

На правах рукописи

БУЯЛО МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ

ОСОБЕННОСТИ ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД В
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРАХ НА НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

(Специальность 01.04.10 - физика полупроводников)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (г. Санкт-Петербург) 194021, СПб, ул. Политехническая, 26

Научный руководитель **Портной Ефим Лазаревич**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, доцент, лаборатория интегральной оптики на гетероструктурах, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,

Официальные оппоненты **Липовский Андрей Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки "Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук"

Карпов Сергей Юрьевич, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер-физик, ООО "Софт-Импакт"

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится 20.04.2017 в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН и на сайте <http://www.ioffe.ru>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по указанному адресу ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан __ _____ 2017 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Л. М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время для решения ряда задач науки и техники, в том числе микроволновой фотоники, требуются компактные, высокоэффективные генераторы высокочастотного оптического излучения с частотой повторения импульсов в несколько десятков гигагерц. Такие генераторы могут быть использованы для получения электромагнитного излучения миллиметрового и сантиметрового диапазона из оптического излучения, которое может быть легко усилено и передано по оптическому волокну.

Реализация таких генераторов в виде полупроводниковых лазеров с пассивной синхронизацией мод (ПСМ) представляет особый интерес, поскольку она лишена недостатков, присущих другим методам получения высокочастотных последовательностей импульсов. А именно, режим ПСМ реализуется в монолитно-интегрированных лазерных диодах (ЛД) полосковой геометрии [1], в которой усиливающая и модулирующая части изготавливаются на одном кристалле в рамках одних и тех же самых технологических процедур. Соответственно, для таких ЛД нет необходимости решать задачи по пространственному сопряжению оптических элементов и по подведению высокочастотного электрического сигнала к ЛД. При этом свойства полупроводниковых материалов позволяют получать стабильный высокочастотный сигнал в лазерных диодах в постоянной электрической цепи управления ЛД. Кроме того, лазер с пассивной синхронизацией мод может быть выполнен в интегральной конструкции с другими оптоэлектронными элементами, например, со спектрально-селективным элементом [2,3] и модулятором на эффекте Штарка, или с оптическим усилителем [4].

Современное развитие технологий эпитаксиального роста материалов системы GaAs/InGaAs позволяет с высоким качеством создавать полупроводниковые волноводные наногетероструктуры на основе квантовых ям (КЯ) и слоев квантовых точек (КТ). В результате, реализация новых типов активных сред с уменьшенной размерностью гетеропереходов привела к последовательному улучшению рабочих характеристик полупроводниковых лазеров, таких как плотность порогового тока и температурная стабильность [5]. Физические свойства различных наногетероструктур качественно отличаются друг от друга, что обуславливает существенные отличия динамических и спектральных характеристик различных типов лазеров с ПСМ [6]. Изучение различных типов активной среды и конструкций лазеров с ПСМ открывает возможности для создания новых оптоэлектронных устройств и улучшения рабочих характеристик известных приборов.

Таким образом, исследование особенностей режима пассивной синхронизации мод и реализация этого режима в лазерах с различными типами

активной среды является актуальной как с научной, так и с практической точки зрения.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование особенностей режима пассивной синхронизации мод в полупроводниковых лазерных диодах, содержащих в своей активной области квантово-размерные структуры, направленное на создание элементной базы и новых устройств микроволновой фотоники.

Для достижения этой цели потребовалось решать следующие задачи:

Исследование влияния конструкции волноводного слоя на стабильность следования импульсов в режиме пассивной синхронизации мод в двухсекционных InGaAs/GaAs лазерах с одиночной квантовой ямой.

Исследование спектральных характеристик поглощения в лазерных структурах на основе квантовых ям и квантовых точек и их влияния на режимы лазерной генерации.

Разработка InGaAs/GaAs лазерной структуры на основе двух асимметричных туннельно-связанных квантовых ям и исследование влияния непрямого оптического перехода на спектральные свойства вблизи фундаментального края поглощения в таких структурах.

Исследование режима пассивной синхронизации мод, обусловленного непрямым оптическим переходом в двухсекционных лазерах с активной областью, состоящей из двух асимметричных туннельно-связанных квантовых ям.

Исследование спектральных характеристик и режима пассивной синхронизации мод в лазерах с активной областью, состоящей из 10 слоев близко расположенных квантовых точек.

Научная новизна

Показано, что увеличение ширины волновода в лазерных структурах на основе квантовых ям приводит к существенному улучшению стабильности следования импульсов в режиме пассивной синхронизации мод. При этом доля шумов, связанных со спонтанным излучением, уменьшается за счет уменьшения коэффициента оптического ограничения, а шумы, связанные с автопульсациями, подавляются из-за увеличения времени доставки инжектированных носителей к активной области. Ширина радиочастотной линии в режиме синхронизации мод в лазерах с широким волноводом составляет порядка 20 кГц на частоте следования импульсов 12 ГГц.

