

На правах рукописи

Тхумронгсилапа Папхави

Люминесценция и поглощение излучения среднего ИК диапазона в наноструктурах с квантовыми ямами в условиях разогрева носителей заряда

Специальность 01.04.10 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор Воробьев Леонид Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор Мамаев Юрий Алексеевич,
кафедра экспериментальной физики, СПбГПУ

доктор физико-математических наук
главный научный сотрудник
Михайлова Майя Павловна
ФТИ им. Иоффе РАН

Ведущая организация: Учреждение Российской Академии Наук
Санкт-Петербургский академический
университет - научно-образовательный центр
нанотехнологий РАН.

Защита состоится «22» апреля 2010 года в 16:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.229.01 в ГОУ ВПО
“Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” по
адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, учебный корпус
2, ауд. 470. С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной
библиотеке ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет”

Автореферат разослан «19» марта 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

Коротков А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Явление разогрева носителей заряда во многих случаях сопутствует физическим процессам, протекающим в полупроводниковых приборах, в том числе и в приборах, включающих системы с ограниченной размерностью. В частности в полупроводниковых инжекционных лазерах при высоких уровнях инжекции электронно-дырочных пар (при токе, значительно превышающем пороговый) двумерные носители заряда в квантовых ямах могут иметь температуру, существенно превышающую температуру решетки, что влияет на спектральные, люкс-амперные и другие характеристики лазеров. В квантовых каскадных лазерах процессы энергетической релаксации двумерных электронов, их разогрев и появление неравновесных оптических фононов также влияют на характеристики лазеров, чему посвящен ряд работ зарубежных и российских авторов. Исследование разогрева носителей заряда в квантовых ямах в сильных латеральных электрических полях или при оптической накачке представляет и самостоятельной научный интерес, так как разогрев носителей заряда приводит к появлению новых явлений, исследование которых дает возможность определить или оценить параметры энергетического спектра квантовых ям, характеристики электронной и фононной подсистем. В силу вышесказанного самостоятельное излучение разогрева носителей заряда в лазерных наноструктурах, а также в структурах со множественными квантовыми ямами представляется достаточно важной и интересной задачей. Между тем исследований по горячим носителям заряда в низкоразмерных системах недостаточно.

В настоящей работе изучение явления разогрева осуществлялось с помощью оптических явлений: фото- и электролюминесценция света и

поглощения света. С помощью этих же явлений исследовались в Sb-содержащих лазерных наноструктурах механизмы рекомбинации, также определяющие характеристики лазеров. Такие исследования необходимы для создания лазеров на базе Sb-содержащих квантовых ям на длину волны более 3 мкм. Подобного типа лазеры, работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре с мощностью более 50 мВт, пока не созданы, хотя потребность в их научном и практическом использовании весьма актуальна.

Основной целью диссертационной работы является исследование разогрева носителей заряда в наноструктурах с квантовыми ямами с помощью оптических явлений: люминесценция и поглощения излучения среднего инфракрасного диапазона. В связи с этим были поставлены следующие **задачи**:

1. Экспериментальное и теоретическое исследование явления разогрева носителей заряда в режимах спонтанного и индуцированного излучения из лазерных структур с квантовыми ямами InGaAs/GaAs. Определение концентрации электронов в КЯ и степени их разогрева как функции тока в этих режимах.
2. Определения механизмов рекомбинации носителей заряда из анализа динамики фотолюминесценции в структурах двух типов – содержащих и не содержащих In в растворе, формирующем барьер. Анализ влияния оже-рекомбинации на разогрев носителей заряда в этих двух типах структур.
3. Экспериментальное исследование фотолюминесценции и разогрева электронов в наноструктурах с туннельно-связанными квантовыми ямами GaAs/AlGaAs при разных уровнях оптической накачки. Проведение экспериментальных исследований явления разогрева носителей заряда при оптическом возбуждении как в латеральных электрических полях, так и в отсутствии поля.

4. Экспериментальное исследование поглощения света при внутризонных переходах горячих носителей заряда электронов в квантовых ямах GaAs/AlGaAs в латеральных электрических полях.

