

На правах рукописи

Колыхалова

Колыхалова Екатерина Дмитриевна

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ
ТОЧЕК

Специальность 01.04.10 – Физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» на кафедре оптоэлектроники и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук в лаборатории интегральной оптики на гетероструктурах

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Соколовский Григорий Семенович

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук Калитеевский Михаил Алексеевич,
федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки
«Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет
Российской академии наук», главный научный сотрудник.

Кандидат физико-математических наук Алексеев Алексей Николаевич,
Закрытое Акционерное Общество «Научное и техническое оборудование»,
генеральный директор

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится “30” ноября 2016 года в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте www.eltech.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан “29” сентября 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.04
доктор физико-математических наук



В. А. Мошников

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Полупроводниковые лазеры на основе квантовых точек (КТ) в настоящее время являются наиболее современным и динамично развивающимся классом лазерных излучателей. Их преимуществами является чрезвычайно малая пороговая плотность тока [1], низкая чувствительность к температурным эффектам [2] и широкая полоса модуляции [3]. Дальнейшее их развитие дает значительные перспективы реализации полупроводникового лазера без охлаждения, без изоляционного материала и с возможностью прямой токовой модуляции. Разработка технологии получения самоорганизованных квантовых точек в процессе эпитаксиального роста позволила достигнуть значительного прогресса в создании ультракомпактных полупроводниковых лазеров на их основе, сопоставимых по многим выходным параметрам с лучшими лазерами на основе квантовых ям и демонстрирующих пороговые токи на уровне долей миллиампер [4].

В настоящее время огромный интерес представляет импульсный режим генерации, так как в этом случае удается исключить проявление негативных температурных эффектов даже при сверхвысоких уровнях накачки и получить выходную мощность на порядок большую, чем при постоянной накачке. Это создает условия для развития т.н. «прямых» применений полупроводниковых лазеров, включая обработку материалов, фотодепеляцию, лазерную липосакцию и генерацию белков теплового шока. Поэтому, на сегодняшний день ключевой задачей является повышение выходной мощности и увеличение быстродействия КТ-лазеров при импульсной накачке, что невозможно без детального изучения их динамических характеристик.

Цель работы.

Целью данной работы являлось исследование динамических характеристик полупроводниковых лазеров на основе квантовых точек при накачке мощными токовыми импульсами в десятки раз превышающими пороговое значение, объяснение механизмов задержки включения и срыва генерации в таких лазерах, а также численное моделирование этих процессов.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Обнаружено различие зависимости задержки включения лазеров на основе квантовых ям в области больших и малых токов накачки, а именно, наблюдается соответственно гиперболическая и логарифмическая зависимость задержки включения от тока накачки.
2. За счет сравнения динамики включения лазеров на основе квантовых точек и квантовых ям, показано наличие неисчезающей компоненты задержки включения в лазерах на основе квантовых точек, не зависящей от тока накачки. Данный эффект не наблюдается в лазерах с объемной активной областью и в лазерах на основе квантовых ям.
3. Обнаружено существенное различие задержек включения основного и возбужденного состояния в лазерах на основе квантовых точек при двухуровневой генерации. При плавном включении импульса накачки время между включением основного и возбужденного состояния может достигать нескольких наносекунд.
4. Показано, что динамика включения основного и возбужденного состояний КТ-лазера различна и зависит от скорости нарастания переднего фронта токового импульса. В связи с этим в области малых и больших токов накачки задержка между включением основного и возбужденного состояний обратно пропорциональна скорости нарастания переднего фронта токового импульса и ее корню соответственно.

5. Показано, что динамическое изменение альфа-фактора ведет к значительному изменению формы импульса лазера на КТ, что приводит к срыву генерации лазера после короткого начального импульса

Практическая значимость заключается в следующем:

1. Описан механизм возникновения неисчезающей компоненты задержки включения в лазерах на основе квантовых точек, приводящий к принципиальному ограничению скорости включения КТ-лазера.