Показано, что в двухсекционных лазерах с глубокой квантовой ямой поглощение на длине волны генерации при малых обратных смещениях мало и не достаточно для эффективной работы поглотителя из-за эффекта сужения зоны в усиливающей секции, и локализации носителей в глубокой яме и экситонного характера края спектра поглощения в поглощающей секции. В силу квадратичной

зависимости от приложенного поля, штарковский сдвиг края поглощения мал при малых полях. При этом экситонный характер поглощения сохраняется в широком диапазоне приложенных смещений. Достаточное для работы лазера в режиме пассивной синхронизации мод поглощение на длине волны лазерной генерации достигается при внешнем приложенном поле более 50 кВ/см, при котором скорость выноса носителей из поглотителя уже насыщена.

Были исследованы спектральные свойства лазерных структур, содержащих в активной области две InGaAs/GaAs квантовые ямы различной ширины с GaAs барьером между ямами толщиной 2 и 5 нм. При толщине барьера 5 нм туннельная связь между электронными уровнями мала и поглощение определяется основным переходом широкой ямы. В спектрах поглощения структуры с узким барьерным слоем наблюдался дополнительный пик, соотносящийся с непрямым переходом между первым уровнем тяжелых дырок валентной зоны широкой ямы и первым уровнем электронов узкой ямы. При обратных смещениях вблизи 1 В положение пика совпадает с положением длины волны лазерной генерации, что приводит к увеличению поглощения на длине волны лазерной генерации и реализации режима пассивной синхронизации мод.

Впервые получен режим пассивной синхронизации мод в лазерных структурах, содержащих слои вертикально-коррелированных квантовых точек. Коэффициенты поглощения на длине волны лазерной генерации для ТЕ и ТМ поляризаций света отличаются в 1,6 раза.

Практическая значимость

Предложен новый способ улучшения стабильности следования импульсов без использования систем обратной связи в режиме синхронизации мод в лазерах с активной областью на основе квантовых ям. Изготовление широкого волноводного слоя является технологически более простой задачей, чем рост квантовых точек. Предложенный способ может быть использован при создании стабильных генераторов импульсов в широком спектральном диапазоне для различных приложений микроволновой фотоники.

Полученные результаты о влиянии эффекта Штарка на режимы работы лазера могут быть использованы для создания многосекционных приборов, например, для реализации монолитно-интегрированного модулятора на эффекте Штарка с лазером с синхронизацией мод. При этом, структуры на основе квантовых ям имеют большой потенциал, так как они позволяют реализовывать усиливающие, поглощающие и прозрачные для света области в рамках конструкции с общим волноводом, и при этом являются технологически доступным объектом.

Предложены и реализованы монолитно-интегрированные лазеры спектрального диапазона 1,06 мкм с активной областью, содержащей две асимметричные туннельно-связанные квантовые ямы, в которых генерация пикосекундных импульсов света может развиваться при малых обратных

смещениях порядка 1 В на поглощающей секции. Такая конструкция активной области может быть использована для создания эффективных модуляторов света, в которых для переключения между пропускающим и поглощающим состоянием не нужно прикладывать значительные обратные смещения. Также, использование такой активной среды в двух- и многосекционных конструкциях лазеров может улучшить рабочие характеристики (надежность и срок службы) в приборах на их основе.

Показано, что в структурах на основе вертикально-коррелированных слоев квантовых точек величины поглощения для обеих поляризаций света отличаются менее чем в два раза. Реализация режима пассивной синхронизации мод с частотой следования импульсов 12,5 ГГц в таких лазерах показывает перспективы создания быстродействующего поляризационно-независимого модулятора на основе связанных слоев квантовых точек.

Положения, выносимые на защиту

1. Уменьшение фактора оптического ограничения и увеличение времени доставки инжектированных носителей на основной уровень за счет увеличения ширины волновода в лазерах на КЯ приводит к значительному улучшению стабильности частоты следования импульсов.
2. Экситонный характер поглощения в структурах с глубокими квантовыми ямами обуславливает необходимость прикладывать значительное (до 10 В) обратное смещение к секции поглотителя для достижения величины поглощения на длине волны лазерной генерации, достаточной для развития процесса синхронизации мод.
3. В лазерах с двумя асимметричными туннельно-связанными квантовыми ямами режим пассивной синхронизации мод может быть реализован при малых обратных смещениях за счет поглощения на непрямом оптическом переходе с основного уровня тяжелых дырок широкой ямы на основной электронный уровень узкой ямы.
4. В двухсекционных лазерах с активной областью, состоящей из десяти слоев вертикально-коррелированных квантовых точек, может быть реализован режим пассивной синхронизации мод.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- Семинары лаборатории интегральной оптики на гетероструктурах ФТИ им. А. Ф. Иоффе, РАН
- "13th Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology", 2005, St. Petersburg, Russia