Основными полученными в работе результатами являются: исследование оптическими методами явления разогрева носителей заряда в лазерных наноструктурах с квантовыми ямами и в структурах со сдвоенными туннельно-связанными квантовыми ямами в режимах спонтанного и индуцированного излучения; определение температура и концентрации горячих электронов в квантовых ямах в двух режимах как функции уровня токовой или оптической накачки; определение механизмов рекомбинации в лазерных Sb-содержащих наноструктурах с квантовыми ямами методом “up-conversion” пикосекундного диапазона при возбуждении электронно-дырочных пар оптическими импульсами фемтосекундного диапазона; исследованы роли оже-рекомбинации в разогреве носителей заряда в Sb-содержащих КЯ при мощном оптическом возбуждении; изучено влияние электрического поля на каналы ФЛ по изменению спектров ФЛ в поле; исследование разогрева электронов и определение температуры горячих электронов как функция поля в сдвоенных КЯ в латеральных электрических полях по внутризонному межподзональному поглощению света. Полученные результаты важны не только для физики полупроводников и физики низкоразмерных систем, но имеют и прикладное значение, например, для разработки лазеров и модуляторов излучения среднего ИК диапазона.

Научная и практическая значимость работы. Большая часть исследований относится к такой актуальной области, как физика полупроводниковых наноструктур и приборы опто- и наноэлектроники. В работе оптическими методами изучено такое малоисследованное явление как разогрев носителей заряда при токовой или оптической накачке в режиме спонтанного и индуцированного излучения в лазерных наноструктурах,

наноструктурах со множественными КЯ, впервые изучены механизмы рекомбинации неравновесных носителей заряда в Sb-содержащих квантовых ямах современными методами. Полученные результаты имеют как научное значение, расширяя наши знания о физике низкоразмерных систем и физических процессах в приборах на базе наноструктур с КЯ, так и прикладное, т.к. полученные данные могут быть использованы значение при разработке приборов опто- и наноэлектроники среднего ИК диапазона.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. В режиме стимулированного излучения при высоких уровнях токовой инжекции электронно-дырочных пар в лазерных наногетероструктурах носители заряда на основных уровнях нелегированных квантовых ям (КЯ) разогреваются, а их концентрация не стабилизируется, а растет с ростом тока. В режиме спонтанного излучения разогрев носителей заряда несущественен.

2. В Sb-содержащих лазерных наноструктурах с квантовыми ямами $\text{In}_{0.545}\text{Ga}_{0.455}\text{As}_{0.238}\text{Sb}_{0.762}$ с барьерами $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ оже-рекомбинация выражена сильнее, чем в структурах с барьерами пятерного состава $\text{In}_{0.25}\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.55}\text{As}_{0.245}\text{Sb}_{0.755}$ из-за вклада резонансных оже-процессов. Оже-рекомбинация при высоких уровнях возбуждения электронно-дырочных пар приводит к разогреву носителей заряда в квантовых ямах.

3. В наноструктурах с легированными квантовыми ямами в режиме спонтанного излучения носители заряда в КЯ разогреваются с ростом уровня инжекции немонотонно: сильнее при относительно слабых уровнях инжекции и слабее при высоких уровнях.

4. Спектры ФЛ меняются в сильных латеральных электрических полях из-за разогрева носителей заряда в квантовых ямах.

5. Изменение спектров межподзонного поглощения света в наноструктурах с туннельно-связанными КЯ вызвано перераспределением горячих электронов между КЯ разной ширины.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях, в частности:

1. XXXVI Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 26 ноября – 1 декабря, 2007.
2. IX Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводников, опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 3-7 Декабря 2007
3. XII Международный Симпозиум. Институт физики микроструктур РАН. Нижний Новгород, 10 - 14 марта 2008
4. XIII Международный Симпозиум. Институт физики микроструктур РАН. Нижний Новгород, 16 – 20 марта 2009
5. XI Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников, опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 30 ноября - 4 декабря 2009.
6. XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 30 ноября – 5 декабря 2009 – С. 166.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 11 статьях и докладах, среди которых 3 публикации в ведущих рецензируемых российских научных изданиях и 8 тезисов докладов на российских и международных конференциях. Список публикаций приводится в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 126 страниц, в том числе 45 рисунков, 2 таблицы. Список литературы включает 64 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цели работы, научная новизна и практическая значимость полученных в работе результатов, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются результаты исследований концентрации и температуры горячих носителей заряда в режимах спонтанного и индуцированного излучения из лазерных структур с квантовыми ямами InGaAs/GaAs[1]. Описываются основные теоретические предпосылки, определяющие рекомбинационные процессы в лазерных гетероструктурах с квантовыми ямами (КЯ) при разогреве носителей заряда в условиях токовой накачки. Зависимость концентрации от j определяется главным образом тремя процессами: безызлучательной рекомбинацией через ловушки, излучательной бимолекулярной рекомбинацией и оже-рекомбинацией. В режиме спонтанного излучения поверхностная концентрация инжектированных носителей заряда n_s примерно пропорциональна плотности тока j . После достижения порогового тока концентрация инжектированных носителей в КЯ стабилизируется с ростом тока и концентрация носителей заряда не меняется из-за уменьшения излучательного времени жизни носителей заряда $\tau^{(v)}$ благодаря индуцированному испусканию фотонов. Однако при больших уровнях токовой или оптической инжекции электронов и дырок возможен их разогрев. Разогрев носителей заряда в подзонах КЯ может оказаться особенно существенным в постпороговом режиме, так как концентрация носителей заряда с ростом уровня инжекции не растет или растет слабо, тогда как скорость набора энергии на один носитель заряда возрастает с ростом тока и может оказаться значительной при $j \gg j_{th}$. Эта ситуация отлична от случая допорогового режима, так как в этом режиме (в области спонтанного

излучения) n_s растет с ростом j , поэтому скорость набора энергии с током на один носитель увеличивается с ростом уровня инжекции значительно медленнее, если активная область не легирована или легирована слабо.

В основной части главы описаны исследования в режиме спонтанного излучения и индуцированного излучения. Проведен анализ экспериментальных исследуемых спектров спонтанного излучения при $T = 77\text{ К}$. Этот анализ позволяет определить концентрацию горячих носителей заряда n_s в КЯ и их температуру T_e . Их значения могут быть найдены из совместного решения уравнения баланса числа частиц и уравнения баланса мощности в стационарном режиме.

В результате получено удовлетворительное согласие экспериментально найденных и рассчитанных спектров и их зависимостей от плотности тока. Уширение пика в коротковолновой области и смещение спектра в эту область связаны с ростом концентрации носителей заряда и вкладом запрещенных межзонных переходов с различным четностью: $e1 \rightarrow hh2$, который особенно существен при больших значениях $k_{\perp} L_{QW} \approx 3$ [2], где k_{\perp} - волновой вектор носителей заряда в плоскости КЯ.

Также проведен анализ экспериментальных спектров стимулированного излучения. Эксперимент был проведен при комнатной температуре. Из экспериментальных результатов установлено, что с ростом тока накачки наблюдается насыщение максимума спектральной зависимости интенсивности излучения, а также происходит существенное уширение спектра в коротковолновой области. Уширение спектра стимулированного излучения связано с ростом концентрации носителей заряда в активной области и их разогревом.

Вторая глава посвящена исследованию механизмов рекомбинации носителей заряда из анализа динамики спада фотолюминесценции в Sb-содержащих лазерных наноструктурах

Во введении упомянуты применения лазеров среднего инфракрасного диапазона в различных областях науки и техники. Наибольшую ценность представляют лазеры с мощностью излучения, превышающей 50 мВт и работающие при комнатной температуре в непрерывном режиме. Диапазон длин волн $\lambda > 3.8$ мкм освоен с помощью хорошо известных монополярных квантовых каскадных лазеров. Диапазон длин волн примерно 2-2.9 мкм перекрыт с помощью инжекционных лазеров на гетероструктурах InGaAsSb/AlGaAsSb I типа. Диапазон длин волн примерно 3 ÷ 3.8 мкм пока не освоен. Наиболее перспективными для освоения этого диапазона представляются инжекционные лазеры на гетероструктурах I типа на подложке GaSb. Однако на пути продвижения в область длин волн $\lambda > 3$ мкм имеется ряд трудностей. Для увеличения длины волны излучения возможный вариант – использование пятикомпонентных твердых растворов $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_z\text{Sb}_{1-z}$ для создания барьера квантовой ямы и волновода.

