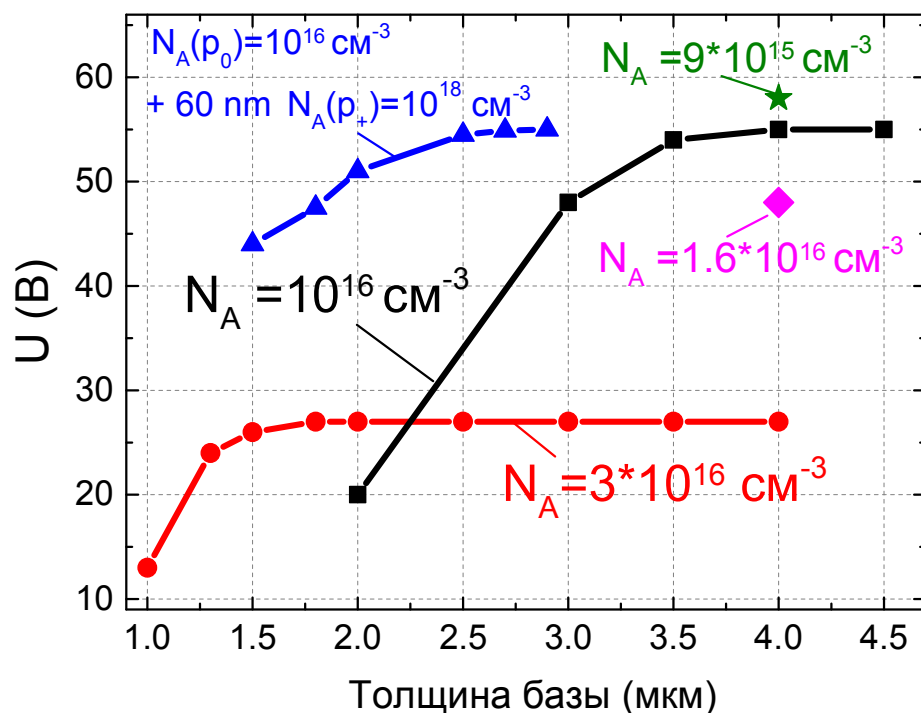


Рисунок 10 – Зависимость максимального напряжения блокировки от толщины базы для структур лазер-тиристора с различным легированием p_0 -GaAs базы, а также для случая составной p_+/p_0 базы. Для некоторых уровней легирования указано только значение блокирующего напряжения при толщине базы 4 мкм

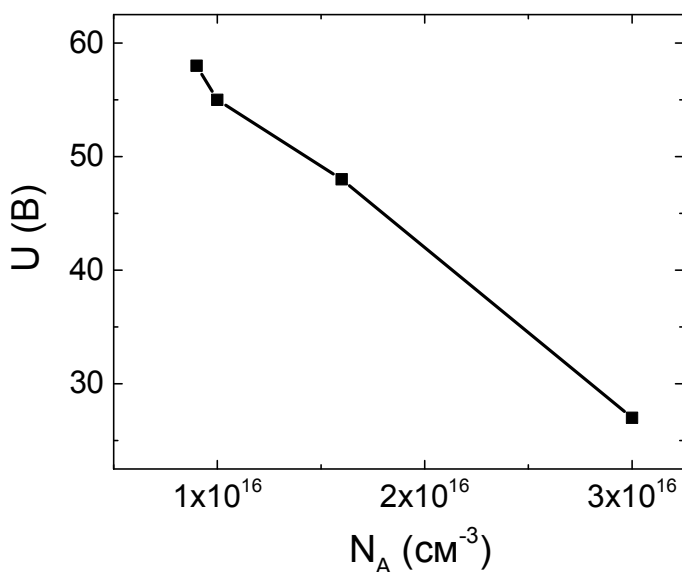


Рисунок 11 – Максимальное блокирующее напряжение лазер-тиристора в зависимости от концентрации легирующей примеси в базе (толщина базы подбиралась с учетом толщины области объемного заряда)

Тем не менее, при проведении численного моделирования не всегда возможно правильно рассчитать максимальное блокирующее напряжение, т.к. реальная структура может иметь различные дефекты, в том числе поверхностные, не учитываемые в модели, что будет оказывать влияние на темновой ток, а в конечном итоге и на блокирующее напряжение в полупроводниковых приборах. На рис.12 приведены результаты расчета темнового тока лазер-тиристора с базовой областью толщиной 4 мкм и легированием 10^{16} см^{-3} в зависимости от напряжения. Очевидно, что чем выше становится напряжение на структуре, тем выше темновой ток, однако темновая плотность тока слабо меняется с изменением напряжения, так при напряжении на структуре в 50 В темновая плотность тока составляет $\sim 10^{-9} \text{ А/см}^2$, а при напряжении 20 В $\sim 2 \div 4 \cdot 10^{-9} \text{ А/см}^2$. Начиная с некоторого значения напряжения (в данном случае это 55В) темнового тока, протекающего через структуру, становится достаточно для накопления в базовой области критической концентрации неравновесных дырок, сгенерированных за счет ударной ионизации в области коллекторного перехода, что в конечном итоге приводит к включению прибора. Было проведено исследование минимального уровня оптической активации на длине волны 800 нм (таким образом, чтобы весь спектр оптического излучения поглощался в области базы), достаточного для включения прибора при изменении напряжения на структуре от 20В до 50В. Как видно из рис. 12 минимальная оптическая плотность мощности, требуемая для включения прибора, меняется при изменении напряжения на 4 порядка от 10^{-6} Вт/см^2 до 10^{-2} Вт/см^2 . Оптическая активация была пересчитана в плотность тока, исходя из соотношений для оптической обратной связи (1, 2) в лазере-тиристоре, с учетом длины волны излучения и условия, что один фотон вызывает генерацию одной электронно-дырочной пары.

При расчете минимальной плотности тока для активации принималось приближение, в котором все излучение поглощалось в области объемного заряда, а сгенерированные носители накапливались в области базы, таким образом, полученные плотности тока активации являются верхней границей (возможна активация меньшими плотностями тока). Полученные таким образом плотности тока изменялись в пределах от 10^{-6} до 10^{-1} А/см^2 при изменении напряжения от 50 до 20 В, что на несколько порядков выше рассчитанных темновых плотностей тока. Так как при 55 В темнового тока достаточно для включения транзисторной структуры, а пересчитанная из минимального уровня оптической активации плотность тока является верхней границей, можно предположить, что реальный уровень минимальной оптической активации на несколько порядков ниже. Для расчета точного значения максимального напряжения блокировки необходимо знать темновой ток в реальной структуре, который может быть обусловлен

влиянием фоновой засветки и особенностью структуры (наличие дефектов, дислокаций в объеме и на поверхности), при этом темновой ток должен быть ниже минимального уровня плотности тока, необходимого для активации. Предположим, что в структуре наблюдается темновая плотность тока на уровне 10^{-5} А/см², в данном случае максимальное напряжение блокировки будет ниже 55 В и лазер-тиристор может переходить во включенное состояние уже при напряжениях порядка 32 В. Для построения более точной модели необходимо более детальное исследование темновых характеристик лазер-тиристора и разработка 2-х и 3-х мерных моделей, учитывающих дефекты полупроводниковых кристаллах и поверхностные эффекты, что выходит за рамки данной работы.

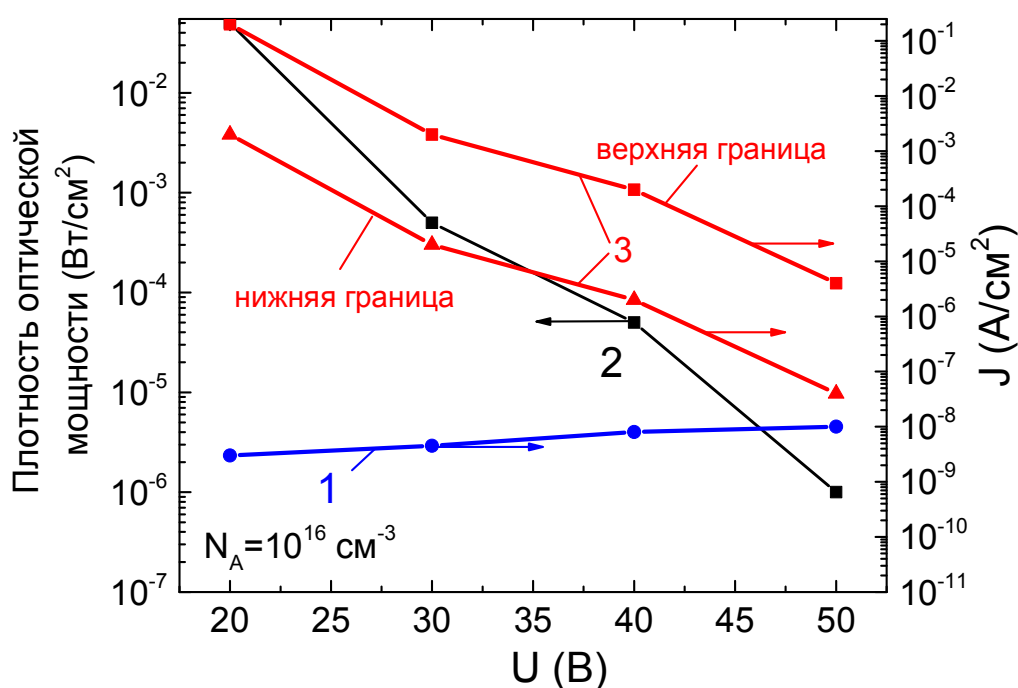


Рисунок 12 – 1) Темновая плотность тока в лазер-тиристоре в зависимости от напряжения для структуры с однородно-легированной базой ($N_A=10^{16}$) толщины 4 мкм, полученная в одномерной транспортной модели, 2) минимальный уровень плотности мощности, требуемый для оптической активации и 3) расчетные значения оценки минимальной плотности тока, необходимой для оптической активации.

Выводы

Для обеспечения более высокого блокирующего напряжения необходимо снижать легирование слоя, в котором происходит формирование объемного заряда и/или увеличивать толщину данного слоя/слоев в разумных пределах, так как для эффективной работы лазер-тиристора и решения поставленных задач (генерация лазерных импульсов мощностью десятки Вт при длительности 10-100нс на полувысоте) нет необходимости в

очень высоких напряжениях питания, кроме того высокие толщины структуры (за счет роста толщины низколегированной области) приведут к росту последовательного сопротивления и усложнению технологического процесса изготовления прибора (т.к. рост более толстой структуры методом MOCVD требует большего времени). Для снижения толщины структуры возможно внесение тонкого высоколегированного p^+ слоя в область базы со стороны эмиттера во избежание эффекта смыкания переходов. При внесении в базу со стороны эмиттера p^+ GaAs слоя толщиной 60 нм и легированием 10^{18} см^{-3} напряжение блокировки в 55 В достигается уже при толщинах p_0 -GaAs с легированием 10^{16} см^{-3} слоя 2.5 – 3 мкм, при этом с уменьшением толщины слаболегированного p_0 -GaAs слоя блокирующее напряжение снижается медленнее, чем в структурах с однородно-легированной базой. В представленной модели при максимальных напряжениях в структуре очень низкие уровни темнового тока, а включение может происходить при минимальных уровнях засветки (т.е. прибор при таких напряжениях является очень чувствительным к темновому току и засветке).

3.2 Моделирование динамических электрических характеристик и оптимизация конструкций AlGaAs/GaAs гетероструктур низковольтных лазер-тириستоров

С целью оптимизации структуры лазер-тиристора было проведено теоретическое исследование различных конструкций гетероструктуры прибора. Целью оптимизации является разработка конструкции лазер-тиристора для генерации лазерных импульсов пиковой оптической мощностью в десятки ватт при длительностях импульса порядка 100 нс, при высокой скорости перехода во включенное состояние в широком диапазоне длительностей импульсов (1-100 нс) и напряжений питания (до 110 В). В лазер-тиристорах должны поддерживаться низкие остаточные напряжения во включенном состоянии, должны быть минимизированы рекомбинационные потери и омическое сопротивление. В работе рассматриваются различные дизайны фототранзисторной части прибора и оптимизируются генерируемые лазер-тиристором токовые импульсы, при этом предполагается что оптические импульсы с длительностью в 10 нс и выше будут повторять по форме импульсы тока.

Исследуемые конструкции транзисторной части лазер-тиристора можно разделить на несколько типов по расположению области с высокими значениями напряженности электрического поля, т.к. именно распределение электрического поля на начальных этапах включения определяет скорость поставки неравновесных носителей, сгенерированных за счет ударной ионизации, в базу, что в свою очередь оказывает основное влияние на скорость перехода во включенное состояние. Начальное распределение электрического поля определяется профилем легирования гетероструктуры в соответствии с уравнением Пуассона. Электрическое поле тем сильнее проникает в слои гетероструктуры, чем ниже легирование данного слоя, в областях с высоким легированием, где электрическое поле проникает на небольшую глубину (50-200 нм), не происходит активной генерации неравновесных носителей за счет ударной ионизации, поэтому основной интерес представляет расположение низколегированных слоев, расположена основная часть области объемного заряда (ООЗ) где падает основное напряжение, приложенное к лазер-тиристор и где происходит активная ударная ионизация.

В лазере-тиристоре ООЗ может быть сформирована, а) в базе (низколегированная база и высоколегированный коллектор и эмиттер, к примеру рис. 4), б) в коллекторе (высоколегированная база и низколегированный коллектор) и в) одновременно и в базе, и в коллекторе (низколегированная база и коллектор состоящий из низколегированной части со стороны базы и высоколегированной части со стороны контактного слоя или эмиттера лазерного диода). Под высоким легированием (n_+ , p_+) будем понимать уровни легирования порядка 10^{17} см^{-3} и выше (чаще всего 10^{18} см^{-3} и более), а низкое

легирование(n_0, p_0) – 10^{17} см^{-3} и ниже. При исследовании различных конструкций прибора изменялись толщины слоев и профили легирования, однако во всех случаях рассматриваемая транзисторная структура была типа n-p-n для обеспечения сквозного транспорта электронов, как носителей с более высокой подвижностью, также не менялся состав слоев.

1) Гетероструктура лазер-тиристора с областью объемного заряда, сформированной в p-GaAs базе

Рассмотрим структуру с ООЗ, расположенной в p-базе лазер-тиристора. Исследуемая гетероструктура схематически представлена на рис. 13 и состоит из 0.3 мкм $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ эмиттера с $N_D=1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, 4 мкм GaAs базы с $N_A=10^{16} \text{ см}^{-3}$ и составного коллектора, состоящего из 0.24 мкм GaAs и 1 мкм $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ с $N_D=1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Максимальное напряжение блокировки лазер-тиристора с такой фототранзисторной частью составляет 55 В, при моделировании значение емкости внешнего конденсатора взято равным 100 нФ, а значение внешнего сопротивления – 0.5 Ом.

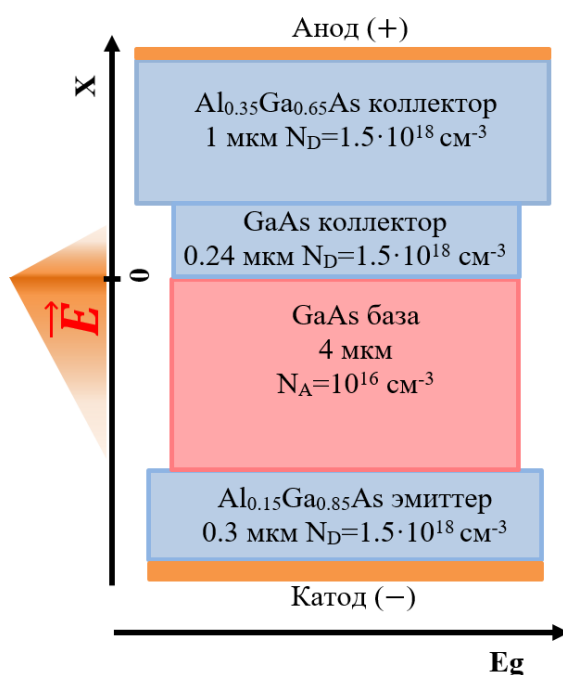


Рисунок 13 – Схематическое изображение гетероструктуры лазер-тиристора с ООЗ, сформированной в области p-GaAs базы

В результате моделирования были получены динамики тока и напряжения при генерации лазер-тиристором одиночного импульса тока при начальных напряжениях от 10 до 50 В (рис. 14). При напряжении 50 В достигается максимальная амплитуда импульсов тока в 80 А, для сравнения в структуре с толщиной базы 2 мкм и $N_A=3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ максимальная полученная амплитуда тока составляла 20 А, хотя и не при максимально возможном напряжении. В исследуемой структуре с 4 мкм базой наблюдаются высокие скорости перехода лазер-тиристора во включенное состояние (порядка 10-20 нс) при включении с начальными напряжениями 50 – 30 В, при начальном смещении в 20 В фронт включения более медленный и составляет порядка 30 нс, а амплитуда тока ~15 А, при 10 В время включения более 150 нс с амплитудой тока в единицы А. Можно сделать вывод,

что данная структура более эффективно работает при высоких напряжениях, в то же время, как было показано ранее, так как в модели не учитываются пространственные эффекты, скорости перехода лазер-тиристора во включенное состояние при более низких начальных напряжениях в действительности могут быть более высокими.

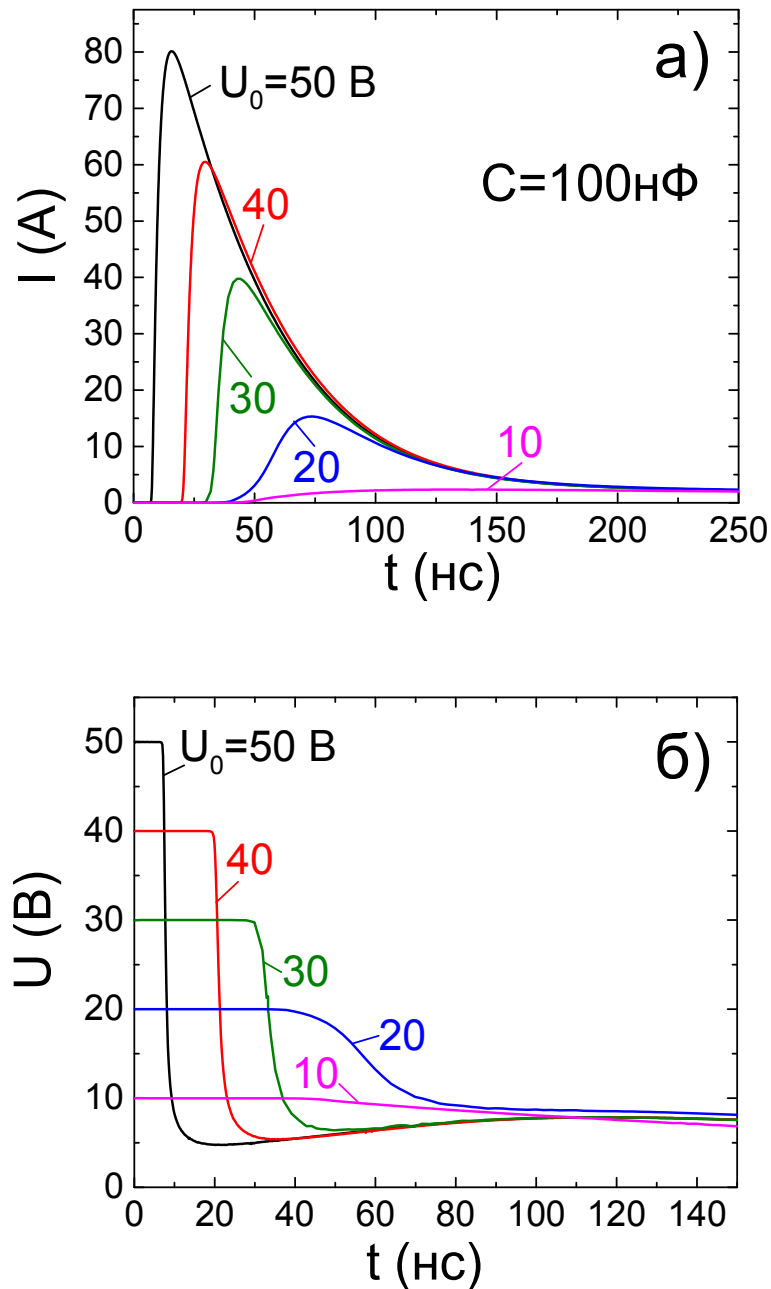


Рисунок 14 – Динамика а) тока и б) напряжения в структурах лазер-тиристора с однородно-легированной базой ($N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)

Для понимания причин снижения скоростей переходных процессов при более низких начальных напряжениях рассмотрим распределения электрического поля и концентраций носителей в структуре в различные моменты времени (рис. 15-16). В лазер-тиристорах скорости перехода во включенное состояние определяется скоростью

накопления в базе неравновесных дырок в базе и более высокие скорости возможны при наличии ударной ионизации, как уже говорилось ранее. В свою очередь для обеспечения высокой скорости поставки неравновесных дырок в базу необходимо поддержание высоких темпов ударной ионизации, что возможно при высоких значениях напряженности электрического поля.

При напряжениях 10 В и ниже структура не включается эффективно из-за низких значений напряженности электрического поля (рис. 15б) в области коллекторного перехода, не обеспечивающих эффективную ударную ионизацию. Как видно из распределения электрического поля при напряжении 30В (рис. 15а), высокая скорость переходных процессов обусловлена высокими значениями напряженности электрического поля (обеспечивающими высокую скорость ударной ионизации) на начальном этапе, а также во время включения при перераспределении электрического поля и формировании домена на коллекторном переходе. При снижении напряжения на структуре, очевидно, снижается и максимальная напряженность электрического поля. Как видно из рис. 16, за счет накопления в базовой области высоких концентраций электронно-дырочной плазмы при включении увеличивается градиент электрического поля в базе (рис. 15а) в соответствии с уравнением Пуассона, что оказывает существенное влияние на перераспределение электрического поля в базе во время включения. За счет увеличения градиента электрического поля максимальные значения напряженности электрического поля выше при тех же напряжениях на структуре и выше скорость генерации носителей посредством ударной ионизации, а, следовательно, сохраняются более высокие скорости включения. При более низких напряжениях начальные значения напряженности электрического поля недостаточны для активной ударной ионизации, обеспечивающей высокие скорости включения (рис. 15б), и в то время как уже при 20 В скорость включения постепенно увеличивается за счет изменения градиента электрического поля при 10 В ударная ионизация практически не влияет на динамику включения. В гетероструктуре с более высоким легированием базы значения напряженности поля при тех же начальных напряжениях выше, что обеспечивает более эффективное включение при низких напряжениях (в соответствии с уравнением Пуассона).

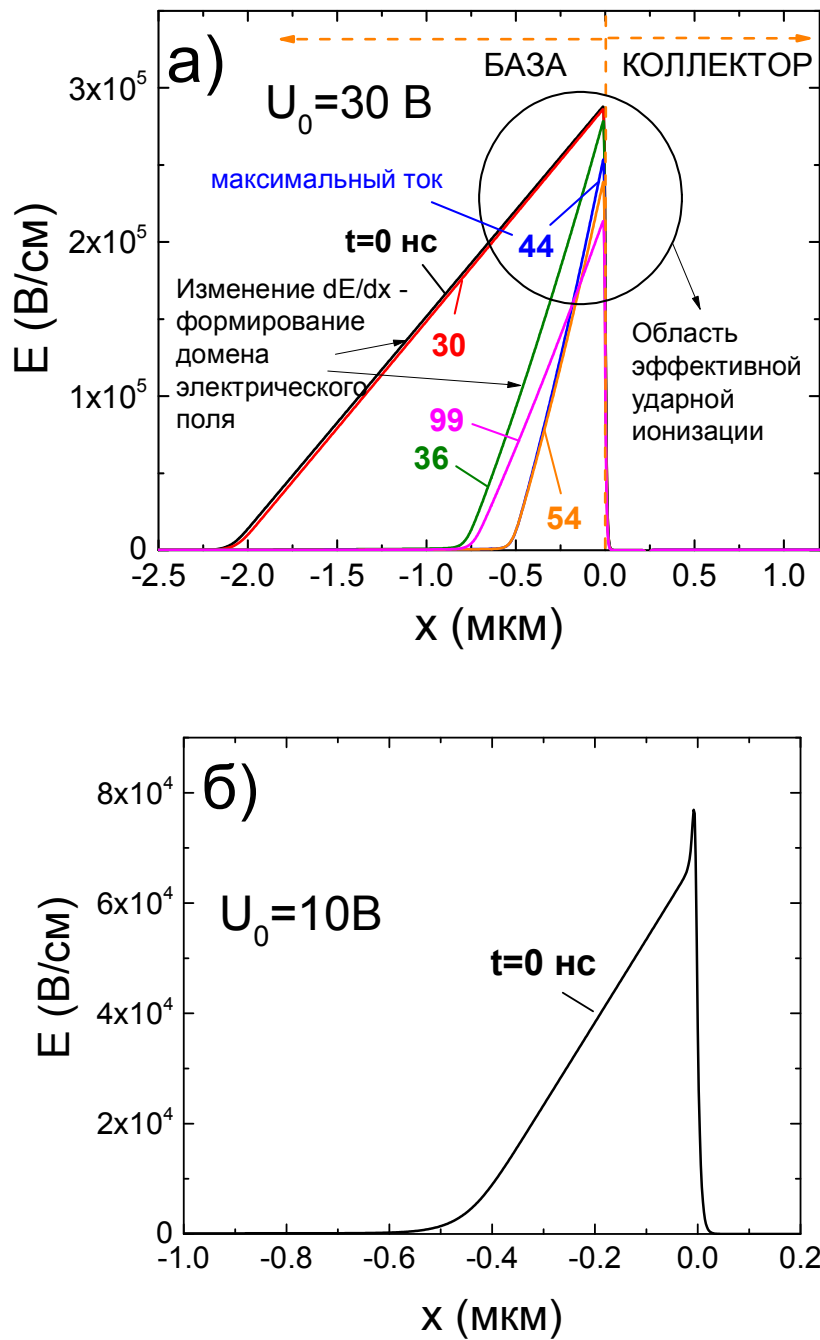


Рисунок 15 – Распределение напряженности электрического поля в структуре лазер-тиристора с однородно-легированной базой ($N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$) толщиной 4 мкм при, а) $U_0 = 30 \text{ В}$ в различные моменты времени и б) $U_0 = 10 \text{ В}$ в начальный момент времени. Внешняя емкость равнялась 100 нФ, динамика включения представлена на рис. 14

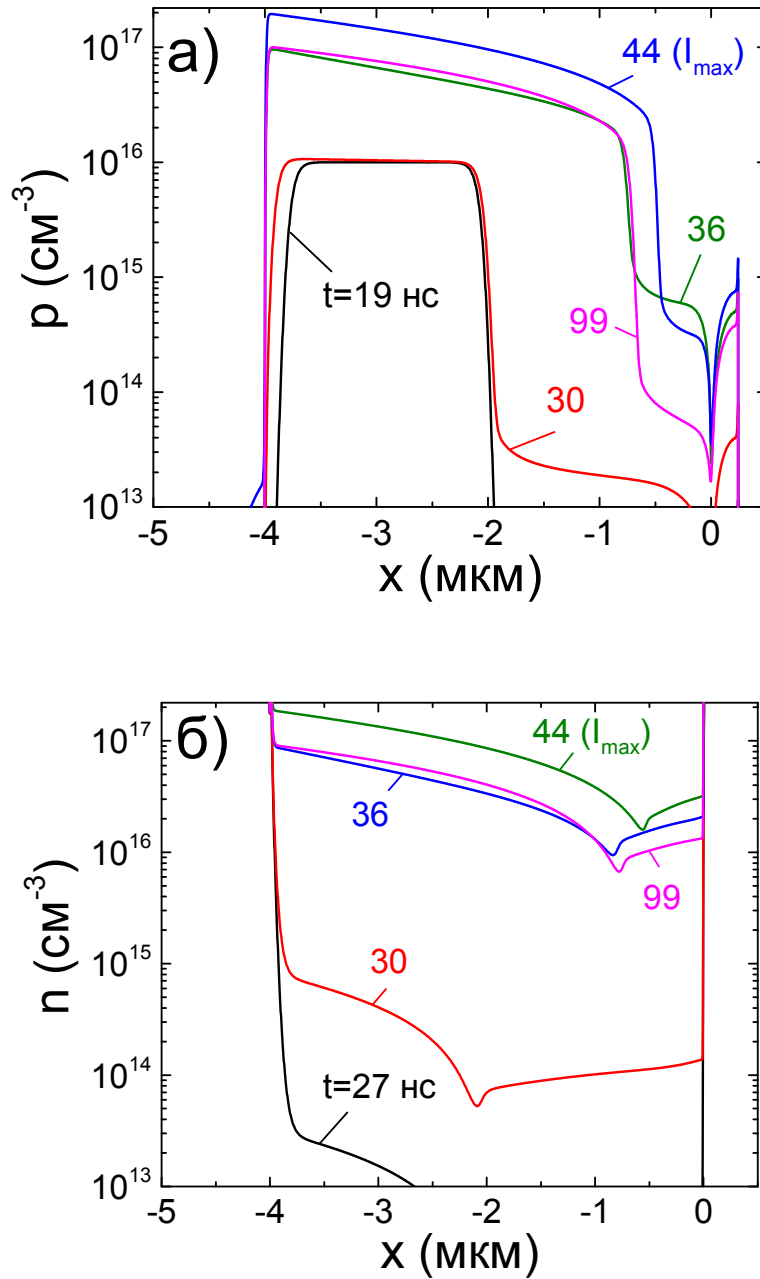


Рисунок 16 – Распределение концентрации а) дырок и б) электронов в различные моменты времени для гетероструктуры лазер-тиристора с однородно-легированной базой ($N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) толщиной 4 мкм. Внешняя емкость равнялась 100нФ, динамика включения представлена на рис. 14

Для оптимизации толщин слоев и снижения омического сопротивления структуры возможным решением может быть внесение тонкого p_+ высоколегированного слоя в базу со стороны эмиттера, при этом будет сохраняться максимальное напряжение блокировки, а высоколегированный p_+ слой позволит избежать эффекта смыкания переходов при снижении толщины p_0 -GaAs слоя базы. На рис.17 схематически показана гетероструктура такого типа с толщиной p_+ слоя $0.5 \mu\text{m}$ и $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ и толщиной p_0 слоя $2.5 \mu\text{m}$ в

качестве примера, однако необходимо дополнительно проводить оптимизацию толщин p_+ и p_0 слоев.

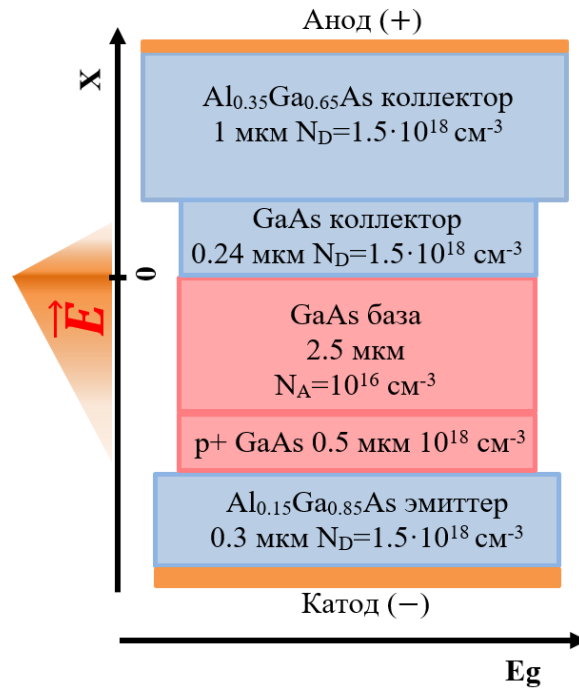


Рисунок 17 – Схематическое изображение конструкции гетероструктуры лазер-тиристора с внесением высоколегированного слоя в базу

Сравнение динамики тока при генерации одиночного импульса в лазер-тиристорах с однородно легированной базой толщиной 4 мкм и с составной базой с толщиной p_0 слоя 2.5 мкм и p_+ слоя 0.5 мкм показало, что форма импульса не изменяется, но в лазер-тиристоре с составной базой наблюдается чуть больший максимальный ток и выше задержка включения (рис. 18). Задержка включения в структуре с составной базой выше из-за внесения дополнительных рекомбинационных потерь за счет наличия p_+ слоя и, возможно, меньшей толщины поглощающего спонтанное излучение слоя (последнее скорее всего малозначительно сказывается на задержке включения, так как интенсивность излучения экспоненциально спадает в слое GaAs).

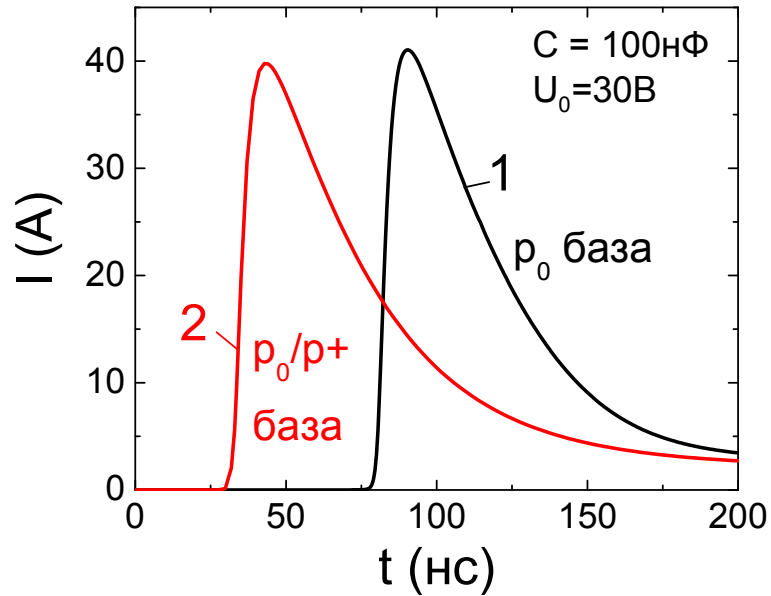


Рисунок 18 – Сравнительная динамика токов в структурах лазер-тиристора с различным профилем легирования базовой области: 1 – составная база 0.5 мкм $N_A=10^{18} \text{ см}^{-3}$ + 2.5 мкм $N_A=10^{16} \text{ см}^{-3}$, 2 – однородно-легированная база 4 мкм $N_A=10^{16} \text{ см}^{-3}$. Начальное напряжение 30 В, внешняя емкость 100 нФ

Как видно из распределения напряженности электрического поля (рис.19), внесенный p_+ слой влияет на распределение поля и, весь p_0 слой заполнен электрическим полем, которое «подпирается» высоколегированным слоем. Также в такой структуре за счет меньшей толщины p_0 области накапливается большая концентрация неравновесных носителей (рис. 20). В данном случае в области высоколегированной базы так же происходит накопление неравновесной концентрации дырок, однако из-за более высоких концентраций акцепторной примеси рекомбинация в данной области значительно выше, что видно на рис. 20 по снижению концентрации электронов в области слоя p_+ .