- "IX Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике", 2007, Санкт-Петербург, Россия
- "European Semiconductor Laser Workshop", 2007, Berlin, Germany
- Симпозиум "Полупроводниковые лазеры: физика и технология", 2008, С.Петербург, Россия
- "X Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике", 2008, С.Петербург, Россия
- "Laser Optics 2008", 2008, Saint-Petersburg, Russia
- "29th International Conference on the Physics of Semiconductors", 2008, Rio de Janeiro, Brazil.
- "European Semiconductor Laser Workshop", 2009, Vienna, Austria.
- "Semiconductor and Integrated Opto-Electronics Conference", 2009, Cardiff, Wales.
- "18th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", 2010, Saint-Petersburg, Russia.
- "Laser Optics 2012", Saint-Petersburg, Russia.
- "21th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", 2013, Saint-Petersburg, Russia.
- 4-й Всероссийский симпозиум с международным участием "Полупроводниковые лазеры: физика и технология", 2014, Санкт-Петербург, Россия

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 23 печатных работах, в том числе 9 – в статьях в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК, 14 – в тезисах научных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 47 рисунков и 2 таблицы. Список цитируемой литературы состоит из 137 наименований. Общий объем диссертационной работы составляет 114 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, научная новизна и практическая значимость работы, сформулирована цель диссертации, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведены результаты исследования влияния на ширину линии радиочастотного спектра излучения двухсекционного лазера в режиме ПСМ в зависимости от конструкции волноводного слоя (ВС) и активной области. Показано, что увеличение ширины волновода повышает стабильность следования импульсов за счет уменьшения коэффициента оптического ограничения Γ , и как следствие, уменьшения доли спонтанных шумов в излучении лазера.

Были исследованы два типа лазерных структур, отличающихся дизайном волновода. Структура с узким волноводным слоем была сформирована из одиночной $\text{In}_{0.2}\text{GaAs}$ КЯ шириной 6 нм, заключенной в волновод переменного состава $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, где x меняется от 0 на границе с КЯ до 0.5, ширина волновода составляла 0,4 мкм (рис. 1а).

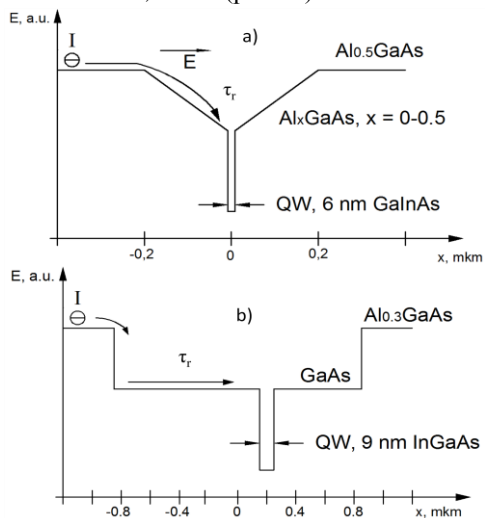


Рис.1. Схематическое изображение зонных структур для лазеров с а) узким, б) широким волноводом

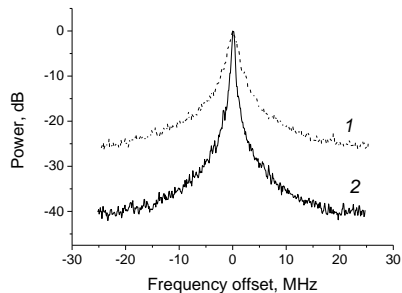


Рис.2. Радиочастотные спектры лазеров с ПСМ. 1) – лазер с узким волноводом: частота следования импульсов $F_{ML} = 21.3$ ГГц, ширина радиочастотной линии $\Delta F_{FWHM} = 1$ МГц. 2) – лазер с широким волноводом: $F_{ML} = 12.3$ ГГц, $\Delta F_{FWHM} = 20$ кГц

Лазеры с широким ВС были изготовлены из структуры, содержащей GaAs волноводный слой толщиной 1,7 мкм с напряженной $\text{In}_{0.26}\text{GaAs}$ КЯ толщиной 9 нм, расположенной асимметрично относительно центра волновода (рис. 1б). Данная конструкция ВС обеспечивает генерацию с высокой выходной мощностью на основной пространственной моде [7].

Из лазерных структур были изготовлены двухсекционные образцы с узким полоском, длина лазеров составляла 2,14 и 3 мм для структур с узким и широким барьером соответственно, длина секции поглотителя – 10% длины лазера.

Режим ПСМ был достигнут на обоих типах лазеров при приложении постоянного тока накачки и обратного смещения V_{rev} . В лазерах с узким волноводом при малых или положительных V_{rev} наблюдался режим пассивной модуляции добротности (ПМД). На рис. 2, линия 1 представлен типичный радиочастотный спектр излучения такого лазера. В лазерах с широким волноводом, напротив, режим ПМД отсутствовал во всем диапазоне обратных смещений. На рис. 2, линия 2 отображен типичный радиочастотный спектр лазера, а минимальная достигнутая ширина радиочастотной линии составляет 20 кГц.

Расчет Γ по данным о лазерных структурах дает значение коэффициента 2 и 0,7% для структуры с узким и широким волноводом соответственно. Экспериментально расчет подтвержден измерением величины поглощения первого оптического перехода, что дало значения поглощения для материала $1,1-1,3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$.