Исследование динамики фотолюминесценции Sb-содержащих лазерных наноструктур, является эффективным способом определения рекомбинационных процессов таких структур. Использование метода "up-conversion" позволяет получить зависимость интенсивности фотолюминесценции в максимуме спектра излучения от времени, для структур, содержащих In в материале барьера и без In в температурном интервале 77...300 К. Начальные участки зависимостей $J_{PL}(t)$ отражают процессы захвата носителей заряда в квантовые ямы и процессы внутри- и межподзонной релаксации энергии электронов и дырок, возбуждаемых мощным фемтосекундным импульсом излучения в барьере. Спад интенсивности фотолюминесценции $J_{PL}(t)$ определяется следующими рекомбинационными

процессами: рекомбинацией Шокли-Рида-Холла, излучательной рекомбинацией и оже-рекомбинацией. Определены аддитивные вклады механизмов рекомбинации Шокли-Рида-Холла, излучательной рекомбинации и оже-рекомбинации в полную вероятность рекомбинации. При высоких уровнях инжекции процессы оже-рекомбинации приводят к существенному разогреву носителей заряда в квантовых ямах.

Установлено, что вероятность оже-рекомбинации в структуре без содержания In в барьере выше, чем в структуре со содержанием In в материале барьера из-за вклада оже-процессов, близких к резонансным. Полученные, экспериментальные результаты показали, что время оже-рекомбинации в структурах с пятикомпонентными твердыми растворами в качестве барьера оказывается больше чем в структуре без содержания In. Это и является причиной лучших характеристик пятикомпонентных структур.

В третьей главе описываются результаты экспериментальных исследований фотолюминесценции в наноструктурах с туннельно-связанными квантовыми ямами GaAs/AlGaAs.

В основной части главы описано исследование процессов разогрева носителей заряда в квантовых ямах при оптическом возбуждении в отсутствие электрического поля. Энергию порядка глубины КЯ инжектированные электроны и дырки передают либо решетке при эмиссии оптических фононов либо электронам и дыркам на нижних уровнях размерного квантования. При достаточно высокой концентрации электронов или дырок ($n_s > 10^{11} \text{ см}^{-2}$, n_s - поверхностная концентрация носителей заряда) в подзонах квантовых ям второй процесс преобладает и это приводит к разогреву электронов и дырок. Разогрев носителей заряда может существенно изменить характеристики лазеров на наноструктурах с КЯ. Анализированы спектры спонтанной ФЛ при разных уровнях оптического возбуждения j_{pump} наноструктуры со 100 парами сдвоенных туннельно-связанных КЯ GaAs/Al_{0,38}Ga_{0,62}As n-типа, легированных

до уровня поверхностной концентрации электронов $n_s = 6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Основной вклад в ФЛ при низкой температуре решетки и не очень высоком уровне накачки дают переходы электронов $e_I - hh_I$, что позволяет определить температуру носителей заряда T_e по коротковолновому спаду интенсивности ФЛ как функции энергии кванта. Такой метод определения T_e ранее использовался в работах [3]. Анализ коротковолнового участка спектра ФЛ позволил найти температуру горячих носителей заряда в зависимости от уровня возбуждения j_{pump} . Зависимость носит нелинейный характер, что связано с разной зависимостью скорости набора энергии на один носитель заряда от j_{pump} в области слабых уровней накачки, когда концентрация неравновесных электронов (и дырок) Δn_s много меньше n_s и в области высоких уровней накачки, когда $\Delta n_s \gg n_s$. Расчет зависимости $T_e(j_{pump})$ из скоростных уравнений для концентрации носителей заряда и баланса мощности с учетом накопления неравновесных оптических фононов дал хорошее согласие с экспериментом. Таким образом, настоящее исследование демонстрирует особенности разогрева носителей заряда в легированных и нелегированных структурах. Первый случай соответствует условию $\Delta n_s \ll n_s$ (при умеренных уровнях j_{pump}), а второй условию $\Delta n_s \gg n_s$.

