

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Буяло Михаила Сергеевича

«Особенности пассивной синхронизации мод в полупроводниковых лазерах на наногетероструктурах», представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.10 - «Физика полупроводников»

Диссертационная работа Михаила Сергеевича Буяло посвящена методам создания высокоэффективных генераторов оптического излучения с частотой повторения импульсов, лежащей в диапазоне десятков гигагерц, на основе полупроводниковых наногетероструктур. В качестве подхода автором диссертации использована пассивная синхронизация мод в лазерных структурах нескольких типов, включая двухсекционные InGaAs/GaAs лазеры с одиночной квантовой ямой, двумя связанными асимметричными квантовыми ямами и лазеры с активной областью, представляющей собой набор близко расположенных слоев квантовых точек. В работе удачно сочетаются как разработка лазерных структур, в том числе многосекционной с монолитной интеграцией, так и исследование генерации сверхкоротких световых импульсов с высокой стабильностью следования без использования систем обратной связи.

Сочетание разработки лазерных структур, исследования их спектральных характеристик, реализации режима пассивной синхронизации мод с получением сверхкоротких импульсов и определяет значительность рассматриваемой диссертации.

### **Актуальность темы диссертации**

В последние годы наблюдается повышенный интерес к развитию элементной базы микроволновой фотоники, включающей генераторы сверхкоротких световых импульсов, образующих регулярные последовательности с межимпульсными интервалами менее ста пикосекунд. Получение таких импульсных последовательностей обеспечивает возможность передачи электромагнитного излучения гигагерцового диапазона с использованием оптической несущей частоты. Таким образом, после демодуляции сигнала, переданного, например, по оптическому волокну, может быть получено СВЧ излучение сантиметрового диапазона. Перспективным для решения этой задачи является использование компактных полупроводниковых лазеров, позволяющих интегрировать в одном кристалле генератор и модулятор излучения в едином технологическом процессе. Применение режима пассивной синхронизации мод в этом случае представляет особый интерес ввиду потенциальной простоты конструкции лазерного диода с такой синхронизацией и возможности получения высокочастотных импульсных последовательностей. Лазерные диоды на квантоворазмерных гетероструктурах уже завоевали рынок перспективных технологий ввиду их высокой эффективности, низких пороговых токов и высокой надежности. Однако, до последнего времени отсутствовали систематические исследования, направленные на реализацию режима пассивной синхронизации мод в подобных лазерах. В связи с этим можно заключить, что тема представленного М.С. Буяло диссертационного исследования «Особенности пассивной синхронизации мод в полупроводниковых лазерах на наногетероструктурах» является актуальной.

### **Содержание диссертационной работы**

Общий объем диссертации составляет 114 страницы, включая 47 рисунков и 2 таблицы. В него входят введение, 4 главы, заключение, список публикаций автора по теме диссертации и список цитируемой литературы, последний включает 137 наименований.

Во введении кратко освещено современное состояние проблемы, сформулированы цель исследования и обоснована его актуальность, охарактеризована научная новизна, приведены выносимые на защиту положения и представлена информация об апробации работы и публикациях автора диссертации.

Первая глава посвящена исследованию связи параметров волноводной и активной областей двухсекционной лазерной структуры и характеристик радиочастотной огибающей оптического спектра лазера, излучающего в режиме пассивной синхронизации мод. В этой части исследований автором диссертации выполнено сравнение лазеров с узким (0.4 микрона) и широким (1.7 микрона) волноводным слоем. Основным новым результатом, полученным М.С. Буяло в этой части работы, является выявление того, что увеличение ширины волновода в лазерных структурах с квантовыми ямами позволяет повысить стабильности импульсных последовательностей, генерируемых в режиме пассивной синхронизации мод. Автором диссертации показано, что вклад шумов, связанных спонтанным излучением и автомодуляцией, в этом случае уменьшается. Минимальная достигнутая при этом ширина радиочастотной составляющей спектра излучения при синхронизации мод составила ~ порядка 20000 Гц при частоте следования импульсов 12 ГГц.