Низкий коэффициент оптического ограничения обуславливает меньшую долю спонтанных шумов при лазерной генерации в режиме пассивной синхронизации мод. Также, в широком волноводе время транспорта инжектированных носителей определяется временем диффузии дырок к КЯ и составляет 200 пс, что приводит к сильному эффекту подавления усиления, и как следствие, уменьшению шумов, связанных с автопульсациями [8].

Во **второй главе** описывается исследование влияния спектральных свойств поглотителя в двухсекционной конструкции лазера на режимы генерации. Показано, что для развития процесса синхронизации мод необходимо согласование по спектру линии генерации лазера и спектра поглощения. В случае лазерных структур с активной областью, содержащей квантовые ямы, линия генерации лазера сдвинута в длинноволновую область за счет эффекта сужения зон, а спектр поглощения имеет экситонный характер. Таким образом, в отсутствие приложенного смещения к секции поглотителя, линия лазерной генерации находится в области, где поглощение мало.

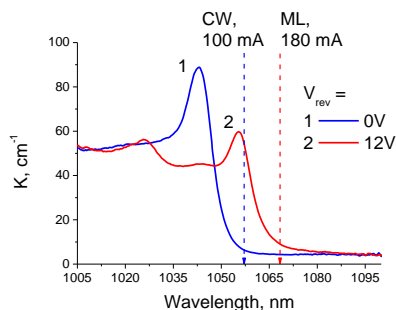


Рис.3. Сдвиг экситонного края поглощения с ростом обратного смещения и местоположение линий спектра излучения в непрерывном режиме при прокачке обеих секций в прямом направлении при токе, близком к пороговому (CW), и в режиме ПСМ (ML)

крутизна изменения поглощения составляет 10 и $6 \text{ см}^{-1}/\text{мэВ}$ для $V_{\text{rev}} 0$ и 14 В соответственно. При этом, линия генерации сдвинута в длинноволновую область на 30 мэВ за счет эффекта сужения зоны, таким образом, при малых V_{rev} поглощение

Были исследованы экспериментальные образцы, содержащие одну напряженную InGaAs КЯ в широком GaAs волноводе, описание лазерной структуры подробно приведено в главе 1. Режим ПСМ наблюдался при обратных смещениях более 9 В, значительно больших, чем в ранее исследованных лазерах с ПСМ на КЯ [9]. Для объяснения этого эффекта методом интегрально-абсорбционной спектроскопии (ИАС) [10] были измерены спектры поглощения при различных обратных смещениях (рис. 3). Видно, что в достаточно глубокой КЯ экситонный пик на краю поглощения сохраняется во всем диапазоне приложенных смещений

на длине волны генерации мало и лазер работает в непрерывном режиме (пунктирная линия CW на рис. 3). Синхронизация мод достигается только при больших напряжениях (пунктирная линия ML на рис. 3), когда поглощение увеличивается под влиянием квантово размерного эффекта Штарка.

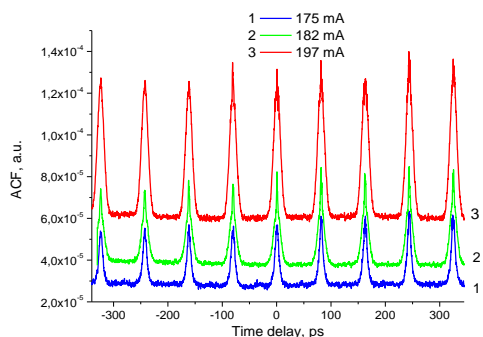


Рис.4. Автокорреляционные функции при токах 1 - 175 мА, 2 - 182 мА, 3 – 197 мА и обратном смещении 12,5 В

гауссовой формы импульса.

Для лазеров на КТ характер поглощения определяется уширением спектра поглощения, вызванного дисперсией размеров квантовых точек [11]. Это приводит к тому, что линия генерации находится в спектральной области, где поглощение достаточно для работы поглотителя в качестве нелинейного элемента для синхронизации мод уже при нулевых обратных смещениях. Соответственно, для реализации режима синхронизации мод необходимо только достичь условия, при котором время жизни носителей в поглотителе меньше времени полного обхода резонатора, что приводит к меньшим значениям полей, прикладываемых к поглощающей секции.

В третьей главе описывается исследование режима пассивной синхронизации мод в лазерах на основе двух асимметричных InGaAs квантовых ям. Структуры были выращены методом МПЭ на n^+ -GaAs подложках. Активная область структуры содержала две $\text{In}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$ КЯ с толщинами 5.5 и 8.5 нм, при этом широкая яма располагалась ближе к p -эмиттеру. Были изготовлены две структуры, различавшиеся толщиной GaAs барьера между квантовыми ямами - 2 и 5 нм. Фотография структуры с узким барьером, полученная с помощью просвечивающей электронной микроскопии, представлена на рис. 5. Квантовые ямы были заключены в GaAs волновод толщиной 400 нм.