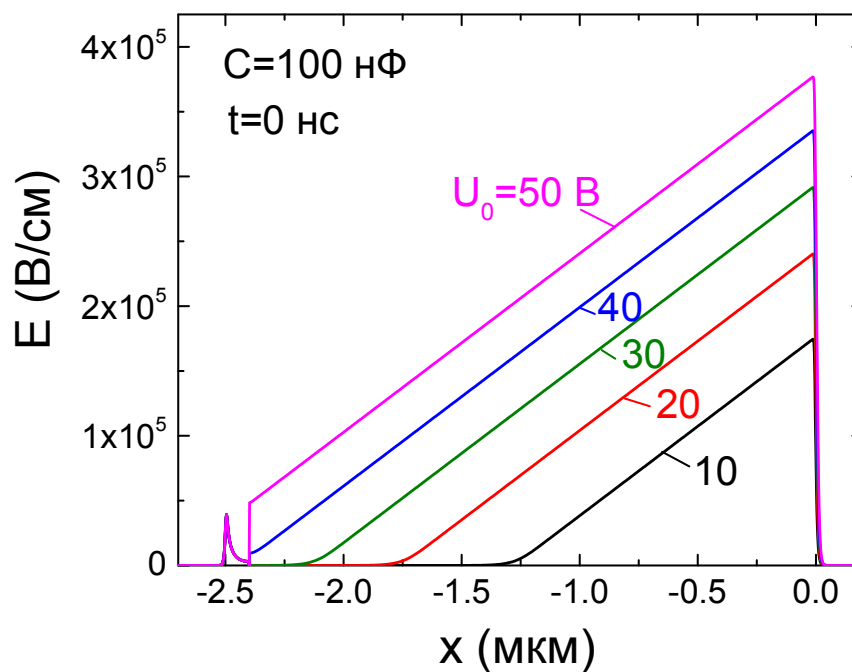


Рисунок 19 – Начальное распределение напряженности электрического поля в структуре лазер-тиристора с составной GaAs базой 0.5 мкм $N_A=10^{18}$ см $^{-3}$ + 2.5 мкм $N_A=10^{16}$ см $^{-3}$. Внешняя емкость равнялась 100 нФ, динамика тока для $U_0=50$ В представлена на рис. 18

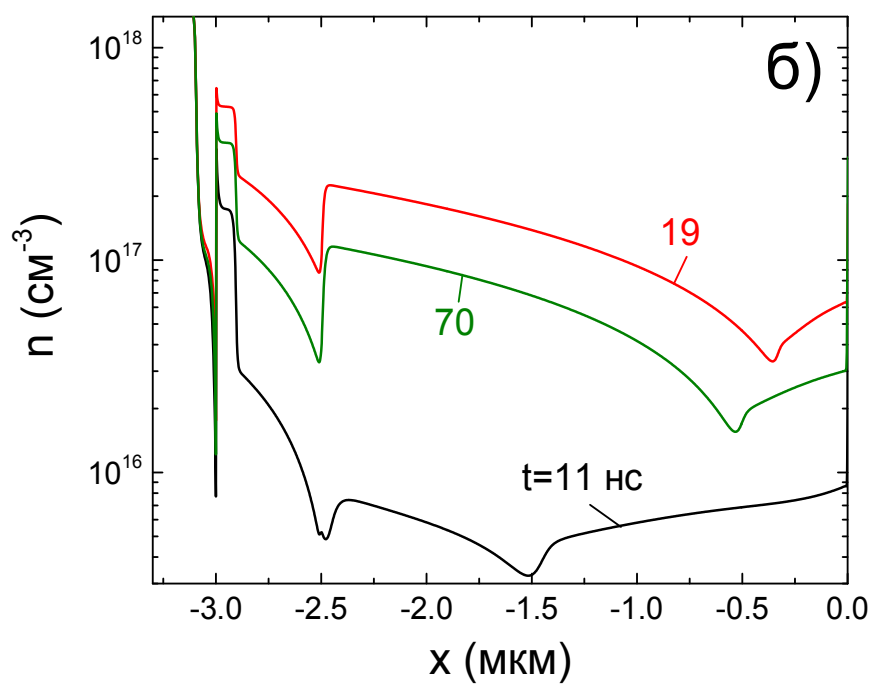
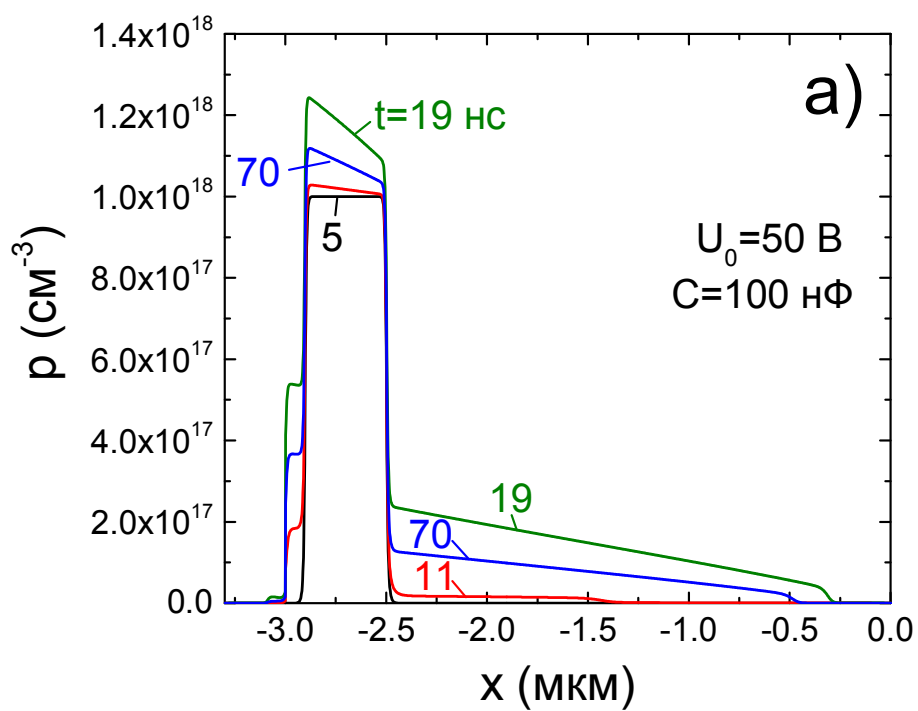


Рисунок 20 – Распределение концентраций, а) дырок в линейном масштабе и б) электронов в логарифмическом масштабе в различные моменты времени при начальном напряжении 50 В в структуре лазер-тиристора с составной базой GaAs базой 0.5 мкм $N_A=10^{18} \text{ см}^{-3}$ + 2.5 мкм $N_A=10^{16} \text{ см}^{-3}$. Внешняя емкость равнялась 100 нФ, динамика тока представлена на рис. 18

В результате проведения оптимизации толщины p_+ слоя показано, что его толщина должна быть равна или превышать 0.05 мкм во избежание эффекта смыкания p - n переходов, а для снижения рекомбинационных потерь лучшим решением будет минимальная толщина p_+ слоя, т.е. 0.05 мкм. При использовании тонкого высоколегированного слоя повышается эффективность прибора. На рис. 21 показан фронт включения данной структуры в сравнении с стандартной однородно-легированной 4 мкм базой при напряжении питания 20В, видно, что транзистор включается быстрее, остаточное напряжение меньше, а ток выше. При уменьшении области p_0 до 1.8 мкм так же наблюдается небольшое улучшение эффективности включения. Уменьшение толщины p_0 слоя менее 2.5 мкм приводит к незначительному снижению максимального напряжения блокировки, как было показано на рис. 10, однако это снижение незначительно и при толщине p_0 слоя максимальное напряжение блокировки составляет 45 В. Как видно из динамики тока и напряжения при включении лазер-тиристора с составной базой (рис. 21) при меньшей толщине p_0 слоя значительно увеличивается скорость перехода во включенное состояние, достигая максимума при толщине 1.8 мкм, при этом значительно увеличивается амплитуда токовых импульсов – в сравнении со стандартной структурой в рассматриваемом случае амплитуда импульсов тока выше практически в 2 раза и составляет ~30 А (рис. 21). В структуре с p_0 областью базы толщиной 1.8 мкм и с наличием тонкого p_+ слоя со стороны эмиттера меньше задержка включения несколько меньше, чем в структуре с однородно легированной базой или в структуре с p_0 областью толщиной 2.5 мкм, однако на рис. 21 динамики тока и напряжения совмещены для наглядности. Различие в задержках включения говорит о том, что с одной стороны, внесение p_+ слоя вносит дополнительные потери (в структуре с p_0 слоем толщиной 2.5 мкм задержка включения выше, чем в структуре с однородно легированной p_0 базой толщиной 4 мкм), а с другой стороны, в меньшем объеме легче накопить критическую концентрацию дырок, необходимую для включения прибора (в структуре с p_0 базовой областью толщиной 1.8 мкм наблюдается минимальная задержка включения) (рис. 21). Уменьшение толщины низколегированной части базы менее, чем до 1.8 мкм не приводит к повышению скорости перехода во включенное состояние. Более быстрое переключения лазер-тиристорov с узкой p_0 базой является следствием того, что в узкой нелегированной области быстрее накапливается критическая концентрация неравновесных носителей при включении лазер-тиристора, так как сгенерированные носители концентрируются в меньшем объеме.

Кроме того, как видно из рис. 22, в структурах с узкой p_0 областью при включении с начальными напряжениями ниже максимального основным каналом поставки носителей

в базу является фотогенерация, и, чем уже p_0 область, тем меньший вклад вносит генерация носителей посредством ударной ионизации, в то время как скорость фотогенерации в целом повторяет импульс тока (из-за того, что фотогенерация в области базы обусловлена оптической обратной связью). Еще одним преимуществом структур с p_+ слоем со стороны эмиттера является низкое остаточное напряжение. Таким образом, в структурах данного типа наблюдаются высокие скорости перехода во включенное состояние (порядка 20 нс), обусловленные фотогенерацией, а не ударной ионизацией, как было показано ранее на примере структур с однородно легированной базой. Данные особенности работы лазер-тиристоров с наличием p_+ -GaAs слоя значительно отличаются от рассмотренных ранее (в структурах с однородно легированной p_0 -GaAs базой), так в структуре 4 мкм базой на начальном этапе включения преобладает фотогенерация (рис. 22) и наблюдается участок с очень медленной скоростью нарастания тока и спада напряжения, а когда включается ударная ионизация скорость переходных процессов нарастает. Данный факт означает, что возможно создание лазер-тиристоров, где высокие скорости переключения в проводящее состояние будут определяться и ударной ионизацией, и фотогенерацией. Рассматриваемый эффект заметен при более низких напряжениях, в то же время при высоких напряжениях высокая скорость генерации неравновесных носителей обеспечивается ударной ионизацией и уменьшение толщины p_0 слоя практически не сказывается на динамике перехода во включенное состояние.

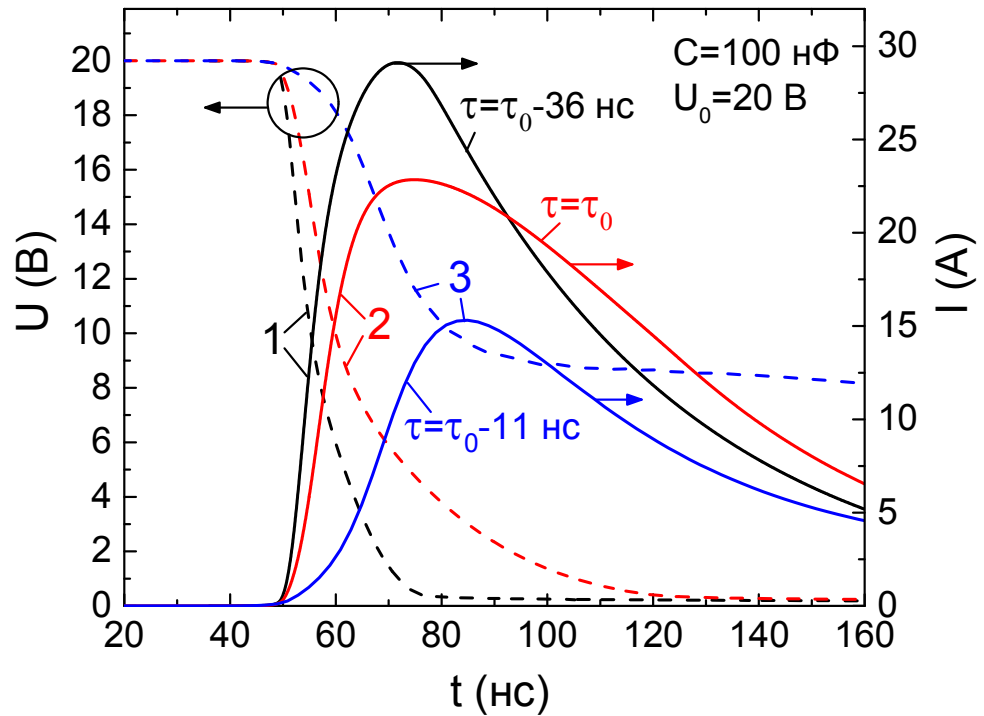


Рисунок 21 – Динамика тока (сплошная линия) и напряжения (пунктир) при включении лазер-тиристора с различными профилями легирования и толщинами базовой области: 1) база с GaAs p_+ слоем толщиной 0.05 мкм со стороны эмиттера и p_0 слоем толщиной 1.8 мкм; 2) база с GaAs p_+ слоем толщиной 0.05 мкм со стороны эмиттера и p_0 слоем толщиной 2.5 мкм; 3) однородно легированная GaAs p_0 база толщиной 4 мкм. 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 указано смещение задержки включения (τ) относительно структуры 1. Начальное напряжение 20 В, внешняя емкость 100 нФ

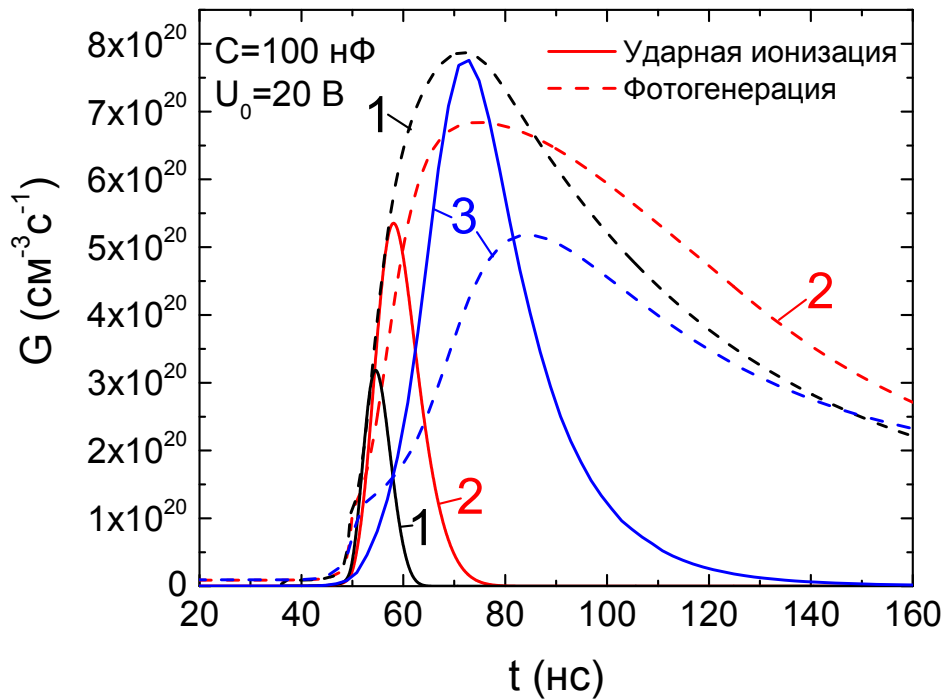


Рисунок 22 – Динамика генерации носителей в области базы за счет ударной ионизации (сплошная линия) и фотогенерации (пунктир) в лазер-тиристорах с различными профилями легирования и толщинами базы. 1) база с GaAs p_+ слоем толщиной 0.05 мкм со стороны эмиттера и p_0 слоем толщиной 1.8 мкм; 2) база с GaAs p_+ слоем толщиной 0.05 мкм со стороны эмиттера и p_0 слоем толщиной 2.5 мкм; 3) однородно легированная GaAs p_0 база толщиной 4 мкм. Для p_+ слоев $N_A=10^{18} \text{ см}^{-3}$, для p_0 слоев $N_A=10^{16} \text{ см}^{-3}$. Начальное напряжение 30 В, внешняя емкость 100 нФ, динамика тока и напряжения, задержки включения показаны на рис. 21

Рассмотрим более подробно, как происходит накопление носителей и перераспределение электрического поля в структурах лазер-тиристоров с составной базой для понимания особенностей динамики переходных процессов, а также более низких скоростей ударной ионизации при уменьшении толщины p_0 слоя. На рис. 23 указаны распределения электрического поля в различные моменты времени для гетероструктур двух типов, при этом моменты времени подбирались чтобы остаточные напряжения на структурах совпадали. На рис. 24 указаны распределения электронов и дырок.

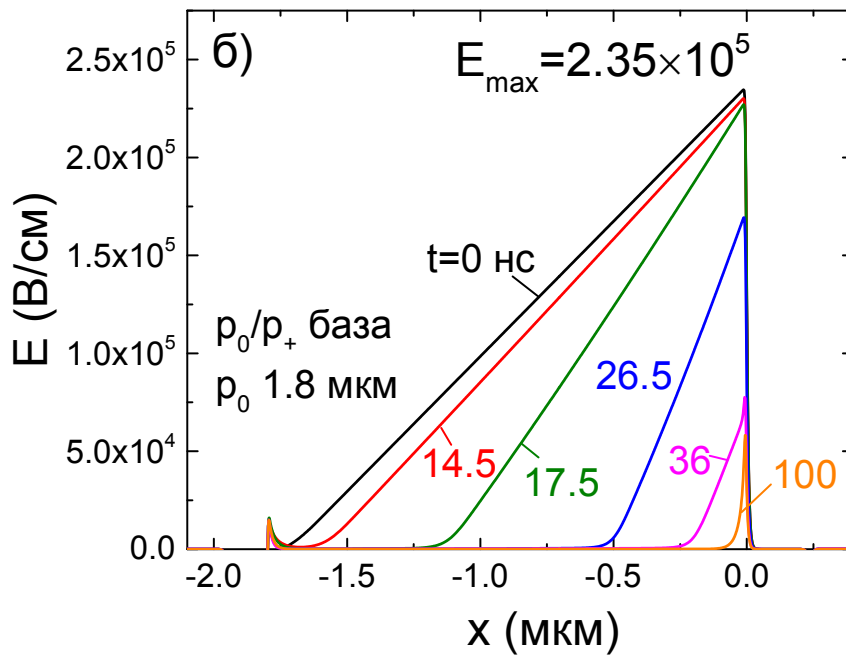
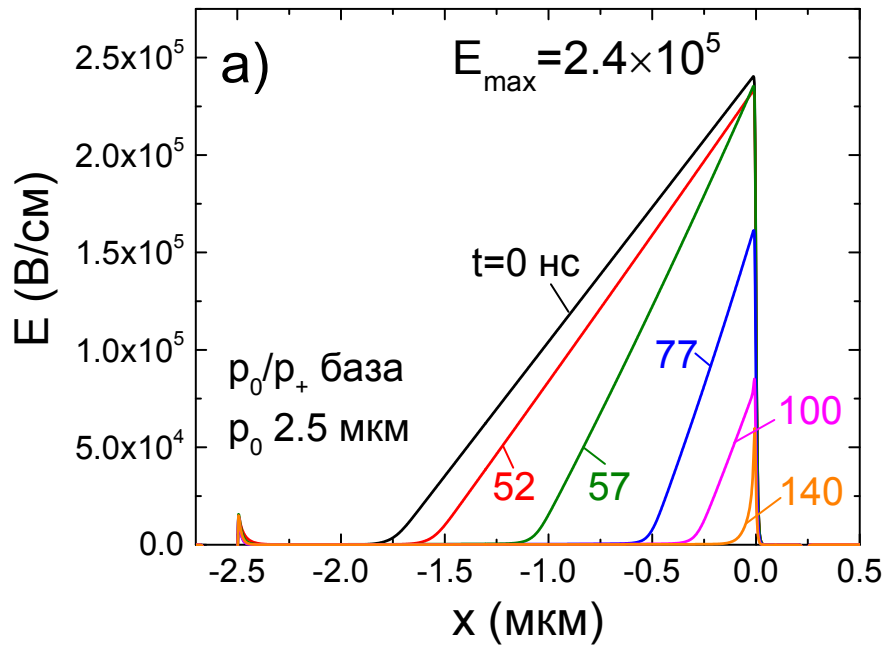


Рисунок 23 – Распределения напряженности электрического поля в структурах лазер-тиристора с различным профилем легирования в различные моменты времени: а) для с толщиной GaAs p_0 области 2.5 мкм и p_+ слоем толщиной 0.05 мкм; б) для структуры с толщиной GaAs p_0 области 1.8 мкм и p_+ слоем толщиной 0.05 мкм. Указаны моменты времени без смещения, т.е. для сопоставления времени с рис. 21 и 22 для рис. б) необходимо прибавить разницу задержек включения двух структур в 36 нс. Начальное напряжение 30 В, внешняя емкость 100 нФ, динамика тока и напряжения, задержки включения показаны на рис. 21

Из распределений электрического поля видно, что в структуре с толщиной p_0 области 1.8 мкм на начальном этапе напряженность электрического поля немного ниже, также в данном случае поле спадает значительно быстрее, что обуславливает более низкие уровни ударной ионизации, так как при максимальном токе (а ударная ионизация является произведением плотности тока и коэффициентов ударной ионизации, зависящих от поля) в данном случае напряженность поля в базе практически равна нулю и ударная ионизация отсутствует (36 нс), в то же время в структуре с p_0 областью толщиной 2.5 мкм при токах, близких к максимальному напряженность поля не равна нулю, а плотности тока достаточно высоки (57 – 77 нс). Второй фактор – это небольшое перераспределение электрического поля и более низкие начальные значения напряженности поля в структуре с p_0 областью толщиной 1.8 мкм. Также в случае с p_0 областью толщиной 1.8 мкм при напряжении в 20 В поле занимает всю низколегированную область, и именно данная структура показывает самую быструю скорость перехода во включенное состояние при рассматриваемом напряжении в 20 В.

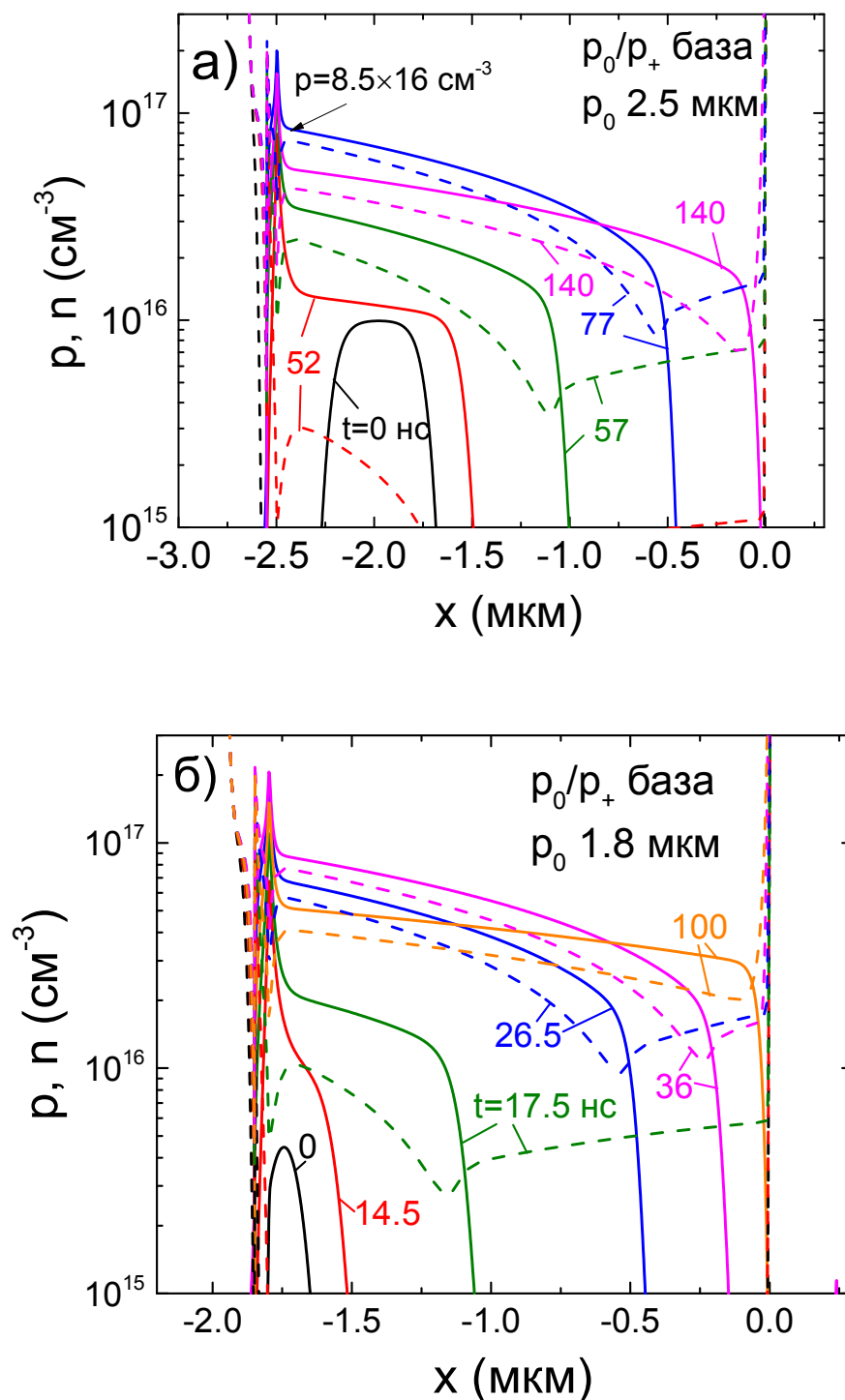


Рисунок 24 – Распределения концентрации дырок (сплошная линия) и электронов (пунктир) в структурах лазер-тиристора с различным профилем легирования в различные моменты времени: а) для с толщиной GaAs p_0 области 2.5 мкм и p_+ слоем толщиной 0.05 мкм; б) для структуры с толщиной GaAs p_0 области 1.8 мкм и p_+ слоем толщиной 0.05 мкм. Указаны моменты времени без смещения, т.е. для сопоставления времени с рис. 21 и 22 для рис. б) необходимо прибавить разницу задержек включения двух структур в 36 нс. Начальное напряжение 30 В, внешняя емкость 100 нФ, динамика тока и напряжения, задержки включения показаны на рис. 21

Из распределений концентрации носителей (рис. 24), видно, что при толщине p_0 слоя 1.8 мкм, т.к. ООЗ занимает всю область p_0 слоя концентрация дырок в области базы очень мала и ниже 10^{16} см^{-3} , а во включенном состоянии квазинейтральная область с высокой концентрацией электронно-дырочной плазмы занимает почти весь $p_0\text{GaAs}$ слой при максимальном токе (36 нс), что обеспечивает наиболее эффективное включение. В целом, в структуре с более узкой p_0 областью концентрация носителей немного выше (рис. 24), что так же обеспечивает более высокие амплитуды тока. На рис. 25 показана интегральная концентрация (интеграл по области базы) в зависимости от тока, видно, что в структуре с p_0 базой интегральная концентрация немного выше, однако, т.к. ширина базы больше амплитуда тока. Также рис. 25 демонстрирует, что при максимальной интегральной концентрации в области базы достигается минимальное напряжение в структуре, что не обязательно совпадает с максимумом тока, т.к. ток также зависит от параметров цепи (в данном случае играет роль наличие индуктивности и тот факт, что внешний емкостной накопитель начинает разряжаться). При снижении напряжения до остаточного на структуре, ток в цепи определяется диффузионной и дрейфовой компонентой, последнюю же обеспечивает остаточная напряженность поля в квазинейтральной области (порядка 100-200 В/см), а максимальная концентрация электронно-дырочной плазмы в области базы снижается.

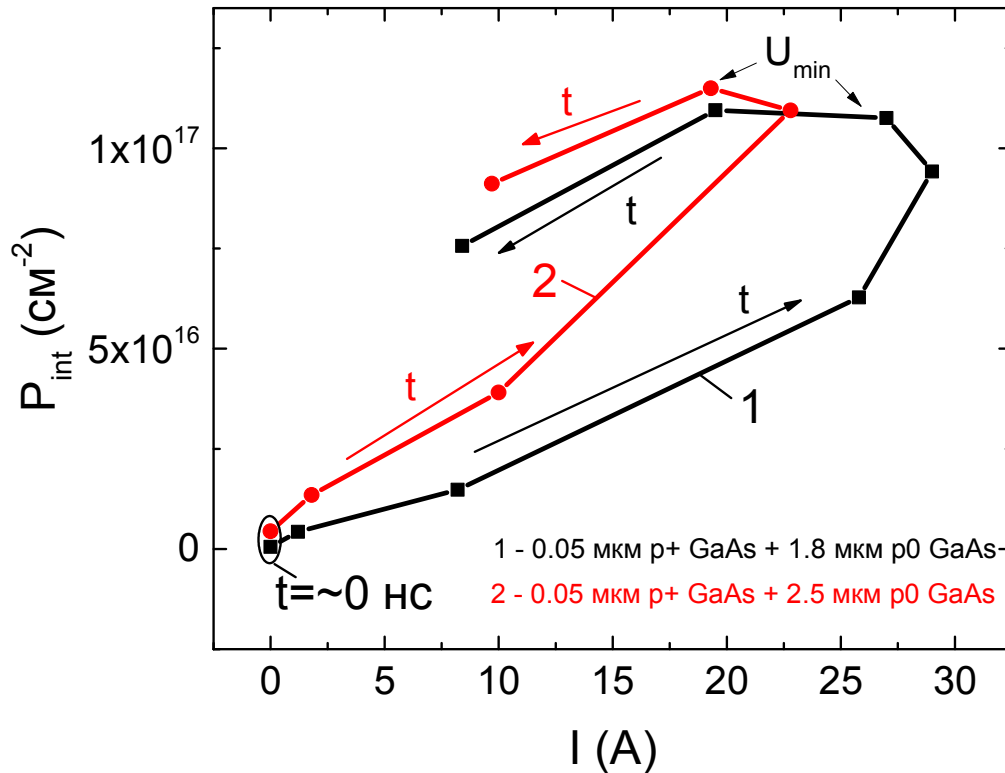


Рисунок 25 – Интегральная концентрация дырок в области базы (P_{int}) в структурах лазер-тиристора с различным профилем легирования базы в зависимости от тока: 1 – база с толщиной GaAs p_0 области 1.8 мкм и p_+ слоем толщиной 0.05 мкм; 2 – база с толщиной GaAs p_0 области 2.5 мкм и p_+ слоем толщиной 0.05 мкм. Начальное напряжение 30 В, внешняя емкость 100 нФ, динамика тока и напряжения, задержки включения показаны на рис. 21. Стрелкой показано направление оси времени, т.к. одному значению тока может соответствовать несколько значений P_{int} , при этом большие значения P_{int} соответствуют более поздним моментам времени.

Выводы

Можно заключить, что наиболее эффективными конструкциями лазер-тиристора с ООЗ, сформированной в базе, являются структуры с однородно легированной базой толщиной ~ 4 мкм и $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ или с составной базой, состоящей из p_0 слоя толщиной 1.8 – 2.5 мкм и p_+ слоя, расположенного со стороны эмиттера, толщиной 0.05 мкм, при этом структура с составной базой демонстрирует более высокие скорости включения при относительно низких напряжениях (~ 20 В), низкие остаточные напряжения. Максимальную скорость при 20 В демонстрирует структура с p_0 слоем толщиной 1.8 мкм, где ООЗ занимает всю p_0 область. Критически важной является толщина p_+ слоя, которая должна быть минимальной во избежание лишних рекомбинационных потерь и снижения эффективности включения лазер-тиристора (увеличения времени включения и остаточного напряжения). Главной особенностью структур с наличием p_+ GaAs слоя со

стороны эмиттера является преобладание фотогенерации при включении прибора при относительно низких напряжениях (~ 20 В), которая в то же время обеспечивает высокую скорость перехода во включенное состояние.

2) Гетероструктура лазер-тиристора с областью объемного заряда, сформированной в p_0 -GaAs базе и n_0 -GaAs/AlGaAs коллекторе

Еще одним из вариантов конструкции транзисторной части лазер-тиристора является гетероструктура с расположением ООЗ в базе и коллекторе, в данном случае коллектор состоит из двух частей – низколегированной, где расположена ООЗ, и высоколегированной, которая служит эмиттером интегрированной лазерной РОДГС. Такой подход позволяет увеличить толщину ООЗ и максимальное напряжение блокировки, не увеличивая при этом толщину структуры. В структурах лазер-тиристора с более высоким напряжением блокировки возможна генерация импульсов с более высокой амплитудой тока, и, соответственно, большей пиковой оптической мощностью. На рис.26 представлено схематическое изображение исследуемой гетероструктуры, которая представляет собой транзисторную часть лазер-тиристора и состоит из n^+ $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ эмиттера толщиной 0.15 мкм с $N_D=1.5 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$, p_0 -GaAs базы толщиной 1-3 мкм $N_A=10^{16} \text{cm}^{-3}$, низколегированной части GaAs/ $Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ коллектора толщиной 1-3 мкм с $N_D=10^{16} \text{cm}^{-3}$ и высоколегированной части $n^+Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ коллектора толщиной 0.5 мкм с $N_D=1.5 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$. Рассмотрена также структура с p^+/p_0 базой, в которой со стороны N- $AlGaAs$ эмиттера внесен p^+ -GaAs слой толщиной 0.5 мкм с $N_A=10^{18} \text{cm}^{-3}$. При этом в случае $AlGaAs$ коллектора небольшая часть коллекторного слоя, примыкающая к базе, состояла из узкозонного GaAs, толщиной 0.24 мкм. Внешнее сопротивление в цепи равнялось 0.5 Ом, значение емкости конденсатора, включенного параллельно лазер-тиристор, варьировалось в пределах 150 – 0.05 нФ. Ударная ионизация в слоях коллектора $AlGaAs$ рассчитывалась с теми же значениями коэффициентов, что и в GaAs, таким образом, в данной модели не учитывалась разница в коэффициентах ударной ионизации в GaAs и $AlGaAs$.

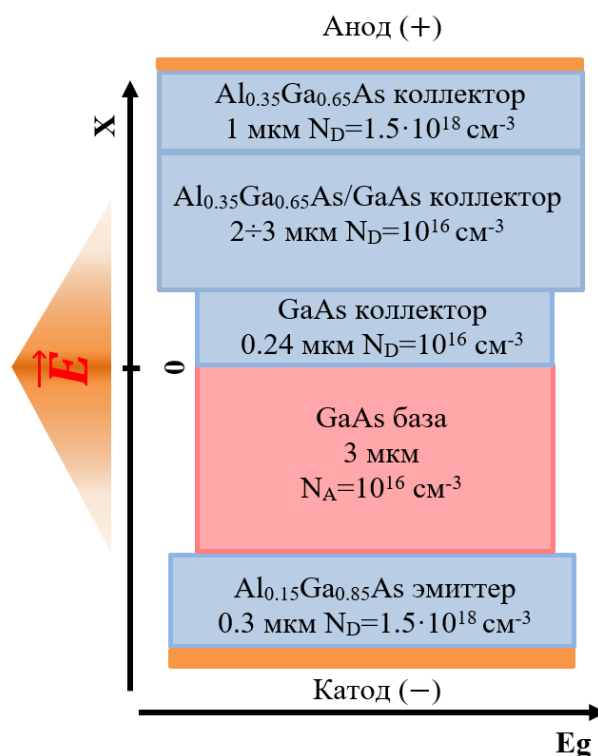


Рисунок 26 – Схематическое изображение конструкции гетероструктуры фототранзисторной части лазер-тиристора с формированием ООЗ в базе и коллекторе ($n_+p_0N_0N_+$)

На начальном этапе рассматривалась структура с p_0 -GaAs базой толщиной 3 мкм и N_0 -AlGaAs коллектором толщиной 2 и 3 мкм, и n_0 -GaAs коллектором толщиной 2 и 3 мкм. Динамика тока и напряжения для гетероструктур данного типа при значении емкости конденсатора в цепи 150 нФ и сопротивлении в цепи 0.5 Ом приведена на рис. 27а. Максимальное напряжение блокировки структуры 75 В, таким образом, рассматривалось включение при напряжении близком к максимальному. На динамике тока и напряжения можно заметить некоторые особенности (рис. 27а). Более выражены данные особенности проявляют себя при напряжениях 50 В и ниже, и видны даже в структурах с шириной коллектора 2 мкм (рис. 27б), при напряжениях 40 В и ниже структура не включается эффективно. В структурах с GaAs коллектором наблюдаются высокочастотные осцилляции на динамике напряжения при включении и в момент времени ~ 110 нс (рис. 27а), данные осцилляции возникают из-за отрицательной дифференциальной подвижности в GaAs [74, 80], более подробно осцилляции напряжения не рассматривались, т.к. данная тема выходит за рамки проведенного исследования. На рис. 27в для удобства на графике не представлена динамика ударной ионизации в моменты осцилляций напряжения. На динамике тока и напряжения при переходе лазер-тиристора во включенное состояние можно заметить особенность, которая наблюдается только в структурах с коллектором толщиной 3 мкм – небольшая «полка» на динамике тока и

локальный минимум на динамике напряжения. Для объяснения возникновения данных особенностей на динамике тока и напряжения рассмотрим более подробно распределение напряженности электрического поля в различные моменты времени и динамику ударной ионизации (рис. 27в, 28).

