



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)



Проректор по научной работе

Д.В. Гайворонский

27 апреля 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию
Дубинкина Ильи Николаевича

«НЕЛИНЕЙНЫЕ И СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ЛАЗЕРАХ НА КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ»

представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.21 – Лазерная физика

Диссертационная работа И.Н. Дубинкина посвящена теоретическому исследованию динамических режимов работы полупроводниковых лазеров на квантовых точках в режиме одновременной генерации из основного и первого возбужденного состояний квантовых точек с инъекцией внешнего оптического сигнала.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена тем, что полупроводниковые лазеры на квантовых точках имеют широкое применение в биомедицинских технологиях, оптической когерентной томографии, спектроскопии, оптических системах передачи информации и метрологии. Особое внимание в работе уделено динамическим режимам возбужденных колебаний первого и второго рода, возникновение которых в лазерах на квантовых точках имеет ряд существенных особенностей. Исследование работы полупроводниковых лазеров в указанных режимах представляет существенный интерес с точки зрения применения в оптических нейроморфных вычислительных системах, основным компонентом которых является полупроводниковый лазер.

Оценка содержания диссертационной работы и полученных результатов

Диссертационная работа изложена на 122 страницах, содержит 34 рисунка, 6 таблиц и список использованной литературы, включающий 148 наименований. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и 1 приложения, написана последо-

вательно, логично, доступным для понимания языком. Оформление диссертации соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатской диссертации.

Во *введении* приведена актуальность диссертационной работы, поставленные цели и задачи, научная новизна результатов исследования, теоретическая и практическая значимость работы, основные результаты и положения, выносимые на защиту, апробация и достоверность полученных результатов, личный вклад автора диссертации.

В *первой главе* диссертации даны основные определения, приводится обзор развития полупроводниковых лазеров и анализ полупроводниковых сред на основе квантовых точек, перечислены их преимущества. Сформулированы понятия возбужденных колебаний первого и второго рода, дана их характеристика в рамках теории бифуркаций.

Проведен обзор работ по исследованию нелинейной динамики в полупроводниковых лазерах с инъекцией внешнего оптического сигнала, проанализированы основные экспериментальные и теоретические результаты. На основе проведенного анализа сделан вывод о целесообразности исследования динамических режимов работы лазера в режиме одновременной генерации из основного и первого возбужденного состояний квантовых точек с инъекцией внешнего оптического сигнала.

Вторая глава диссертации посвящена построению математической модели лазера на квантовых точках в режиме одновременной ("симультанной" по терминологии авторов) генерации из основного и первого возбужденного состояний с инъекцией внешнего оптического сигнала. Рассмотрены особенности одновременной генерации на двух длинах волн, приведены экспериментальные результаты, на основе которых принят ряд предположений, использованных при построении модели. Проведена оценка параметров полупроводниковой активной среды на основе квантовых точек, которые используются при теоретическом анализе динамических режимов генерации лазера в последующих главах.

В *третьей главе* даны результаты проведенного автором бифуркационного анализа работы лазера на квантовых точках в режиме одновременной генерации из основного и первого возбужденного состояний с инъекцией внешнего оптического сигнала в режиме возбужденных колебаний второго рода. Показано ключевое влияние медленных тепловых релаксаций на возникновение данного режима, определена последовательность бифуркаций, определяющих динамику генерации, и сделан вывод о возможности управления параметрами указанного режима.

В *четвертой главе* автор исследует работу лазера на квантовых точках в режиме одновременной генерации из основного и первого возбужденного состояний с инъекцией внешнего оптического сигнала в режиме возбужденных колебаний первого рода. Режим проанализирован в рамках теории бифуркаций, также приводятся данные статистического анализа. Сделан вывод о существовании режима возбужденных колебаний первого рода с ограниченным изменением фазы, не подчиняющимся уравнению Адлера.

Заключение содержит основные результаты работы.

Полезным является *Приложение*, в котором кратко рассмотрены некоторые типы бифуркаций.

На наш взгляд, **наиболее значимыми результатами работы являются:**

1. Развита математическая модель лазера на квантовых точках, работающего в режиме одновременной генерации на двух длинах волн. Модель учитывает влияние фазово-амплитудного взаимодействия, вызванного неоднородным уширением;
2. Продемонстрировано существование режимов возбужденных колебаний I и II рода в лазере на квантовых точках с инъекцией внешнего оптического сигнала;
3. Продемонстрирована возможность управления параметрами режима возбужденных колебаний II рода в лазере на квантовых точках с инъекцией при изменении амплитуды инжектируемого сигнала внешнего оптического поля.