Стандартными фотолитографическими методами были изготовлены двухсекционные лазеры длиной 2 мм, секция поглотителя составляла 10% длины секции резонатора лазера для реализации режима ПСМ, а также образцы с равными длинами секций для измерения поглощения.

Исследования проводились при комнатной температуре и постоянном токе накачки усиливающей секции и обратных смещениях на секции поглотителя до -4 В.

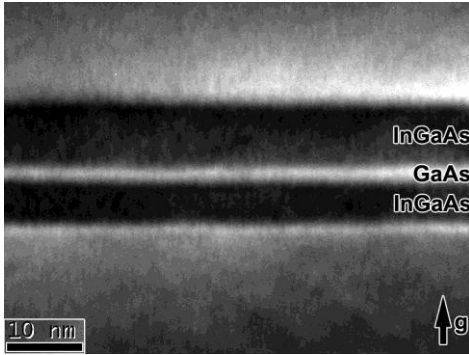


Рис.5. ТЕМ-Изображение активной области лазера с двумя туннельно-связанными квантовыми ямами, толщины ям 5.5 и 8.5 нм для узкой и широкой КЯ соответственно.

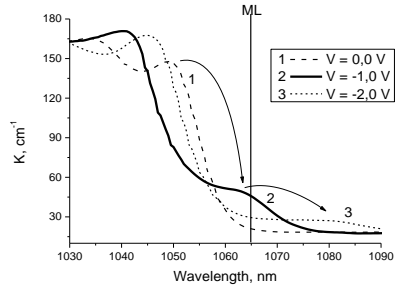


Рис.6. Спектры поглощения структуры с шириной барьера между ямами 2 нм при различных обратных смещениях. ML - положение линии генерации в режиме ПСМ, стрелками отмечено движение пика, связанного с непрямым переходом

Отличительной особенностью спектра поглощения (рис. 6) структуры с узким барьером является наличие дополнительного пика, связанного с не прямым оптическим переходом между основным электронным уровнем узкой КЯ и основным уровнем тяжелых дырок в широкой КЯ. Скорость движения этого пика составляет 0.76 мэВ/(кВ/см), что в три раза больше скорости движения пика, связанного с прямым оптическим. Таким образом, уже при малом приложенном обратном смещении к секции поглотителя (1 В) на длине волны лазерной генерации поглощение становится достаточно велико для развития режима ПСМ. При этом, в

структуре с широким барьером туннельная связь мала, и поведение края зоны поглощения при приложении внешнего смещения в ней соответствует поведению в структуре с одиночной КЯ.

Режим ПСМ наблюдался в обеих структурах при $V_{rev} > 3$ В, когда поглощение на длине волны лазерной генерации увеличивалось под воздействием штарковского сдвига прямого оптического перехода в широкой КЯ. В структуре с узким барьером режим ПСМ наблюдался

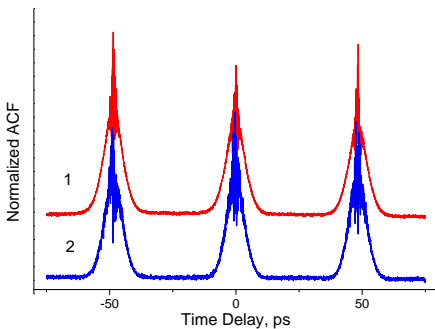


Рис.7. Автокорреляционные функции излучения лазера с узким барьером. 1 - $V_{rev} = 1$ В, 2 - $V_{rev} = 3.4$ В

также при $V_{rev} \approx 1$ В в широком диапазоне токов накачки лазера. На рис. 7 представлены АКФ лазера с узким барьером в режиме ПСМ. Обе кривые измерены при одном и том же токе накачки, но при обратных смещениях, соответствующих случаям, когда поглощение определяется непрямым (линия 1) и прямым (линия 2) оптическими переходами. Длительность импульсов составляет 5 пс.

В **четвертой главе** представлены результаты исследования лазеров с активной областью, содержащей систему вертикально-коррелированных квантовых точек. Такие структуры могут быть использованы для создания поляризационно-независимых модуляторов света [12]. Лазерные структуры были изготовлены методом МПЭ и содержали 10 слоев InGaAs квантовых точек, разделенных GaAs барьером толщиной 6 нм и заключенных в GaAs волновод толщиной 480 нм. Двухсекционные лазеры с шириной полоска 5 мкм были изготовлены стандартными методами фотолитографии, длина лазеров составила 3.5 мм, длина секции поглотителя - 10% длины резонатора лазера.