Во второй главе М.С. Буяло представлены результаты исследования влияния рассогласования спектра насыщающегося поглотителя двухсекционного лазера и спектра излучения активной области лазера. В подобных структурах экситонного характера поглощения и сужения зон при накачке линия генерации соответствует краю спектральной области поглощения. Выбор обратного смещения, прикладываемого к поглощающей секции, позволил автору диссертации скомпенсировать существующее рассогласование и обеспечить эффективную пассивную синхронизацию мод за счет квантово-размерного Штарк-эффекта. Минимальная зарегистрированная при работе длительность импульса составила около 5пс, существенно, что эта длительность только на ~20% превышает предельно достижимую для измеренной

ширины спектра выходного излучения лазерной структуры. Автором также продемонстрировано в эксперименте, что использование структуры основе квантовых точек облегчает получение пассивной синхронизации мод, которая может быть обеспечена даже при отсутствии смещения. Это связано с уширением спектра, связанным с дисперсией квантовых точек по размеру.

Третья глава диссертации посвящена исследованию пассивной синхронизации мод в лазерах на основе двух, узкой (5.5 нм) и широкой (8.5 нм), квантовых ям. Соответствующая лазерная структура разработана и изготовлена в рамках работы. Особенностью этой структуры является пик оптического поглощения, связанный с переходом между основным электронным уровнем узкой квантовой ямы и основным уровнем тяжелых дырок широкой квантовой ямы (1.203 эВ). Зависимость спектрального положения этого пика от обратного смещения такова, что уже при смещении  $\sim 1$  В величина поглощения оказывается достаточной для развития режима пассивной синхронизации мод. В этом случае при обратном смещении 3 В также получены световые импульсы длительностью около 5 пс.

В четвертой главе приводятся результаты исследований лазерных структур с активной областью, представляющей собой 10 слоев InGaAs квантовых точек, разделенных GaAs барьерами толщиной по 6 нм и локализованных в GaAs волноводе толщиной 480 нм. В этом случае также исследовались двухсекционные лазеры. М.С. Буяло обнаружено, что в таких структурах в более длинноволновой области поглощение ТМ мод превышает поглощение мод ТЕ, а в области 1 эВ происходит «переключение», и ТЕ-поглощение начинает превалировать. Во всем диапазоне поглощения ТЕ и ТМ мод оказываются достаточно близкими, что связано с близким расположением слоев квантовых точек. Это представляет потенциальный интерес для создания поляризационно-независимых короткоимпульсных устройств. Интересно, что в подобных структурах из-за высокого поглощения реализуется режим жесткого возбуждения, выход из которого обеспечивается лишь при значительных

прямых смещениях поглощающей секции. Достигнутая в структурах с квантовыми точками длительность импульса составила около 10 пс.

В заключении приводятся сводка основных результатов диссертационной работы.

### **Основные научные результаты, полученные автором, и их новизна**

Все представленные в диссертационной работе решения экспериментальных задач являются новыми. Полученные результаты вносят существенный вклад в разработку полупроводниковых лазеров, генерирующих последовательности сверхкоротких импульсов. Наиболее важными новыми результатами, имеющими наибольшую научную и практическую значимость, на мой взгляд, являются:

- развитый подход к пассивной синхронизации мод в системе с двумя различающимися по ширине квантовыми ямами;
- реализованное повышение стабильности импульсных последовательностей, генерируемых лазерными структурами с одиночными квантовыми ямами режиме пассивной синхронизации мод, за счет увеличения ширины волноводной области.

### **Степень обоснованности научных положений, результатов и выводов**

Достоверность и обоснованность построенной модели определяется использованием современных подходов к разработке и исследованию лазерных структур и их сочетанием с высокоточными диагностическими методами. Достоверность полученных в работе результатов подтверждается совпадением ряда представленных в диссертации данных с известными из литературы.

### **Практическая значимость полученных автором результатов**

Практическая значимость полученных автором экспериментальных результатов обусловлена тем, что разработанные и исследованные структуры

могут найти применение в системах микроволновой фотоники и оптической связи.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Полученные в диссертации результаты представляют интерес для специалистов, работающих в области физики полупроводников, фотоники, оптической передачи и обработки информации.

Результаты диссертации могут быть использованы на предприятиях, связанных с разработкой и производством полупроводниковых лазеров, элементов систем оптической связи, в научных лабораториях соответствующего профиля и учебных организациях, осуществляющих подготовку специалистов в области физики конденсированного состояния. В частности, сюда относятся АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха», научно-производственная корпорация «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова» ГОИ им С.И. Вавилова, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики и др.