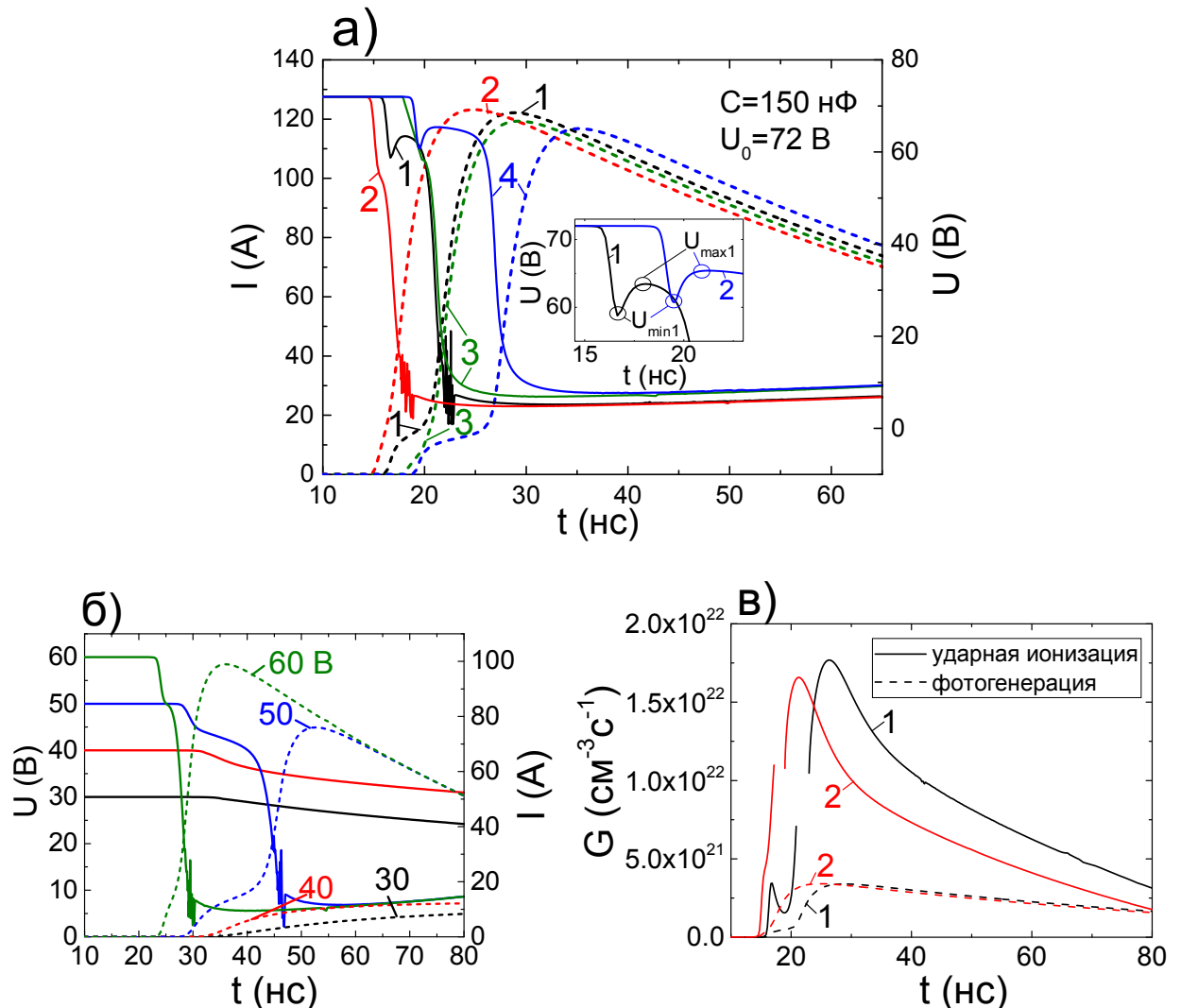


Рисунок 27 – а) динамика напряжения (сплошная линия) и тока (пунктир) для гетероструктуры лазер-тиристора с формированием ООЗ в базе и коллекторе и различной конфигурацией коллектора, $U_0 = 72$ В; толщина базовой низколегированной GaAs области 3 мкм. толщина и состав коллекторного слоя изменялись: 1 – коллектор n_0 -GaAs толщиной 3 мкм; 2 - коллектор n_0 -GaAs толщиной 2 мкм; 3 – коллектор N_0 - $Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ толщиной 2 мкм; коллектор N_0 - $Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ толщиной 3 мкм. Внешняя емкость в цепи составляла 150 нФ, начальное напряжение 72 В. На вставке показаны локальные минимумы и максимумы напряжения U_{min1} и U_{max1} для структур 1 и 4; б) динамика напряжения (сплошная линия) и тока (пунктир) для структуры с конфигурацией коллектора типа 2 (представленных на рис. 27а) для различных напряжений питания в диапазоне 30-60 В; в) динамика генерации носителей за счет ударной ионизации и фотогенерации для структур с конфигурацией коллектора 1 и 2

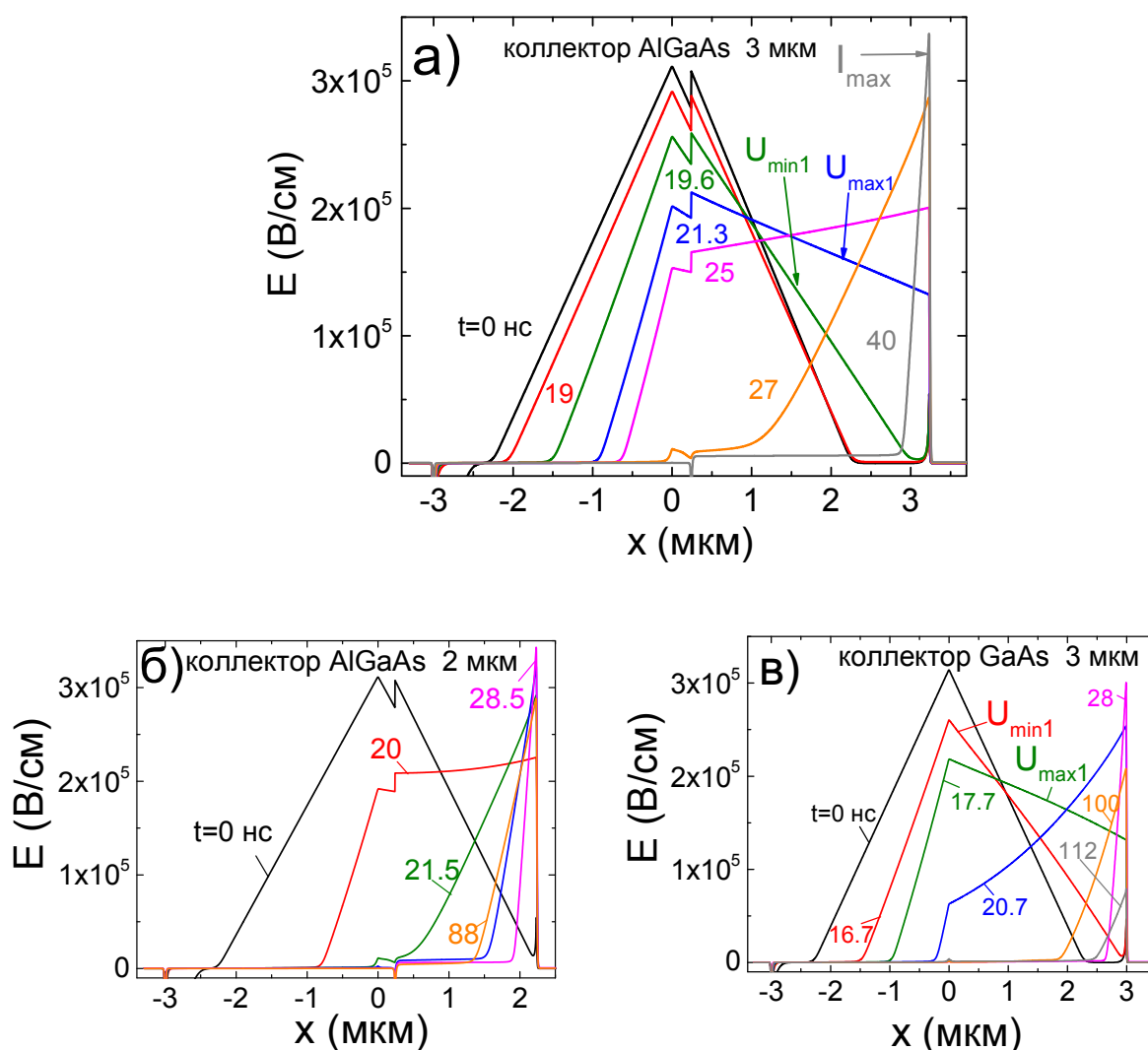


Рисунок 28 – Распределение напряженности электрического поля в различные моменты времени при $U_0=72$ В в структуре лазер-тиристора с формированием ООЗ в базе и коллекторе, толщина базовой низколегированной GaAs области 3 мкм, толщина и состав низколегированной части коллекторного слоя изменялись: а) N_0 -AlGaAs коллектор толщиной 3 мкм, б) N_0 -AlGaAs коллектор толщиной 2 мкм, в) N_0 -GaAs коллектор толщиной 3 мкм. На распределениях напряжения на рис. а) и в) отмечены моменты времени в которые достигаются локальные минимумы и максимумы напряжения U_{min1} и U_{max1} (см. рис. 26). Внешняя емкость в цепи составляла 150 нФ, начальное напряжение 72 В

Из распределений электрического поля в структуре лазер-тиристора при его включении видно, что происходит перераспределение поля и формирование домена электрического поля у границы n_0/n_+ в области коллектора [81]. При включении прибора через структуру начинает протекать высокая плотность тока, при этом, когда концентрация носителей (в данном случае электронов), участвующих в переносе заряда, становится сравнима или выше концентрации легирующей примеси в коллекторе или базе, то данная концентрация носителей оказывает существенное влияние на распределение поля в соответствии с уравнением Пуассона. Если заменить в уравнении

Пуассона на $J_n/qv_{sat,n}$ (в предположении, что основной ток обеспечивается за счет дрейфа), где $v_{sat,n}$ – насыщенная скорость электронов, тогда можно вывести условие для плотности тока, при которой будет происходить перераспределение напряженности электрического поля, а именно при $J \geq J_{ND} = qv_{sat,n}N_D$. Так как в ООЗ в коллекторе объемный заряд сформирован за счет положительного заряда донорных примесей, при протекании тока электронов, когда $J > J_{ND}$, в области коллектора начинает преобладать отрицательный заряд и меняется градиент электрического поля, а в тот момент времени, когда $J = J_{ND}$ градиент поля равен нулю (на рис. 28 видны моменты времени когда градиент поля близок к нулю, а $J \approx J_{ND}$). В области базы градиент поля определяется отрицательным зарядом акцепторных примесей, и протекающий в данной области ток электронов увеличивает отрицательный заряд ООЗ базы и градиент поля в данной области становится сильнее (увеличивается $dE(x)/dx$), но не меняет знак. Стоит также учитывать, что в следствии ударной ионизации и фотогенерации в области базы и коллектора могут накапливаться дырки, которые также влияют на распределение поля, однако дырки в большей степени накапливаются в квазинейтральной области.

Во время перераспределения электрического поля в структуре сначала наблюдается снижение напряженности поля на фоне падения напряжения на структуре, при этом увеличивается ООЗ в коллекторе и начинает изменяться градиент электрического поля. В этот момент на динамике напряжения наблюдается локальный минимум в структурах с коллектором толщиной 3 мкм, а в структурах с толщиной коллектора 2 мкм, где ООЗ изначально занимает всю область коллектора, происходит снижение напряженности поля. Далее, при увеличении протекающей через структуру плотности тока, происходит перераспределение электрического поля в структуре и в некоторый момент градиент электрического поля в области коллектора близок к нулю, в данный момент отсутствует пик напряженности поля и наблюдается минимум максимальной напряженности поля в структуре, что приводит к снижению скорости генерации носителей за счет ударной ионизации (рис. 27в). Снижение скорости поступления неравновесных дырок в базу приводит к замедлению скорости включения лазер-тиристора, что отражается на динамике тока (рис. 27а). Очевидно, что при более низких напряжениях минимум в генерации носителей будет более выражен и начиная с некоторого напряжения не будет происходить эффективного включения лазер-тиристора (рис. 27б). Также на динамике (рис. 27а) виден локальный рост напряжения (от U_{min1} до U_{max1}) в структурах с толщиной коллектора 3 мкм, что происходит при заполнении всей области коллектора электрическим полем, в тот момент, когда градиент поля в коллекторе близок к нулю, при

этом напряжение увеличивается только в структурах с толщиной коллектора 3 мкм, т.к. максимальная напряженность поля в структурах с коллектором толщиной 2 и 3 мкм одинакова, в структуре с более толстым коллектором выше напряжение. В структуре с коллектором толщиной 2 мкм перераспределение электрического поля и формирование домена происходит быстрее, не оказывая влияния на динамику тока при включении лазер-тиристора. При дальнейшем перераспределении электрического поля формируется узкий домен на границе n_0/n_+ в коллекторе с высоким значением максимальной напряженности поля, увеличивается скорость генерации носителей за счет ударной ионизации и возрастает скорость перехода лазер-тиристора во включенное состояние. Следует ожидать что в гетероструктурах лазер-тиристора с толщиной коллектора более 3 мкм «полка» на динамике тока будет более выражена, при этом длина полки будет увеличиваться с увеличением толщины коллектора. На рис. 27 и 28 отмечены моменты времени, когда наблюдаются локальные минимумы и максимумы на динамике напряжения.

В зависимости от состава коллектора различается динамика накопления неравновесных носителей в низколегированных областях базы и коллектора (рис. 29, 30). Так, в структуре с AlGaAs коллектором из-за наличия гетеробарьера присутствует скачок на распределении дырок и электронов (рис. 29, 30), который практически отсутствует в структуре с GaAs коллектором. В любом случае накопление неравновесных дырок в области коллектора начинает происходить при формировании домена электрического поля в коллекторе на границе n_0/n_+ и активной генерации носителей посредством ударной ионизации в данной области. Из-за осцилляций электрического поля в GaAs наблюдается крайне неоднородное распределение носителей (рис. 29 б, 30б). Более низкие подвижности носителей заряда в AlGaAs оказывают влияние на скорость перехода во включенное состояние, незначительно снижая ее, а также увеличивают общее последовательное сопротивление структуры, из-за чего амплитуда тока в структурах с AlGaAs коллектором несколько ниже в сравнении со структурами с GaAs коллектором. Стоит отметить, что в модели не учитывается тот факт, что коэффициенты ударной ионизации в AlGaAs ниже, чем в GaAs, и в реальности ударная ионизация в широкозонном коллекторе будет значительно ниже, что негативно скажется как на динамике включения, так и на амплитуде токовых импульсов, при этом не увеличится максимальное напряжение блокировки, т.к. ударная ионизация начнется в GaAs базе. В целом, переход к AlGaAs с точки зрения увеличения напряжения блокировки лазер-тиристора должен рассматриваться в целом в структуре, также необходимо учесть наличие оптической обратной связи и возможность поглощения спонтанного излучения активной области в базе лазер-тиристора, что потребует изменения дизайна лазерной

части прибора, и, возможно, перехода на другую длину волны излучения. При увеличении ширины запрещенной зоны низколегированных базы/коллектора увеличится не только максимальное напряжение блокировки, но и изменятся коэффициенты ударной ионизации, таким образом скорость генерации носителей посредством ударной ионизации не изменится при изменении состава базы/коллектора. Уменьшение подвижности в AlGaAs также будет носить негативный характер, как уже показано в рассмотренном примере, однако в структурах с AlGaAs коллектором отсутствуют осцилляции напряжения, который в данном случае не приводят к какому-либо положительному эффекту в плане применения лазер-тиристора, а отсутствие высокочастотных осцилляций при моделировании значительно сокращает требуемое для вычислений время.

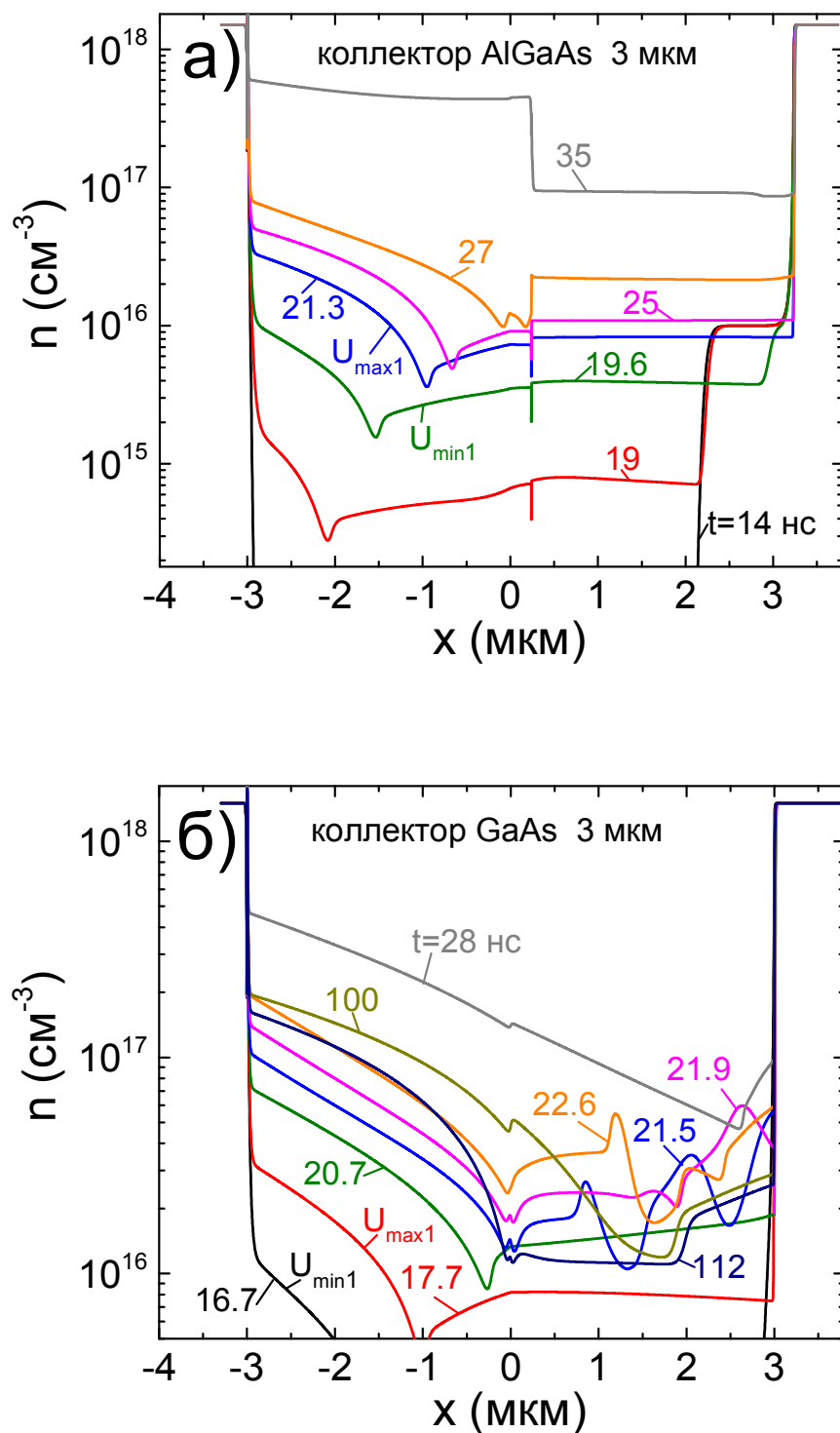


Рисунок 29 – Распределение концентрации электронов в различные моменты времени при $U_0=72 \text{ В}$ в структуре лазер-тиристора с формированием ООЗ в базе и коллекторе, толщина базовой низколегированной GaAs области 3 мкм, состав низколегированной части коллекторного слоя изменялся: а) N_0 -AlGaAs коллектор толщиной 3 мкм, б) N_0 -GaAs коллектор толщиной 3 мкм. Внешняя емкость в цепи составляла 150 нФ, начальное напряжение 72 В. На распределениях напряжения отмечены моменты времени в которые достигаются локальные минимумы и максимумы напряжения $U_{\min1}$ и $U_{\max1}$ (см. рис. 27)

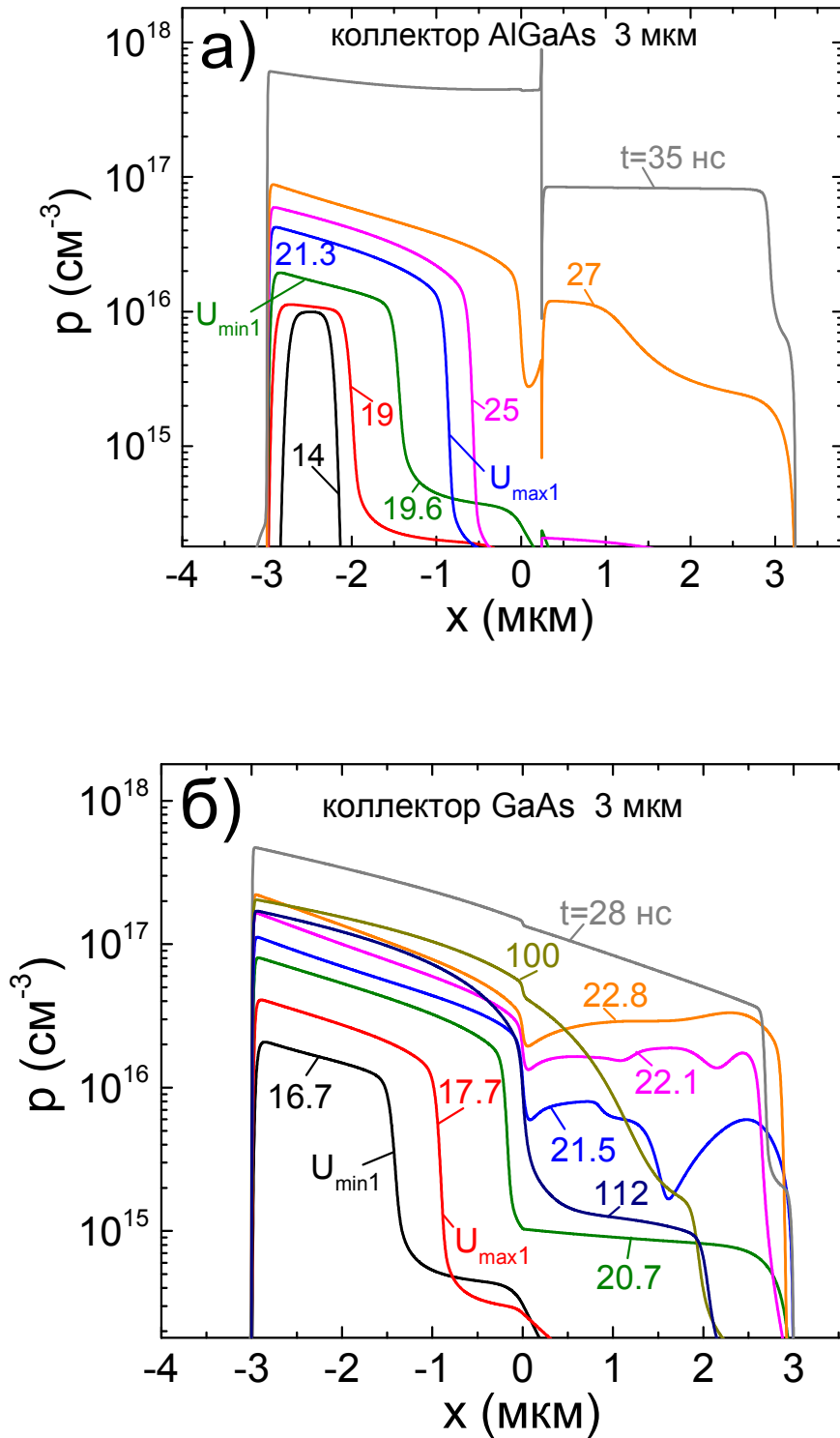


Рисунок 30 – Распределение концентрации дырок в различные моменты времени при $U_0=72 \text{ В}$ в структуре лазер-тиристора с формированием ООЗ в базе и коллекторе, толщина базовой низколегированной GaAs области 3 мкм, состав низколегированной части коллекторного слоя изменялся: а) N_0 -AlGaAs коллектор толщиной 3 мкм, б) N_0 -GaAs коллектор толщиной 3 мкм. Внешняя емкость в цепи составляла 150 нФ, начальное напряжение 72 В. На распределениях напряжения отмечены моменты времени в которые достигаются локальные минимумы и максимумы напряжения $U_{\min 1}$ и $U_{\max 1}$ (см. рис. 27)

Одним из вариантов гетероструктур лазер-тиристора с ООЗ, сформированной в базе и коллекторе может быть структура с внесением p_+ слоя в базу со стороны эмиттера, как и на примере структуры с ООЗ в базе, данный p_+ слой должен служить для повышения эффективности работы прибора (см. рис. 31). Была исследована подобная гетероструктура, которая состояла из N_+ $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ эмиттера толщиной 0.3 мкм с $N_D=1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, p_+ GaAs базы толщиной 1 мкм с $N_A=10^{17} \text{ см}^{-3}$, p_0 GaAs базы толщиной 2 мкм, легирование p_0 области было снижено для увеличения максимального напряжения блокировки и равнялось 10^{15} см^{-3} , коллектор состоял из n_0 GaAs части толщиной 0.24 мкм и $N_0Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ части толщиной 2 мкм с $N_D=10^{15} \text{ см}^{-3}$, высоколегированная часть коллектора имела толщину 0.5 мкм и $N_D=1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Схематически гетероструктура представлена на рис. 37.

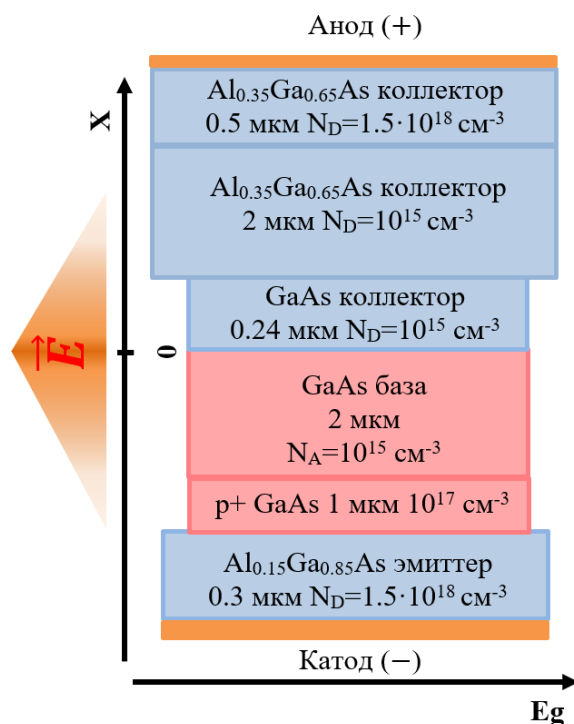


Рисунок 31 – Схематическое изображение конструкции гетероструктуры фототранзисторной части лазер-тиристора с формированием ООЗ в базе и коллекторе ($N_+/p_+/p_0/n_0/N_+$)

Особенностью исследуемой $N_+/p_+/p_0/n_0/N_+$ гетероструктуры (рис. 31) является высокое максимальное напряжение блокировки – 110 В, что позволяет генерировать импульсы тока с высокой амплитудой, и, следовательно, лазерные импульсы высокой мощности, при этом толщина структуры меньше, чем в структуре, представленной на рис. 26. На рис. 32 представлены динамика тока и напряжения в исследуемой гетероструктуре при различных значениях внешней емкости в цепи (150 – 0.05 нФ), значение сопротивления в цепи разрядки конденсатора равно 0.5 Ом. Максимальная амплитуда тока получена при значении внешней емкости 150 нФ и составила 190 А, при снижении

внешней емкости снижается и длительность импульса, при $C=5$ нФ амплитуда тока составила порядка 110 А при длительности импульса около 8 нс по основанию, при $C=1$ нФ амплитуда тока достигла более 60 А при длительности импульса 4 нс по основанию, при $C=0.2$ нФ амплитуда тока составила более 20 А, а длительность импульса по основанию менее 2 нс. Из рис. 32 видно, что при снижении значения емкости конденсатора в цепи до 0.2 нФ и ниже значительно увеличивается задержка включения лазер-тиристора, плавно увеличивается фронт импульса тока (или скорость нарастания тока), а при значении $C=0.05$ нФ наблюдается очень медленное включение с низкой амплитудой. Такая особенность динамики тока при низких значениях внешней емкости связана с тем, что ток в цепи начинает ограничиваться конденсатором, что приводит к более низкой скорости ударной ионизации, и, как следствие, более медленному фронту включения и увеличению времени задержки включения.

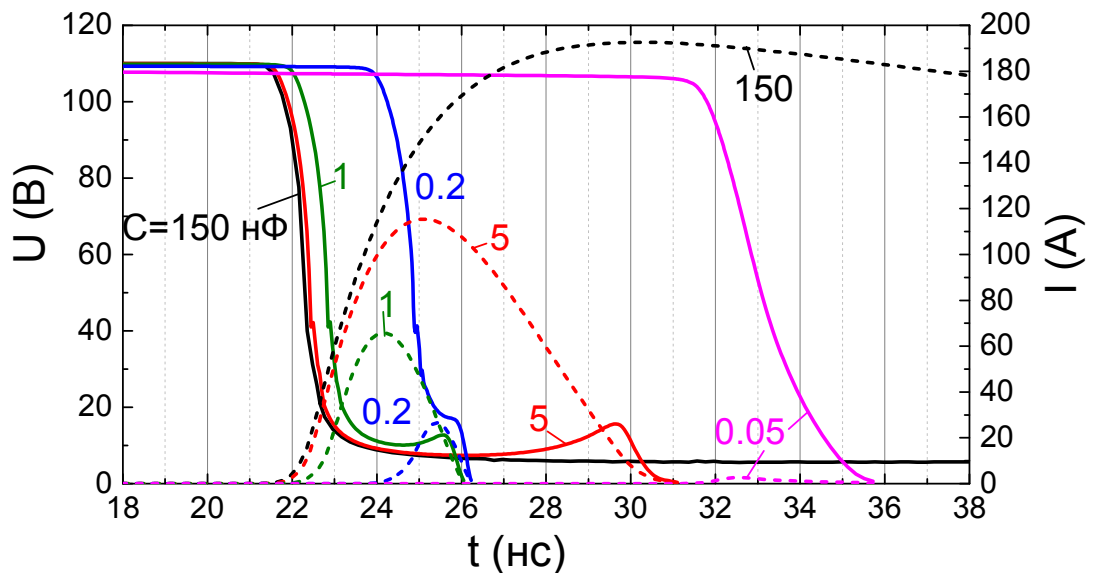


Рисунок 32 – Динамика напряжения (сплошная линия) и тока (пунктир) при $U_0=110$ В и различных значениях внешней емкости и лазер-тиристор на основе гетероструктуры типа $N_+/p_+/p_0/n_0/N_+$

Также особенности токовой динамики тесно связаны с распределениями напряженности электрического поля и концентрации неравновесных носителей в структуре (рис. 33а и 33б). Как было показано ранее, для эффективного включения лазер-тиристора необходимо обеспечение высокой скорости генерации неравновесных носителей в низколегированной области на протяжении всего периода включения прибора. В случае рассматриваемой $N_+/p_+/p_0/n_0/N_+$ структуры для выполнения данного условия необходимо быстрое перераспределение электрического поля с формированием домена на границе p_0/n_+ в области коллектора, а также заполнение низколегированной области базы и коллектора неравновесными носителями – дырками. При генерации

импульсов в структурах данного типа перераспределение электрического поля происходит примерно за ~ 1 нс, при $C=0.2$ нФ за это время в структуре достигается максимальная амплитуда тока и дальнейшего сужения домена электрического поля не происходит. На рис. 34 показаны распределения поля и концентрации дырок при $C=5$ нФ, видно, что успевает сформироваться более узкий домен электрического поля с большим значением максимальной напряженности поля, при этом также увеличивается максимальная плотность тока, эти факторы приводят к тому, что по принципу положительной обратной связи в низколегированных областях структуры накапливается значительно большая концентрация носителей в сравнении с случаем при $C=0.2$ нФ (рис. 33б и 34б), что в свою очередь обеспечивает более высокие плотности тока.

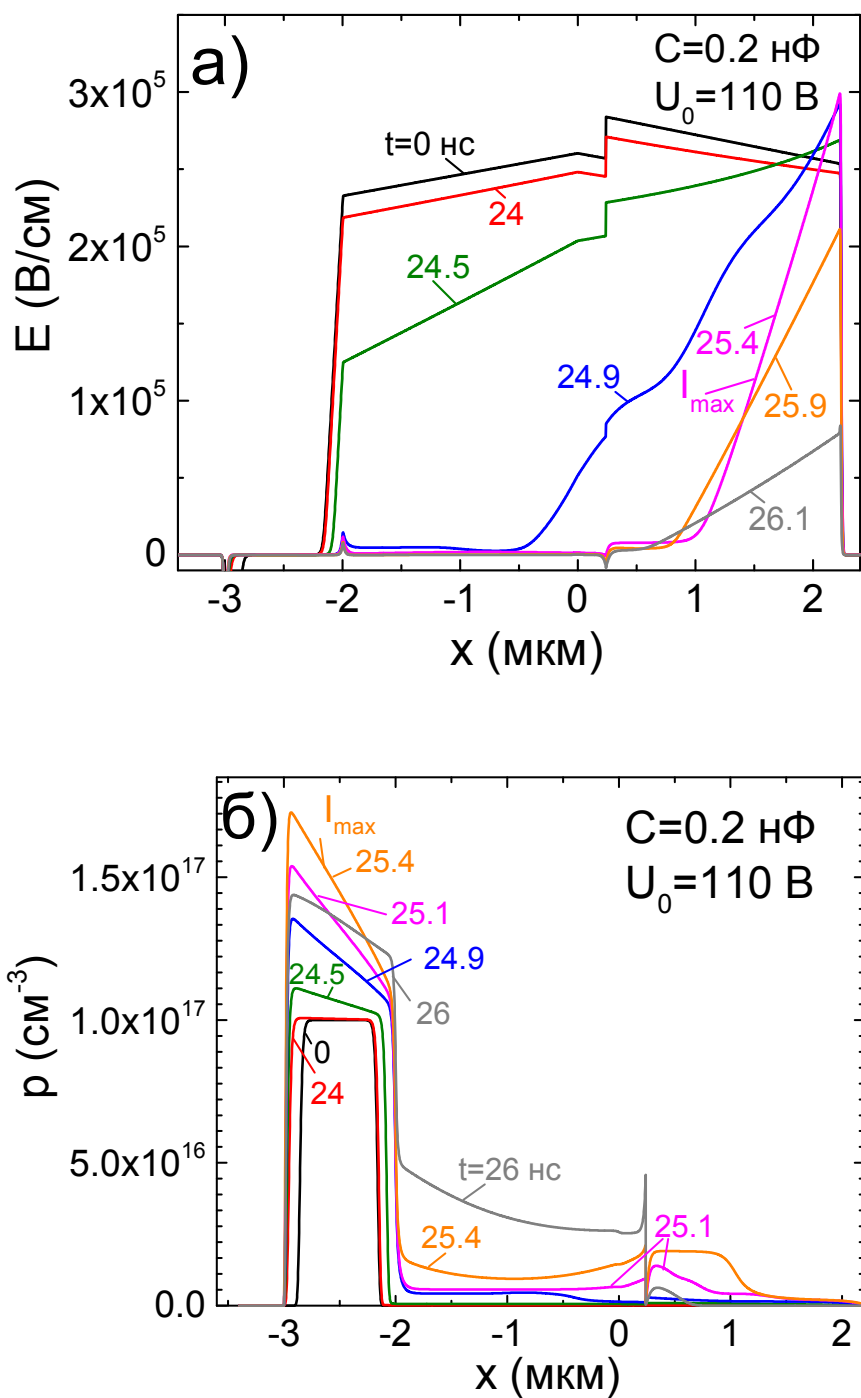


Рисунок 33 – Распределения а) напряженности электрического поля и б) концентрации дырок в различные моменты времени при включении лазер-тиристора на основе гетероструктуры типа $N^+/p^+/p_0/n_0/N^+$ при $U_0=110$ В и $C=0.2$ нФ

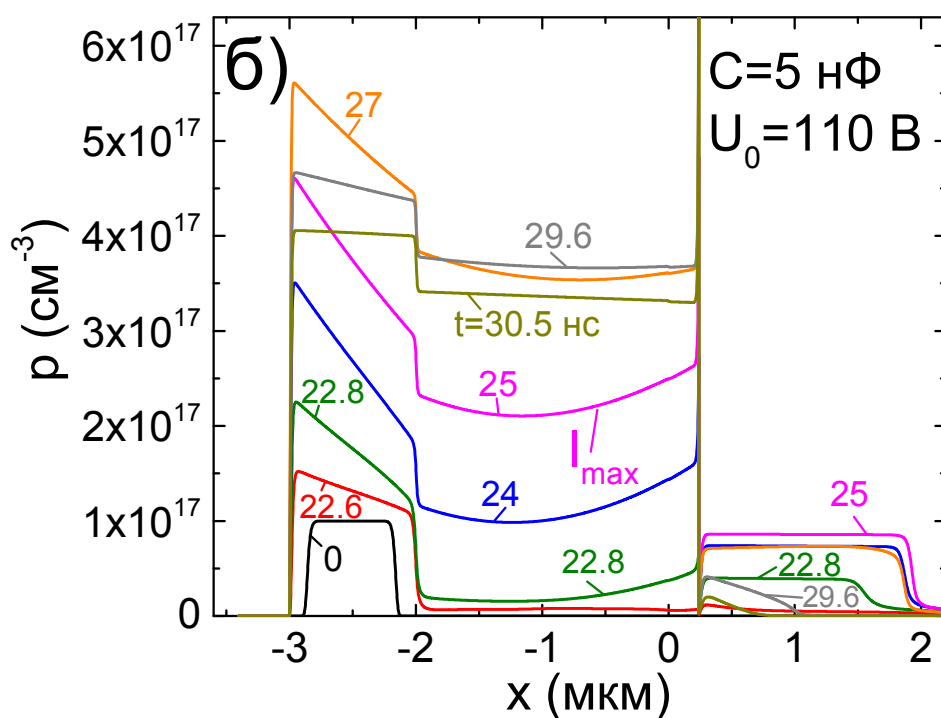
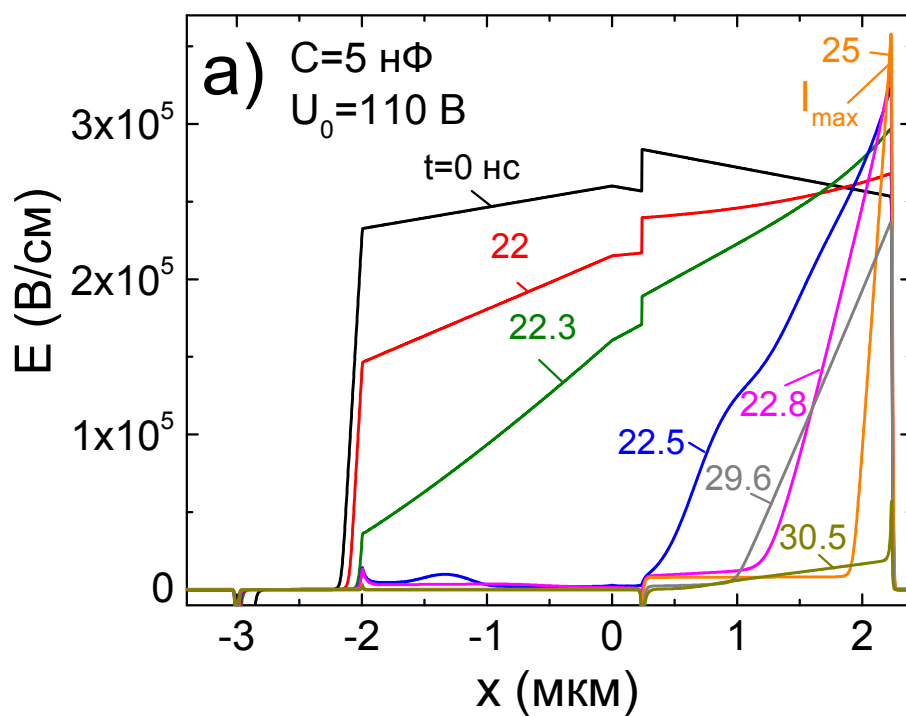


Рисунок 34 – Распределения а) напряженности электрического поля и б) концентрации дырок в различные моменты времени при включении лазер-тиристора на основе гетероструктуры типа N+/p+/p₀/n₀/N+ при U₀=110 В и C=5 нФ

Можно построить зависимость эффективной длительности и амплитуды импульса от значения внешней емкости (рис. 35), где видно, что при значении C<0.2 нФ

значительно уменьшается амплитуда импульса тока и начинает увеличиваться длительность импульса, а также время включения (фронт импульса тока). В то же время, при увеличении $C > 100$ нФ продолжает линейно увеличиваться длительность импульса, а максимальная амплитуда тока насыщается и практически не увеличивается. Таким образом, данная гетероструктура может быть очень эффективна для генерации коротких импульсов высокой мощности с длительностями до 10 нс по основанию при значениях $C = 0.2 - 5$ нФ.