2. Показано, что медленное нарастание переднего фронта импульса тока накачки приводит к задержке включения возбужденного состояния КТ-лазера, излучающего одновременно через основное и возбужденное состояния, а временной интервал между включением ES и GS зависит от скорости нарастания тока накачки и может достигать нескольких наносекунд.

3. Было показано, что вблизи порога возбужденного состояния КТ-лазера возникают точки бифуркации, что приводит к нестабильности формы выходного оптического импульса в виде высокоамплитудных затухающих колебаний.

4. Выявлено, что при накачке импульсами тока длительностью несколько десятков наносекунд с плавным нарастанием переднего фронта динамическое изменение альфа-фактора при приближении к порогу генерации с возбужденного состояния может приводить к срыву генерации длительностью от нескольких наносекунд до нескольких десятков наносекунд.

Научные положения, выносимые на защиту

1. В лазерах на основе квантовых точках существует неисчезающая компонента задержки включения, не зависящая от тока накачки. Данный эффект не наблюдается в лазерах на основе квантовых ям.

2. При двухуровневой генерации при плавном включении тока накачки (при длительности переднего фронта импульса накачки порядка 5 нс),

основное и возбужденное состояния в лазере на основе квантовых точек включаются не одновременно.

3. Задержка включения как основного, так и возбужденного состояний в лазере на основе квантовых точек зависит от величины тока накачки. Задержка включения возбужденного состояния относительно основного может достигать нескольких наносекунд и уменьшается с ростом тока накачки.

4. При накачке короткими импульсами тока высокой амплитуды динамическое изменение альфа-фактора при приближении к порогу генерации возбужденного состояния приводит к значительному изменению формы импульса лазера на основе квантовых точек и может приводить к срыву генерации.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на конференции по физике и астрономии для молодых учёных Санкт-Петербурга и Северо-Запада «Физика.СПб» (Санкт-Петербург, 26-27 октября 2011 г., 24-25 октября 2012 г., 23-24 октября 2013 г.), Симпозиуме «Полупроводниковые лазеры: физика и технология» (Санкт-Петербург, 13-16 ноября 2012 г.), International Conference Laser Optics (St Petersburg, Russia, 30 June-4 July 2014), International Conference Photonics West (San Francisco, USA, 7-12 February 2015), Int. Conf. on Lasers and Electro-Optics CLEO-Europe (Germany, Munich, 21-25 June 2015.)

Публикации

По результатам исследований, выполненных в диссертационной работе, опубликовано 5 статей, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитированной литературы. Объем диссертации составляет 141 страницу, в том

числе 40 рисунков на 40 страницах и 3 таблицы. Список цитированной литературы включает в себя 124 наименования.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определена цель работы, её научная новизна и практическая значимость, приведены выносимые на защиту научные положения и кратко изложено содержание диссертации.

Глава 1 Основные характеристики и принципы работы полупроводниковых лазеров с активной областью на основе квантовых точек.

Параграф 1.1 Посвящен описанию обусловленных квантовомеханическими эффектами преимуществ лазеров на основе квантовых точек (КТ).

Аракава и Сакаки еще в 80-е годы обратили внимание на то, что использование в качестве активной области лазера материалов, в которых распространение носителей ограничено во всех трех направлениях (квантовых точек), может привести к повышению температурной стабильности приборов [2]. Затем Асада показал, что использование структур на основе квантовых точек в качестве активной области лазеров может привести к значительному снижению порогового тока таких устройств по сравнению с лазерами на основе квантовых ям (КЯ) [1]. Однако, потребовалось больше десятилетия на то, чтобы улучшить качество КТ-структур до уровня возможности изготовления приборов на их основе. Прорывом стала разработка технологии получения самоорганизованных квантовых точек в процессе эпитаксиального роста [4]. Это позволило изготовить КТ-лазеры, сопоставимые по многим выходным параметрам с лучшими КЯ-лазерами, например, высокомошные лазеры с длиной волны излучения 980 нм, РОС лазеры на 1,3 мкм и лазеры на 1,55 мкм на основе InP. Также очень многообещающим является

использование КТ-материалов для оптических усилителей диапазона 1,3 мкм и 1,55 мкм.

