



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной
и инновационной деятельности

А.А. Семенов

26 декабря 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Гаджиева Идриса Мирзебаловича
«Пикосекундные гетеролазеры с поглощающими и дифракционными элементами»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.11– «физика полупроводников»

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа И.М. Гаджиева посвящена экспериментальному исследованию режимов генерации пикосекундных оптических импульсов полупроводниковыми лазерами, резонатор которых содержит дифракционную решетку или секцию насыщающегося поглотителя.

Сверхкороткие лазерные импульсы используются во многих областях науки и техники, например, в оптической томографии с временным разрешением, терагерцовой спектроскопии, автомобильных лидарах. Полупроводниковые лазеры, излучающие короткие импульсы пикосекундного временного масштаба, обладают рядом достоинств по отношению к другим типами лазеров. Основными преимуществами полупроводниковых лазеров являются простота токовой накачки, высокая эффективность преобразования электрической мощности в оптическую, доступность и компактность. Динамические процессы пикосекундного временного масштаба, происходящие в полупроводниковых лазерах с квантовыми ямами и точками, в частности, релаксация неравновесных носителей, выжигание и восстановления усиления, уширение оптических импульсов под действием наведенной дисперсии, представляют значительный интерес для современной физики наногетероструктур, что подтверждается большим количеством публикаций по данной тематике.

Общей тенденцией развития технологии полупроводниковых лазеров является все большее использование квантоворазмерных свойств наногетероструктур, и в представляемой работе дано сравнение особенностей пикосекундных излучателей на основе классических лазеров с объемным активным слоем и лазеров на основе квантовых ям и точек. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 158 страниц, включая 94 рисунка и 3 таблицы. Список цитируемых источников содержит 142 наименования.

В первой главе произведен обзор литературы, посвященной полупроводниковым лазерам, излучающим короткие оптические импульсы, дано описание физических процессов, происходящих в усиливающей и поглощающих секциях двухсекционных лазеров, показан метод вывода основных уравнений, описывающих поведение гетеролазеров. Обзор литературы свидетельствует о большом количестве современных публикаций по данной тематике, что говорит о ее актуальности.

Вторая глава содержит описание лазеров с дифракционным выводом излучения, у которых расходимость излучения на порядок меньше, чем у лазеров с зеркалами, образованным гранями кристалла. Еще одним преимуществом таких излучателей является наличие интегрированной в резонатор дифракционной решетки, которая может выполнять функцию спектрально-селективного фильтра. На основе этих свойств был экспериментально продемонстрирован лазер с дифракционным выводом во внешнем резонаторе, излучающий пикосекундные импульсы, спектр которых перестраивался в широком диапазоне. При этом за счет интегрального исполнения дифракционной решетки общий размер резонатора составлял несколько миллиметров, и подобные компактные пикосекундные перестраиваемые лазеры могут быть востребованы в спектроскопии с временным разрешением.

Глава 3 посвящена исследованию двухсекционных лазеров с насыщающимся поглотителем с различными типами активной областей: односторонняя и двойная гетероструктура, квантовые ямы и точки. Основное внимание уделяется режиму модуляции добротности, а также определяются условия, при которых происходит переход к режиму синхронизации мод. Наибольшая энергия и пиковая мощность 380 Вт пикосекундных импульсов достигается в классических лазерах с активным слоем на основе объемного материала с имплантационным насыщающимся поглотителем. В лазерах с квантовыми ямами и квантовыми точками режим модуляции добротности наблюдался при низком напряжении на секции насыщающегося поглотителя, а при высоком напряжении происходил переход к режиму синхронизации мод. В этом случае лазеры излучают последовательность субпикосекундных импульсов с частотой повторения в диапазоне 40-80 ГГц, что может быть использовано в такой активно развивающейся области, как радиофотоника.

В главе 4 рассмотрены квантоворазмерные лазеры с синхронизацией мод с обратносмещенной секцией. Несомненный интерес представляют лазеры, у которых

секция поглотителя смещена относительно зеркала к центру, вследствие чего такие лазеры излучают на высших гармониках резонатора, и такой метод позволяет повысить частоту следования импульсов. С технологической точки зрения привлекательным является применение метода селективного травления с использованием стоп-слоя, что позволило существенно упростить технологию изготовления двухсекционных лазеров с InGaAsP/InP квантовыми ямами.