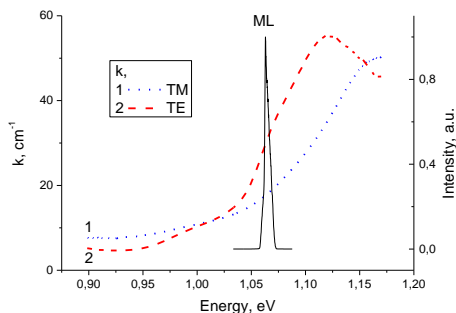


Рис.8. Спектры поглощения для ТМ и ТЕ мод (линии 1 и 2) и линия генерации лазера в режиме ПСМ (линия ML)

Коэффициент поглощения для ТМ-поляризованного света в такой структуре оказался всего в 1,6 раз меньше, чем для ТЕ на длине волны, соответствующей длине волны генерации лазера в режиме ПСМ (рис. 8), при этом при энергиях менее 1.012 эВ и более 1.156 эВ поглощение больше для ТМ поляризации. Стоит отметить, что крутизна роста поглощения составляет $0,6 \text{ см}^{-1}/\text{мэВ}$, что значительно меньше, чем в

структурах с КЯ.

В лазерах с вертикально-коррелированными КТ наблюдался эффект жесткого включения, характерный для двухсекционных лазеров на несвязанных КТ [9]. Этот эффект связан с эффектом оптической бистабильности, вызванным просветлением поглотителя из-за недостаточно высокой скорости выноса носителей. Эффект жесткого включения подавлялся при значительном прямом токе на секции поглотителя, при этом уменьшался пороговый ток лазера.

Режим ПСМ наблюдался в широком диапазоне импульсных токов накачки длительностью 1 мкс при обратных смещениях от -1 до -3 В с частотой следования импульсов 12,5 ГГц. При обратном смещении -2 В длительность импульсов составила 10 пс при ширине спектра 5.2 нм.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

1. Показано, что уширение волноводной области в лазерных структурах с одиночной квантовой ямой приводит к увеличению стабильности следования импульсов в режиме пассивной синхронизации мод за счет подавления шумов, связанных с автопульсациями и спонтанным излучением.

2. Исследовано влияние спектральных свойств поглотителя в лазерных структурах на основе InGaAs глубокой квантовой ямы в широком волноводе GaAs, глубокой квантовой ямы в стандартном волноводе и в структуре с десятью слоями InGaAs/GaAs квантовых точек на реализацию режима пассивной синхронизации мод.

Показано, что в структурах с квантовыми ямами линия лазерной генерации находится на краю зоны поглощения в силу экситонного характера поглощения в таких структурах и эффекта сужения зон при высоких уровнях накачки. Для достижения достаточного для реализации режима пассивной синхронизации мод в двухсекционных лазерах с глубокой квантовой ямой поглощения необходимо прикладывать значительные обратные смещения к поглощающей секции, так как экситонный характер поглощения сохраняется при больших приложенных обратных смещениях на поглотителе, а сдвиг края поглощения определяется квантово-размерным эффектом Штарка. В тоже время, в лазерах на квантовых точках, из-за неоднородного уширения вследствие дисперсии размеров точек линия лазерной генерации находится в спектральной области, где поглощение достаточно для синхронизации мод.

3. Исследованы спектры поглощения и генерации в лазерах, содержащих в активной области две InGaAs квантовые ямы одинакового состава, но разной толщины, разделенных GaAs барьером толщиной 2 нм для обеспечения туннельной связи между основными электронными уровнями. Показано, что в спектрах поглощения присутствует дополнительный пик, обусловленный непрямым оптическим переходом между основным состоянием валентной зоны широкой ямы и основным состоянием зоны проводимости узкой ямы. Скорость движения этого пика от приложенного поля в три раза превосходит скорость движения пика поглощения, определяемого прямым оптическим переходом между основными состояниями широкой ямы.

4. Продемонстрирован режим пассивной синхронизации мод, обусловленный поглощением на непрямом оптическом переходе, в двухсекционных лазерах с активной областью, содержащей две асимметричные туннельно-связанные квантовые ямы. При обратных смещениях порядка 1 В поглощение на длине волны лазерной генерации становится достаточным для процесса синхронизации мод.

5. Исследованы спектры поглощения в лазерных структурах с десятью туннельно-связанными слоями квантовых точек. В таких структурах близкое расположение слоев квантовых точек приводит к тому, что интенсивности