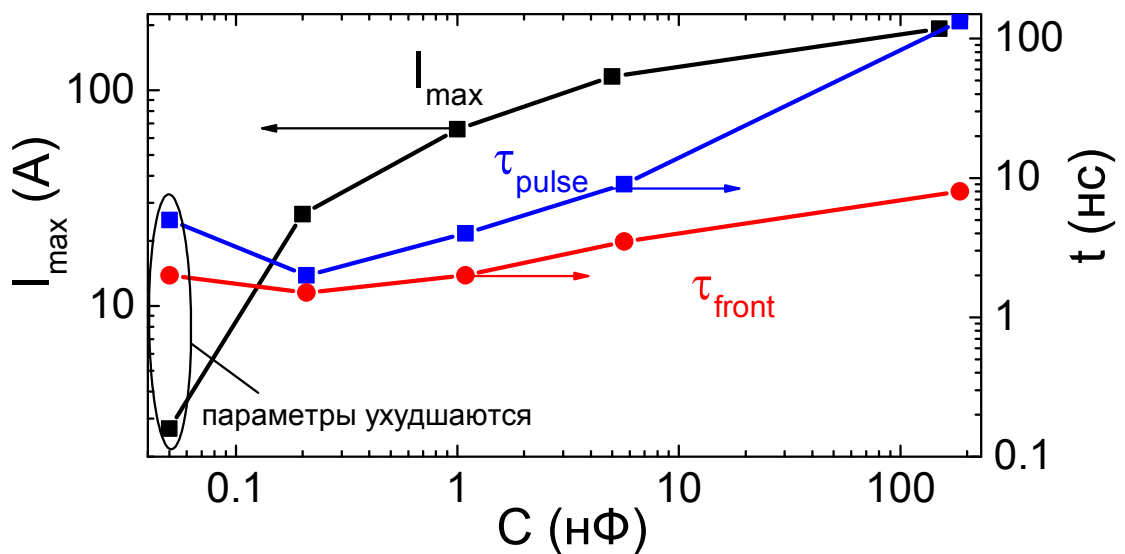


Рисунок 35 – Зависимость длительности импульса тока (τ_{pulse}), времени нарастания тока (τ_{front}) и максимальной амплитуды тока (I_{max}) от значения емкости C конденсатора в цепи

Однако, в исследуемых гетероструктурах при относительно низких рабочих напряжениях (~ 50 В и ниже) наблюдается медленный фронт включения (рост тока и спад напряжения) на начальном участке (рис. 36а). Низкая скорость нарастания тока при включении лазер-тиристора, основанного на подобной гетероструктуре, объясняется тем, что за счет низкого легирования в p_0 базе и n_0 части коллектора начальное распределение электрического поля близко к равномерному (градиент поля близок к нулю), и, при снижении напряжения на структуре значительно уменьшается максимальная напряженность электрического поля, что ведет к низкой скорости ударной ионизации или ее отсутствию и включение прибора на начальном этапе происходит за счет фотогенерации, которая обеспечивает значительно более медленную скорость накопления носителей в базе. Перераспределение поля в данном случае также происходит медленно (при 50 В порядка 10 нс), но в момент формирования домена электрического поля на границе n_0/n_+ (рис. 37 б) максимальная напряженность поля в структуре увеличивается и

значительно возрастает скорость ударной ионизации, и, следовательно, скорость нарастания тока (на рис. 36 в момент времени 115 нс заметен излом на динамике тока, который соответствует моменту формирования домена электрического поля на рис. 36б). Данная особенность может приводить к тому, что домен поля не будет сформирован при более низких напряжениях и фронт включения будет еще более медленным.

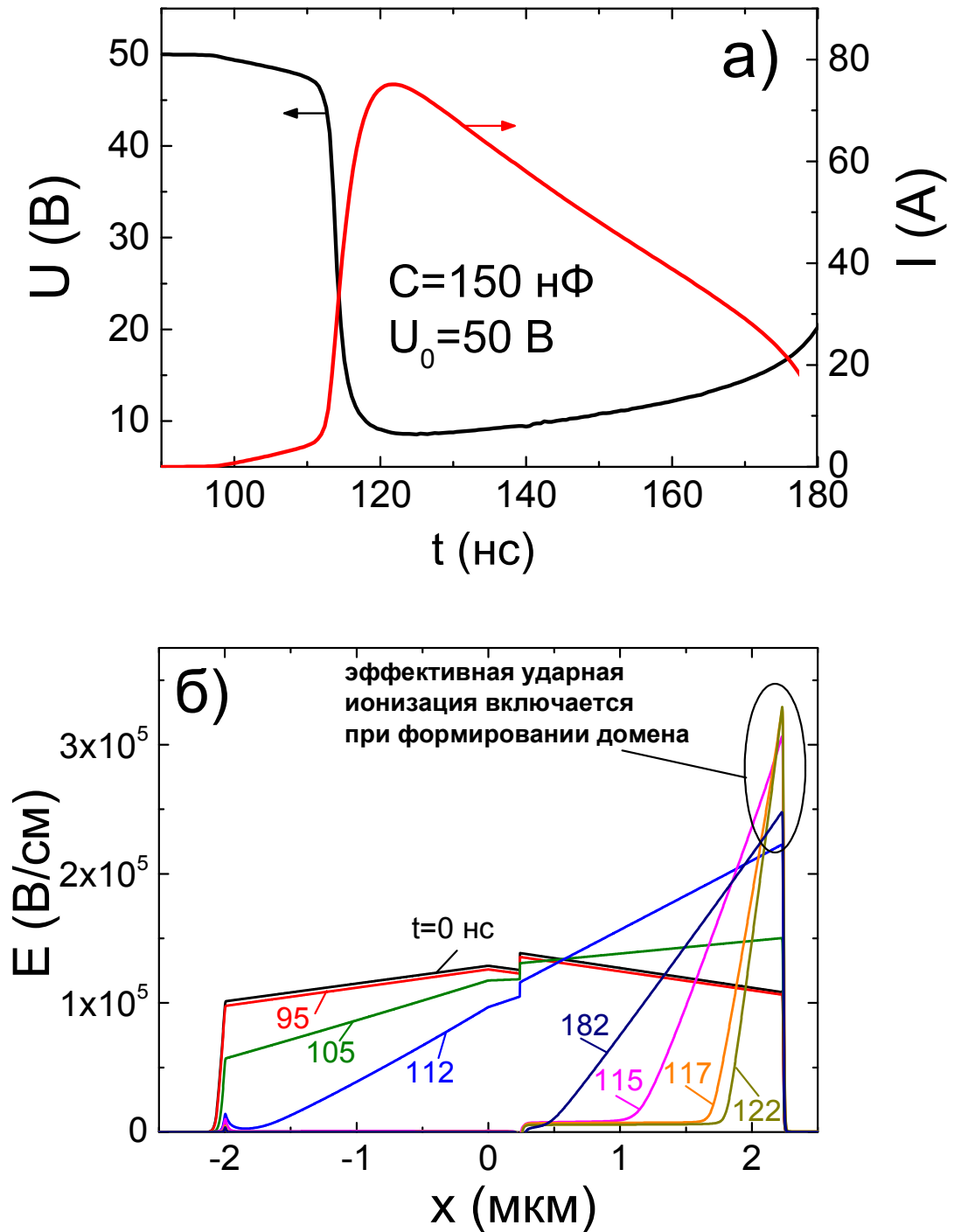


Рисунок 36 – а) Динамика тока и напряжения в структуре лазер-тиристора на основе гетероструктуры типа $N^+/p^+/p_0/n_0/N^+$ и б) формирование домена электрического поля в такой структуре при $U_0=50$ В

Выводы

Рассмотренные в данном разделе гетероструктуры лазер-тиристора с формированием ООЗ в базе и коллекторе могут обеспечивать более высокие максимальные напряжения блокировки в сравнении с рассмотренными ранее гетероструктурами с ООЗ, расположенной в базе, и, в зависимости от легирования области ООЗ (p_0 базы и низколегированной части коллектора) максимальные напряжения составляют 72 – 110 В (при $N_A=N_D=10^{16} \text{ см}^{-3}$ и 10^{15} см^{-3} соответственно). В структурах с $N_A=N_D=10^{16} \text{ см}^{-3}$ шириной низколегированного коллектора более 2 мкм может наблюдаться сложная динамика включения с "полкой" на динамике тока, а в структурах с пониженной степенью легирования области, в которой формируется ООЗ ($N_A=N_D=10^{15} \text{ см}^{-3}$) при напряжениях ниже максимального наблюдается медленное включение. Данные особенности связаны с перераспределением напряженности электрического поля в структуре и формированием домена электрического поля на границе p_0/n_+ . Для обеспечения эффективной работы прибора необходимо, чтобы в процессе перераспределения электрического поля в гетероструктуре мог быстро сформироваться домен поля на границе p_0/n_+ .

Для выполнения данного условия в гетероструктурах данного типа начальное напряжение U_0 должно быть близко к максимальному, при этом ширина низколегированной части коллектора должны быть не более 2 мкм. Наибольший интерес рассмотренные структуры представляют для генерации коротких лазерных импульсов высокой мощности, была продемонстрирована возможность генерации импульсов тока с амплитудой в 10-ки А при длительности менее 10 нс по основанию (110 А при длительности 8 нс и 20 А при 2 нс).

3) Гетероструктура лазер-тиристора с областью объемного заряда, сформированной в n_0 -GaAs/AlGaAs коллекторе

Рассматривались гетероструктуры лазер-тиристора с расположением ООЗ в коллекторе и высоколегированной ($10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$) GaAs базой толщиной $0.5 - 1 \text{ мкм}$. Схематическое изображение структуры представлено на рис. 37. Толщина $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ или GaAs низколегированной части коллектора была равна $3 - 4 \text{ мкм}$ с $N_D = 10^{16} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$, при этом со стороны базы дополнительно располагался GaAs низколегированный слой толщиной 0.24 мкм ($N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$), толщина высоколегированного $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ эмиттера 0.3 мкм и $N_D = 1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, толщина высоколегированной части коллектора 0.5 мкм и $N_D = 1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Схематически исследуемая гетероструктура показана на рис. 43. Максимальное напряжение блокировки в структуре 55 В , как и в структурах с ООЗ в базе при толщине базы 4 мкм и ее легировании 10^{16} см^{-3} . Сопротивление во внешней цепи равнялось 0.5 Ом и значение емкости конденсатора, включенного параллельно лазер-тиристоры равно 150 нФ (в некоторых случаях 5 нФ). Как и в гетероструктурах с ООЗ, сформированной в базе и коллекторе в данном случае коэффициенты ударной ионизации в AlGaAs коллекторе принимались равными таковым в GaAs.

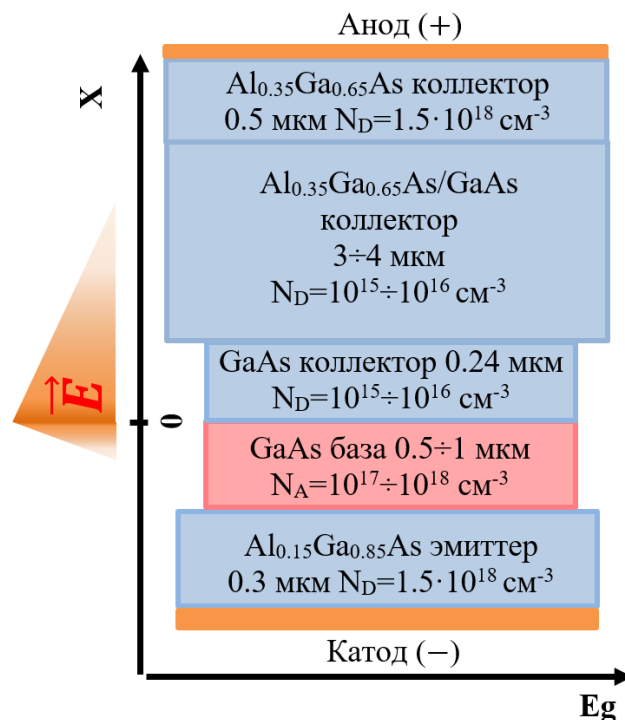


Рисунок 37 – Схематическое изображение гетероструктуры фототранзисторной части лазер-тиристора с ООЗ, расположенной в коллекторе

На рис. 38 представлена динамика тока и напряжения при генерации одиночного импульса в лазер-тиристорах с ООЗ в коллекторе и с GaAs базой толщиной 1 мкм ,

изменялось легирование базы и состав коллектора, начальное напряжение на структуре 50 В. Из динамики тока и напряжения видно, что при более высоком легировании базовой области ($N_A=10^{18} \text{ см}^{-3}$) наблюдается неэффективное включение лазер-тиристора с низкой амплитудой тока – порядка 10 А, высоким остаточным напряжением (которое снижается очень медленно) и большой длительностью импульса. При более низком легировании базы, за счет уменьшения потерь на рекомбинацию, амплитуда тока при включении лазер-тиристора достигает 70-75 А, наблюдается более низкое остаточное напряжение, время спада напряжения до минимального составляет порядка 25 – 35 нс в зависимости от состава коллекторного слоя. Очевидно, что подобного снижения потерь и повышения эффективности включения можно добиться и уменьшением толщины базы при ее более высоком легировании.

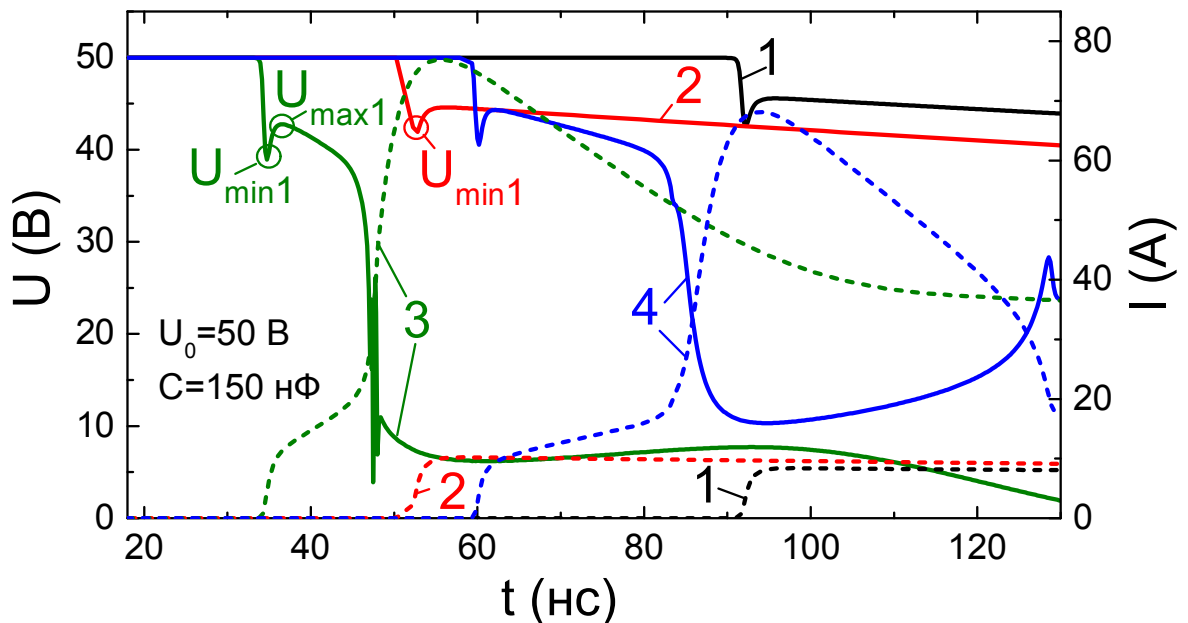


Рисунок 38 – Динамика напряжения (сплошная линия) и тока (пунктир) при $U_0=50 \text{ В}$ и $C=150 \text{ нФ}$ для гетероструктуры лазер-тиристора с формированием ООЗ в коллекторе, толщина коллекторной низколегированной области 3 мкм с $N_D=10^{16} \text{ см}^{-3}$, толщина базы 1 мкм, изменялись легирование базовой области (10^{17} и 10^{18} см^{-3}) и состав низколегированной части коллектора (GaAs или $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$): 1 – база с $N_A=10^{18} \text{ см}^{-3}$ и коллектор AlGaAs; 2 – база с $N_A=10^{18} \text{ см}^{-3}$ и коллектор GaAs; 3 – база с $N_A=10^{17} \text{ см}^{-3}$ и коллектор GaAs; 4 – база с $N_A=10^{17} \text{ см}^{-3}$ и коллектор AlGaAs

Рассмотрим более подробно характерные особенности динамики тока и напряжения в структурах с ООЗ в коллекторе. Как можно видеть из рис. 38 на динамике тока при включении прибора (при $N_A=10^{17} \text{ см}^{-3}$ в базе) наблюдается ярко выраженная полка, подобная той, которая наблюдалась в структурах с ООЗ в базе и коллекторе (рис. 27). При одинаковой (3 мкм) толщине низколегированной ($N_D=10^{16} \text{ см}^{-3}$) части

коллекторного слоя в гетероструктурах с ООЗ, сформированной только в коллекторе, наблюдается более выраженная полка на динамике тока длительностью 10-20 нс. Основными отличиями, влияющими на более низкую эффективность работы прибора с рассматриваемой конструкцией, являются: а) наличие высоколегированной базы, в которой происходит накопление неравновесных носителей заряда, т.к. в данном случае необходимо накопление больших концентраций заряда, также увеличивается уровень потерь на рекомбинацию при протекании тока электронов через высоколегированную область базы; б) особенности распределения напряженности электрического поля, т.к. на начальном этапе из-за расположения ООЗ только в области коллектора, активная ударная ионизация происходит в меньшем объеме гетероструктуры. Отличия между структурами с различным по составу коллектором объясняются отличиями в подвижностях носителей заряда, таким образом более высокая подвижность в GaAs способствует более быстрому перераспределению электрического поля в области низколегированного коллектора. Также в структурах с GaAs коллектором меньше задержка включения за счет большей области поглощения спонтанного излучения (в широкозонном AlGaAs не поглощается спонтанное излучения лазерного диода, см. п.3 «Экспериментальные исследования эффективности оптической обратной связи»). Наблюдаемая «полка» на динамике тока, как и в структурах с ООЗ в базе и коллекторе, рассмотренных ранее, формируется в момент перераспределения электрического поля (рис. 39 и 40), когда ток электронов становится близким к насыщенному ($J_{Nd} = qN_D v_{n,sat}$) и градиент электрического поля близок к нулю (рис. 40а моменты времени 37 – 45 нс). В момент перераспределения поля снижается максимальная напряженность электрического поля и скорость генерации неравновесных носителей за счет ударной ионизации, что приводит к снижению скорости нарастания тока на динамике включения лазер-тиристора. Затем, когда формируется домен электрического поля у границы n_0/n_+ в области коллектора, повышается максимальная напряженность поля в структуре, возрастает интенсивность ударной ионизации, и, следовательно, скорость переходных процессов в структуре. В структурах с высоколегированной базой не происходит формирования домена с высокой напряженностью электрического поля, поэтому не происходит эффективного (с высокой амплитудой тока и низким остаточным напряжением) и быстрого включения прибора. Также, несмотря на то, что концентрация дырок в области базы сопоставима с накопленной в структуре с более низким легированием базы (рис. 39б и 40б), при более высоком легировании ниже соотношение неравновесной концентрации дырок к концентрации легирующей примеси. Из рис. 41 видно, что в структуре с более высоким легированием базы при сопоставимых токах ~ 7 А (моменты времени 60 нс на рис. 41а и

35нс на рис.41б рекомбинационные потери (рекомбинация Шокли-Рида-Холла R_{SRH} и излучательная рекомбинация R_{rad}) выше практически на порядок.

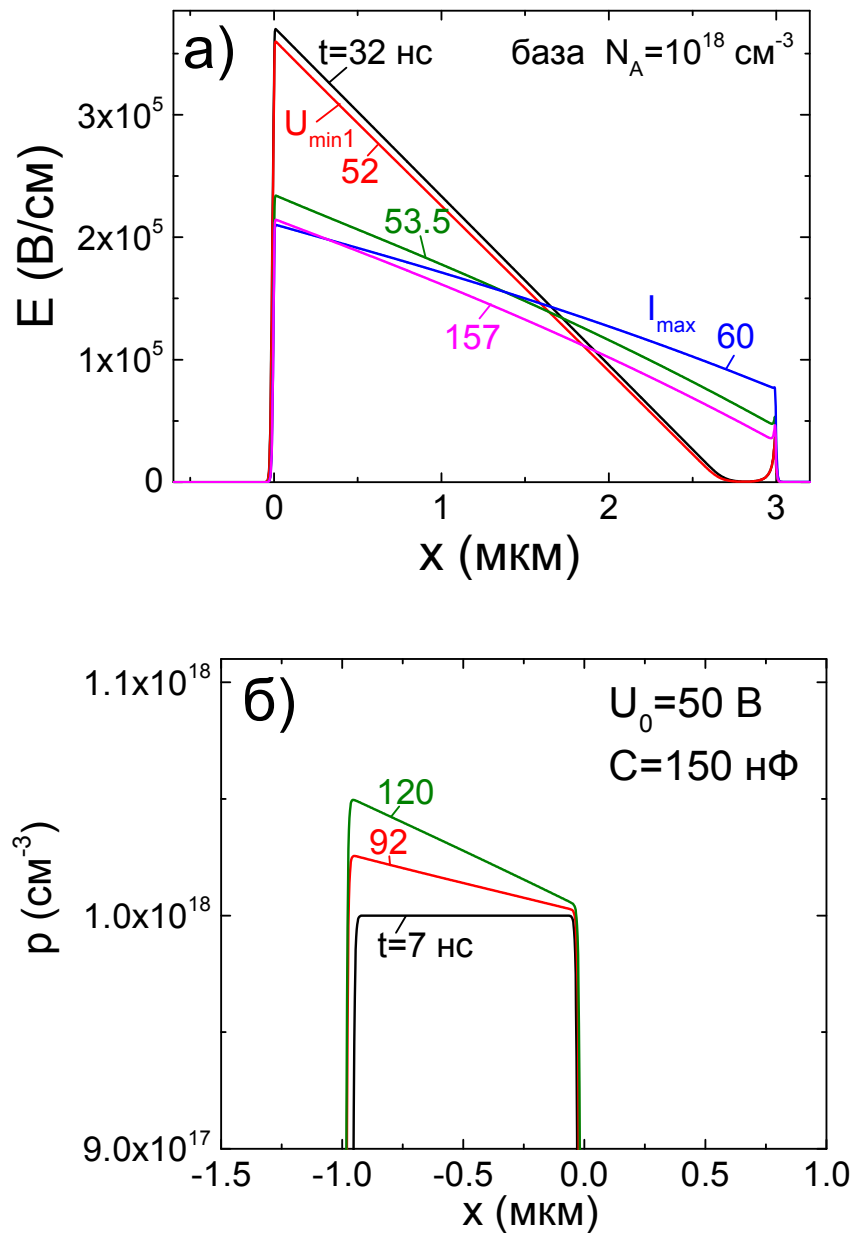


Рисунок 39 – Распределения (а) напряженности электрического поля и (б) концентрации дырок в различные моменты времени при включении лазер-тиристора на основе гетероструктуры с расположением ООЗ в коллекторе с толщиной базы 1 мкм и $N_A = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и GaAs низколегированной частью коллектора толщиной 3 мкм с $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, включение происходило при $U_0 = 50 \text{ В}$ и $C = 150 \text{ нФ}$. Указаны моменты времени, в которые достигаются локальные максимумы на динамике напряжения (U_{min1} и U_{max1}) (см. рис. 38) и максимальная амплитуда тока (I_{max})

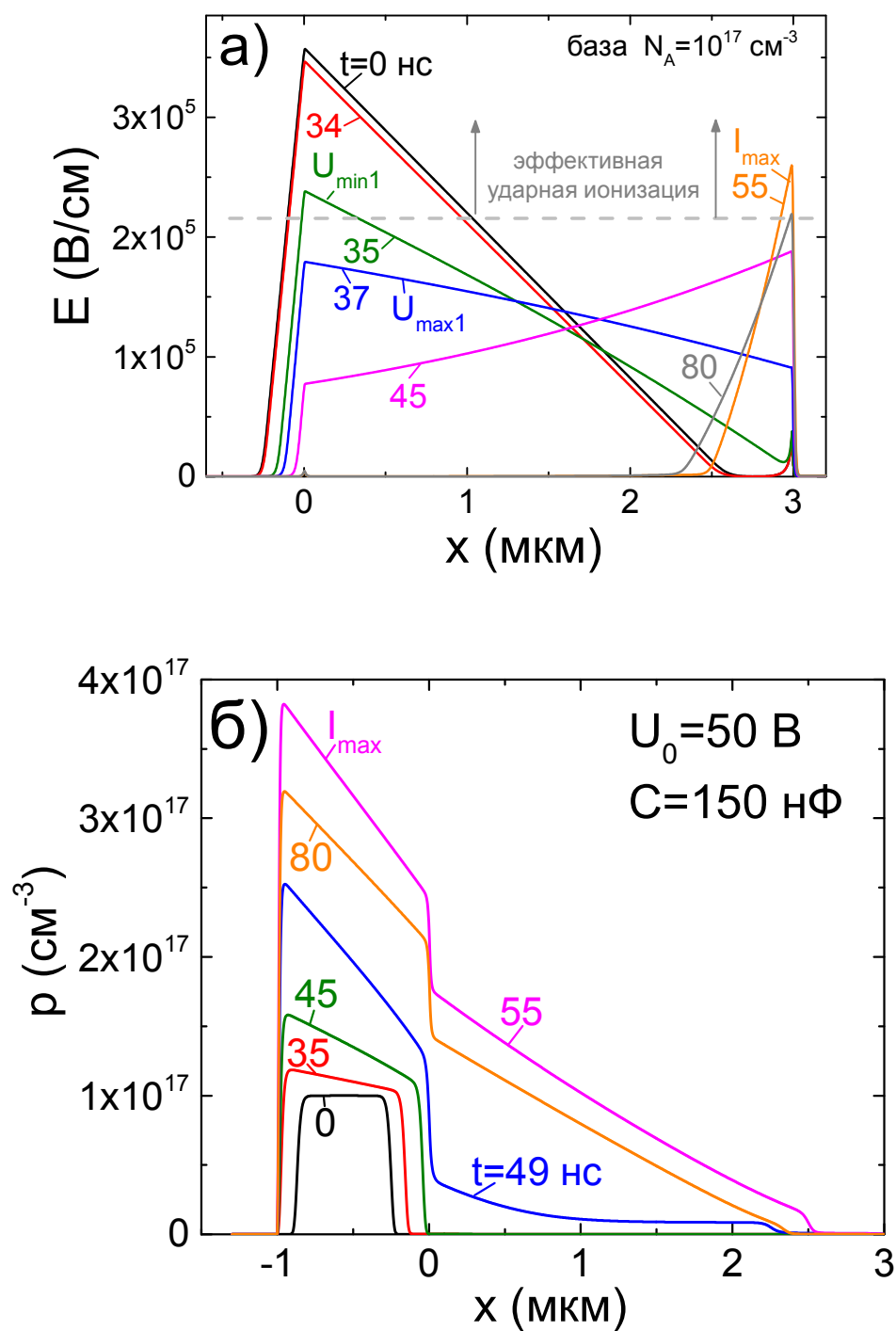


Рисунок 40 – Распределения (а) напряженности электрического поля и (б) концентрации дырок в различные моменты времени при включении лазер-тиристора на основе гетероструктуры с расположением ООЗ в коллекторе с толщиной базы 1 мкм и $N_A=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ и GaAs низколегированной частью коллектора толщиной 3 мкм с $N_D=10^{16} \text{ cm}^{-3}$, включение происходило при $U_0=50 \text{ В}$ и $C=150 \text{ нФ}$. Указаны моменты времени, в которые достигаются локальные максимумы на динамике напряжения ($U_{\min 1}$ и $U_{\max 1}$) (см. рис. 38) и максимальная амплитуда тока ($I_{\max}$)

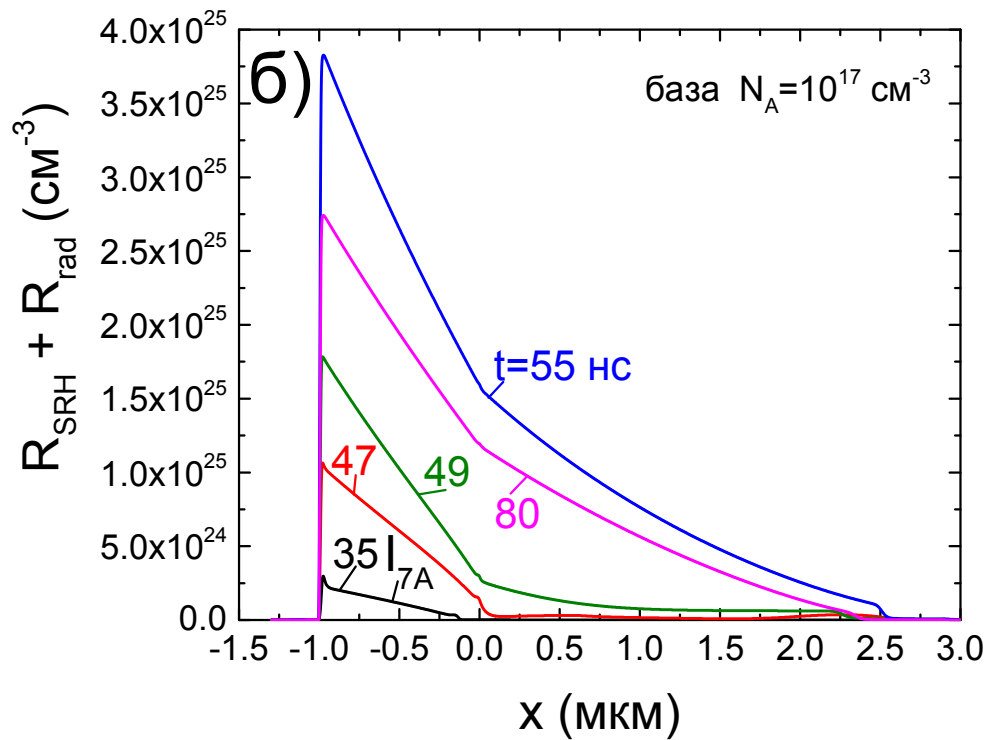
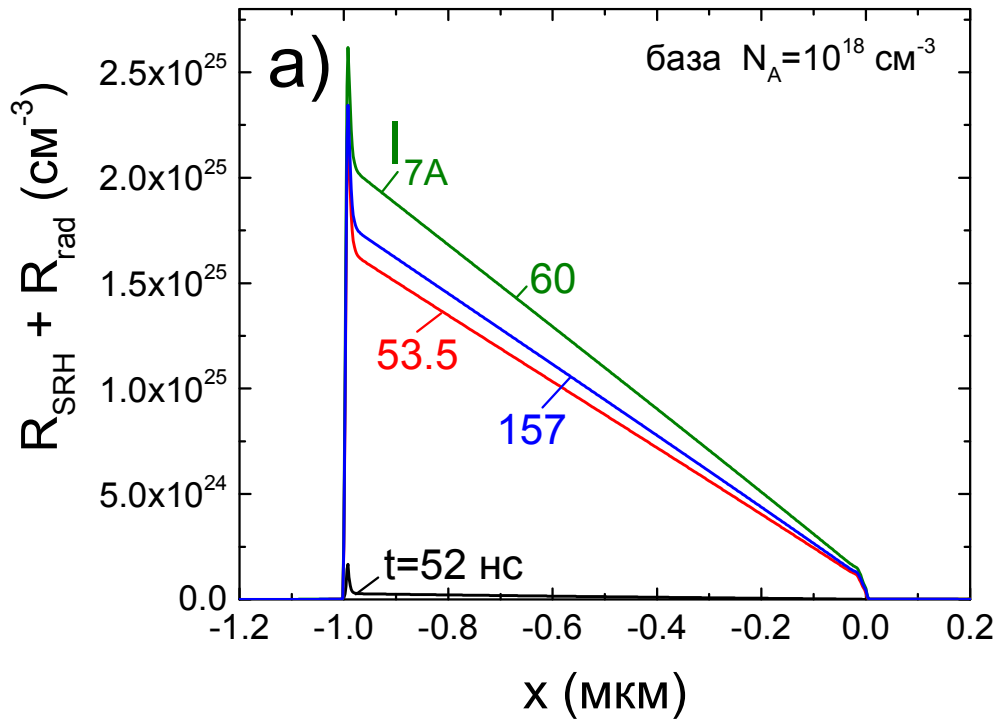


Рисунок 41 – Распределения скорости рекомбинации (излучательной R_{rad} и Шокли-Рида-Хола R_{SRH}) в различные моменты времени при включении лазер-тиристора на основе гетероструктуры с расположением ООЗ в коллекторе с толщиной базы 1 мкм и ее легированием а) $N_A = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и б) $N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, низколегированная часть коллектора состояла из GaAs слоя толщиной 3 мкм с $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, включение происходило при $U_0 = 50 \text{ В}$ и $C = 150 \text{ нФ}$. Указаны моменты времени, в которые достигается одинаковая амплитуда тока $\sim 7 \text{ А}$ (I_{7A}) для сравнения

На рис. 42 приведена динамика тока и напряжения для структур с легированием базы 10^{17} см^{-3} , при этом емкость внешнего конденсатора была уменьшена до 5 нФ для оценки эффективности генерации коротких импульсов. Как видно из динамики тока и напряжения, в данном случае не происходит эффективного и быстрого включения, ток выходит на некоторую «полку», как и в случае длинных импульсов, но дальнейшего быстрого включения не происходит, т.к. не успевает сформироваться домен электрического поля на границе n_0/n_+ в области коллектора (рис. 43). Как и ранее, большая амплитуда тока и меньшая задержка включения наблюдаются в структуре с GaAs коллектором.