В главе 5 описаны методы генерации импульсов с длительностью десятки пикосекунд РОС-лазерами в режиме модуляции усиления и полупроводниковым усилителем в кольцевом резонаторе. Автором продемонстрировано, что существует оптимальный диапазон температур, в котором РОС-лазер излучал пикосекундные импульсы мощностью 0.5 Вт, и, что особенно важно, длительность которых определялась шириной спектра в соответствии с преобразованиями Фурье. Именно эти особенности позволили впоследствии использоваться эти лазеры в качестве задающих в регенеративном усилителе, где мощность пикосекундных импульсов усиливались на девять порядков.

Таким образом, можно заключить, что **актуальность** выбранной темы диссертационного исследования не вызывает сомнений.

Новизна исследований и полученных результатов, их практическая значимость

Диссертантом продемонстрирован ряд экспериментальных результатов в области физики полупроводниковых лазеров, которые обладают практической значимостью, и часть из них была получена впервые. Особенностью работы является то, что выявленные физические эффекты показаны с точки зрения применения в пикосекундных лазерах. Однако свойства полученных результатов таковы, что они могут применяться не только в импульсных, но и в непрерывных лазерах, а также в оптоэлектронных компонентах для оптических линий связи. Дополнительную ценность с практической точки зрения работе придает тот факт, что все результаты продемонстрированы на реальных, изготовленных в российских институтах образцах, работавших при комнатной температуре. Также диссертантом приведены упрощенные физические модели, на основе которых были получены предварительные оценки параметров лазерных излучателей.

Во второй главе описаны разработанные технологические методы изготовления лазеров, которые включали в свою конструкцию дифракционную решетку, нанесенную на поверхность лазерного волновода. Важной особенностью таких лазеров является то, что большая площадь дифракционного излучателя позволяет получить малую расходимость излучения. В работе впервые продемонстрирован спектрально перестраиваемый лазер с нерезонансной дифракционной решеткой во внешнем резонаторе, излучение которого имело расходимость менее одного градуса, т.е. значительно меньшую, чем у традиционных

полупроводниковых лазеров, что может быть востребовано в практических приложениях.

Изученный в главе 3 механизм перехода от режима модуляции добротности к режиму синхронизации представляет интерес для реализации амплитудно-модулированной последовательности пикосекундных оптических импульсов. Изменением напряжения на секции насыщающегося поглотителя можно управлять амплитудой импульсов в режиме синхронизации мод. Обнаруженный в определенном диапазоне напряжений смешанный режим одновременного существования синхронизации мод и модуляции добротности в лазерах с квантовыми точками позволяет получить излучение в виде цуга пикосекундных импульсов. С помощью таких методов можно формировать сигналы в радиофотонике.

Новым результатом, полученным в главе 4, является использование лазерных структур с малым фактором оптического ограничения для реализации режима синхронизации мод. Технически уменьшение перекрытия оптического поля с активной средой было выполнено двумя способами: увеличением ширины волновода и уменьшением толщины квантовых ям. Использование таких структур позволило уменьшить уровень шума в лазерном излучении и, соответственно, получить более узкую ширину линии радиочастотного сигнала синхронизации мод. В главе 5 описаны способы получения пикосекундных импульсов с узким спектром и произвольной частотой повторения. Лазеры, излучающие такие импульсы, перспективны для применения в когерентной томографии и для генерации второй гармоники.

По всем оригинальным главам И.М. Гаджиевым сформулированы выносимые на защиту научные положения. Каждое положение обосновано, а основные результаты диссертационного исследования опубликованы им в соавторстве в двух десятках работ в отечественных и зарубежных периодических научных изданиях («Физика и техника полупроводников», «Electronics Letters», «Phys. Rev. B»), что подтверждает **новизну** и **достоверность** полученных результатов. Кроме того, работы И.М. Гаджиева многократно представлялись на российских и международных научных конференциях по физике полупроводников и полупроводниковых наноструктур.