люминесценции и значения коэффициентов поглощения для ТЕ- и ТМ-поляризаций являются сопоставимыми, что является ключевым моментом для создания поляризационно-независимых модуляторов света. В двухсекционных лазерах, изготовленных из такой структуры, продемонстрирован режим пассивной синхронизации мод.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Nikolaev V., Averkiev N., Sobolev M., Gadzhiev I., Bakshaev I., **Buyalo M.**, Portnoi E. Tunnel coupling in an ensemble of vertically aligned quantum dots at room temperature // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 80, № 20. P. 1–10.
2. Гаджиев И.М., **Буяло М.С.**, Бакшаев И.О., Григорьев Р.И., Слипченко С.О., Пихтин Н.А., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Винокуров Д.А., Тарасов И.С., и др. Особенности синхронизации мод в лазерах с квантовой ямой в широком волноводном слое // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, № 22. С. 29–36.
3. Соболев М.М., Гаджиев И.М., Бакшаев И.О., Неведомский В.Н., **Буяло М.С.**, Задиранов Ю.М., Портной Е.Л. Оптическое поглощение в сверхрешетках квантовых точек InAs / GaAs в электрическом поле при комнатной температуре // ФТП. 2011. Т. 45, № 8. С. 1095–1101.
4. **Буяло М.С.**, Соболев М.М., Гаджиев И.М., Бакшаев И.О., Задиранов Ю.М., Ильинская Н.Д., Портной Е.Л. Пассивная синхронизация мод в лазерах на сверхрешетке из квантовых точек // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, № 18. С. 31–36.
5. **Buyalo M.S.**, Gadzhiev I.M., Gorbacevich A.A., Egorov A.Y., Bakshaev I.O., Zadiranov Y.M., Il'inskaya N.D., Portnoi E.L. Passive modelocking due to diagonal optical transition in asymmetric double quantum well // Electron. Lett. 2012. Vol. 48, № 14. P. 870–872.
6. **Буяло М.С.**, Горбачевич А.А., Егоров А.Ю., Гаджиев И.М., Бакшаев И.О., Задиранов Ю.М., Ильинская Н.Д., Портной Е.Л. Влияние ширины барьера в структуре с двумя асимметричными связанными квантовыми ямами на область существования пассивной синхронизации мод // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, № 7. С. 31–39.
7. Sobolev M., **Buyalo M.**, Gadzhiev I., Bakshaev I., Zadiranov Y., Portnoi E. Room temperature passive mode-locked laser based on InAs/GaAs quantum-dot superlattice // Nanoscale Res. Lett. 2012. Vol. 7, № 1. P. 545.
8. **Буяло М.С.**, Гаджиев И.М., Бакшаев И.О., Портной Е.Л. Ширина линии радиочастотного спектра в лазерах на квантовой яме с пассивной синхронизацией мод // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, № 3. С. 41–48.
9. **Буяло М.С.**, Гаджиев И.М., Усикова А.А., Задиранов Ю.М., Ильинская Н.Д., Губенко А.Е., Егоров А.Ю., Портной Е.Л. Влияние эффекта Штарка на увеличение

мощности в двухсекционных лазерах с квантовыми ямами в режиме модуляции добротности // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, № 20. С. 30–36.

Тезисы и материалы докладов на конференциях

10. Gadjiev I.M., Gubenko A.E., **Buyalo M.S.**, Portnoi E.L., Kovsh A.R., Mikhrin S.S., Krestnikov I.L., Ledentsov N.N. Q-switching and mode-locking in QD lasers at 1.06 μm // 13th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology". St. Petersburg, Russia, 20-25 June 2005. P. 83-84.
11. Portnoi E.L., Gadjiev I.M., **Buyalo M.S.**, Gubenko A.E., and Kovsh A.R. Peculiarities of Passive Q-switching and Modelocking in QD Laser Diodes // ESLW. Berlin, Germany, 14-15 September 2007.
12. **Буяло М.С.**, Портной Е.Л. Особенности модуляции добротности в лазерах на квантовых точках // VIII Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике. Санкт-Петербург, Россия, 4-7 декабря 2007.
13. Gadjiev I.M., **Buyalo M.S.**, Bakshaev I.O., Portnoi E.L. High product value of average power and repetition frequency in QD laser diode // International Conference "Laser Optics 2008". St. Petersburg, Russia, Tech. Prog., 23-28 June 2008.
14. **Buyalo M.S.**, Gadjiev I.M., Portnoi E.L. Mode-Locked Quantum Dot Laser as Microwave-Range Frequency Local Oscillator // International Conference "Laser Optics 2008". St. Petersburg, Russia, Tech. Prog., 23-28 June 2008.
15. Portnoi E.L., Gadjiev I.M., Sobolev M.M., Bakshaev I.O., Mikhrin V., Nevedomskiy V., **Buyalo M.S.**, Zadiranov Y. Field-controlled resonance absorption in vertically correlated systems of InAs/GaAs quantum dots at room temperature // 29th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-2008). Rio de Janeiro, Brazil, 27 July - 1 August 2008. P. 409–410.
16. Бакшаев И.О., **Буяло М.С.**, Гаджиев И.М., Григорьев Р.И., Портной Е.Л. Гетеролазеры с синхронизаций мод в микроволновой фотонике // Симпозиум "Полупроводниковые лазеры: физика и технология". С.Петербург, Тезисы докладов, 5-7 ноября 2008. С. 30.
17. **Буяло М.С.**, Портной Е.Л. Исследование радиочастотных спектров двухсекционных полупроводниковых лазеров // X Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике. Санкт-Петербург, Россия, 1-5 декабря 2008.
18. Bakshaev I.O., **Buyalo M.S.**, Gadjiev I.M., Portnoi E.L., Gubenko A.E., Kovsh A.R. Multi-section saturable absorber design for mode-locking of monolithic QD lasers with high power pulses // Semiconductor and Integrated Opto-Electronics Conference (SIOE 2009). Cardiff, Wales, UK, 6-8 April 2009 Book of Abstracts, paper 21.
19. Gadjiev I.M., **Buyalo M.S.**, Bakshaev I.O., Slipchenko S.O., Pikhtin N.A., Leshko A.Y., Lyutetskij A. V., Tarasov I.S., Portnoi E.L. Mode-locked broadened-waveguide

SQW GaInAs laser diode with improved stability // Nanostructures: Physics and Technology. St. Petersburg, 21-26 June 2010. P. 18–21.