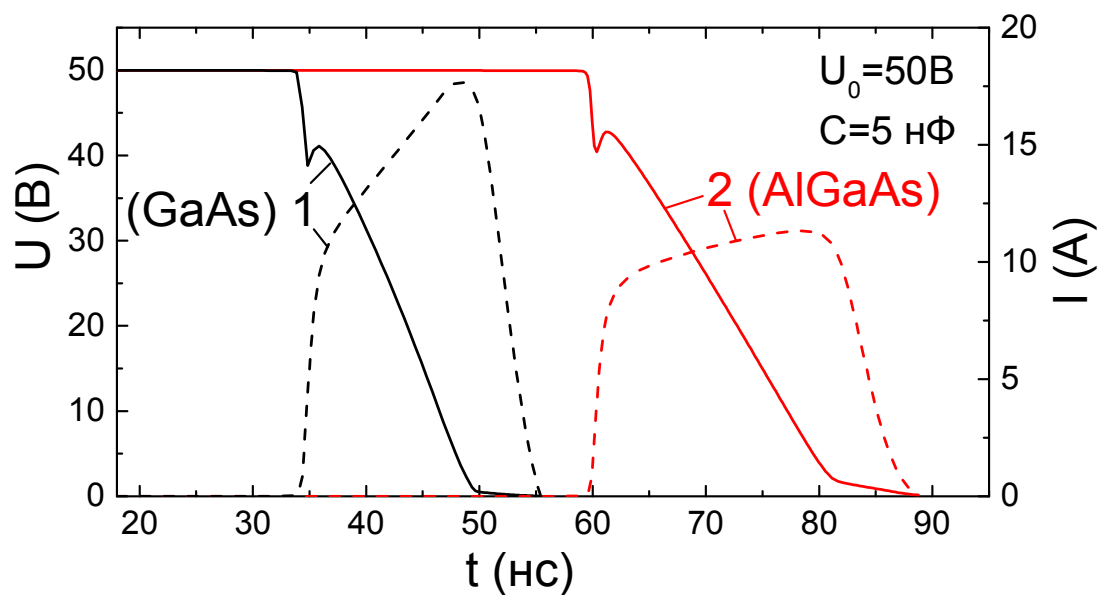


Рисунок 42 – Динамика напряжения (сплошная линия) и тока (пунктир) при $U_0=50 \text{ В}$ и $C=5 \text{ нФ}$ для гетероструктуры лазер-тиристора с формированием ООЗ в коллекторе, толщина коллекторной низколегированной области 3 мкм с $N_D=10^{16} \text{ см}^{-3}$, легирование базовой области $N_A=10^{17} \text{ см}^{-3}$, состав низколегированной части коллектора изменялся: 1 – GaAs; 2 – AlGaAs

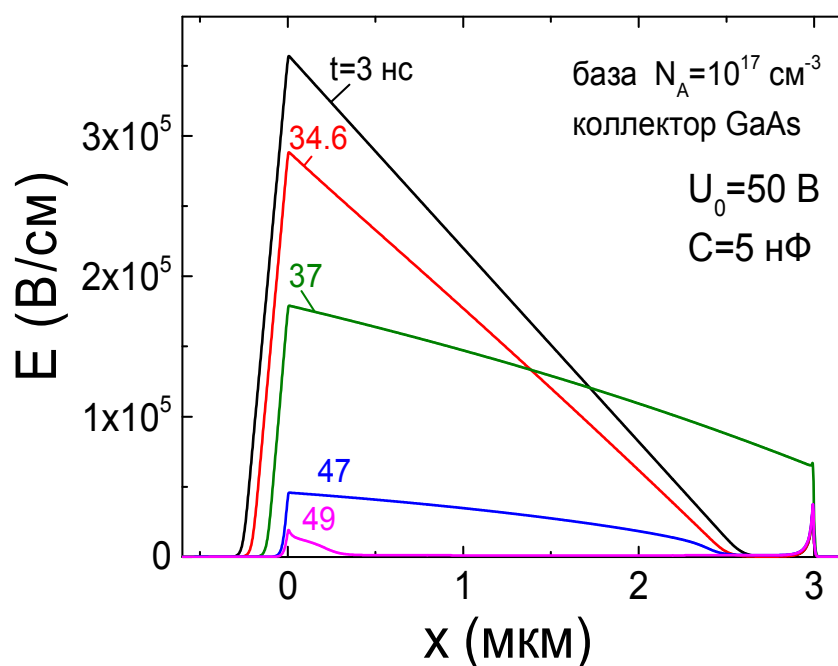


Рисунок 43 – Распределения напряженности электрического поля в различные моменты времени при включении лазер-тиристора на основе гетероструктуры с расположением ООЗ в коллекторе с толщиной базы 1 мкм и $N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и GaAs низколегированной частью коллектора толщиной 3 мкм с $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, включение происходило при $U_0 = 50 \text{ В}$ и $C = 5 \text{ нФ}$

Для задачи генерации коротких лазерных импульсов с высокими значениями оптической мощности были рассмотрены структуры с пониженным легированием в области коллектора до 10^{15} см^{-3} , толщина низколегированной части коллектора была увеличена до 4 мкм. Максимальное напряжение блокировки в данных структурах $\sim 100 \text{ В}$. На рис. 44 приведена динамика тока и напряжения при включении лазер-тиристора, фототранзисторная часть которого основана на предложенной гетероструктуре с 4 мкм коллектором и $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Изменение состава коллектора в данном случае также оказывает влияние на задержку включения, однако амплитуда импульса тока меняется слабо. Была рассмотрена структура с толщиной базы 0.5 мкм при том же легировании, в данной структуре ниже значение задержки включения, однако амплитуда импульса тока не отличается от амплитуды тока при толщине базы 1 мкм. Данные факты говорят о том, что в данном случае скорость нарастания тока и максимальная амплитуда импульса определяются скоростью ударной ионизации, высокий уровень которой обеспечивает быстрое перераспределение поля в гетероструктуре и быстрое и эффективное накопление неравновесных дырок в области базы (рис. 45), что, в свою очередь, приводит к быстрому переключению лазер-тиристора в проводящее состояние. Максимальная амплитуда тока в данных структурах составила 176 А при начальном напряжении 100 В, что близко к

полученным результатам в структурах с ООЗ в базе и коллекторе, где при начальном напряжении в 110 В максимальная амплитуда тока составила 190 А (рис.32).

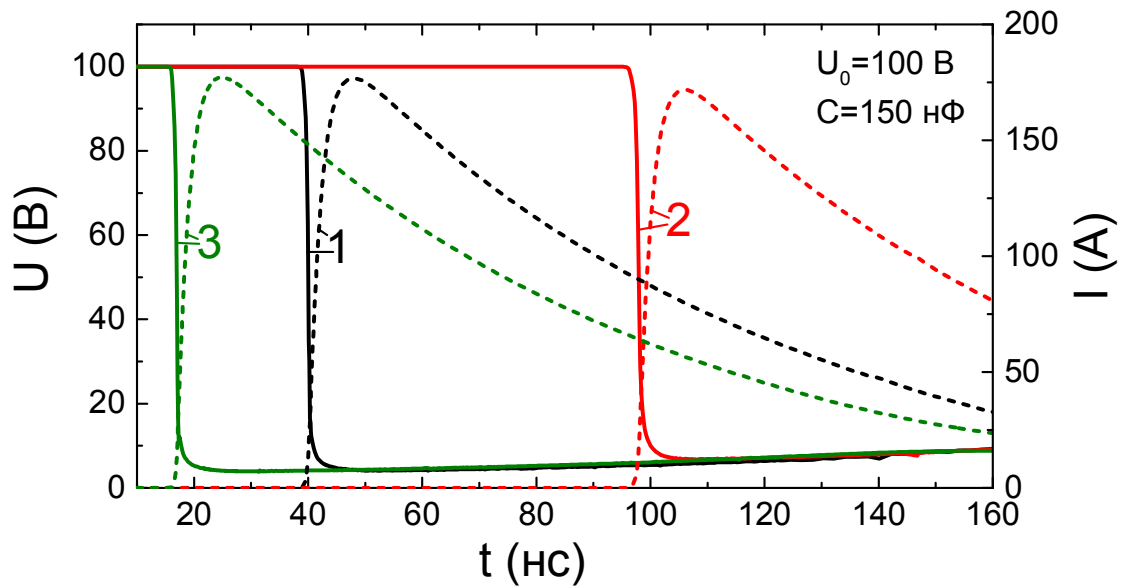


Рисунок 44 – Динамика тока и напряжения при $U_0=100$ В и $C=150$ нФ для гетероструктуры лазер-тиристора с формированием ООЗ в коллекторе, толщина коллекторной низколегированной области 4 мкм с $N_D=10^{15}$ см $^{-3}$, легирование базовой области 10^{17} см $^{-3}$, изменялся состав низколегированной части коллектора и толщина базы: 1 – база 1 мкм и GaAs коллектор; 2 – база 1 мкм и AlGaAs коллектор, 3 – база 0.5 мкм и GaAs коллектор

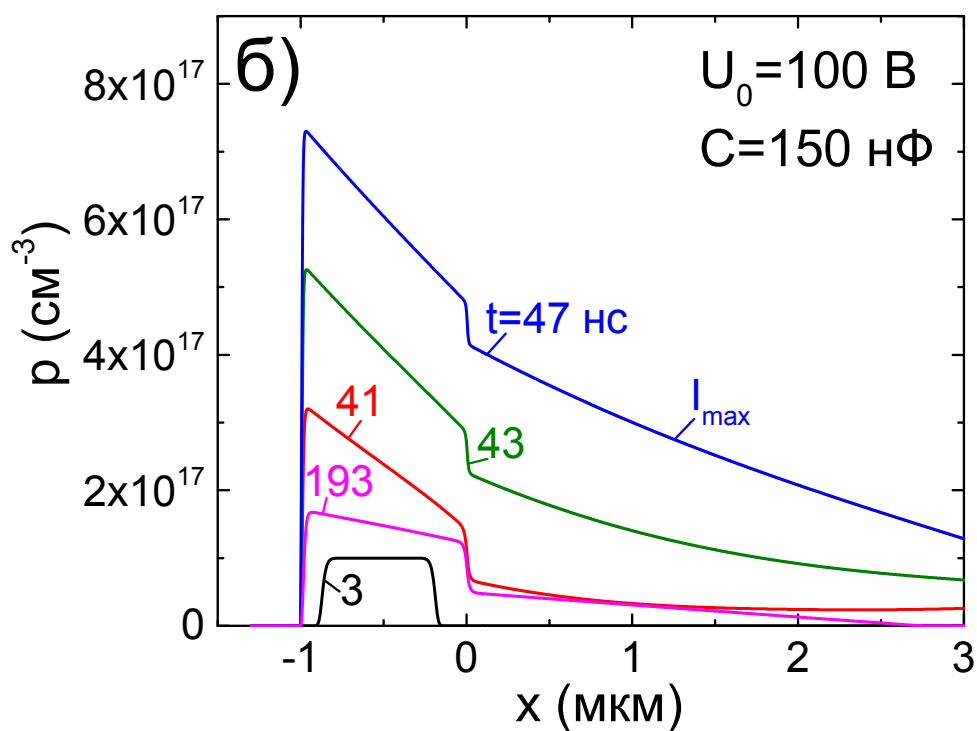
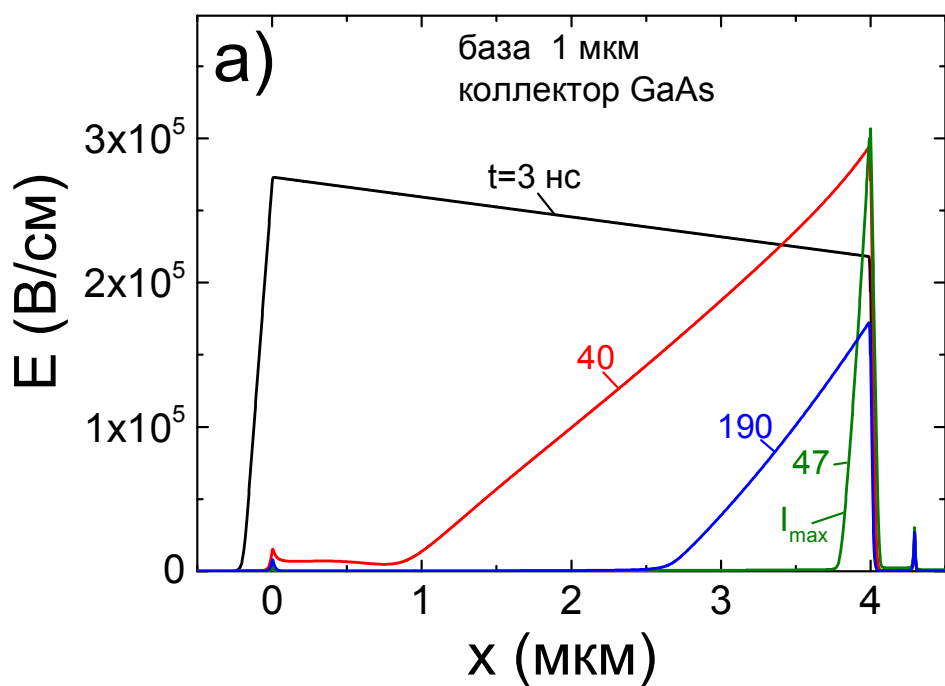


Рисунок 45 – Распределения а) напряженности электрического поля и б) концентрации дырок в различные моменты времени при включении лазер-тиристора на основе гетероструктуры с расположением ООЗ в коллекторе с толщиной базы 1 мкм и $N_A=10^{17}$ см⁻³ и GaAs низколегированной частью коллектора толщиной 4 мкм с $N_D=10^{15}$ см⁻³, включение происходило при $U_0=100$ В и $C=150$ нФ.

При начальном напряжении на структуре 100 В, в структуре с 1 мкм базой и GaAs коллектором показана возможность генерации коротких токовых импульсов с высокой

амплитудой. При $C=5$ нФ и $C=1$ нФ длительность импульса тока по основанию составила 10 и 4 нс, соответственно, а амплитуда тока составили 105 и 60 А, соответственно (рис. 46). Данный результат сопоставим с полученным в структурах с ООЗ, сформированной в базе и коллекторе (рис. 32), где была показана возможность генерации импульсов с амплитудой тока 66 А при длительности импульса по основанию 4 нс при $C=1$ нФ.

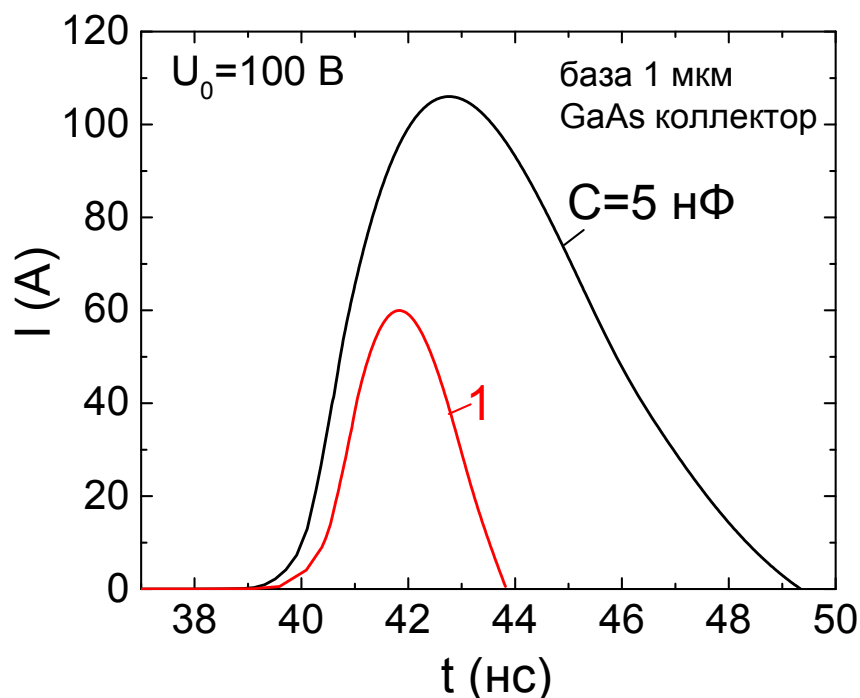


Рисунок 46 – Динамика тока при $U_0=100$ В для гетероструктуры лазер-тиристора с формированием ООЗ в коллекторе, толщина коллекторной низколегированной области 4 мкм с $N_D=10^{15}$ см $^{-3}$, легирование базовой области 10^{17} см $^{-3}$, значение емкости конденсатора во внешней цепи изменялось и равнялось 1 и 5 нФ

Как и ранее, в структурах такого типа наблюдается снижение скорости переходных процессов при переходе к более низким рабочим напряжениям (рис. 47). Причиной такого медленного роста тока и спада напряжения на начальном участке является низкая напряженность электрического поля на начальном этапе включения, как и в случае, показанном на рис. 36б, при этом при формировании домена электрического поля на границе p_0/n_+ на динамике тока и напряжения наблюдается излом и увеличивается скорость переходных процессов. В данном случае амплитуда импульса тока (79 А) несколько выше в сравнении со структурой с формированием ООЗ в базе и коллекторе (76 А), а длительность начального участка с медленным нарастанием тока одинакова и составляет ~15 нс.

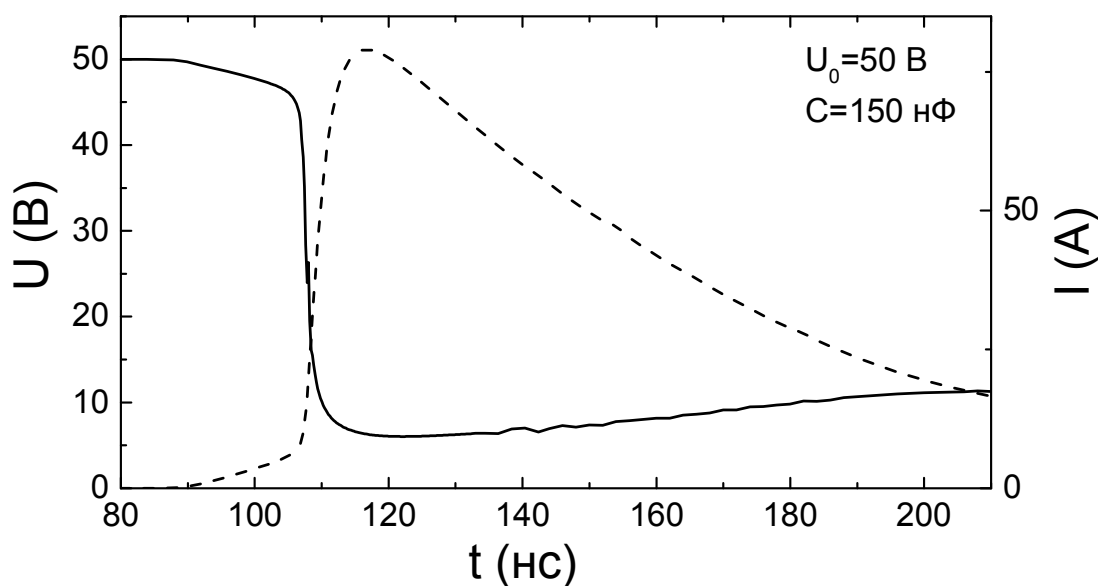


Рисунок 47 – Динамика тока и напряжения при $U_0=50$ В для гетероструктуры лазер-тиристора с формированием ООЗ в коллекторе, толщина коллекторной низколегированной области 4 мкм с $N_D=10^{15}$ см $^{-3}$, легирование базовой области 10^{17} см $^{-3}$, значение емкости конденсатора во внешней цепи изменялось и равнялось 1 и 150 нФ

Выводы.

Можно заключить, что рассмотренные конструкции лазер-тиристора с расположением ООЗ в коллекторе обладают несколько меньшей эффективностью в сравнении с другими типами гетероструктур при легировании области, где расположена ООЗ на уровне 10^{16} см $^{-3}$. В структурах данного типа максимальное напряжение блокировки составило ~ 50 В. Для обеспечения эффективного включения (с высокой скоростью включения, низким остаточным напряжением и высокой амплитудой импульсов тока) лазер-тиристора важно учитывать вносимые рекомбинационные потери за счет высоколегированного базового слоя и необходима оптимизация толщины и легирования базовой области.

В структурах с пониженным легированием коллектора (до 10^{15} см $^{-3}$) толщиной 4 мкм, где максимальное напряжение блокировки составило ~ 100 В, наблюдается эффективное включение и генерация токовых импульсов с высокой амплитудой, в том числе в случае генерации коротких импульсов. В подобных структурах была показана 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 структурах лазер-тиристора с ООЗ, сформированной в коллекторе, как и в случае ООЗ, сформированной в базе и коллекторе, наблюдается сильная зависимость формы импульса тока и динамики спада напряжения от особенностей перераспределения напряженности электрического поля в структуре в процессе перехода во включенное состояние. Необходимым условием для эффективного включения с высокими значениями амплитуды тока, быстрым переключением (порядка 10 нс) и низким остаточным напряжением является быстрое (~ 1 нс) формирование домена электрического поля на границе n_0/p_+ в области коллектора, обеспечивающего высокую скорость генерации носителей за счет ударной ионизации. Для выполнения данного условия необходима оптимизация толщины и легирования коллекторного слоя, так при легировании коллектора 10^{16} см^{-3} его толщина должна быть менее 3 мкм, а при легировании 10^{15} см^{-3} его толщина может быть равна 4 мкм, но при этом эффективная работа прибора возможна только при напряжениях близким к максимальным.

Выводы к части 3.2.

По результатам моделирования различных конструкций гетероструктуры лазер-тиристора наиболее оптимальной для генерации оптических импульсов мощностью в 10-ки Вт длительностью порядка 100 нс и единицы Вт длительностью 1-10 нс в широком диапазоне питающих напряжений является гетероструктура лазер-тиристора с формированием ООЗ в базе, при этом конструкция базы следующая: низколегированный ($N_a=10^{16} \text{ см}^{-3}$) p-GaAs толщиной 2 - 2.5 мкм и с наличием запирающего p_+ ($N_a=10^{18} \text{ см}^{-3}$) GaAs слоя со стороны эмиттера толщиной порядка 50 нм. В данной конструкции показана возможность высокой скорости переходных процессов – включение за 10 нс до амплитуды тока 40-80 А. Высокую эффективность показали структуры с однородной p_0 базой толщиной 2-4 мкм в зависимости от легирования.

Для генерации наносекундных импульсов мощностью 10-ки Вт наиболее оптимальной является гетероструктура типа $N_+/p+/p_0/n_0/N_+$, с суммарной толщиной низколегированной области и порядка 4 мкм и ее легированием на уровне 10^{15} - $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В структуре такого типа возможна генерация импульсов тока длительностью 2 нс и амплитудой более 50 А (~ 45 Вт). Однако, данная структура работает эффективно только в режимах с напряжением питания близким к максимальному. На динамике тока в таких структурах наблюдается «полка», а при низких начальных напряжениях на начальном этапе присутствует медленный фронт включения (обусловленный фотоактивацией), и только на втором этапе начинается быстрый рост тока за счет включения ударной ионизации.

Структуры с ООЗ в коллекторе в целом менее эффективны, по сравнению с другими конструкциями. Но в случае легирования n_0 коллектора на уровне 10^{15} - $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и достаточно тонкой p_+ базе (50 нм при $N_a=10^{18} \text{ см}^{-3}$) или менее легированной базе ($N_a=10^{17} \text{ см}^{-3}$) при ее толщине порядка 1-0.5 мкм могут работать схожим образом с структурами с ООЗ в базе и коллекторе (т.к. форма распределения электрического поля в низколегированных областях совпадает), но имеют несколько более низкие напряжения блокировки.

3.3 Влияние оптической обратной связи и ударной ионизации на характеристики низковольтных лазер-тиристоров на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур

Было проведено исследование влияния ударной ионизации и оптической обратной связи на динамику тока и напряжения при переходе лазер-тиристора во включенное состояние. На первом этапе моделировалось включение прибора при отсутствии ударной ионизации (коэффициенты α_n , α_p в (5), (6) приравнивались к нулю) (рис. 48), в другом случае было снижено поглощение спонтанного излучения из активной области в GaAs слоях структуры, что привело к снижению уровня фотогенерации в структуре при тех же плотностях тока (рис. 48, 49) и, соответственно, к снижению эффективности оптической обратной связи в лазер-тиристоре. На втором этапе исследовалось влияние увеличения эффективности повышения оптической обратной связи.

Рассмотрим влияние ударной ионизации на примере структуры с формированием ООЗ в базе, база в данном случае имела толщину 2 мкм и однородное легирование $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. При наличии ударной ионизации фронт включения по току составляет всего 20 нс, а при отсутствии – длительность фронта включения значительно выше и составляет порядка 60 нс, также снизилась максимальная амплитуда тока примерно на 35%, но не изменилось остаточное напряжение (рис. 48). Данный факт говорит о том, что определяющим фактором скорости перехода лазер-тиристора во включенное состояние является наличие ударной ионизации в области коллекторного перехода.

Эффективность оптической обратной связи в структурах лазер-тиристора возможно регулировать за счет изменения спектра спонтанного излучения (сдвиг в коротковолновую область повысит эффективность оптической обратной связи), за счет увеличения числа квантовых ям (что увеличит пороговый ток и полную интенсивность спонтанного излучения) и за счет внесения между GaAs базой и лазерной частью буферного GaAs коллекторного слоя, поглощающего часть спонтанного излучения из активной области (таким образом в базу поступает изначально меньшая доля спонтанного излучения). Снижение эффективности оптической обратной связи (что моделирует случай наличия между базой и лазером буферного GaAs слоя) в лазере-тиристоре приводит к значительному увеличению задержки включения, снижению амплитуды импульса тока на ~17% и росту остаточного напряжения до ~6 В (рис. 48), при этом сохраняется высокая скорость переходных процессов. Можно сделать вывод, что оптическая обратная связь поддерживает лазер-тиристор во включенном состоянии, за счет поддержания высокой концентрации неравновесных дырок в базе. Скорость генерации носителей за счет

ударной ионизации во включенном состоянии ниже, что наглядно продемонстрировано на рис. 49.

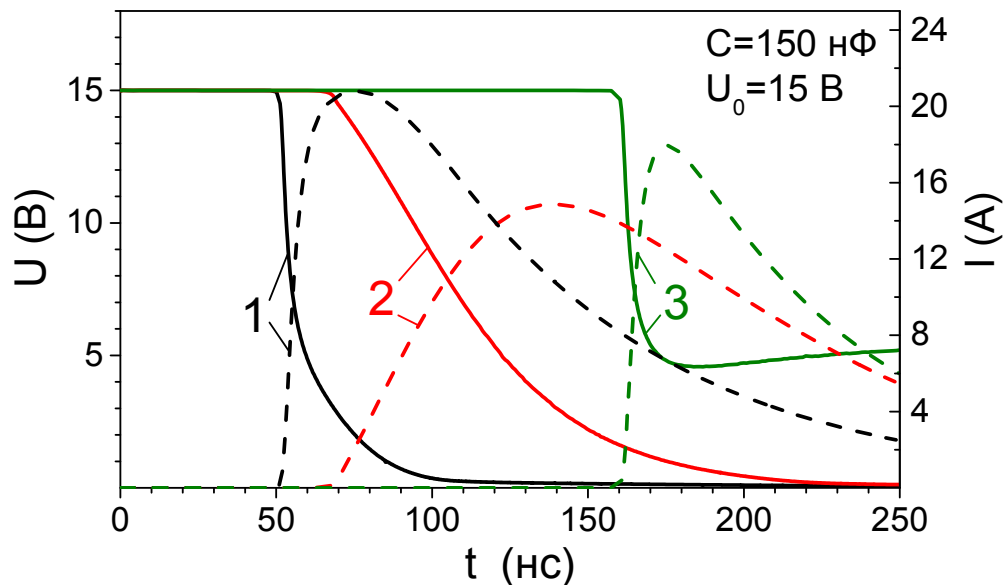


Рисунок 48 – Зависимости тока (пунктирная линия) и напряжения (сплошная) от времени, полученные для блокирующего напряжения 15В и с внешней емкостью в цепи 150 нФ, рассчитанные с учетом: 1 – фотогенерации и ударной ионизации; 2 – только фотогенерации; 3 – низкого уровня фотогенерации (поглощение в р-базе ниже в 7 раз) и ударной ионизации. Момент включения на данном графике совмещены для удобства, однако качественно отражают увеличение задержки включения при выключении ударной ионизации и снижении эффективности оптической обратной связи

Из рис. 49 и 50 видно, что при более низких напряжениях включение лазер-тиристора преимущественно происходит за счет фотогенерации, и, таким образом в модели наблюдается более медленный фронт включения, а при 7 В скорость генерации носителей за счет ударной ионизации значительно ниже скорости фотогенерации. Во всех случаях эффективная ударная ионизация наблюдается в короткий промежуток времени во время перехода лазер-тиристора во включенное состояние (порядка 20 нс), т.к. далее падает напряжение на структуре и снижается напряженность электрического поля в области коллекторного перехода (рис. 51). Значительно снижается напряженность электрического поля в области базы при снижении напряжения на структуре (рис. 52), что приводит к снижению скорости генерации носителей за счет ударной ионизации (поэтому она значительно ниже скорости фотогенерации при низких напряжениях – порядка 7 В) и в конечном итоге к накоплению меньшей концентрации носителей в области базы, более слабой модуляции базы неравновесными носителями, и, соответственно к снижению амплитуды тока в структуре.

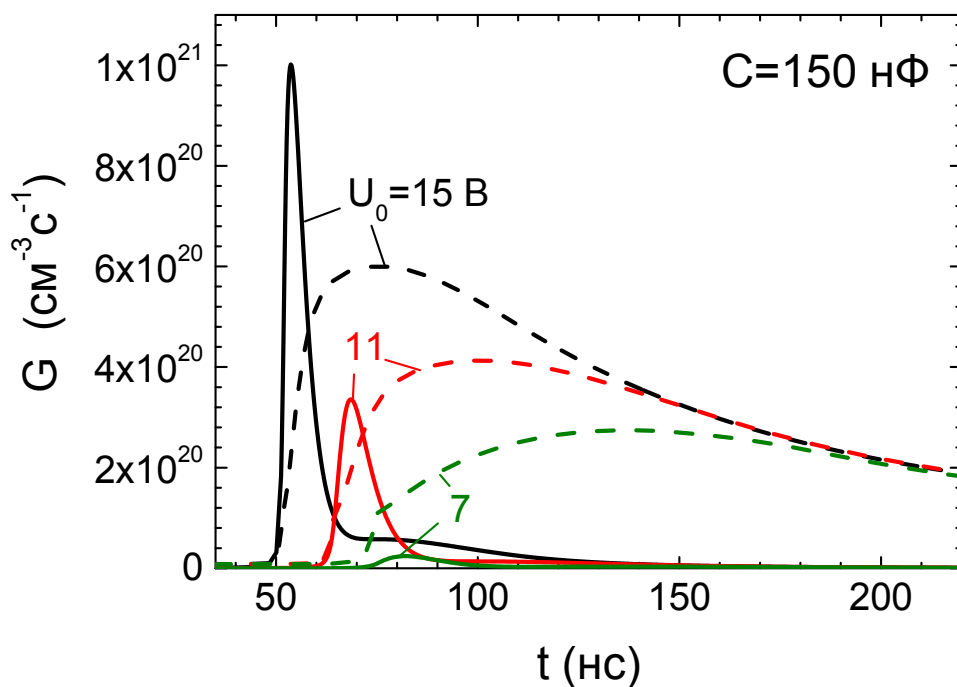


Рисунок 49 – Скорость генерации неравновесных носителей за счет ударной ионизации в области коллекторного перехода (сплошная линия) и за счет оптической обратной связи (пунктир) при начальных напряжениях на структуре 7-15 В в случае полной модели, учитывающей стандартный уровень фотогенерации

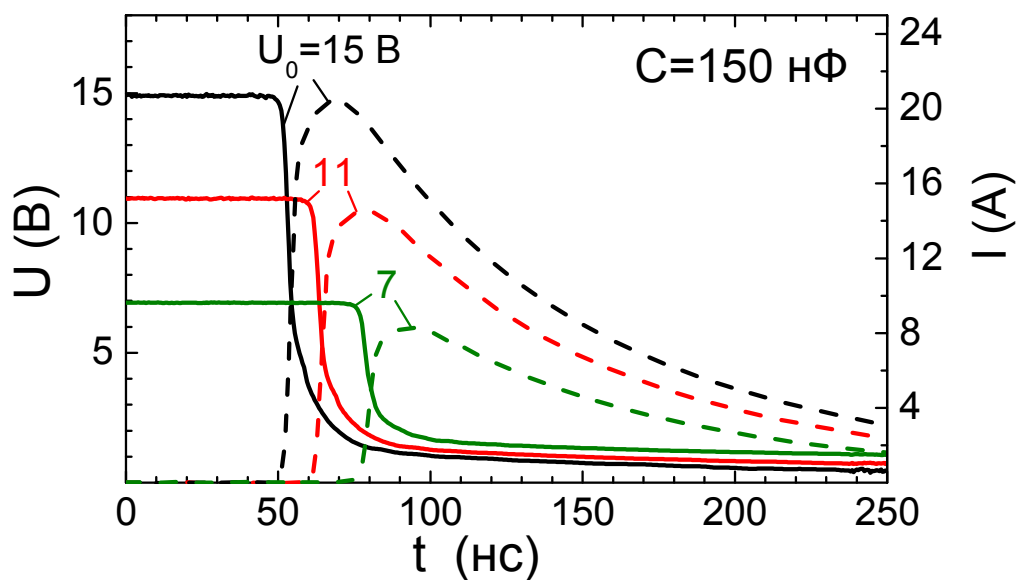


Рисунок 50 – Зависимости тока (пунктирная линия) и напряжения (сплошная) от времени, полученные для блокирующего напряжения 7-15 В с внешней емкостью в цепи 150 нФ в случае полной модели, учитывающей стандартный уровень фотогенерации