В диссертации четко сформулированы цели и задачи исследования, при ее выполнении были разработаны и изготовлены экспериментальные образцы пикосекундных лазеров, проведены оптоэлектронные измерения на современном оборудовании, приведены физические модели, на основе которых качественно объяснен ряд экспериментальных данных, а также указаны области практического использования полученных экспериментальных результатов. Диссертация в целом написана четким и ясным языком.

Тем не менее, к содержанию и оформлению диссертационной работы имеются следующие **замечания:**

- 1) При расчете поглощения энергии электромагнитной волны структурой (с. 24–31 диссертации) и соответствующего расчета коэффициента поглощения автор пользуется, в основном, классическими формулами для случая объемного полупроводника. Однако, современные лазеры представляют собой наногетероструктуры с квантовыми ямами, и для них необходимо применять статистику двумерных носителей заряда. См., например, [Л.Е. Воробьев, и др. Оптические свойства наноструктур, 2001].
- 2) Расчет энергетических состояний носителей заряда в легированных квантово-размерных гетероструктурах автор проводит в прямоугольном приближении потенциала квантовой ямы. Это достаточно грубое приближение. В действительности, огромная концентрация электронов в яме (более 10^{18} см^{-3}), несущих заряд, существенно искажает сам барьер. Корректные расчеты самосогласованного потенциала необходимо выполнять совместным численным решением нелинейного уравнения Пуассона и уравнения Шредингера. При этом положения энергетических уровней квантования в самосогласованном потенциале КЯ сдвигаются и, соответственно, концентрации носителей заряда в подзонах квантования оказываются существенно ниже, чем для ямы прямоугольной формы.
- 3) Во второй главе не вполне ясен принцип совместного применения для создания дифракционных решеток халькогенидного стекла и подслоя планаризирующего фоторезиста, имеющего на порядок более высокую скорость травления в кислородной плазме.
- 4) Необходимо пояснить причину существенного различия длительности импульсов, излучаемых лазером в гибридном режиме модуляции добротности и усиления, измеренных с помощью осциллографа и фотоприемника (24 пс) и с помощью автокорреляционной функции второго порядка (17 пс).
- 5) В тексте диссертации присутствует ряд неточностей формулировок и технических ошибок, в частности, в подписи к рис. 2.34 нет пояснений для частей а) и б), а в подписи к рис. 4.17 введена аббревиатура ТВР, которой не дано пояснений в тексте. Некоторые сокращения в тексте даны строчными буквами, не хватает нумераций формул.

Указанные недостатки носят частный характер и не снижают научной и практической ценности диссертационной работы. В целом, диссертационная работа И.М. Гаджиева является законченной научно-квалификационной работой, содержит новые научно-обоснованные методические, технические и практические результаты, имеющие существенное значение для улучшения характеристик полупроводниковых пикосекундных лазеров. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации, которая является самостоятельной исследовательской работой. По значимости полученных результатов и научно-техническому уровню диссертация соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном

учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор – Гаджиев Идрис Мирзебабович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

Отзыв составил:

доктор физико-математических наук,
профессор кафедры микро- и
нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Глинский Геннадий Федорович
e-mail: gfglinskii@etu.ru
тел. +79046308617

Работа заслушана и обсуждена 18 декабря 2023 г. на научном семинаре кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Отзыв утвержден на заседании кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», протокол № 11 от 20 декабря 2023 г.

Заместитель заведующего кафедрой
микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ
«ЛЭТИ», доктор физико-математических
наук, профессор

Зубков Василий Иванович
e-mail: vzubkovspb@mail.ru
тел. +7 921 659 7464

Ученый секретарь кафедры микро- и
нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,
кандидат физико-математических наук,
доцент

Александрова Ольга Анатольевна

Подписи Г.Ф. Глинского, В.И. Зубкова, О.А. Александровой заверяю:

Ученый секретарь

диссертационных советов СПбГЭТУ «ЛЭТИ» _____ Т.Л. Русяева

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Адрес: 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5 литера Ф.

Телефон: +7 (812) 346-44-87

Электронная почта: info@etu.ru

Сайт: <https://etu.ru>