



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

**ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
ОКПО 02068574**

Политехническая ул., 29, С.-Петербург, 195251
Телефон (812) 297-20-95, факс 552-60-80
E-mail: office@spbstu.ru

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор
по научной работе

Виталий Владимирович Сергеев

«30» марта 2017 г.

Г отзыв ведущей организации Г

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию 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 Буяло М. С. посвящена исследованию режима пассивной синхронизации мод в лазерах с активной областью на основе квантовых ям и квантовых точек.

Актуальность темы диссертации определяется необходимостью создания компактных высокоэффективных генераторов высокочастотного излучения с высокой частотой повторения импульсов (несколько десятков гигагерц). Такие генераторы могут быть использованы для решения задач микроволновой фотоники, в том числе радиофотоники.

Генераторы высокочастотного излучения с высокой частотой повторения импульсов могут быть реализованы на основе лазеров, в которых осуществляется пассивная синхронизация мод. В связи с этим особый интерес представляет использование полупроводниковых лазеров, поскольку в монолитно-интегрированных лазерных диодах полосковой геометрии можно реализовать конструкцию, объединяющую генерирующую и модулирующую части на одном кристалле и создаваемую путем одних и тех же технологических процедур. При этом отпадает необходимость пространственного сопряжения оптических элементов и подведения высокочастотного электрического сигнала к лазеру. Достоинством полупроводникового лазера с пассивной синхронизацией мод также является возможность его интегрирования с другими оптоэлектронными элементами. При исследовании полупроводниковых лазеров интерес представляет также выбор активной

среды на основе квантовых ям и квантовых точек, поскольку такие лазеры имеют существенно отличающиеся динамические и спектральные характеристики.

В связи с этим исследование особенностей режима пассивной синхронизации мод в полупроводниковых лазерах и реализация этого режима в лазерах с различными типами активной среды является актуальной задачей с научной точки зрения. Наряду с этим изучение различных типов активной среды и конструкций полупроводниковых лазеров с синхронизацией мод открывает возможности для создания новых оптоэлектронных устройств и улучшения рабочих характеристик известных приборов.

В работе получен ряд важных результатов, имеющих научную новизну, среди которых можно отметить следующие:

При исследовании лазерных структур с квантовыми ямами с различной шириной волновода показано, что увеличение ширины волновода существенно улучшает стабильность режима пассивной синхронизации мод, что связано с уменьшением шумов. Шумы, связанные со спонтанным излучением, уменьшаются за счет уменьшения коэффициента оптического ограничения, а шумы, связанные с автопульсациями, подавляются из-за увеличения времени доставки инжектированных носителей к активной области.

Показано, что в структурах с квантовыми ямами для достижения поглощения, достаточного для реализации режима пассивной синхронизации мод, необходимо прикладывать значительные обратные смещения к поглощающей секции, так как поглощение сохраняет экситонный характер даже при больших приложенных обратных смещениях на поглотителе, а сдвиг края поглощения определяется квадратичным размерным эффектом Штарка. При этом в лазерах на квантовых точках, в которых имеется значительное неоднородное уширение, линия лазерной генерации находится в той спектральной области, где величины поглощения достаточно для синхронизации мод.

Исследованы спектры поглощения и генерации в лазерах, содержащих в активной области асимметричную двойную квантовую яму InGaAs/GaAs с барьером между ямами разной толщины. Показано, что в спектрах поглощения двойной квантовой ямы с туннельно-прозрачным барьером 2 нм присутствует дополнительный пик, обусловленный непрямым пространственным оптическим переходом между основным состоянием валентной зоны широкой ямы и основным состоянием зоны проводимости узкой ямы. При обратных смещениях около 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.

Достоверность результатов

Достоверность и надежность результатов обеспечивается использованием современных высокоточных методов молекулярно-пучковой эпитаксии и газофазной эпитаксии из металл-органических соединений при выращивании структур, использованием широкого набора экспериментальных методик, включающих просвечивающую электронную микроскопию, интегрально-абсорбционную спектроскопию, характеризацию последовательности оптических импульсов посредством автокорреляционных измерений, а также прямые измерения посредством высокоскоростных фотоприемников, осциллографов и

анализаторов спектра. Достоверность полученных результатов подтверждается также воспроизводимостью экспериментальных данных.