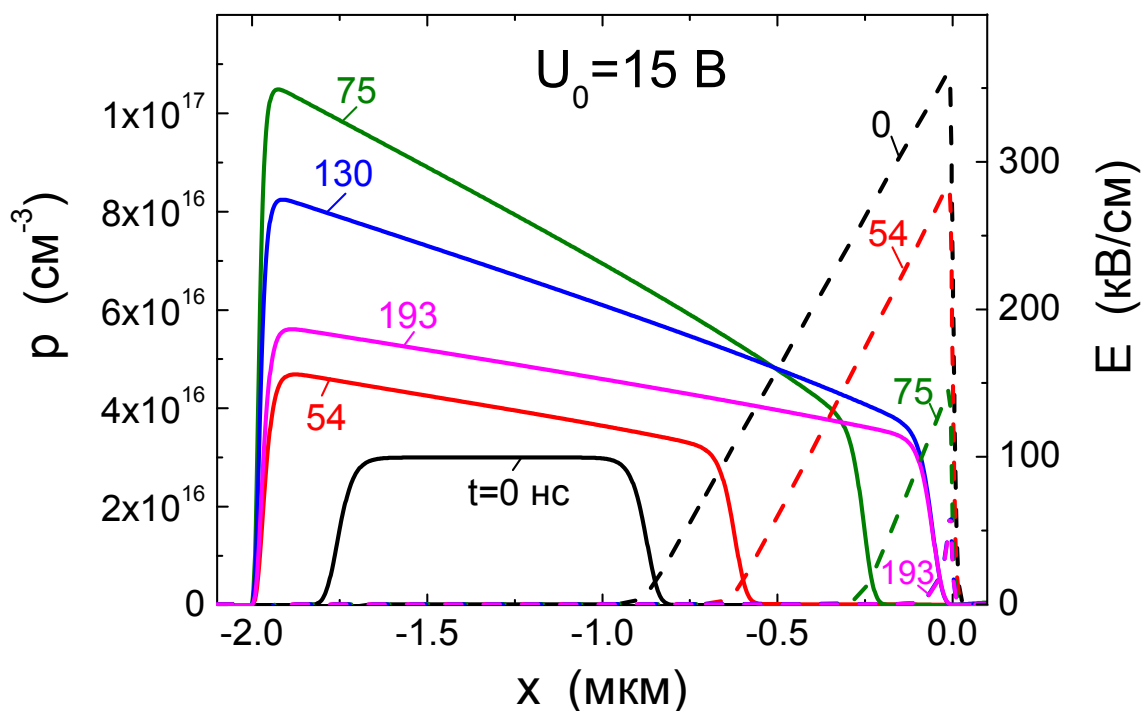


Рисунок 51 – Распределения концентрации дырок (сплошная линия) и напряженности электрического поля (пунктир) и в p-GaAs базе лазер-тиристора при начальном напряжении на структуре 15 В и значении внешней емкости 150 нФ в различные моменты времени

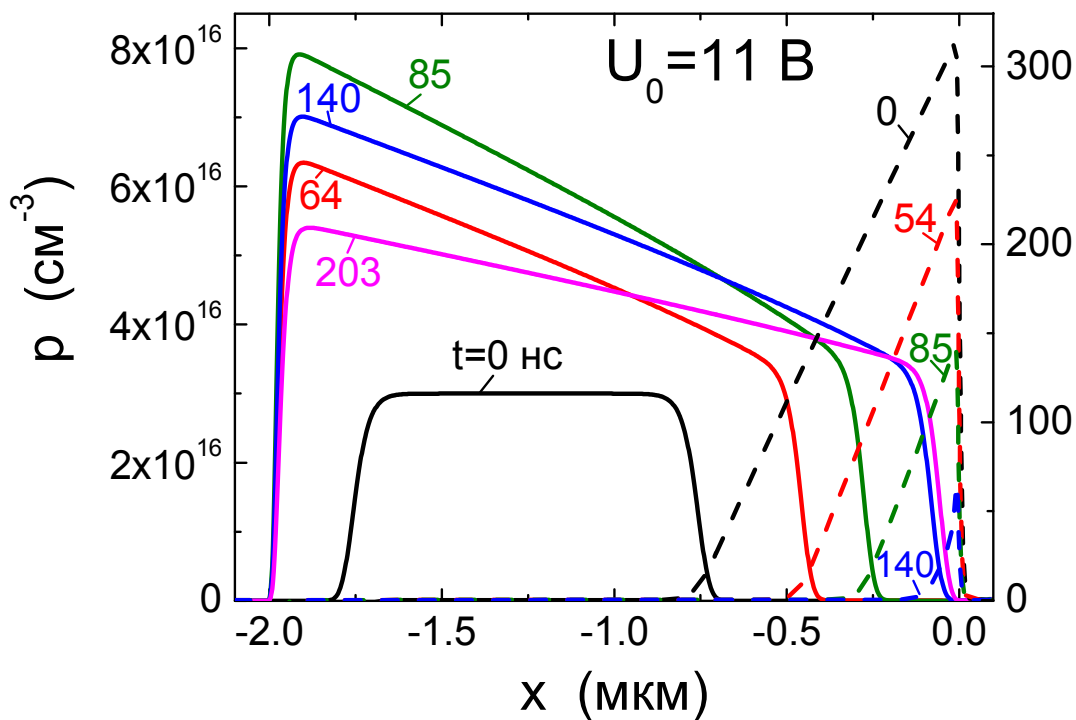


Рисунок 52 – Распределения концентрации дырок (сплошная линия) и напряженности электрического поля (пунктир) и в p-GaAs базе лазер-тиристора при начальном напряжении на структуре 11 В и значении внешней емкости 150 нФ в различные моменты времени

Рассмотрим влияние высокого уровня фотогенерации в базе лазер-тиристора. Было проведено моделирование лазер-тиристора с высокой эффективностью оптической обратной связи, при этом в (3а) коэффициент полезной доли спонтанного излучения активной области лазерного диода (β) был увеличен с 0.08 до 0.4 (что моделирует случай, когда спектр спонтанного излучения активной области полностью перекрывается спектром поглощения базы), а также пороговый ток I_{th} в (3а) и (3б) был увеличен в 3 раза (3 квантовые ямы в лазерной части вместо одной). Рассматривалась структура с формированием ООЗ в базе и коллекторе; гетероструктура транзисторной части состояла из составной базы p^+/p_0 , низколегированная ($N_A=10^{16} \text{ см}^{-3}$) часть была толщиной 2 мкм, а p^+ часть ($N_A=10^{17} \text{ см}^{-3}$) – 0.5 мкм и низколегированного ($N_D=10^{16} \text{ см}^{-3}$) коллектора AlGaAs коллектора толщиной 2.24 мкм (максимальное напряжение блокировки в такой структуре $\sim 75 \text{ В}$). Данная структура была выбрана по причине нестандартной динамики тока и напряжения, когда при перестроении домена электрического поля в структуре на динамике напряжения и тока наблюдались «полки» и локальные минимумы. Целью данной части исследования было выяснить будет ли повышенная эффективность оптической обратной связи способствовать более быстрому перестроению домена электрического поля и приведет ли она к более гладкой форме динамики тока и напряжения. На рис. 53 показана динамика тока в такой структуре, дополнительно рассматривался случай полного отсутствия ударной ионизации.

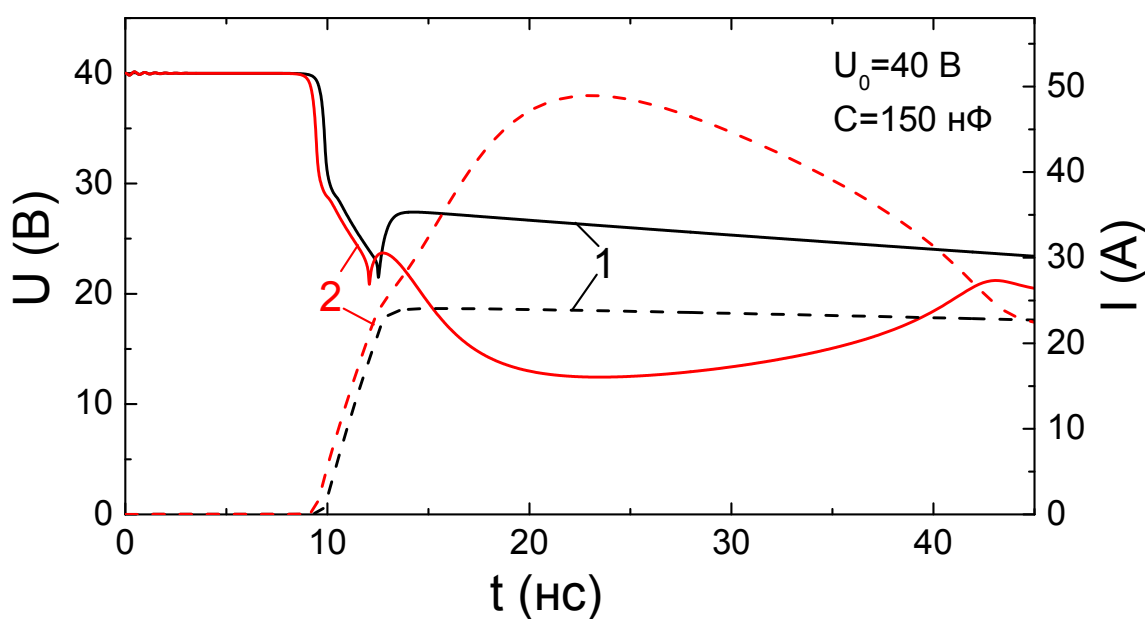


Рисунок 53 – Динамика напряжения (сплошная линия) и тока (пунктир) в структуре лазер-тиристора с повышенной эффективностью оптической обратной связи: 1 – при наличии ударной ионизации и 2 – без ударной ионизации

На динамике напряжения и тока при наличии ударной ионизации видно (рис. 53), что в зависимости тока присутствует "излом" – снижение скорости нарастания тока, а также видна сложная динамика напряжения с локальным минимумом и максимумом. При отсутствии ударной ионизации прибор не включается эффективно, включение останавливается в определенный момент времени, а остаточное напряжение выше, чем в случае с ударной ионизацией. Для понимания причин такой динамики тока и напряжения рассмотрим распределения напряжённости поля в структуре в различные моменты времени при наличии и отсутствии ударной ионизации (рис. 54).

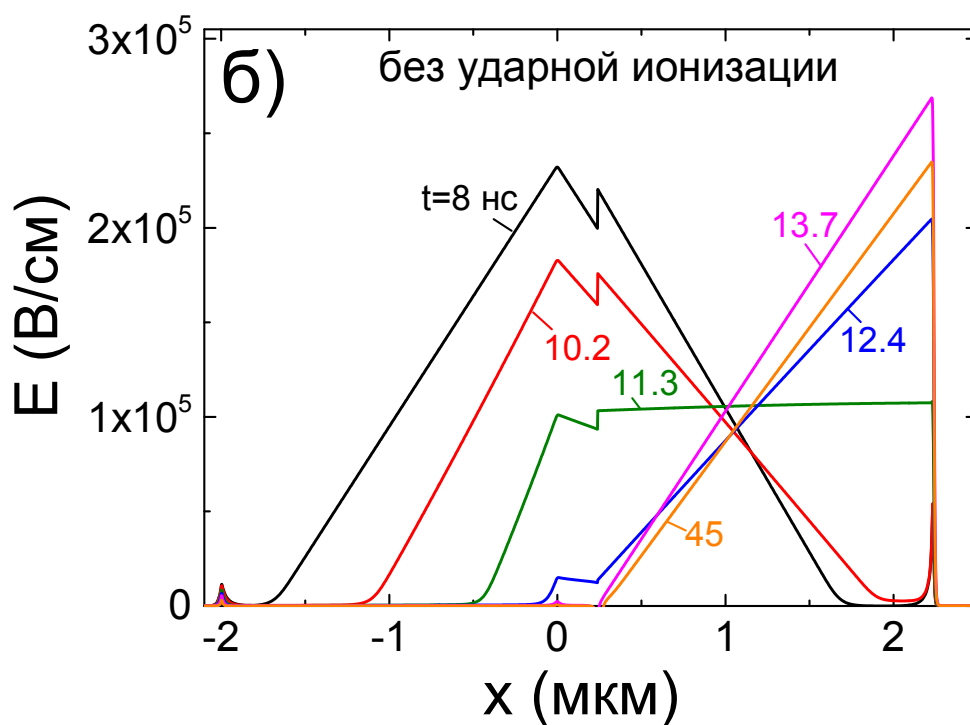
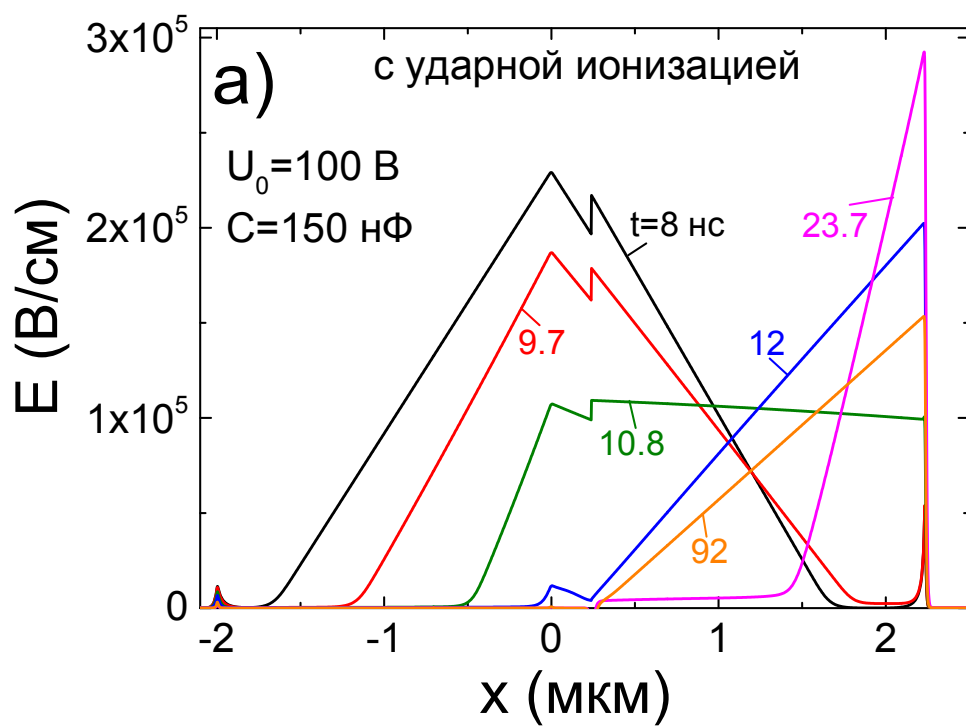


Рисунок 54 – Распределения напряженности электрического поля в структуре лазер-тиристора с повышенной эффективностью оптической обратной связи а) при наличии ударной ионизации и б) без ударной ионизации. Начальное напряжение равнялось 40 В, внешняя емкость в цепи составляла 150 нФ

При отсутствии ударной ионизации, в коллекторном слое не может сформироваться высокая концентрация электронно-дырочной плазмы (рис. 54б) и домен электрического поля не меняет свою ширину. При этом изменяется градиент

электрического поля под действием нарастающего тока (и, соответственно нарастающей концентрации электронов в n_0 коллекторе). Поэтому наблюдается локальный рост напряжения на структуре, который виден на динамике (рис. 53). При отсутствии ударной ионизации ток, протекающий через структуру не может увеличиваться далее, остаточное напряжение при включении составляет ~ 25 В. При наличии ударной ионизации за счет более высокой концентрации носителей в n_0 -AlGaAs коллекторе (рис. 55а и 55б) поле «поджимается» к границе n_0/n_+ , домен поля сужается (рис. 54а), напряжение в таком случае ниже, что и видно на динамике (рис. 53). В то же время, при сравнении с динамикой тока при стандартном уровне ООС в похожих структурах (гл. 3.2 (Б), рис. 36), видно, что при повышенном уровне ООС в структуре форма динамики тока имеет более гладкий вид, полки на динамике тока отсутствуют. Таким образом, можно сделать вывод, что повышение эффективности ООС положительно сказывается на электрических характеристиках прибора.

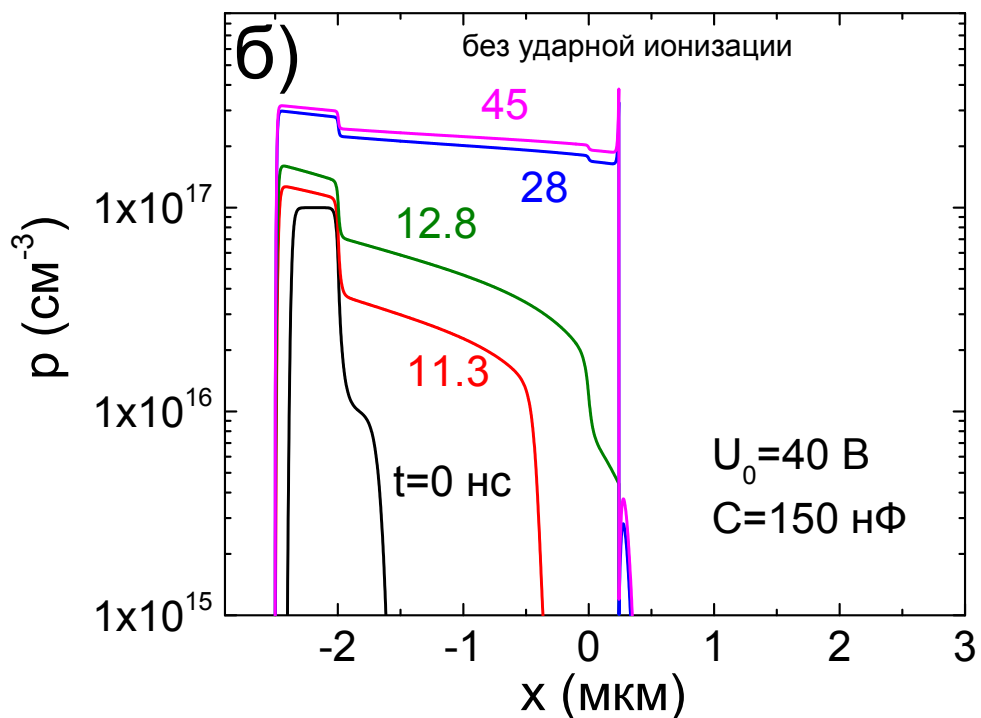
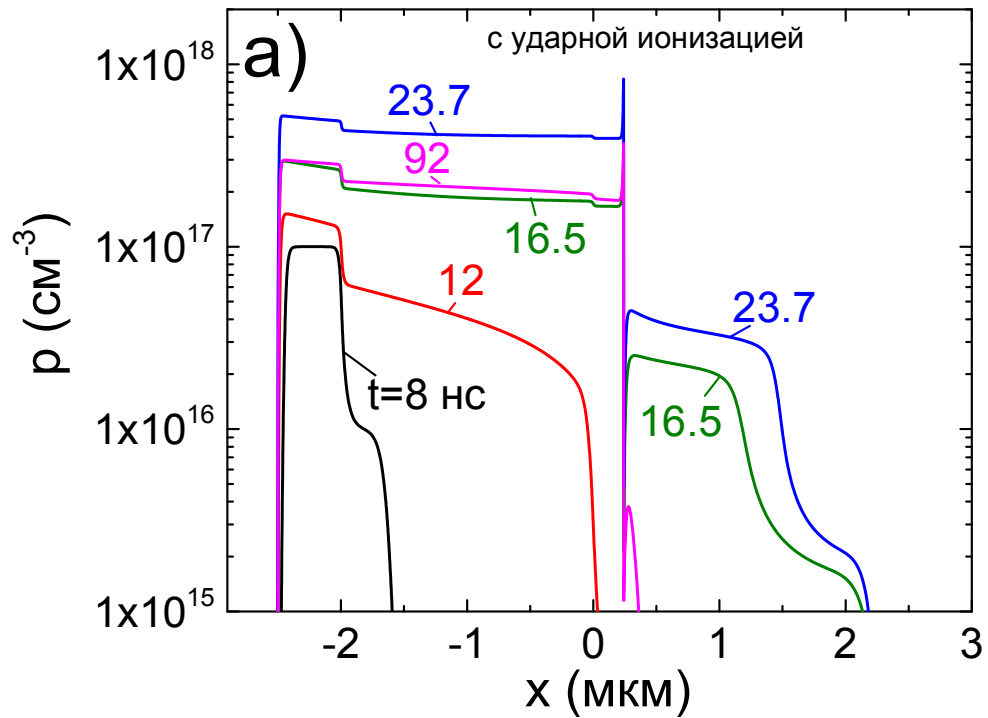


Рисунок 55 – Распределения концентрации дырок в структуре лазер-тиристора с повышенной эффективностью оптической обратной связи а) при наличии ударной ионизации и б) без ударной ионизации. Начальное напряжение равнялось 40 В, внешняя емкость в цепи составляла 150 нФ

На рис. 56 представлено изменение интегральной скорости ударной ионизации и фотогенерации в рассматриваемых случаях. Видно, что в случае наличия ударной

ионизации лазер-тиристор включается на начальном этапе за счет фотогенерации, на начальном этапе также происходит сброс напряжения за счет падения напряженности электрического поля в области коллекторного перехода без перераспределения электрического поля ($t=9.7, 10.8$ нс на распределении поля рис. 54), но в момент включения ударной ионизации электрическое поле уже перераспределено и сформирован домен поля. В данных условиях присутствует достаточная напряженность поля и плотность тока для активной ударной ионизации, что дает увеличение тока и рост концентрации неравновесных дырок в области коллектора, что в свою очередь приводит к формированию более узкого домена поля. В этот же момент времени (включение ударной ионизации при $t=12$ нс) на динамике тока наблюдается перелом (рис. 53). При отсутствии ударной ионизации в данной критической области нет дополнительного источника носителей, поэтому дальнейший рост тока прекращается. Стоит отметить, что на динамике скорости фотогенерации наблюдается два излома, первый из них соответствует достижению порога лазерной генерации (рис. 56).

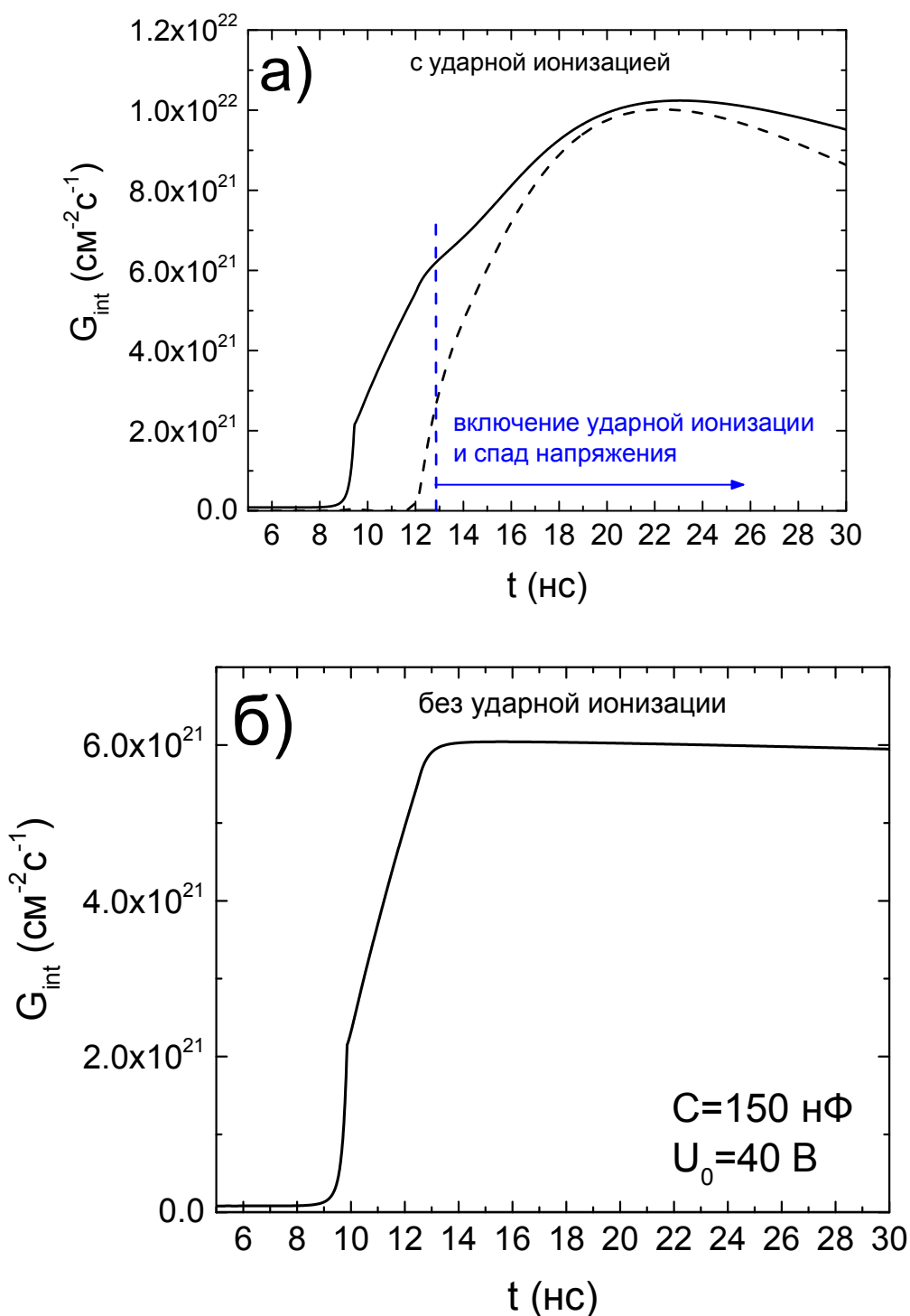


Рисунок 56 – Динамика интегралов скоростей фотогенерации (сплошная линия) и ударной ионизации (пунктир) в структуре лазер-тиристора с повышенной эффективностью оптической обратной связи а) при наличии ударной ионизации и б) без ударной ионизации. Начальное напряжение равнялось 40 В, внешняя емкость в цепи составляла 150 нФ

Представляется интересным рассмотрение конструкции лазер-тиристора с повышенной эффективностью оптической обратной связи и с формированием ООЗ в базе или же в базе и коллекторе с коллектором GaAs. В работе рассмотрен вариант формирования ООЗ в области базы, с 4 мкм базой с $N_A=10^{16} \text{ см}^{-3}$. В данном случае прибор

работает более эффективно (рис. 57) – остаточное напряжение близко к нулю (в модели не учитывается напряжение, падающее на лазерной диодной части прибора) и обеспечивается высокая скорость включения, т.к. поглощение происходит во всей низколегированной области. На рис. 58 показана динамика интегральных скоростей ударной ионизации и фотогенерации. В отличие от рассмотренного ранее варианта структуры, скорость фотогенерации значительно превышает скорость ударной ионизации. Амплитуда тока в структуре с более высоким уровнем фотогенерации в сравнении со стандартным уровнем оптической обратной связи увеличилась на 17% и составила 70А (рис. 59).

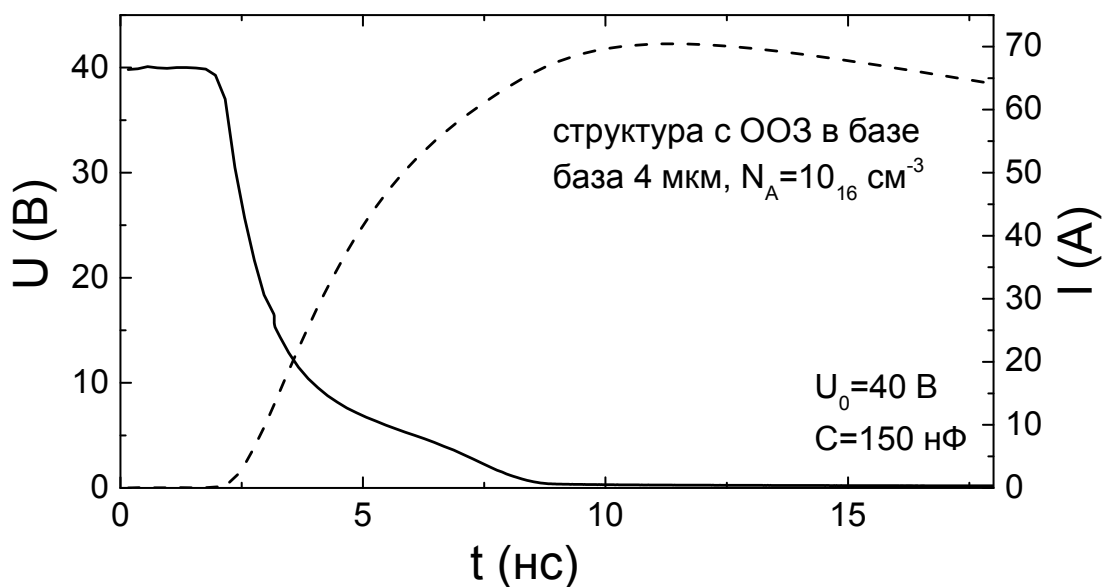


Рисунок 57 – Динамика тока и напряжения в структуре лазер-тиристора с формированием ООЗ в базе и повышенной эффективностью оптической обратной связи

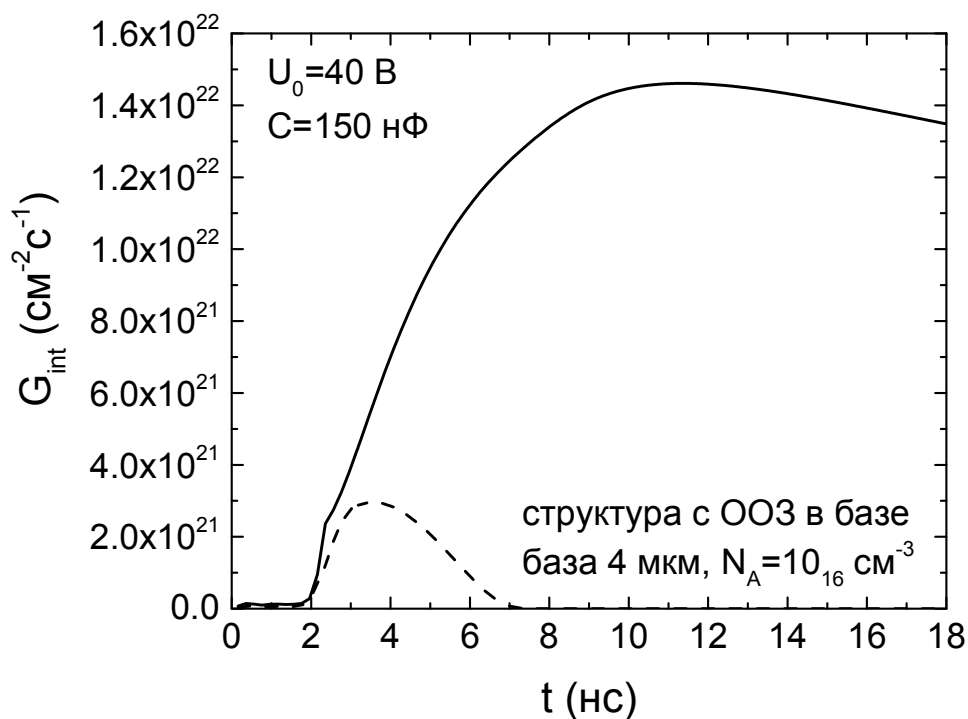


Рисунок 58 – Интегральные скорости ударной ионизации и фотогенерации в структуре лазер-тиристора с формированием ООЗ в базе и повышенной эффективностью оптической обратной связи

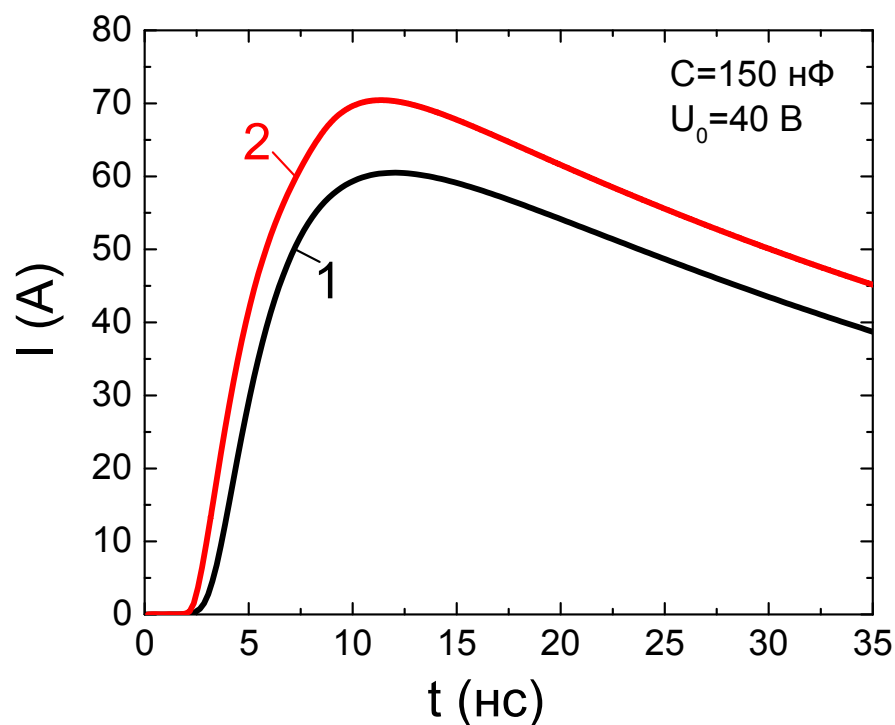


Рисунок 59 – Сравнительная токовая динамика в структурах лазер-тиристора с формированием ООЗ в р-GaAs базе: 1 – стандартная оптическая обратная связь; 2 – повышенная эффективность оптической обратной связи

Выводы

Ударная ионизация в структурах лазер-тиристора играет определяющую роль в скорости переходных процессов при включении прибора, а в некоторых случаях определяет и эффективность включения лазер-тиристора. В то же время, возможны конструкции лазер-тиристора, в которых высокая скорость включения будет определяться за счет оптической обратной связи. К таким структурам можно отнести и рассмотренные ранее структуры с узкой p_0 базой (порядка 1.5-2 мкм) при наличии p_+ слоя в базе, а также структуры с более высокой эффективностью оптической обратной связью, рассмотренные в данной главе.

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): 1) ООЗ сформирована в p -базе; 2) ООЗ сформирована в p -базе и n -коллекторе; 3) ООЗ сформирована в n -коллекторе. Оптимальной для работы в широком диапазоне рабочих напряжений является структура с ООЗ в p -базе, при максимальном напряжении удержания в 55 В наблюдается эффективное включение вплоть до 10 В. Кроме этого структура типа 1 является наиболее простой с технологической точки зрения, т.к. не требует использования дополнительных слоев с сильно отличающимся легированием одного типа. В структурах типа 2 с ООЗ в p -базе и n -коллекторе при внесении узкого p_+ слоя со стороны эмиттера получены максимальные напряжения удержания – 110 В, что делает эти структуры применимыми для генерации импульсов тока с высокой амплитудой (10 – 100 А) и длительностью в единицы наносекунд. Однако, при переходе к напряжениям ниже максимального в структурах данного типа снижается эффективность включения, в том числе из-за перераспределения домена электрического поля при включении (максимум домена электрического поля смещается с коллекторного перехода на границу p_0/n_+). Это существенно снижает возможность эффективно управлять выходной оптической мощностью, что является важной рабочей характеристикой прибора. Структуры 3-го типа с ООЗ в коллекторе в целом похожи на структуры типа 2 с ООЗ в p -базе и n -коллекторе, однако в них получено меньшее напряжение удержания и эффективность их работы ещё ниже.

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. Также в данном случае

наблюдается большая задержка включения лазер-тиристора, которая может достигать микросекунд.

Высокие скорости фотогенерации (при повышенной эффективности оптической обратной связи) могут обеспечивать довольно высокие скорости переключения, однако показывают довольно низкую эффективность включения при отсутствии ударной ионизации. В данном примере рассмотрена структура с формированием ООЗ в базе и коллекторе, при этом материал коллектора более широкозонный, чем база и не поглощает спонтанное излучение из активной области лазер-тиристора. Увеличение эффективности ООС в данной структуре в целом привело к более гладкой форме импульса тока и позволило уйти от наличия полки на динамике тока. 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.

С основными результатами работы, представленными в данной главе, дополнительно можно ознакомиться в [1А], [2А], [5А].

4. Экспериментальные исследования характеристик низковольтных лазер-тиристоров на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур с InGaAs квантовой ямой (длина волны лазерной генерации 900 нм) и сопоставление с результатами моделирования

На основе проведенного теоретического исследования наиболее оптимальной гетероструктурой низковольтного лазер-тиристора для генерации мощных (10-ки Вт) лазерных импульсов в диапазоне длительностей десятки наносекунд в широком диапазоне рабочих напряжений является структура с ООЗ, расположенной в базе, другими словами внешнее напряжение падает в основном в области низколегированной базы с $N_A \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Была выбрана структура с однородно-легированной базой, как наиболее простая с технологической точки зрения.