Параграф 1.2 описано явление двухуровневой генерации в КТ-лазерах. При низких уровнях токовой накачки генерация происходит через оптические переходы, соответствующие основному энергетическому состоянию квантовых точек (GS) (около 1.3 мкм в точках InAs/InGaAs), а затем, при значительно более высоких уровнях накачки в лазерном спектре появляется линия, соответствующая первому возбужденному состоянию (ES). Эта линия обычно смещена на $\sim(60-70)$ мэВ в коротковолновую область относительно GS. Этот эффект может быть достигнут, поскольку, плотность носителей в состояниях, не резонансных излучающим модам, не остается постоянной на значении порога GS, а растет с током, позволяя другим продольным модам, через оптические переходы возбужденного состояния, достичь пороговых условий.

Параграф 1.3 посвящен описанию фактора уширения линии (α -фактора) в КТ-лазере. Было показано, что различные экспериментальные методики, используемые для измерения α -фактора полупроводниковых КТ-лазеров, в случае, когда прибор работает в режиме насыщения населенности квантовых точек, могут давать значительное расхождение результатов, поскольку в этом режиме важную роль играет эффект электронной плазмы. Например, анализ усиленного спонтанного излучения (УСИ) может дать $\alpha = 1,5$ при $J = 0,4 J_{th}$, в то время, как анализ FM/AM ответа того же прибора показывает $\alpha = 28$ при $J = 2 J_{th}$ [5]. Отсюда можно сделать вывод, что следует быть аккуратным при работе с α -фактором материалов и приборов на основе квантовых точек.

Глава 2 Задержка включения полупроводниковых лазеров на основе квантоворазмерных гетероструктур

Параграф 2.1 посвящен сравнению задержки включения полупроводникового лазера на основе квантовых точек и квантовых ям. К рассмотрению процесса включения лазеров на основе квантовых ям и с

объемной активной областью можно подойти двумя способами. Первый из них применим при малых токах накачки и предполагает, что включения лазера произошло после достижения концентрации носителей порогового значения. В решении не учитывается стимулированное излучение, а в допороговом режиме работы плотность фотонов считается равной нулю.

Для высоких токов ситуация несколько меняется и следует использовать подход, при котором момент включения лазера определяется как момент достижения некоторого фиксированного значения интенсивности света. Такое определение более удобно с точки зрения экспериментатора и учитывает вынужденное излучение.

Оба подхода показывают, что задержка включения КЯ-лазера стремится к нулю с ростом тока накачки, в первом случае как логарифм тока, а во втором гиперболически.

В случае, когда активной областью лазера являются квантовые точки, в силу сугубо ограниченного количества разрешенных состояний, важную роль начинает играть влияние степени заполненности точек на захват носителей. Численное решение системы скоростных уравнений, учитывающей двухэтапный процесс захвата носителей на точку через смачивающий слой, показывает наличие в решении исчезающей компоненты, не зависящей от тока накачки, иными словами включение лазера не может произойти быстрее определенного момента, определяемого скоростью захвата носителей на точку. Это контрастирует с выводом о том, что в лазерах на квантовых ямах задержка включения является убывающей функцией тока накачки.

Параграф 2.2 посвящен описанию экспериментов по исследованию задержки включения полупроводниковых квантоворазмерных гетеролазеров. Для исследования задержки включения были использованы полосковые гетеролазеры на основе GaAs с квантовыми точками InAs в качестве активной области. Накачка производилась короткими импульсами тока длительностью 10 нс и амплитудой до 1.5 А.

Результаты экспериментов подтвердили, что поведение задержек включения лазеров на КЯ и КТ различно. Время включения КЯ-лазера обратно пропорционально величине тока накачки за вычетом порогового тока, что является следствием медленного роста числа носителей. Экспериментальные данные по КТ-лазерам, напротив, явно указывают на наличие неисчезающей задержки включения в широком диапазоне высоких токов накачки.