Научная и практическая значимость полученных результатов несомненна. Частично она уже была описана в предыдущих разделах отзыва. Отметим также следующее:

Предложено использовать структуры с широким волноводным слоем для улучшения стабильности следования импульсов в режиме синхронизации мод в лазерах с активной областью на основе квантовых ям. Такой способ может быть использован для создания стабильных генераторов импульсов в широком спектральном диапазоне.

Результаты изучения влияния эффекта Штарка на режимы работы лазера могут быть использованы для создания интегральных конструкций приборов, например, для реализации монолитно-интегрированного модулятора на эффекте Штарка с лазером с синхронизацией мод. Показано, что 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, являясь технологически доступным объектом.

Показано, что конструкция активной области монолитно-интегрированного лазера спектрального диапазона 1,06 мкм, содержащей две асимметричные туннельно-связанные квантовые ямы, позволяет осуществить генерацию пикосекундных импульсов света при малых обратных смещениях поглощающей секции около 1 В. Использование такой активной среды в двух- и многосекционных конструкциях лазеров может улучшить их надежность и срок службы.

Реализован режим пассивной синхронизации мод с частотой следования импульсов 12,5 ГГц в лазерах на основе вертикально-коррелированных слоев квантовых точек. Это даёт возможность создать быстродействующий поляризационно-независимый модулятор на основе структур с вертикально-коррелированными слоями квантовых точек.

По диссертации имеются следующие замечания.

1. В работе много внимания уделяется влиянию спектральных характеристик поглотителя на режимы генерации лазеров. При этом особенности, связанные с временными характеристиками практически не обсуждаются, хотя они должны оказывать существенное влияние на работу лазера с синхронизацией мод.

2. Интересным результатом работы является реализация режима пассивной синхронизации мод за счет вклада непрямого оптического пространственного перехода в поглощение на длине волны генерации в туннельно-связанных квантовых ямах. Зависимость коэффициента поглощения на длине волны генерации от электрического поля является немонотонной, что не объясняется в диссертации.

3. В работе исследовано несколько типов гетероструктур, однако все лазеры на их основе обладают длиной волны излучения в спектральном диапазоне вблизи 1,06 мкм. Применимы ли методики, разработанные в работе для других спектральных диапазонов, например, для представляющего большой практический интерес диапазона 1,55 мкм?

4. В спектрах люминесценции и поглощения структур, содержащих слои вертикально-коррелированных квантовых точек, был обнаружен вклад как ТЕ-, так и ТМ-поляризации. Присутствие ТМ-поляризации объясняется в работе оптическими переходами с участием тяжелых дырок, было бы желательно также обсудить природу поглощения и эмиссии излучения ТЕ-поляризации с оценкой влияния наличия в структуре множественных слоев связанных квантовых точек.

5. В работе имеются элементы небрежного оформления. Так, например, часто используются аббревиатуры без их расшифровки, спектры приводятся в зависимости от энергии кванта и от длины волны, что затрудняет их сравнение. Также затруднительно сравнивать различные графики, на которых в качестве параметра различных кривых используются напряжение в вольтах и электрическое поле в кВ/см.

Указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Результаты работы полностью и своевременно опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России прошли апробацию в форме докладов и обсуждений на российских и международных конференциях и семинарах. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертационная работа «Особенности пассивной синхронизации мод в полупроводниковых лазерах на наногетероструктурах» является завершённым научным исследованием, соответствует профилю Совета Д 002.205.02 (специальность 01.04.10 – физика полупроводников), полностью отвечает требованиям ВАК при Минобрнауки России, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.10 — физика полупроводников, а её автор Буяло Михаил Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертационная работа Буяло М. С. заслушана и обсуждена на научном семинаре кафедры "Физика полупроводников и нанoeлектроника" института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого» 30 марта 2017.

Отзыв заслушан и утвержден на заседании кафедры "Физика полупроводников и нанoeлектроника" 30 марта 2017 г., протокол № 7.

Старший научный сотрудник кафедры "Физика полупроводников и нанoeлектроника",
кандидат физико-математических наук
тел. +7 (812) 552 96 71
e-mail: mvin@spbstu.ru

Максим Яковлевич Винниченко

Заведующий кафедрой
"Физика полупроводников и нанoeлектроника",
профессор, доктор физико-математических наук
тел. +7 (812) 552 96 71
e-mail: dmfir@rphf.spbstu.ru

Дмитрий Анатольевич Фирсов

Секретарь кафедры
"Физика полупроводников и нанoeлектроника"
тел. +7 (812) 552 96 71
e-mail: iischipacheva@mail.ru

Ирина Игоревна Щипачева