### **Оформление диссертации, публикации и апробация**

Диссертационная работа целесообразным образом структурирована, написана хорошим языком и оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ. Материалы диссертации опубликованы в девяти печатных работах, входящих в перечень ВАК. Основные результаты, представленные в диссертационной работе, многократно докладывались автором на научных конференциях. Содержание диссертации адекватно отражено в автореферате.

### **Замечания по диссертации**

1. В первой главе диссертации рассматриваются, помимо прочего, шумы, связанные со спонтанным излучением и автомодуляцией, т.е. спонтанной модуляцией добротности резонатора. Однако, в отличие от главы 3, где влияние модуляции добротности рассматривается достаточно подробно, в

первой главе информация о том, как именно этот эффект влияет на выходные характеристики лазера, как эти характеристики изменятся при переходе к режиму пассивной синхронизации мод, практически не представлена.

2. В двух из глав диссертации в качестве критерия эффективности синхронизации мод рассматривается параметр, представляющий собой произведение длительности импульса на ширину спектра излучения. Этот параметр, согласно материалам диссертации, принимает значение и меньшее, и большее единицы. В диссертации, однако, не обсуждается, какую именно информацию несет этот критерий. По-видимому, его уменьшение характеризует степень узости генерируемого светового импульса относительно обратной ширины излучаемого спектра, однако хорошо известно, что предельное значение этого произведения – единица, при этом предельно малая длительность импульса совпадает с обратной шириной спектра. Во всех остальных случаях импульс длиннее. В диссертации используется длительность импульса по некоторому уровню, но при этом отсутствует предельная оценка рассматриваемого критерия, что не позволяет оценить степень близости длительности импульса к минимально достижимой.
3. Помимо отмеченного, в диссертации имеются небольшие дефекты, связанные с употреблением жаргонизмов. Например, на стр. 36 написано «Излучение двухсекционного лазера фокусируется в параллельный пучок, который разделяется светоделителем на два плеча автокоррелятора, соответствующий неподвижной и подвижной задержкам», на схеме рис. 2.4 также имеются элементы, обозначенные словом «задержка», в тексте используется слово «пичок» (стр. 82), «Измеренный на таких лазерах коэффициент поглощения» (стр. 36) и др. Есть небольшое количество стилистических дефектов, например на стр. 17 - предложение «Еще одним подходом измерения джиттера является прямое исследование», на стр. 59 «В такой структуре удалось создать модулятор с соотношением 14:1» (скорее всего, имеется в виду контраст модуляции) и др.

Невзирая на хорошо оформленную, грамотно написанную и тщательно вычитанную, что сейчас не слишком частое явление, диссертацию, в ней присутствуют, также, небольшие погрешности в виде отсутствующих и излишних запятых, опечаток, не раскрыта аббревиатура IQE (место, где была выращена одна из исследованных структур).

Однако, отмеченные незначительные недостатки не влияют на основные результаты работы, отвечающие сформулированной во введении к диссертации цели исследований.

### **Заключение**

Резюмируя сказанное, можно констатировать, что диссертационная работа М.С. Буяло выполнена на высоком научном уровне и является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно и на высоком научном уровне. Полученные в работе результаты и выводы являются достоверными и обоснованными. Автореферат диссертации и публикации автора в высокорейтинговых научных изданиях полностью отражают научную новизну и содержание работы. Приведенные в работе научные результаты позволяют квалифицировать их как существенные для современной физики полупроводников. Работа имеет большое практическое значение для развития методов получения модулированного на высокой частоте светового излучения, что существенно для развивающихся в настоящее время систем сверхвысокочастотной оптической связи и микроволновой фотоники.

Тематика выполненных М.С. Буяло исследований соответствует паспорту специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников», а диссертационная работа М.С. Буяло по форме и содержанию соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением №842 Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. Автор диссертации Буяло Михаил Сергеевич заслуживает присужде-



ния ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников».

Официальный оппонент

Профессор кафедры физики и технологии наногетероструктур  
федерального государственного бюджетного учреждения  
высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследова-  
тельский Академический университет Российской академии наук»,  
д.ф.-м.н.

Липовский Андрей Александрович

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д.8, корпус 3, лит. А  
Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования  
и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академи-  
ческий университет Российской академии наук»,  
телефон: (812) 4488591, e-mail: [lipovsky@sbpau.ru](mailto:lipovsky@sbpau.ru)

Подпись руки А.А. Липовского заверяю:

Проректор по научной работе Санкт-Петербургского национального исследова-  
тельского Академического университета Российской академии наук

А.Е. Жуков