20. **Buyalo M.S.**, Sobolev M.M., Gadzhiev I.M., Bakshaev I.O., Zadiranov J.M., Portnoi E.L. Room Temperature Passive Mode-Locked Laser Based on InAs/GaAs Quantum-Dot Superlattice // International Conference on Superlattices, Nanostructures and Nanodevices. ICSNN, 22-27 July 2012.

21. Gadzhiev I.M., **Buyalo M.S.**, Bakshaev I.O., Portnoi E.L. Spectral properties of two sectional coupled asymmetric quantum well lasers // International Conference "Laser Optics 2012". St. Petersburg, Russia, Tech. Prog., 27 June – 1 July 2012.

22. Sobolev M.M., Gadzhiev I.M., Bakshaev I.O., Nevedomskiy V.N., **Buyalo M.S.**, Zadiranov J.M., Zolotareve R. V. Polarization Dependences of Electroluminescence and Absorption // 31-th International Conference on the Physics of Semicond. ICPS, 29 July – 3 August 2012.

23. Gadzhiev I.M., **Buyalo M.S.**, Egorov A.Y., Portnoi E.L. Absorption in laser structures with single and asymmetric double quantum wells // 21th Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology". St. Petersburg, Russia, 24-28 June 2013.

Список цитируемой литературы

1. Avrutin E.A., Marsh J.H., Portnoi E.L. Monolithic and multi-GigaHertz mode-locked semiconductor lasers: Constructions, experiments, models and applications // IEE Proc. - Optoelectron. 2000. Vol. 147, № 4. P. 251–278.
2. Hou L., Haji M., Marsh J.H. Mode locking at terahertz frequencies using a distributed Bragg reflector laser with a sampled grating. // Opt. Lett. 2013. Vol. 38, № 7. P. 1113–1115.
3. Hu Y., Gubenko A., Venus G., Gadzhiev I., Il'inskaja N., Nesterov S., Portnoi E., Dubov M., Khrushchev I. Gain switching of an external cavity grating-coupled surface emitting laser with wide tunability // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82, № 24. P. 4236.
4. Lianping Hou, Haji M., Marsh J.H. Monolithic Mode-Locked Laser With an Integrated Optical Amplifier for Low-Noise and High-Power Operation // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2013. Vol. 19, № 4. P. 1100808–1100808.
5. Bimberg D. Quantum dots for lasers, amplifiers and computing // J. Phys. D. Appl. Phys. 2005. Vol. 38, № 13. P. 2055–2058.
6. Ukhanov A. A., Stintz A., Eliseev P.G., Malloy K.J. Comparison of the carrier induced refractive index, gain, and linewidth enhancement factor in quantum dot and quantum well lasers // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 84, № 7. P. 1058.
7. Слипченко С.О., Винокуров Д.А., Пихтин Н.А., Соколова З.Н., Станкевич А.Л., Тарасов И.С., Алферов Ж.И. Сверхнизкие внутренние оптические потери в квантово-размерных лазерных гетероструктурах раздельного ограничения // Физика и Техника Полупроводников. Наука, 2004. Т. 38, №

12. P. 1477.
8. Avrutin E.A., Portnoi E.L. Suppression of Q-switching instabilities in broadened-waveguide monolithic mode-locked laser diodes // *Opt. Quantum Electron.* 2008. Vol. 40, № 9. P. 655–664.
 9. Gubenko A., Livshits D., Krestnikov I., Mikhrin S., Kozhukhov A., Kovsh A., Ledentsov N., Zhukov A., Portnoi E. High-power monolithic passively modelocked quantum-dot laser // *Electron. Lett.* 2005. Vol. 41, № 20. P. 29–30.
 10. Nikolaev V., Averkiev N., Sobolev M., Gadzhiyev I., Bakshaev I., Buyalo M., Portnoi E. Tunnel coupling in an ensemble of vertically aligned quantum dots at room temperature // *Phys. Rev. B.* 2009. Vol. 80, № 20. P. 1–10.
 11. Nikolaev V. V., Averkiev N.S. Relation between size dispersion and line shape in quantum dot ensembles // *Appl. Phys. Lett.* 2009. Vol. 95, № 26. P. 263107.
 12. Соболев М.М., Гаджиев И.М., Бакшаев И.О., Михрин В.С., Неведомский В.Н., Буяло М.С., Задиранов Ю.М., Портной Е.Л. Поглощение в лазерных структурах со связанными и несвязанными квантовыми точками в электрической поле при комнатной температуре // *ФТП.* 2009. Т. 43, № 4. P. 512–516.