Были изготовлены экспериментальные образцы лазер-тиристоров на основе разработанной гетероструктуры **с ООЗ в базе**. Методом МОС-гидридной эпитаксии была выращена гетероструктура на $n\text{-GaAs}$ подложке, на которой послойно располагались: $N_+\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ эмиттер толщиной 0.3 мкм ($N_D = 1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), **$p_0\text{GaAs}$ база толщиной 4 мкм** и с $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ – для повышения максимального блокирующего напряжения (в сравнении с гетероструктурой лазер-тиристора с 2 мкм базой и $N_A = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ – см. п. 3.1), $n\text{-GaAs}$ узкозонная часть коллектора толщиной 0.24 мкм и $N_+\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ широкозонная часть коллектора толщиной 2 мкм, легирование коллектора составляло $N_D = 1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, затем располагалась лазерная часть прибора. Лазерная часть гетероструктуры лазер-тиристора состояла из широкозонного N-эмиттера, который так же являлся $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ коллектором транзисторной части, нелегированного волновода $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ толщиной 0.4 мкм с активной областью на основе InGaAs квантовой ямы толщиной 10 нм, расположенной по центру волноводного слоя, эмиттер Р-типа был выполнен на основе $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ слоя толщиной 2 мкм с $N_A = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, затем располагался контактный $p\text{-GaAs}$ слой толщиной 0.2 мкм. Состав активной области обеспечивал генерацию лазерного излучения на длине волны $\sim 900 \text{ нм}$, расположение активной области в GaAs спейсерах позволило повысить эффективность оптической обратной связи в лазер-тиристоре за счет увеличения интенсивности спонтанного излучения в коротковолновой части спектра. Были сформированы полосковые контакты (Au) к $p\text{-GaAs}$ контактному слою с шириной полоска 200 мкм (анодный силовой контакт), также с помощью частичного травления были сформированы управляющие контакты к

$N_{+}Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ коллекторному слою толщиной 200 мкм по обе стороны от анодного контакта.

Кристаллы лазер-тиристора были смонтированы на медные теплоотводы подложкой вниз. На рис. 60 показана фотография лазер-тиристора с электронного микроскопа.

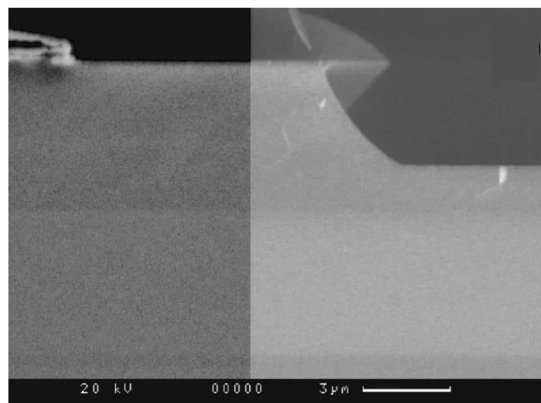


Рисунок 60 – Фото SEM (электронный микроскоп) гетероструктуры лазер-тиристора

Все экспериментальные исследования проводились при комнатной температуре. На первом этапе работ была проведена характеристика лазерной части прибора, для чего изготавливались специальные образцы, представляющие собой лазерную гетероструктуру, идентичную интегрированной в лазер-тиристор, выращенную на $n_{+}GaAs$ подложке, имеющую полосковые контакты и смонтированную непосредственно на медный теплоотвод. Для данной лазерной структуры была измерена зависимость дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора, на основе которой были рассчитаны внутренние оптические потери (α_0 – значение потерь при токах близких к пороговому) (рис. 61а), также был измерен спектр лазерной генерации (рис. 61б)

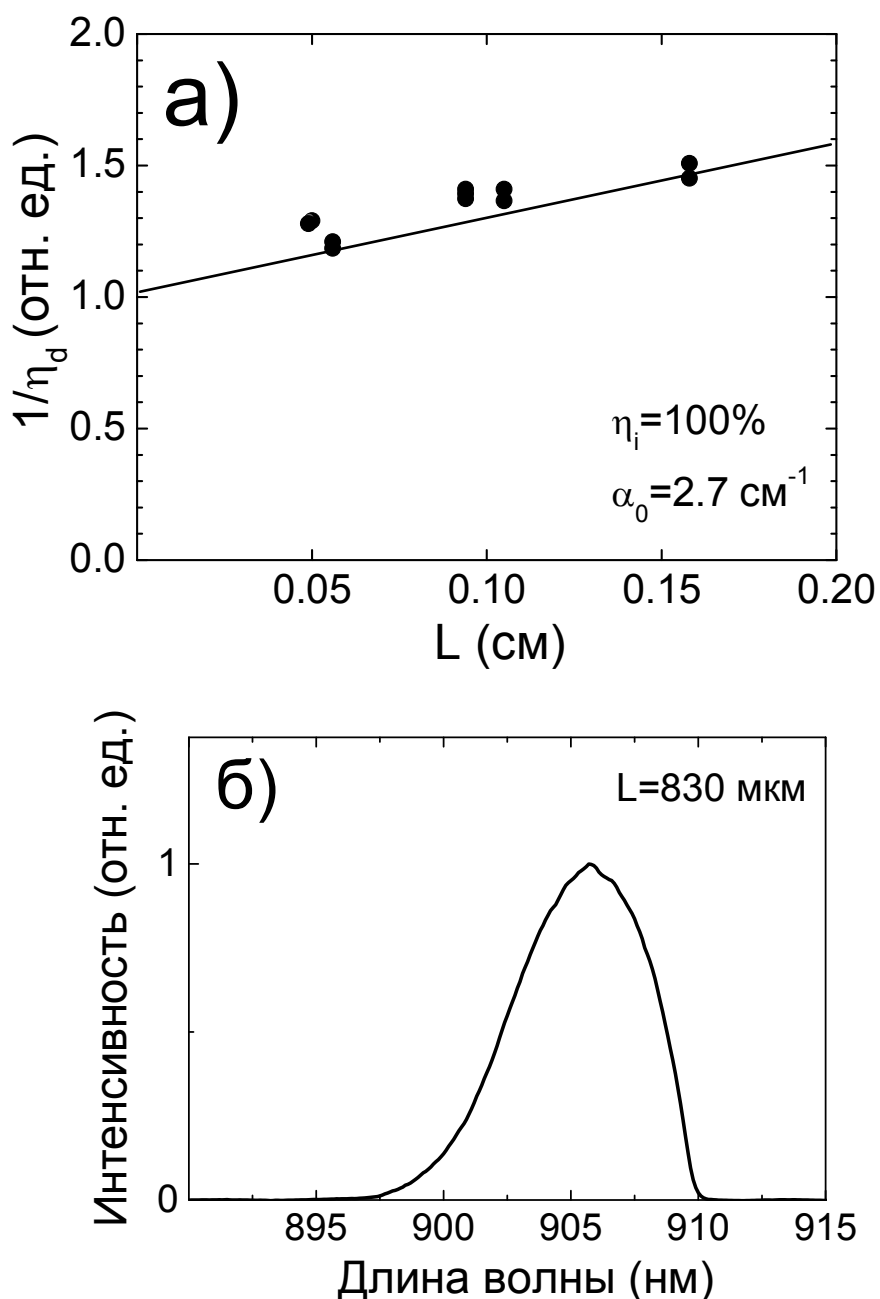


Рисунок 61 –а) Зависимость дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора (L) и б) спектр лазерной генерации для лазерной части лазер-тиристора

Была измерена ватт-амперная характеристика лазерного диода (идентичного лазерной части лазер-тиристора), накачка производилась с помощью внешнего мощного импульсного источника тока, длительность импульсов тока составляла 100 нс на полувысоте (рис. 62а). При амплитуде тока накачки 70 А пиковая оптическая мощность (P_{peak}) составила 43.5 Вт.

На следующем этапе проводилось экспериментальное исследование электрооптических характеристик лазер-тиристора. Максимальное блокирующее напряжение исследуемой структуры с $p_0\text{GaAs}$ база толщиной 4 мкм и с $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

³составило ~ 25 В, что выше рассмотренной ранее структуры с 2 мкм базой (рис.63), где максимальное напряжение блокировки составляло 18 В. Была измерена ватт-амперная характеристика лазер-тиристора (рис. 62б), при этом длительность генерируемых оптических импульсов составляла 100 нс на полувывоте, а внешняя емкость в цепи равнялась 470 нФ для получения максимальной оптической мощности. Амплитуда тока в данном случае рассчитывалась на основании значения внешней емкости и зависимости dU/dt . Также на рис. 62б показана зависимость пиковой оптической мощности (P_{peak}) от внешнего напряжения, прикладываемого к прибору, т.к. именно за счет изменения внешнего напряжения в лазер-тиристоре осуществляется управление амплитудой генерируемых импульсов тока и пиковой мощностью лазерных импульсов. Внешнее сопротивление в цепи отсутствовало. Из рис. 62б видно, что пиковая оптическая мощность лазерного диода, идентичного лазерной части лазер-тиристора, и лазер-тиристора практически совпадают при одинаковых уровнях тока накачки, однако в случае с лазер-тиристором нет необходимости в использовании внешнего импульсного источника тока высокой мощности, также данный факт говорит о том, что внесение дополнительных слоев транзисторной части в эпитаксиально-интегрированной структуре лазер-тиристора не оказывает влияние на ватт-амперную характеристику и эффективность генерации лазерных импульсов. В экспериментальных образцах лазер-тиристора продемонстрирована максимальная пиковая мощность оптических импульсов **в 55 Вт при длительности импульса порядка 100 нс на полувывоте (рис. 62б, рис. 69б)**. Подробно методика измерения импульсной мощности в лазер-тиристорах описана в [77, 82].

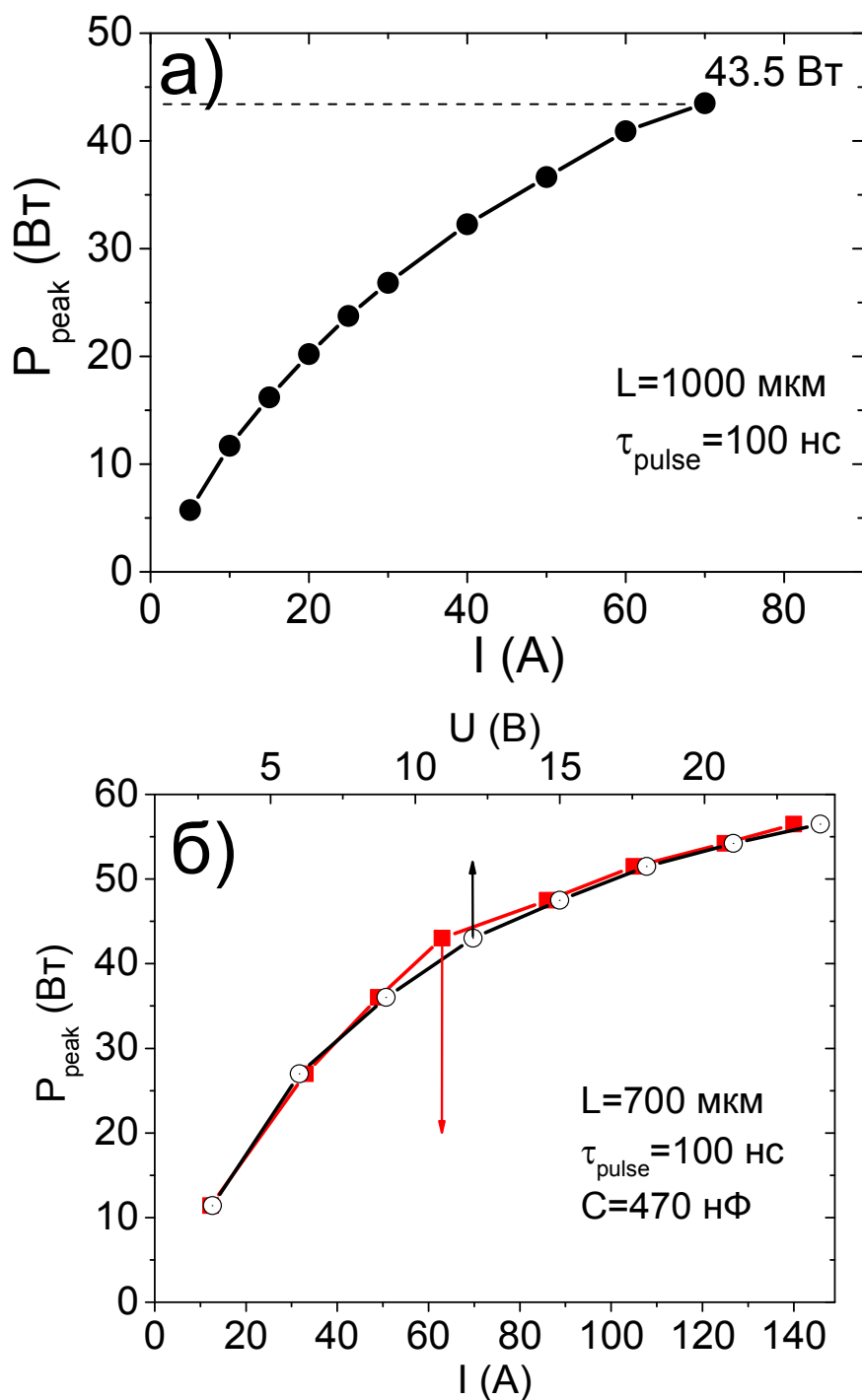


Рисунок 62 –а) Импульсная ватт-амперная характеристика лазерной части лазер-тиристора при накачке внешним источником тока; б) импульсная ватт-амперная характеристика лазер-тиристора при длительности импульса 100нс. Дополнительно указаны длительность импульсов (τ_{pulse}) на полувысоте и длина резонатора (L) и внешняя емкость в случае лазер-тиристора

При переходе к моделированию лазерной части, важно убедиться, что модель лазер-тиристора хорошо описывает электрические характеристики прибора. Такое сопоставление экспериментальных данных и результатов моделирования было проведено на примере не оптимизированной структуры лазер-тиристора с 2 мкм базовой областью с

$N_D=3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (см. п. 3.2.1). Рис. 63 демонстрирует хорошее соответствие результатов моделирования электрических характеристик и экспериментальных данных, однако в данном случае для измерения тока в цепи присутствовало сопротивление, что, очевидно, снизило амплитуду тока и выходную оптическую мощность (данное сопротивление учитывалось и в модели).

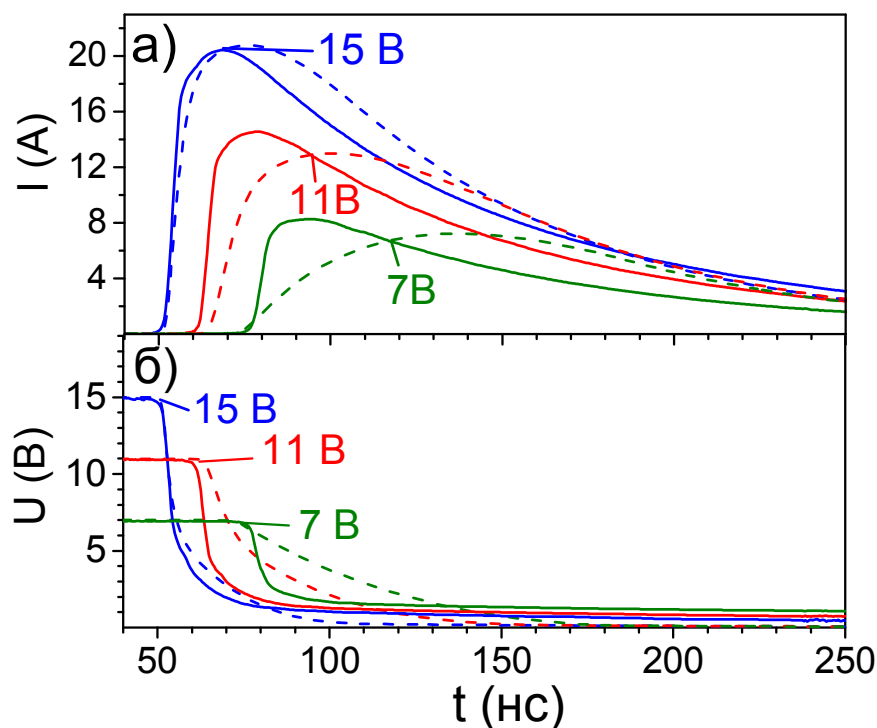


Рисунок 63 – Динамика а) тока и б) напряжения в структуре лазер-тиристора с ООЗ в базе, толщина базы составляла 2 мкм $N_A=3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Пунктир – результаты моделирования электрических характеристик, сплошная линия – экспериментальные данные

Для сопоставления полученных в результате моделирования тиристорной структуры импульсов тока с экспериментальными импульсами оптической мощности необходимо дополнить транспортную модель лазерной частью, что позволит получить из токовой динамики динамику оптической мощности. Так как дизайн лазерной структуры не изменялся во всех конструкциях лазер-тиристора, то, зная зависимость оптической мощности от тока накачки для лазерной гетероструктуры (ВтАХ) и, предполагая, что процесс лазерной генерации квазистационарный при исследуемых длительностях импульса (порядка 100 нс на полувывоте), мы можем получить из токовой динамики динамику оптической мощности для всех рассмотренных в данной работе структур (на длительностях импульса порядка 100 нс). Для пересчета зависимости $I(t)$ в $P(t)$ будет использоваться функция $k(I)$, которая является полиномиальной аппроксимацией ВтАХ

лазерной части выражается как $P(t) = k(I) \cdot I(t)$. Для подобной аппроксимации можно было бы использовать и экспериментальную ВтАХ (рис.62а), но в данном случае мы ограничены только значениями токов 70 А, что значительно ниже получаемых в модели токовых амплитуд. Экспериментальная ВтАХ лазерной части лазер-тиристора будет использоваться для верификации лазерной модели.

Для моделирования лазерной генерации в статическом приближении было использовано сосредоточенное скоростное уравнение для фотонов (17, гл. 1) совместно с дрейф диффузионным транспортом в одномерном приближении ((5)-(9) при $d/dt=0$, гл. 1) и волновым уравнением (18). В данном случае транспортная модель использовала простую модель подвижности, в которой нет зависимости от напряженности электрического поля. Все слои в структуре трактовались как объемные, а модель усиления задавалась в активной области, как указано в ((19), гл. 1), коэффициенты модели усиления были выбраны на основе экспериментальной зависимости пороговой плотности тока от обратной длины резонатора (рис. 64). В модели учитывалось поглощение на свободных носителях (21), коэффициенты, выбранные для моделирования, вписываются в диапазон, применяемых значений в современных исследованиях [83, 84]. Из данных, приведенных на рис. 64 были выбраны точки, лежащие на одной прямой и на их основе, была построена зависимость усиления от концентрации при значениях параметров, указанных в табл. 2. Зависимость усиления от концентрации показана на рис. 65 вместе с модельной аппроксимацией. Коэффициенты, используемые в модели усиления также указаны в табл. 2.

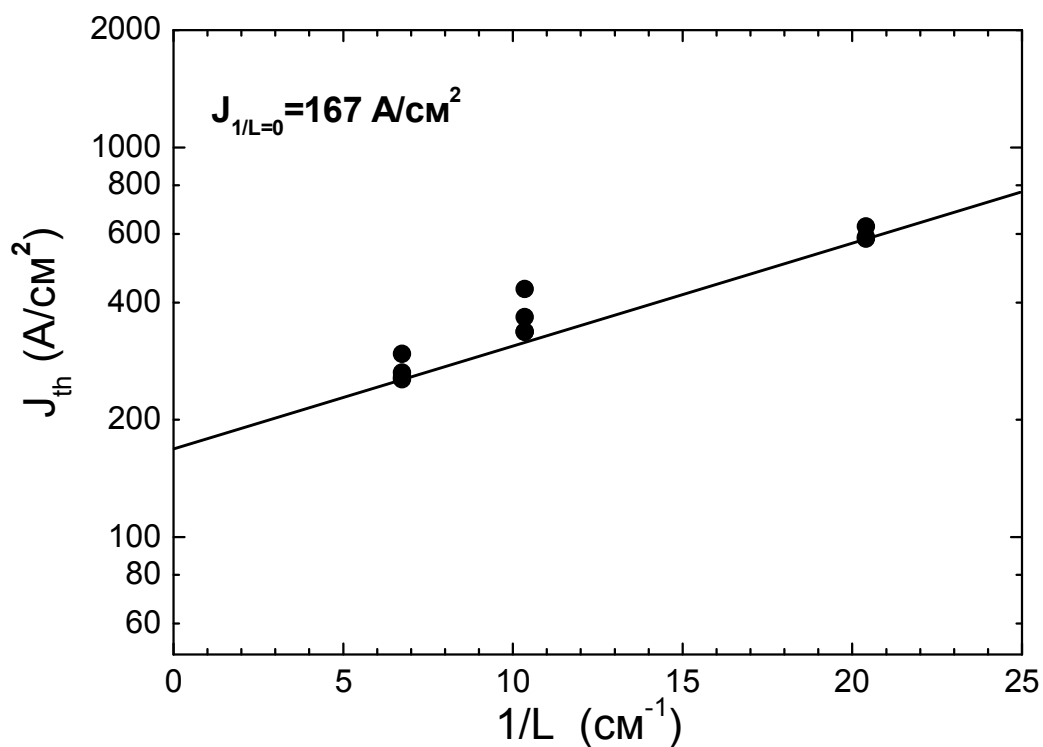


Рисунок 64 – Зависимость пороговой плотности тока от обратной длины резонатора лазерной части лазер-тиристор

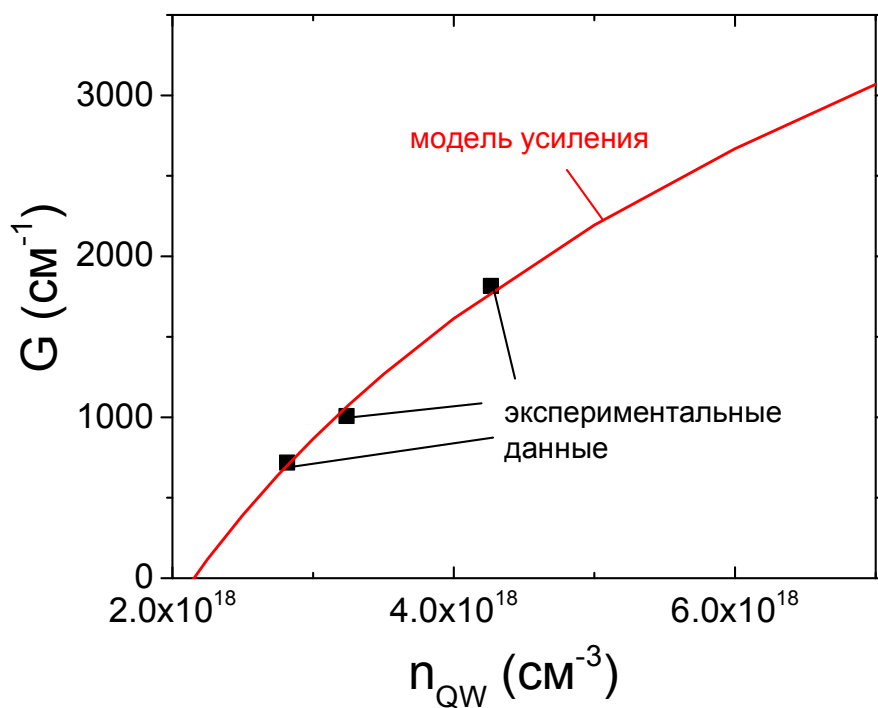


Рисунок 65 – Зависимость усиления от концентрации носителей заряда в активной области лазер-тиристора, экспериментальные точки и модель (сплошная линия)

Таблица 2 – Параметры, используемые при моделировании лазерной генерации

Параметр	Описание	Значение
B	Коэффициент спонтанной рекомбинации	$2 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$
γ	Фактор оптического ограничения квантовой ямы	1.56%
g_0	Коэффициент модели усиления (19)	2600 см^{-1}
N_{tr}	Коэффициент модели усиления (19)	$2.15 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
τ_{SRH}	Время жизни носителей в модели рекомбинации Шокли-Рида-Хола	20 нс
$N_A, \text{ emitter}$	Концентрация легирующей примеси в эмиттере p-типа (35% AlGaAs)	$4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$
$N_D, \text{ emitter}$	Концентрация легирующей примеси в эмиттере n-типа (35% AlGaAs)	10^{18} см^{-3}
$N_A, \text{ waveguide}$	Концентрация легирующей примеси в эмиттере волноводе (30% AlGaAs)	10^{15} см^{-3}
$N_D, N_A, \text{ contact}$	Концентрация легирующей примеси в эмиттере контактных слоях (GaAs)	$3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
$\mu_n/\mu_p, \text{ n-emitter}$	Подвижность электронов/дырок в n-эмиттере	$700/60 \text{ см}^2\text{Вс}^{-1}$
$\mu_n/\mu_p, \text{ p-emitter}$	Подвижность электронов/дырок в p-эмиттере	$1400/90 \text{ см}^2\text{Вс}^{-1}$
$\mu_n/\mu_p, \text{ waveguide}$	Подвижность электронов/дырок в волноводе	$2000/160 \text{ см}^2\text{Вс}^{-1}$
$\mu_n/\mu_p, \text{ contact}$	Подвижность электронов/дырок в контактных слоях	$4000/200 \text{ см}^2\text{Вс}^{-1}$
R_1	Коэффициент отражения зеркала 1 волновода	5%
R_2	Коэффициент отражения зеркала 2 волновода	99%
σ_n	Сечение поглощения электронов в модели для потерь на свободных носителях	$4 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$
σ_p	Сечение поглощения дырок в модели для потерь на свободных носителях	$12 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$

Данная модель усиления была введена в лазерную модель, в которой были рассчитаны пороги лазерной генерации, которые сравнивались с экспериментальными (рис. 66). Транспортные параметры модели указаны в табл. 2.

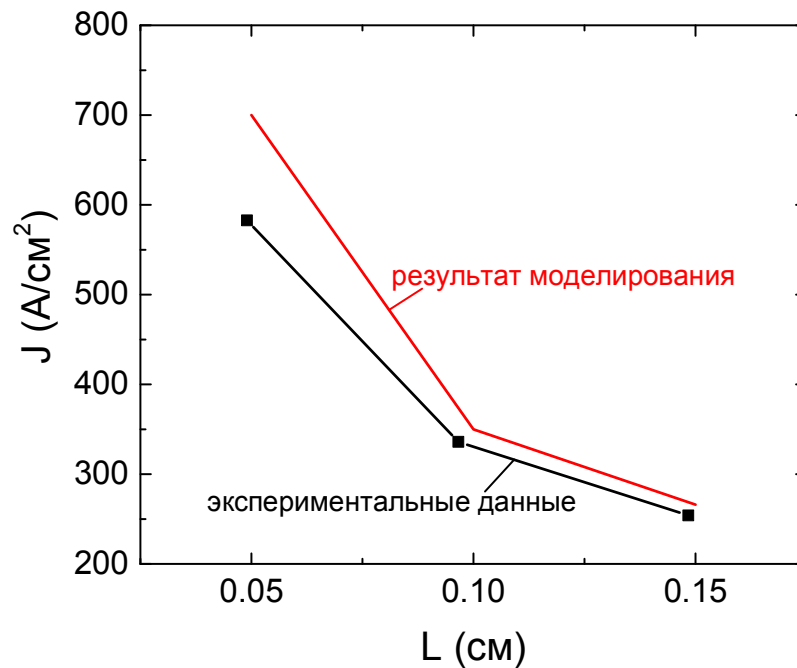


Рисунок 66 – Зависимость пороговой плотности тока от длины резонатора для лазерной части лазер-тиристора, экспериментальные точки и модель ($R_1=R_2=30\%$)

Видно, что при меньших длинах резонатора модель несколько расходится с экспериментальными значениями, однако в целом данная зависимость довольно хорошо описывает экспериментальную. Небольшими расхождениями можно пренебречь (которые могут объясняться неточностями модели), т.к. нас интересуют в основном характеристики лазерной генерации при больших плотностях тока накачки. Для сравнения на рис. 66 показаны результаты, полученные в более простой модели скоростных уравнений, где динамика концентрации носителей в активной области тоже выражается через скоростное уравнение. Т.е. наблюдаемые отличия могут быть связаны с неточностями в описании транспорта в лазерной структуре. При длине резонатора 1 мм на пороге лазерной генерации в модели получено значение внутренних оптических потерь $\alpha_i=2.95 \text{ см}^{-1}$, что несколько выше экспериментального значения (2.6 см^{-1}).

При помощи построенной лазерной модели была рассчитана ВТАХ, которая приведена на рис. 67 в сравнении с экспериментальной.

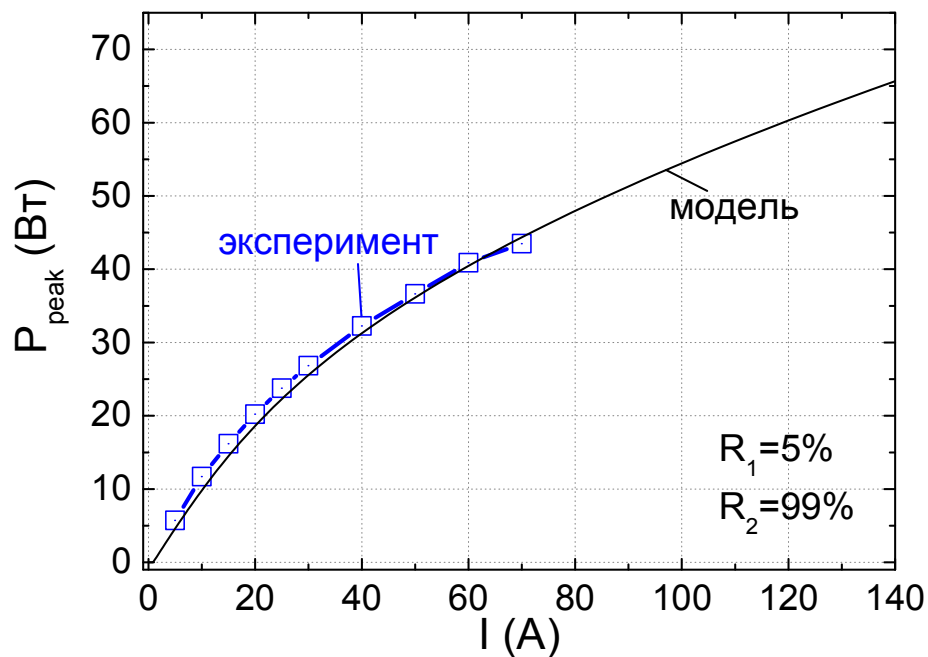


Рисунок 67 – Сравнение модельной и экспериментальной ВtАХ

Как видно из рис. 67 в результате моделирования получено хорошее соответствие экспериментальным данным при выбранных значениях параметров. Для данной модельной ВtАХ была получена аппроксимация полиномом 4 степени (рис. 68), которая использовалась как коэффициент $k(I)$ для перевода получаемых при моделировании тиристорной динамики импульсов тока в импульсы оптической мощности. Рис. 68 демонстрирует что на диапазоне токов 1-220 А (что вполне охватывает требуемый диапазон) данная аппроксимация хорошо описывает ВtАХ. Однако, при малых значениях тока мы можем наблюдать некоторые несоответствия, поэтому для значений тока менее 0.5-0.7 А оптическая мощность была приравнена к нулю.

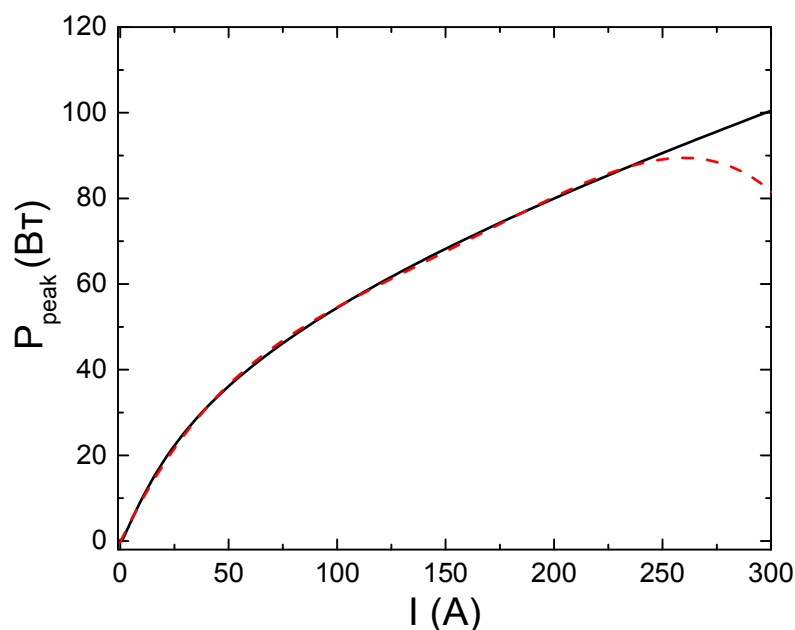


Рисунок 68 – Модельная ВtAX (сплошная линия) и ее аппроксимация полиномом (пунктир)

Далее было проведено моделирование токовой динамики включения тиристорной структуры, конструкция которой повторяет экспериментальную с 4 мкм базой и легированием 10^{16} см^{-3} (рис. 69а). При этом в отличие от приведенных ранее расчетов в цепь включалось дополнительное сопротивление 0.1 Ом (которое отражает сопротивление лазерной структуры и контактов), а также индуктивность цепи была увеличена до 3 нГн. Данные параметры подбирались на основании соответствия формы импульса и амплитуды экспериментальным значениям и лежат в разумных пределах для данного типа электрической схемы. По данной токовой динамике с помощью аппроксимации модельной ВtAX (рис. 68) была получена динамика оптической мощности (рис. 69б)

Были проведены измерения динамики оптической мощности и напряжения на лазер-тиристоре при его включении, как и в случае исследования ватт-амперных характеристик значение внешней емкости $C=470 \text{ нФ}$, внешнее сопротивление отсутствовало (рис. 69б). В экспериментальных измерениях не использовалась дополнительное сопротивление в цепи для получения максимальной оптической мощности. Включение производилось при начальных напряжениях 3 – 24 В, длительность импульса на полувывоте составляла $\sim 100 \text{ нс}$. Видно, что при напряжениях более 6 В наблюдается быстрый фронт включения, а при снижении напряжения до 3 В скорость нарастания оптической мощности снижается, также значительно уменьшилась максимальная пиковая мощность, что связано с снижением напряжённости поля в

структуре и, следовательно, снижением темпа ударной ионизации. Максимальная пиковая мощность составила ~ 55 Вт при напряжении 24 В и длине импульса на полувывсоте ~ 100 нс.

По результатам сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными, (рис. 69б) можно сказать, что представленная в работе модель хорошо описывает динамику генерации оптических импульсов в структуре лазер-тиристора, как качественно, так и количественно (в случае более высоких напряжений). Динамику напряжения сравнивать не совсем корректно, т.к. в эксперименте мы имеем дело с полной цепью и наблюдаем «забросы» в обратную полярность, а в модели представлена упрощенная версия электрической цепи, ограниченная конденсатором, индуктивностью и сопротивлением. Наблюдаемые различия в амплитуде оптической мощности могут объясняться ограничениями рассматриваемой одномерной модели, тогда как в реальности пространственные эффекты могут значительно повлиять на работу структуры. Так, при меньших напряжениях мы получаем заметно меньшую скорость включения в модели, тогда как в эксперименте скорость остается достаточно высокой вплоть до напряжений в 3 В, что может быть объяснено недооценкой ударной ионизации в простой одномерной модели, т.к. в структурах с ударной ионизацией может происходить локализация тока, влияющая на динамику тока и напряжения [87]. При напряжениях близким к максимальному блокирующему, вследствие локализации (которая в данном случае сильнее выражена) лазерная структура может работать не столь эффективно, что приводит к слабому росту оптической мощности при увеличении напряжения.