Глава 3 Задержка включения возбужденного состояния полупроводникового лазера на квантовых точках

Параграф 3.1 посвящен описанию экспериментов, в ходе которых наблюдалось включение КТ-лазеров при одновременной генерации через основное и возбужденное состояния. Для исследования задержки между включениями GS и ES были использованы полосковые InAs/GaAs КТ-гетеролазеры. Накачка производилась короткими импульсами тока длительностью 30 нс, амплитудой до 2 А и длительностью переднего фронта 5 нс. Детектировалось как полное выходное излучение, так и излучение только ES с помощью узкополосного спектрального фильтра. Задержка определялась как разница во времени между началом экспоненциального роста выходной мощности излучения через GS и через ES и достигала нескольких наносекунд. Задержка уменьшалась обратно пропорционально амплитуде импульса накачки при малых токах и обратно пропорционально корню из амплитуды импульса накачки при высоких токах накачки.

Параграф 3.2 посвящен теоретическому рассмотрению задержки между включением основного и возбужденного состояний в КТ-лазере. Сложная динамика носителей внутри точек несет в себе трудности при моделировании одновременной генерации в КТ-лазерах. Учитывая различные физические воздействия, все модели считают появление одновременной генерации результатом стационарных бифуркационных переходов. В нашей задаче мы сталкиваемся с проблемой двух следующих друг за другом устойчивых точек

бифуркации, в которых GS и ES состояния последовательно становятся активными.

Анализ системы скоростных уравнений, учитывающей возможность двухуровневой генерации, показал, что бифуркационные переходы через GS и ES разнятся и их нужно рассматривать отдельно. Время бифуркационного перехода GS следует закону $\varepsilon^{-1/2}$, тогда как медленный проход через точку бифуркации ES описывается законом ε^{-1} , где ε – отношение амплитуды импульса тока накачки к длительности переднего фронта. Этим объясняется немонотонная зависимость задержки включения GS-ES, обнаруженная в эксперименте.

Глава 4 Динамическое взаимодействие между основным и возбужденным состояниями в полупроводниковом лазере на квантовых точках

Параграф 4.1 посвящен описанию влияния особенностей релаксации носителей на работу КТ-лазера при генерации через два состояния. В непрерывном режиме порог генерации возбужденного состояния лазера достигается при высоких уровнях накачки и, при дальнейшем повышении тока, выходное излучение с ES начинает преобладать за счет переходов с основного состояния. Это приводит к тому, что при еще более высокой накачке остается только излучающая мода ES. Режим работы лазера существенно зависит от длины резонатора. Обычно, длинные (> 1 мм) приборы излучают только с основного состояния, приборы длиной ≈ 1 мм работают одновременно на основном и возбужденном состояниях, а короткие приборы (< 1 мм) излучают только с возбужденного состояния при всех токах накачки. Чтобы объяснить экспериментальные результаты, модель скоростных уравнений как для основного, так и для возбужденного состояний предполагает каскадный путь релаксации носителей в точку: сначала носители попадают из смачивающего слоя на ES, а затем происходит релаксация на GS.

Однако недавние эксперименты с InGaAs/GaAs КТ-полупроводниковыми оптическими усилителями, обладающие большой

разрешающей способностью по времени, указывают на существование непосредственного пути захвата носителей из смачивающего слоя на основное состояние при электрической накачке КТ-структур [6]. Заключение основано на том, что наблюдается запаздывающее уменьшение населенности ES при нелинейном усилении импульса GS, которое несовместимо с каскадным процессом захвата.

В параграфе 4.2 описано экспериментальное исследование различных режимов работы InAs/GaAs КТ-лазера в зависимости от величины амплитуды токового импульса (до 2 А). Эксперименты показали, что в работе КТ-лазера можно выделить три режима в зависимости от величины тока накачки. В диапазоне низких (до ~ 0.4 А) токов лазер излучает только через уровень GS, а ватт-амперная характеристика строго линейна. Это свидетельствует о каскадном способе захвата носителей в точку. Для высоких токов (> 1.2 А) ватт-амперные характеристики как для GS, так и для ES, почти линейны с постепенным одновременным ростом интенсивности при увеличении тока накачки. Аналогично диапазону низких токов, лазер не показывает какой-либо динамической нестабильности, а выходной импульс повторяет контур электрического импульса. Каскадный способ захвата носителей на точку не согласуется с данными наблюдениями, которые могут быть объяснены только с помощью преобладания прямого захвата на уровень GS. Для среднего диапазона токов (выше порога ES, но < 1.2 А) происходит взаимодействие между каскадным и прямыми способами релаксации носителей, которое приводит к возбуждению высокоамплитудных релаксационных колебаний. Наблюдаемые колебания появляются одновременно на GS и ES и всегда затухают, но могут быть как в фазе, так и в противофазе в зависимости от температурных условий.