Оценка новизны и достоверности

В диссертации разработана математическая модель лазера на квантовых точках, одновременно излучающего из основного и первого возбужденного состояний, с инъекцией внешнего оптического сигнала. В результате численного анализа обнаружены новые динамические режимы работы данного лазера. Автором впервые продемонстрирована возможность контроля параметров режима возбужденных колебаний II рода, который является перспективным для использования, в том числе, в оптических системах нейроморфных вычислений.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием общепринятых методов проведения численного анализа, а также экспериментальными данными, проведенными на современном оборудовании и подтверждающими основные выводы работы. Материалы диссертационного исследования были апробированы на ведущих международных конференциях, опубликованы в 7 статьях в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science, в том числе 2 статьи в журнале Optics Letters, 1 статья в журнале Scientific Report и 4 публикации в сборниках тезисов конференций.

Практическая значимость работы и рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты диссертационной работы обладают теоретической и практической значимостью. Целесообразно использовать разработанную автором математическую модель лазера на квантовых точках, одновременно излучающего из основного и первого возбужденного состояний, при создании новых лазеров на квантовых точках и систем на их основе для применения в оптических линиях связи, спектроскопии и оптической когерентной томографии. Кроме этого, исследованные в работе особенности динамики возбужденных колебаний могут быть использованы в научных и технических приложениях нейроморфных исследований в медицине и биологии.

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы к использованию в научно-исследовательских организациях, занимающихся разработками полупроводниковых лазеров и систем связи, таких как Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет РАН, НТЦ «Микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН», «Сколковский институт науки и технологий», Институт автоматизации и электрометрии СО РАН и других.

В качестве замечаний к представленной И.Н. Дубинкиным диссертации можно отметить следующие:

1. Принципиальной особенностью лазеров на квантовых точках является неоднородное уширение энергетических уровней вследствие самоорганизованного роста активного слоя. В то же время диссертантом в расчетах используется модель системы дискретных уровней. Необходимо проанализировать, как учет неоднородного уширения повлияет на итоговые результаты расчетов и адекватность описания работы реального лазера.

2. Отмечается существенная роль вариаций температуры при возникновении возбужденных колебаний II рода. Однако ее влияние на распределение концентрации носителей заряда по уровням не принимается во внимание, а для количественного описания изменения показателя преломления активной среды (резонатора) используется линейная зависимость от температуры. Следует рассмотреть условия применимости указанного предположения.

3. В модели лазера на квантовых точках используются уравнения каскадной релаксации носителей заряда, однако недостаточно полно описаны приближения, в рамках которых данные уравнения справедливы, в частности, не рассматривается Оже-рекомбинация.

4. В таблице 2 (с. 64) приведен некорректный термин “ширина запрещенной зоны для электронов”, причем единица измерения этой “ширины” отсутствует. Правильно говорить “глубина залегания энергетического уровня”. Далее в этой же таблице “ширина запрещенной зоны для дырок” взята равной 0.

Указанные замечания не снижают высокой оценки диссертации И.Н. Дубинкина, а направлены на более полное раскрытие полученных в работе оригинальных результатов.

Заключение

Подводя итог вышесказанному, можно утверждать, что диссертационная работа И.Н. Дубинкина представляет собой законченное научное исследование, выполненное на актуальную тему, характеризующееся новизной и практической значимостью результатов. Выводы диссертационной работы основаны на результатах, полученных автором лично.

В автореферате сформулированы актуальность, цель и задачи работы, описаны использованные методы исследования, сформулированы основные положения и результаты, выносимые на защиту, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведена информация о личном вкладе автора, апробации работы, структуре и объеме диссертации, кратко изложено содержание работы. В целом автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Материалы диссертации соответствуют паспорту специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Диссертационная работа Дубинкина И.Н. на тему **«НЕЛИНЕЙНЫЕ И СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ЛАЗЕРАХ НА КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ»** соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 28.08.2017), а ее автор Дубинкин Илья Николаевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Отзыв составил:

доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры микро- и наноэлектроники
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
тел.: (812) 234-31-64



Зубков Василий Иванович

e-mail: vizubkov@mail.eltech.ru

Работа заслушана и обсуждена 25 апреля 2018 г. на объединенном семинаре кафедр факультета электроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Отзыв утвержден на заседании научно-технической комиссии факультета электроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», протокол № 2 от 26 апреля 2018 г.

Декан факультета электроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
доктор физ.-мат. наук, профессор



А.В. Соломонов

Зам. председателя НТК
факультета электроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», к.т.н.



Д.Д. Авров

Адрес ведущей организации:
197376, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5.
Тел. 8(812) 234-15-43
e-mail: dvg@etu.ru