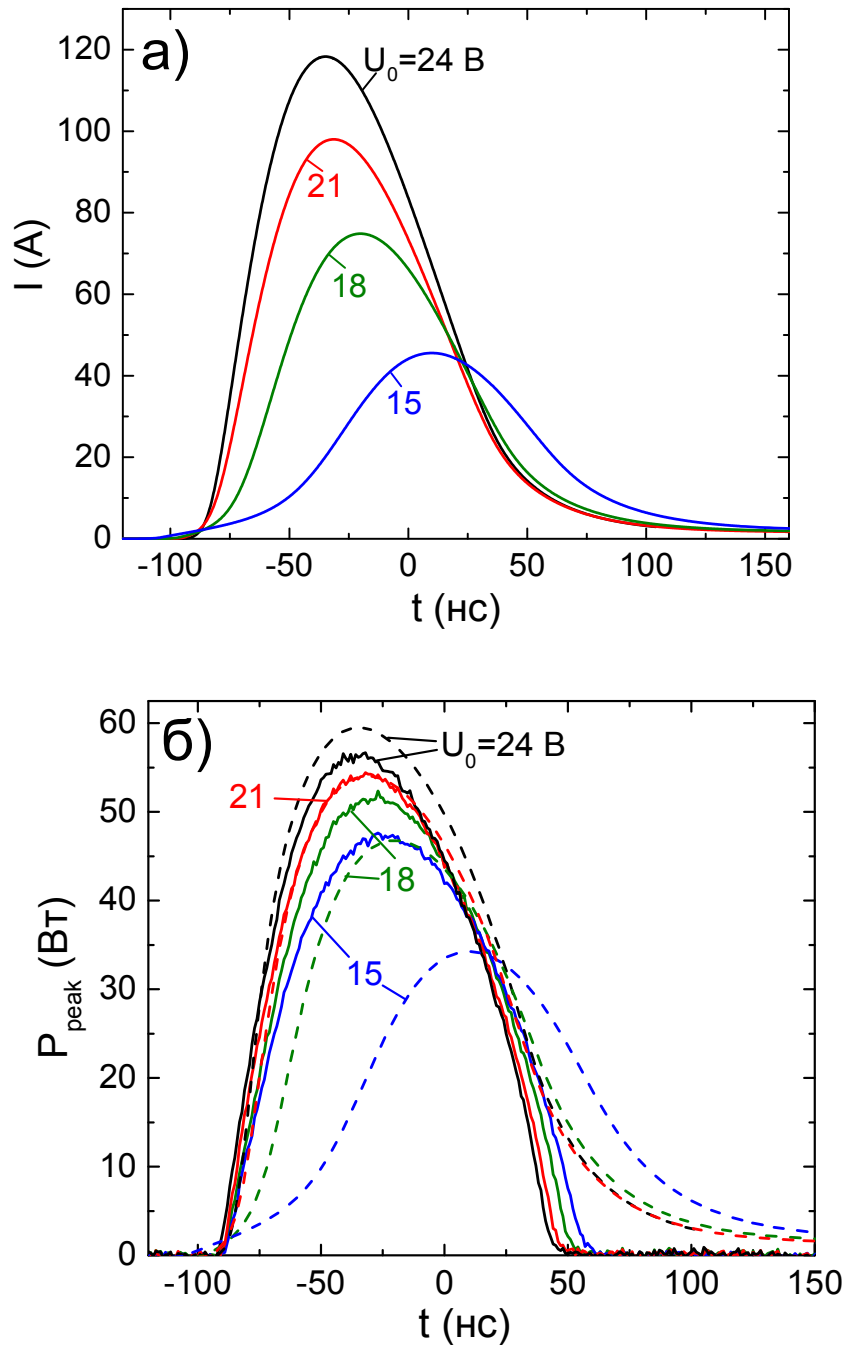


Рисунок 69 – а) Полученные в модели импульсы тока и б) импульсы оптической мощности в структуре лазер-тиристора при длительности импульса ~ 100 нс на полувывоте (экспериментальные данные показаны сплошной линией, а результаты моделирования – пунктиром). Зависимости получены для блокирующих напряжений (В): 15, 18, 21, 24. Внешняя емкость имела значение 470 нФ

На рисунке 70а показана зависимость пиковой оптической мощности от напряжения в эксперименте и в модели, а на рис. 70б приведено изменение пиковой оптической мощности при увеличении напряжения на 3 В (по оси х указано большее напряжение, т.е. для 6 В приведено изменение оптической мощности при изменении напряжения с 3 до 6 В, для 9 при значениях напряжения с 6 до 9 В). Видно, что и в

одномерной модели прослеживается нелинейный характер роста оптической мощности с напряжением (чем выше напряжение, тем меньше увеличивается выходная оптическая мощность с ростом напряжения), что обусловлено многими факторами, но в экспериментальной структуре такая зависимость значительно сильнее (рис. 70б), что скорее всего связано с пространственными эффектами транспорта.

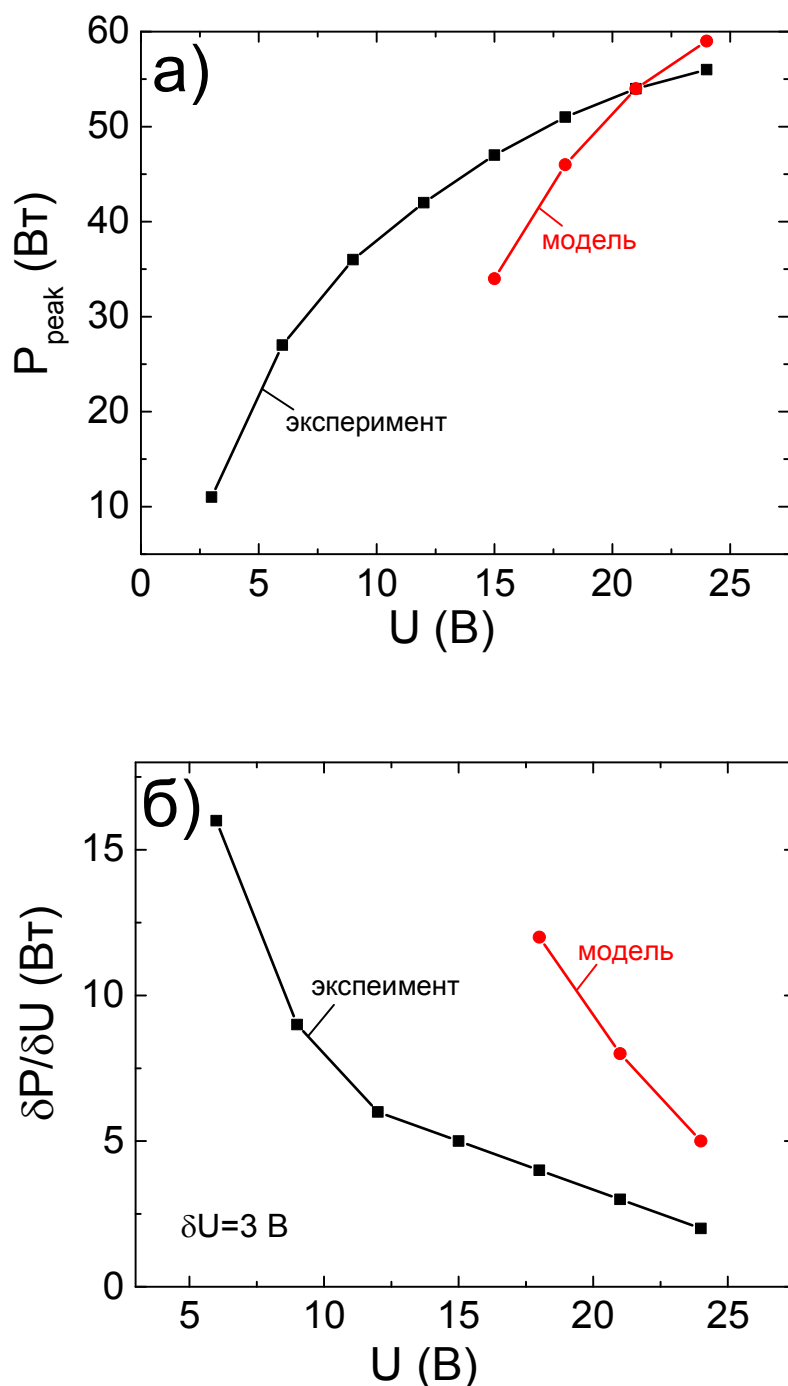


Рисунок 70 – а) Зависимость пиковкой оптической мощности от напряжения, сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования и б) изменение пиковой оптической мощности при увеличении напряжения с шагом в 3 В. Начальное напряжение в цепи изменялось в пределах 3-24 В, внешняя емкость имела значение 470 нФ

Представляет интерес как будет вести себя исследуемая структура при более коротких импульсах, что реализовано посредством снижения емкости конденсатора в цепи. На рис. 71 представлены динамика оптической мощности и напряжения на структуре при генерации лазерных импульсов ~ 10 нс на полувывоте, для чего значение внешней емкости в цепи было уменьшено до 5.1 нФ. Из рис. 71 также видно, что пиковая оптическая мощность значительно снижается при уменьшении внешнего напряжения до 3 В, в структуре лазер-тиристора при начальном напряжении 18 В **продемонстрирована максимальная пиковая мощность 8 Вт при длительности на полувывоте ~ 10 нс.**

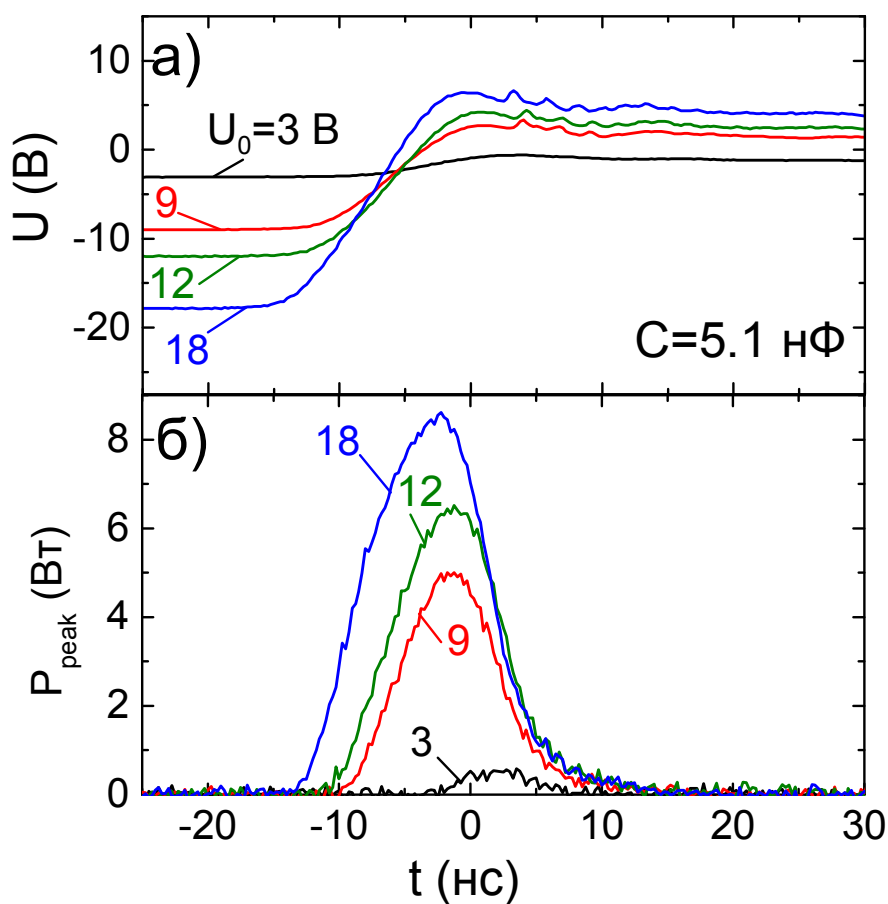


Рисунок 71 – Динамика (а) напряжения и (б) оптической мощности в структуре лазер-тиристора при длительности импульса ~ 10 нс на полувывоте. Начальное напряжение в цепи изменялось в пределах 15-24 В, внешняя емкость составляла 5.1 нФ

Выводы

В результате экспериментальных исследований импульсных характеристик лазер-тиристора было показано, что ВТАХ в лазере-тиристоре соответствует ВТАХ лазерной части структуры при внешней накачке. Это говорит о том, что при интеграции лазерной

гетероструктуры и тиристорного ключа не снижается эффективность работы лазерной структуры в исследованном диапазоне токов 0-70 А.

Показана возможность генерации оптических импульсов с максимальной пиковой мощностью 56 Вт при длительности импульсов 100 нс на полувывоте и 8 Вт при длительности 10 нс.

Показано, что модель лазер-тиристора хорошо описывает получаемые в эксперименте импульсы оптической мощности как качественно, так и количественно (при относительно высоких значениях напряжения – более 18 В).

Стоит отметить, что наблюдаемые в эксперименте максимальные напряжения блокировки лазер-тиристоров значительно ниже модельных. Такие различия связаны с тем, что в одномерной модели не учитываются поверхностные явления и утечка тока по поверхности, что может приводить к пробоем при меньших напряжениях, кроме того, объемный ток утечки в модельных структурах может быть значительно ниже, чем в экспериментальных структурах из-за присутствия в них дефектов и неоднородностей решетки, более подробно данный вопрос обсуждался в п. 3.1 (рис. 12).

Основные экспериментальные результаты по исследованию электрических и оптических характеристик лазер-тиристоров, а также описание методик исследования представлены в [6А], [7А].

Заключение

В результате проведенного исследования была разработана одномерная динамическая модель лазер-тиристора, представляющая прибор как оптопару лазерный диод-фототранзистор. Данная модель учитывает эффекты транспорта носителей в гетероструктуре при сверхвысоких уровнях тока накачки в рамках дрейф-диффузионного приближения, и, включает такие физические особенности прибора, как наличие оптической обратной связи и ударной ионизации. С помощью данной модели возможно получение динамики тока и напряжения при включении лазер-тиристора, а также распределений электрического поля и концентраций носителей вдоль оси, перпендикулярной слоям гетероструктуры. Таким образом, разработанная модель позволяет исследовать основные физические принципы работы прибора, без понимания которых невозможна разработка и создание наиболее оптимальных и энергоэффективных конструкций лазер-тиристора.

Проведено экспериментальное исследование эффективности оптической обратной связи в лазер-тиристоре, и ее зависимости от плотности тока накачки. Показано, что эффективность оптической обратной связи, которая непосредственно влияет в том числе на задержку включения прибора, определяется интегралом перекрытия спектра спонтанного излучения лазерного диода и спектра поглощения узкозонной GaAs части фототранзистора. Полученные в экспериментальных исследованиях данные использовались при построении модели лазер-тиристора.

В работе были рассмотрены различные типы конструкций лазер-тиристора, различающихся профилями легирования и, соответственно, положением области объемного заряда. Проведено статическое моделирование базовой конструкции лазер-тиристора с формированием области объемного заряда в базе. Показано, что для обеспечения более высокого блокирующего напряжения необходимо снижать легирование слоя, в котором происходит формирование объемного заряда, и/или увеличивать толщину данного слоя/слоев в разумных пределах. Получены оптимальные толщины низколегированного слоя в зависимости от его легирования. Для снижения толщины структуры возможно внесение тонкого высоколегированного p^+ слоя в область базы со стороны эмиттера во избежание эффекта смыкания переходов. Показано, что одной из причин несоответствия экспериментальных данных и результатов моделирования максимальных напряжений блокировки в структурах (помимо влияния поверхности, что не учитывалось в одномерной модели) является тот факт, что в представленной модели очень низкие уровни темнового тока, а прибор при максимальных

напряжениях питания очень чувствителен даже к минимальным уровням фотоактивации, что в пересчете на плотность тока может составлять $10^{-5} - 10^{-7}$ А/см². Таким образом, в экспериментальных структурах могут наблюдаться более высокие темновые токи за счет наличия дефектов кристаллической структуры.

Были исследованы три типа конструкции гетероструктуры лазер-тиристор по принципу формирования области объемного заряда в динамическом приближении. Наиболее оптимальной для генерации оптических импульсов мощностью в десятки Вт длительностью порядка 100 нс и единицы ватт длительностью 1-10 нс в широком диапазоне рабочих напряжений является гетероструктура лазер-тиристора с областью объемного заряда, расположенной в базе. Данная структура включала низколегированную ($N_a=10^{16}$ см⁻³) GaAs p-базу толщиной 2 - 2.5 мкм и запирающий p_+ ($N_a=10^{18}$ см⁻³) GaAs слой со стороны эмиттера толщиной порядка 50 нм. В данной конструкции показана возможность высокой скорости переходных процессов – включение за 10 нс до амплитуды тока 40-80 А. Структуры с областью объемного заряда в базе и однородно-легированной базой также показали высокую эффективность включения в широком диапазоне рабочих напряжений, и они более просты с технологической точки зрения. Под высокой эффективностью включения понимается переход во включенное состояние за единицы или десятки наносекунд при низком остаточном напряжении (единицы вольт), последнее определяется скоростью генерации неравновесных носителей заряда в базе лазер-тиристора, как за счет фотогенерации, так и ударной ионизации.

Для генерации лазерных импульсов длительностью 1-30 нс и мощностью в единицы и десятки ватт наиболее оптимальной является гетероструктура типа $N_+/p_+/p_0/n_0/N_+$ с областью объемного заряда, сформированной в базе и коллекторе, с суммарной толщиной низколегированной области порядка 4 мкм и ее легированием $10^{15} - 5 \cdot 10^{15}$ см⁻³. В структуре такого типа возможна генерация импульсов тока длительностью 2 нс и амплитудой более 50 А. Стоит отметить, что 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 областью объемного заряда в коллекторе похожи по своим характеристикам на структуры с областью объемного заряда в базе и коллекторе и имеют те же особенности, но в целом напряжения удержания и максимальные амплитуды тока в данных структурах ниже. Можно сделать вывод, что общим во всех конструкциях гетероструктур лазер-тиристора является тот факт, что именно распределение

напряженности электрического поля и его перераспределение во время включения прибора, определяют форму фронта импульса тока.

В динамической модели была проведена оценка влияния эффективности оптической обратной связи и скорости ударной ионизации на динамику тока и напряжения. Показано, что ударная ионизация определяет высокие скорости переключения в лазер-тиристоре (1-10А/нс в зависимости от напряжения питания), а наличие оптической обратной связи обеспечивает низкие остаточные напряжения во включенном состоянии. В то же время возможно создание конструкций лазер-тиристора, в которых высокие скорости перехода во включенное состояние будет определять оптическая обратная связь. Это возможно либо за счет значительного увеличения эффективности оптической обратной связи (на порядок), либо за счет конструкции лазер-тиристора с формированием области объемного заряда в базе и с составной p^+/p_0 базой с узкой p_0 частью (1.5-2 мкм). Увеличение эффективности оптической обратной связи приводит к снижению задержки включения лазер-тиристора. Увеличение эффективности оптической обратной связи (на порядок за счет увеличения числа квантовых ям в лазерной части или, например, изменения длины волны генерации) в структуре с областью объемного заряда в базе и коллекторе привело к более гладкой форме импульса тока и позволило уйти от наличия полки на динамике тока, в то же время остаточное напряжение в данной структуре все еще достаточно высокое, что не позволяет говорить об эффективном включении. В структурах лазер-тиристора с областью объемного заряда в GaAs базе повышение эффективности оптической обратной связи приводит к более эффективному включению, а амплитуда тока увеличивается на 17% от 60А до 70А.

В ходе экспериментальных исследований электрооптических характеристик показано, что ватт-амперная характеристика лазер-тиристора и лазерной части прибора при внешней импульсной накачке соответствуют друг другу, что говорит о том, что в конструкции лазер-тиристора эффективность лазерной генерации такая же, как и в структуре лазерного диода.

В результате моделирования лазерной части прибора получена динамика оптической мощности для лазер-тиристора по генерируемым лазер-тиристором токовым импульсам. В результате сравнения динамики оптической мощности, полученной в модели с экспериментальными данными показано, что модель хорошо описывает получаемые в эксперименте импульсы оптической мощности как качественно, так и количественно (при относительно высоких значениях напряжения – более 18 В).

Показано повышение максимального напряжения блокировки с 18 В до 25 В в оптимизированной структуре лазер-тиристора с лазерной частью на основе двойной

гетероструктуры GaAs/AlGaAs с раздельным ограничением носителей заряда и InGaAs активной областью, расположенной со стороны анодного контакта. Область объемного заряда в оптимизированной конструкции располагалась в однородно-легированной p_0 -GaAs базе, толщиной 4 мкм. Повышение максимального напряжения в структуре лазер-тиристора способствует увеличению амплитуды тока и оптической мощности, в то же время выполняется условие сохранения высокой энергоэффективности прибора и высокой скорости переходных процессов.

В такой структуре показана возможность генерации лазерных импульсов мощностью 55 Вт (~ 100 А) при длительности импульса порядка 100 нс на полувысоте и 8 Вт (~ 15 А) при длительности импульса 10 нс.

Условные обозначения и сокращения

ООЗ – область объемного заряда

РО ДГС – двойная гетероструктура с отдельным ограничением

ООС – оптическая обратная связь

ВАХ – вольтамперная характеристика

ВтАХ – ватт-амперная характеристика

МОС-гидридная эпитаксия – эпитаксия путем осаждения их металлоорганических соединений

КЯ – квантовая яма

КПД – коэффициент полезного действия

P_0/N_0 – обозначение широкозонного AlGaAs слоя гетероструктуры с низкой степенью легирования (до 10^{17} см^{-3})

p_0/n_0 – обозначение узкозонного GaAs слоя гетероструктуры с низкой степенью легирования (до 10^{17} см^{-3})

P_+/N_+ – обозначение широкозонного AlGaAs слоя гетероструктуры с высокой степенью легирования (выше 10^{17} см^{-3})

p_+/n_+ – обозначение узкозонного GaAs слоя гетероструктуры с высокой степенью легирования (выше 10^{17} см^{-3})

Список использованной литературы

1. Yuferev V. S. et al. Specific features of the injection processes dynamics in high-power laser thyristor //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2015. – Т. 62. – №. 12. – С. 4091-4096.
2. Slipchenko S. et al. 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.
3. Slipchenko S. O. et al. Generation of laser pulses in the megahertz range of repetition frequencies by low-voltage AlGaAs/GaAs laser-thyristors //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2016. – Т. 63. – №. 8. – С. 3154-3159.
4. Soboleva O. S. et al. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Veselov D. A. et al. Saturation of light-current characteristics of high-power lasers ($\lambda=1.0\text{--}1.1\text{ }\mu\text{m}$) in pulsed regime //Quantum electronics. – 2014. – Т. 44. – №. 11. – С. 993.
8. 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.
9. Hallman L. W. et al. 3 nJ, 100 ps laser pulses generated with an asymmetric waveguide laser diode for a single-photon avalanche diode time-of-flight (SPAD TOF) rangefinder application //Measurement Science and Technology. – 2012. – Т. 23. – №. 2. – С. 025202.
10. Lanz B. et al. Performance improvement by a saturable absorber in gain-switched asymmetric-waveguide laser diodes //Optics Express. – 2013. – Т. 21. – №. 24. – С. 29780-29791.
11. Lanz B., Vainshtein S., Kostamovaara J. High power gain-switched laser diode using a superfast GaAs avalanche transistor for pumping //Applied physics letters. – 2006. – Т. 89. – №. 8. – С. 081122.
12. Vinokurov D. A. et al. A study of epitaxially stacked tunnel-junction semiconductor lasers grown by MOCVD //Semiconductors. – 2010. – Т. 44. – №. 2. – С. 238-242.
13. Корольков В. И., Рожков А. В. Исследование стабильности переключения высоковольтных субнаносекундных фотонно-инжекционных коммутаторов //Письма в Журнал технической физики. – 1992. – Т. 18. – №. 10. – С. 26-31.

14. Alferov Z. I. et al. Electrically controlled trielectrode high-voltage switches of the subnanosecond range based on the GaAs-AlGaAs multilayered heterostructure //Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki. – 1986. – Т. 12. – №. 21. – С. 1281-1285.
15. Gaibullaev S., Gappoev A. V., Danolchenko V. G., Korolkov V. I., Nikitin V. B. and Rozhkov A. V., Investigation of high-frequency thyristors on the basis of high-purity GaAs //Radiotekhnika i Elektronika. – 1983 – Т. 28. – №. 10. – С. 2052-2056.
16. Taylor G. W. et al. A new double heterostructure optoelectronic switching device using molecular beam epitaxy //Journal of applied physics. – 1986. – Т. 59. – №. 2. – С. 596-600.
17. Taylor G. W., Claisse P. R., Cooke P. Three terminal operation of the double heterostructure optoelectronic switching laser //Applied physics letters. – 1991. – Т. 58. – №. 25. – С. 2957-2959.
18. Жебулѐв И. А., Корольков В. И., Никитин В. Г., Орлов Н. Ю., Табаров Т. С., Убайдуллаев М.А. Высоковольтный вертикальный полевой фототранзистор на основе GaAs //Письма в журнал технической физики. – 1993. – Т. 19. – №15. – С. 39.
19. Корольков В. И. и др. Токовая и временная зависимости остаточного напряжения во включенном состоянии фотонно-инжекционных импульсных коммутаторов //Физика и техника полупроводников. – 1995. – Т. 29. – №. 3. – С. 400-404.
20. Bardeen J., Brattain W. H. The transistor, a semi-conductor triode //Physical Review. – 1948. – Т. 74. – №. 2. – С. 230.
21. Riordan M. How Europe missed the transistor //IEEE Spectrum. – 2005. – Т. 42. – №. 11. – С. 52-57.
22. Новиков М. А. Олег Владимирович Лосев—пионер полупроводниковой электроники //Физика твердого тела. – 2004. – Т. 46. – №. 1. – С. 5.
23. Circuit Element Utilizing Semiconductive Material //United States Patent 2.569.347. 1951 / Shockley W.
24. Welker H. Über neue halbleitende Verbindungen //Zeitschrift für Naturforschung A. – 1952. – Т. 7. – №. 11. – С. 744-749.
25. Горюнова Н.А. – Автореф. дис. – 1951. – ЛГУ, ФТИ.
26. Нина Александровна Горюнова (1916-1971) (к 90-летию со дня рождения) //Физика и техника полупроводников. 2006. – Т. 40. – № 11. – С. 1406.
27. А.И. Блюм, Н.П. Мокровский, А.Р. Регель. //Тр. VII конф. по свойствам полупроводников (Киев). – 1950.
28. Полупроводниковый лазер с электрической накачкой //патент СССР №181737. заявка №950840 с приоритетом от 30 марта 1963. / Ж.И. Алферов, Р.Ф. Казаринов
29. Kroemer H. A proposed class of hetero-junction injection lasers //Proceedings of the IEEE. – 1963. – Т. 51. – №. 12. – С. 1782-1783.
30. Anderson R. L. Germanium-gallium arsenide heterojunctions [letter to the editor] //IBM Journal of Research and Development. – 1960. – Т. 4. – №. 3. – С. 283-287.

31. R. L. Anderson. Experiments on Ge-GaAs heterojunctions. //Solid-State Electronics. – 1962. – Т. 5. – №. 5. – С. 341-351.
32. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Корольков В.И., Третьяков Д. Н., Тучкевич В.М. //Физика и техника полупроводников. – 1967 – Т. 1. С. 1579.
33. Rupprecht H., Woodall J. M., Pettit G. D. Efficient visible electroluminescence at 300° K from Ga_{1-x}Al_xAs p-n junctions grown by liquid phase epitaxy //Applied Physics Letters. – 1967. – Т. 11. – №. 3. – С. 81-83.
34. Алферов Ж. И., Андреев В. М., Корольков В. И., Никитин В. Г., Портной Е. Л. и Яковенко А. А. Рекомбинационное излучение в четырехслойных структурах на основе гетеропереходов GaAs-AlAs // Физика и техника полупроводников. – 1972. – Т. 6. – № 4. – С. 739-741.
35. Андреев В. М. и др. Исследование транзисторов с оптической связью //Физика и техника полупроводников. – 1983. – Т. 17. – №. 9. – С. 1618-1622.
36. Григорьев Б. И., Корольков В. И., Рожков А. В. Расчет основных характеристик фотонно-инжекционного импульсного тиристора на основе гетероструктуры //Физика и техника полупроводников. – 1988. – Т. 22. – №. 3. – С. 413-418.
37. Данильченко В. Г. и др. Тиристоры на основе гетероструктур GaAs– AlGaAs с полностью оптической связью //Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45. – №. 4. – С. 524-527.
38. Heremans P. L. et al. Fast turn-off of two-terminal double-heterojunction optical thyristors //Applied physics letters. – 1992. – Т. 61. – №. 11. – С. 1326-1328.
39. Mori Y. et al. Operation principle of the InGaAsP/InP laser transistor //Applied physics letters. – 1985. – Т. 47. – №. 7. – С. 649-651.
40. Tashiro Y. et al. Vertical to surface transmission electrophotonic device with selectable output light channels //Applied physics letters. – 1989. – Т. 54. – №. 4. – С. 329-331.
41. Suzuki Y. et al. Heterojunction field effect transistor laser //Electronics Letters. – 1990. – Т. 26. – №. 19. – С. 1632-1633.
42. Zhao J. H. et al. Reverse biased performance of a molecular beam epitaxial grown AlGaAs/GaAs high power optothyristor for pulsed power switching applications //Journal of applied physics. – 1993. – Т. 74. – №. 8. – С. 5225-5230.
43. Kosaka H. et al. Pixels consisting of a single vertical-cavity laser thyristor and a double vertical-cavity phototransistor //IEEE photonics technology letters. – 1993. – Т. 5. – №. 12. – С. 1409-1411.
44. Kosaka H. et al. Detector characteristics of a vertical-cavity surface-emitting laser //Japanese journal of applied physics. – 1991. – Т. 30. – №. 7A. – С. L1172.
45. Swoger J. H. et al. Strained layer (1.5 μm) InP/InGaAsP lasing opto-electronic switch (LOES) //IEEE photonics technology letters. – 1994. – Т. 6. – №. 8. – С. 927-929.

46. Swoger J., Simmons J. G. Electrical and optical properties of the four-terminal double-heterostructure opto-electronic switch //IEEE transactions on electron devices. – 1993. – T. 40. – №. 6. – C. 1071-1080.
47. Kovacic S. J. et al. Molecular beam epitaxially grown InP/InGaAsP heterostructure for inversion channel devices //Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena. – 1993. – T. 11. – №. 3. – C. 979-981.
48. Lee J. H., Choi Y. W. Novel optical thyristors for free-space optical interconnects //Optical Engineering. – 1999. – T. 38. – №. 3. – C. 531-536.
49. Kim D. G. et al. Waveguide-type PnpN optical thyristor operating at 1.55 μm //IEEE Photonics Technology Letters. – 2000. – T. 12. – №. 9. – C. 1219-1221.
50. Taylor G. W., Cai J. Theory of operation of the double-heterostructure optoelectronic switch operating as a laser //IEEE journal of quantum electronics. – 2002. – T. 38. – №. 9. – C. 1242-1252.
51. Oppen H., Taylor G. W. Current-voltage relations for the dual channel double heterostructure optoelectronic switch //Journal of applied physics. – 2003. – T. 94. – №. 3. – C. 1709-1720.
52. Taylor G. W. et al. Derivation of the switch-on parameters in the dual channel double heterostructure optoelectronic switch //Journal of applied physics. – 2004. – T. 96. – №. 12. – C. 7612-7624.
53. Feng M. et al. Room temperature continuous wave operation of a heterojunction bipolar transistor laser //Applied physics letters. – 2005. – T. 87. – №. 13. – C. 131103.
54. Feng M. et al. Charge control analysis of transistor laser operation //Applied physics letters. – 2007. – T. 91. – №. 5. – C. 053501.
55. Feng M. et al. Tunnel junction transistor laser //Applied Physics Letters. – 2009. – T. 94. – №. 4. – C. 041118.
56. Choi W. K. et al. Vertical-injection depleted optical thyristor laser diode with InGaAs/InGaAsP MQW structure //Semiconductor Lasers and Applications II. – International Society for Optics and Photonics, 2005. – T. 5628. – C. 359-366.
57. Kim D. G. et al. Lasing characteristics of InGaAs/InGaAsP multiple-quantum-well optical thyristor operating at 1.561 μm //Applied physics letters. – 2003. – T. 82. – №. 2. – C. 158-160.
58. Choi W. K. et al. Optical properties of selectively oxidized vertical cavity laser with depleted optical thyristor structure //Applied physics letters. – 2006. – T. 89. – №. 12. – C. 121117.
59. Choi W. K. et al. Monolithic integration of latchable vertical cavity laser with depleted optical thyristor for optical logic gates //Optical Fiber Communication Conference. – Optical Society of America, 2007. – C. OThT7.

60. Choi W. K., Choi Y. W. Design of monolithically integrated vertical cavity laser with depleted optical thyristor for optical programmable gate array //Optics express. – 2008. – T. 16. – №. 22. – C. 18264-18274.
61. Wang H. et al. 1.06- μ m InGaAs/GaAs multiple-quantum-well optical thyristor lasers with a PiNiN structure //Optics letters. – 2013. – T. 38. – №. 22. – C. 4868-4871.
62. Wang H. et al. High-power InGaAs/GaAs quantum-well laser with enhanced broad spectrum of stimulated emission //Applied Physics Letters. – 2014. – T. 105. – №. 14. – C. 141101.
63. Li Y., Leburton J. P. Base transport factor and frequency response of transistor lasers //Journal of Applied physics. – 2019. – T. 126. – №. 15. – C. 153103.
64. Taghavi I. et al. Large signal analysis of multiple quantum well transistor laser: Investigation of imbalanced carrier and photon density distribution //Journal of Applied physics. – 2020. – T. 127. – №. 13. – C. 133102.
65. Podoskin A. A. et al. Optical feedback in 905 nm power laser-thyristors based on AlGaAs/GaAs heterostructures //Semiconductor science and technology. – 2015. – T. 30. – №. 12. – C. 125011.
66. Levinshtein M. E., Kostamovaara J., Vainshtein S. Breakdown phenomena in semiconductors and semiconductor devices. – World Scientific, 2005. – T. 36.
67. Ryvkin B. S., Avrutin E. A. Spatial hole burning in high-power edge-emitting lasers: A simple analytical model and the effect on laser performance //Journal of applied physics. – 2011. – T. 109. – №. 4. – C. 043101-043101-5.
68. Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits. LA Coldren and SW Corzine. – 1995.
69. Slipchenko S. O. et al. Finite time of carrier energy relaxation as a cause of optical-power limitation in semiconductor lasers //Semiconductors. – 2006. – T. 40. – №. 8. – C. 990-995.
70. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. – Рипол Классик, 1973.
71. Veselov D. A. et. al. Suppressing the process of charge carrier delocalization in high-power pulse-pumped semiconductor lasers //Technical Physics Letters. – 2015. – T. 41. – №. 3. – C. 263-265.
72. Ryvkin B. S., Avrutin E. A. Free-carrier absorption and active layer heating in large optical cavity high-power diode lasers //Journal of applied physics. – 2006. – T. 100. – №. 2. – C. 023104.
73. Plimmer S. A. et al. Ionization coefficients in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0-0.60$) //Semiconductor science and technology. – 2000. – T. 15. – №. 7. – C. 692.
74. Vainshtein S. et al. Negative differential mobility in GaAs at ultrahigh fields: Comparison between an experiment and simulations //Applied Physics Letters. – 2008. – T. 92. – №. 6. – C. 062114.
75. Blakemore J. S. Semiconducting and other major properties of gallium arsenide //Journal of Applied Physics. – 1982. – T. 53. – №. 10. – C. R123-R181.

76. Saxena A. K. Hall to drift mobility ratio in $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ alloys //Solid State Communications. – 1981. – T. 39. – №. 7. – C. 839-842.
77. Podoskin A. A. et al. 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
78. Slipchenko S. O. et al. Fundamental aspects of closed optical mode formation in Fabry–Perot semiconductor lasers based on AlGaAs/GaAs (905 nm) asymmetric heterostructures //Laser Physics. – 2014. – T. 24. – №. 10. – C. 105001.
79. Slipchenko S. O. et al. Electroluminescence and absorption spectra of low-optical-loss semiconductor lasers based on InGaAs/AlGaAs/GaAs QW heterostructures //Semiconductors. – 2011. – T. 45. – №. 5. – C. 673.
80. Vainshtein S. et al. Terahertz emission from collapsing field domains during switching of a gallium arsenide bipolar transistor //Physical review letters. – 2007. – T. 99. – №. 17. – C. 176601.
81. Vainshtein S. N., Yuferev V. S., Kostamovaara J. T. Avalanche transistor operation at extreme currents: Physical reasons for low residual voltages //Solid-State Electronics. – 2003. – T. 47. – №. 8. – C. 1255-1263
82. Slipchenko S. O. et al. High-Power Laser Thyristors With High Injection Efficiency ($\lambda=890\text{--}910\text{ nm}$) //IEEE Photonics Technology Letters. – 2015. – T. 27. – №. 3. – C. 307-310.
83. Piprek J. On the reliability of pulse power saturation models for broad-area GaAs-based lasers //Optical and Quantum Electronics. – 2019. – T. 51. – №. 2. – C. 1-10.
84. Soboleva O. S. et al. The effect of the carrier drift velocity saturation in high-power semiconductor lasers at ultrahigh drive currents //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2020. – T. 67. – №. 11. – C. 4977-4982.
85. Avrutin E. A., Ryvkin B. S. Theory of direct and indirect effect of two-photon absorption on nonlinear optical losses in high power semiconductor lasers //Semiconductor Science and Technology. – 2016. – T. 32. – №. 1. – C. 015004.
86. Wenzel H. et al. The analysis of factors limiting the maximum output power of broad-area laser diodes //Optical and quantum electronics. – 2009. – T. 41. – №. 9. – C. 645-652.
87. 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. – T. 50, – № 9, – C. 1988-1990.

Список работ, опубликованных автором по теме исследования

- 1A. 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.
- 2A. 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.
- 3A. 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.
- 4A. 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.
- 5A. 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.
- 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. – Т. 119. – №. 12. – С. 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. – С. R3-9-R3-9.