Глава 5 Срыв генерации в полупроводниковом лазере на основе квантовых точек.

Параграф 5.1. посвящен описанию экспериментального наблюдения срыва генерации лазера на квантовых точках. Накачка InAs/GaAs КТ-лазеров осуществлялась импульсами тока амплитудой от 0 до 2 А, длительностью 30 нс и передним фронтом ~ 5 нс, с частотой повторения 100 кГц. Раздельная регистрация излучения с GS и ES осуществлялось путем включения в оптическую схему брегговского фильтра, пропускавшего коротковолновую и отражавшего длинноволновую часть излучения. Форма выходного импульса лазера наблюдалась в зависимости от тока накачки.

Было выявлено, что при низких токах, которые соответствуют генерации с основного уровня, форма оптического импульса повторяет форму импульса тока. При более высоких токах, при появлении в спектре возбужденного состояния, форма оптического импульса становится нестабильной. Нестабильность наиболее выражена вблизи порога возбужденного состояния. Выходная мощность сначала медленно увеличивается, а затем резко падает, и лазер практически выключается. Важно то, что время, необходимое для возобновления генерации, растет с увеличением амплитуды импульса накачки. Так, при импульсе тока накачки амплитудой 2 А, время от выключения до возобновления генерации может превышать 10 нс.

Параграф 5.2 посвящен теоретическому описанию срыва генерации КТ-лазера на основе системы скоростных уравнений с задержкой. Изменения значения альфа-фактора между первым (GS) и вторым (ES) порогами вызванного насыщением GS и изменением показателя преломления. Также учитывалось, что в процессе формирования импульсов при высоких токах важную роль играет плавное увеличение тока накачки.

Результаты моделирования хорошо воспроизводят экспериментальные наблюдения. Аналитическое и численное исследование бифуркационных

диаграмм демонстрирует механизм биения между близко расположенными резонаторными модами, которое порождает точки бифуркации Хопфа, вызывающие быстрые переходы между резонаторными модами и связанный с этим провал в выходной мощности. Иными словами, наблюдаемый эффект срыва лазерной генерации объясняется острой динамической деформацией модовой структуры, вызванной изменением фазово-амплитудной связи (ростом α -фактора) в непосредственной близости от порога ES.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. При исследовании задержки включения полупроводниковых лазеров на основе квантовых точек, генерирующих с основного состояния, было показано, что нелинейное взаимодействие между точками и смачивающим слоем лазера оказывает большое влияние на динамику включения в связи с конечным временем захвата носителей в точку. Это приводит к неисчезающей задержке включения даже при высоких уровнях токовой накачки, что хорошо согласуется с результатами эксперимента. Данный эффект не наблюдается в лазерах на основе квантовых ям.
2. Было показано, что плавное включение тока накачки приводит к задержке включения возбужденного состояния КТ-лазера, излучающего через основное и возбужденное состояния, а временной интервал между включением основного (GS) и возбужденного (ES) состояний записывается как функция скорости изменения тока накачки, причем бифуркационные переходы GS и ES имеют различный характер, что приводит к немонотонному уменьшению задержки включения ES относительно GS с ростом тока накачки.
3. Было показано, что при работе КТ-лазера через основное и возбужденное состояния существуют три различных режима работы в зависимости от тока накачки. Для диапазона низких и высоких токов накачки преобладает либо каскадный, либо прямой способ релаксации, а выходной импульс остается стабильным. Для среднего диапазона токов наблюдаются

высокоамплитудные затухающие релаксационные колебания. Динамическое поведение лазера является результатом взаимодействия между обоими способами релаксации.

4. Было обнаружено, что плавное нарастание переднего фронта импульса накачки может существенно повлиять на выходной импульс в лазерах на квантовых точках, в частности, привести к провалу выходной мощности и резким изменениям формы выходного импульса. Данный эффект объясняется изменением во времени фазо-амплитудной связи (α -фактора). Моделирование на основе дифференциальных уравнений с задержкой воспроизводит экспериментальные наблюдения.

Публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:

- [A1] Sokolovskii, G. S. Nonvanishing turn-on delay in quantum dot lasers / G. S. Sokolovskii, V. V. Dudelev, E. D. Kolykhalova, A. G. Deyagin, M. V. Maximov, A. M. Nadtochiy, V. I. Kuchinskii, S. S. Mikhrin, D. A. Livshits, E. A. Viktorov, T. Erneux // *Applied Physics Letters*. – 2012. – v. 100. – p. 081109.
- [A2] Sokolovskii, G. S. Turn-on delay of QD and QW laser diodes: What is the difference? / G.S.Sokolovskii, V.V.Dudelev, E.D.Kolykhalova, A.G.Deryagin, M.V.Maximov, A.M.Nadtochiy, V.I.Kuchinskii, S.S.Mikhrin, D.A.Livshits, E.A.Viktorov, T.Erneux // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2013. – v.461. – p. 012030.
- [A3] Sokolovskii, G. S. Dynamical interplay between ground and excited states in quantum dot laser / G. S. Sokolovskii, V. V. Dudelev, E. D. Kolykhalova, A. G. Deryagin, A. Bakoz, I. I. Novikov, M. V. Maximov, A. E. Zhukov, V. M. Ustinov, V. I. Kuchinskii, W. Sibbett, E. U. Rafailov, E. A. Viktorov, T. Erneux // *Int. Conf. Laser Optics (St Petersburg, Russia, 30 June-4 July 2014.)* – 2014. – TuR3-04.

- [A4] Sokolovskii, G. S. Impact of the carrier relaxation paths on two-state operation in quantum dot lasers / G. S. Sokolovskii, V. V. Dudelev, E. D. Kolykhalova, K. K. Soboleva, A. G. Deryagin, I. I. Novikov, M. V. Maximov, A. E. Zhukov, V. M. Ustinov, V. I. Kuchinskii, W. Sibbett, E. U. Rafailov // Proceedings of SPIE. – 2015. – v. 9357. – p. 9357-21.
- [A5] Sokolovskii, G. S. Dropout dynamics in pulsed quantum dot lasers due to mode jumping / G. S. Sokolovskii, E. A. Viktorov, M. Abusaa, J. Danckaert, V. V. Dudelev, E. D. Kolykhalova, K. K. Soboleva, A. G. Deryagin, I. I. Novikov, M. V. Maximov, A. E. Zhukov, V. M. Ustinov, V. I. Kuchinskii, W. Sibbett, E. U. Rafailov, T. Erneux // Applied Physics Letters. – 2015. – v. 106. – p. 261103.

Публикации в других изданиях:

- [K1] Колыхалова Е. Д. Влияние насыщения усиления на мощностные и динамические характеристики полупроводниковых лазеров с квантово-размерной активной областью / Е. Д. Колыхалова, В. В. Дюделев, М. В. Максимов, Г. С. Соколовский // Тезисы докладов конференции по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-Запада Физика.СПб (Санкт-Петербург, 26-27 октября 2011 г.) – 2011. – С. 69 – 70.
- [K2] Колыхалова Е. Д. Неисчезающая задержка включения в лазерах на квантовых точках / Е. Д. Колыхалова, В. В. Дюделев, А. Г. Дерягин, М. В. Максимов, А. М. Надточий, В. И. Кучинский, С. С. Михрин, Д. А. Лившиц, Е. А. Викторов, Т. Эрню, Г. С. Соколовский // Тезисы Российской молодежной конференции по физике и астрономии Физика.СПб (Санкт-Петербург, 24-25 октября 2012 г.) – 2012 – С. 96 – 97.
- [K3] Колыхалова Е. Д. Задержка включения в лазерах на квантовых точках / Е. Д. Колыхалова, В. В. Дюделев, А. Г. Дерягин, М. В. Максимов, А. М.

Надточий, В. И. Кучинский, С. С. Михрин, Д. А. Лившиц, Е. А. Викторов, Т. Эрню, Г. С. Соколовский // Материалы 3-го симпозиума «Полупроводниковые лазеры: физика и технология» (Санкт-Петербург, 13-16 ноября 2012 г.) – 2012. – С. 63

- [K4] Колыхалова Е. Д. Нелинейная динамика полупроводниковых лазеров с квантоворазмерной активной областью при импульсной накачке Е. Д. Колыхалова / Г. С. Соколовский, М. Abusaa, J. Danckaert, В. В. Дюделев, А. Г. Дерягин, И. И. Новиков, М. В. Максимов, А. Е. Жуков, В. М. Устинов, В. И. Кучинский, W. Sibbett, Э. У. Рафаилов, Е. А. Viktorov, Т. Erneux // Российская молодежная конференция по физике и астрономии Физика.СПб (Санкт-Петербург, 23-24 октября 2013 г.) – 2013. – С. 186 – 187.
- [K5] Viktorov, E.A. Two state QD laser turn on: slow passage effects E.A. Viktorov, Т. Erneux, М. Abu Saa, J. Danckaert, V.V. Dudelev, E.D. Kolykhalova, K.K. Soboleva, A.G. Deryagin, I.I. Novikov, M.V. Maximov, A.E. Zhukov, V.M. Ustinov, V.I. Kuchinskii, W. Sibbett, E.U. Rafailov, G.S. Sokolovskii //Int. Conf. on Lasers and Electro-Optics CLEO-Europe (Germany, Munich, 21-25 June 2015.). – 2015. – CB-P22.
- [K6] Sokolovskii, G. S. Impact of the carrier relaxation paths on two-state operation in quantum dot lasers / G. S. Sokolovskii, V. V. Dudelev, E. D. Kolykhalova, K. K. Soboleva, A. G. Deryagin, I. I. Novikov, M. V. Maximov, A. E. Zhukov, V. M. Ustinov, V. I. Kuchinskii, W. Sibbett, E. U. Rafailov // Int. Conf. Photonics West, San Francisco (USA, 7-12 February 2015.) – 2015. – 9357-21.

Список цитируемой литературы

1. Asada, M. Gain and the threshold of three dimensional quantum-box lasers / M. Asada, Y. Miyamoto, Y. Suematsu // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1986. – v. 22. – p. 1915–1921.
2. Arakawa, Y. Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current / Y. Arakawa, H. Sakaki // Applied Physics Letters. – 1982. – v. 40. – p. 939–941.
3. Kuntz, M. 10 Gbit/s data modulation using 1.3 μ m InGaAs quantum dot lasers / M. Kuntz, G. Fiol, M. Lämmlin, C. Schubert, A. R. Kovsh, A. Jacob, A. Umbach, D. Bimberg // Electron. Lett. – 2005. – v. 41. – p. 244–245.
4. Ustinov, V.M. Low-threshold injection lasers based on vertically coupled quantum dots / V.M. Ustinov, A.Y. Egorov, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, M.V. Maximov, A.F. Tsatsulinikov, N.Y. Gordeev, S.V. Zaitsev, Y.M. Shernyakov, N.A. Bert, P.S. Kop'ev, Z.I. Alferov, N.N. Ledentsov, J. Boehrer, D. Bimberg, A.O. Kosogov, P. Werner, U. Goesele // Journal of Crystal Growth. – 1997. – v. 175. – p. 689–695.
5. Melnik, S. The linewidth enhancement factor α of quantum dot semiconductor lasers / S. Melnik, G. Huyet // Optics Express. – 2006. – v. 14. – p.2950 – 2955.
6. Gomis-Bresco, J. Time resolved amplified spontaneous emission in quantum dots / J. Gomis-Bresco, S. Dommers-Völkel, Schöps, Y. Kaptan, O. Dyatlova, D. Bimberg, U. Woggon // Applied Physics Letters. – 2010. – v. 97. – p. 251106.