Помимо равновесных спектров ФЛ интерес представляет фотолюминесценция в условиях разогрева носителей заряда внешним продольным электрическим полем. На рисунке 1 представлен измеренный спектр модуляции ФЛ структуры при температуре 77 К для двух значений латерального электрического поля

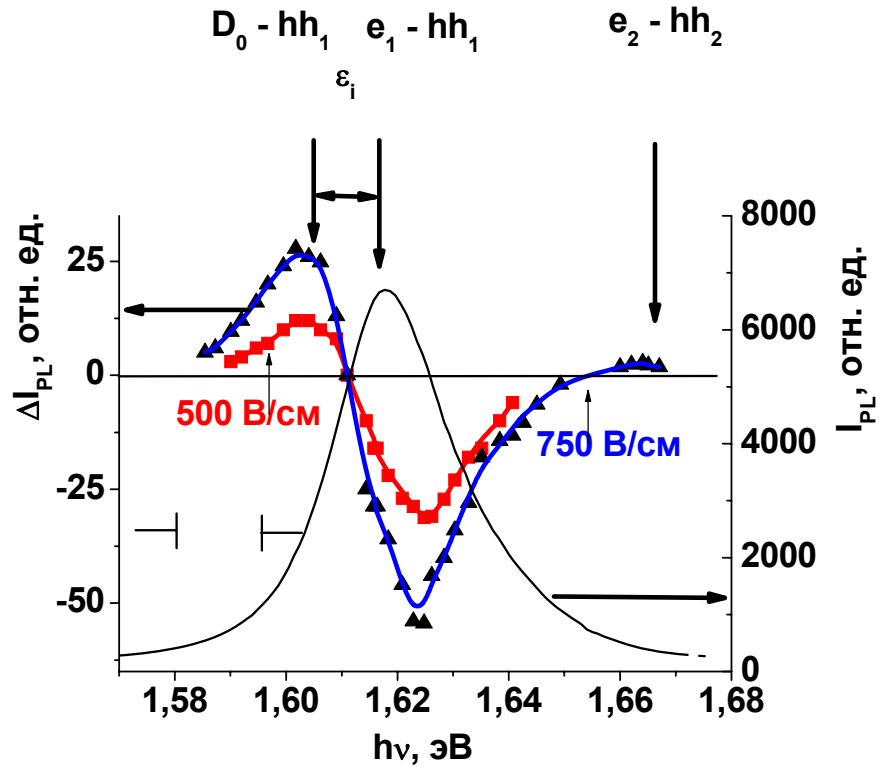


Рис. 1. Спектры модуляции ФЛ в электрическом поле 500 В/см^2 и 750 В/см^2 при температуре 77 К

В спектре модуляции фотолюминесценции, представленном на рисунке 1, присутствуют три пика. Отрицательный пик лежит в районе максимума фотолюминесценции без поля, связан с уменьшением интенсивности переходов электронов $e_1 - hh_1$ из-за уменьшения числа носителей заряда на уровне e_1 при приложении продольного электрического поля. Соответствующее увеличение концентрации электронов на уровне e_2 приводит к положительному сигналу модуляции в коротковолновой области (соответствующий положительный пик модуляции на графике показан стрелкой $e_2 - hh_2$).

Положительный длинноволновый пик модуляции фотолюминесценции не укладывается в схему электронных переходов между уровнями размерного квантования. Его можно связать с переходами электронов с примесного донорного уровня D^0 в валентную зону. Это предположение представляется возможным, поскольку данный длинноволновый пик находится на расстоянии

14 мэВ от максимума спектра ФЛ, что соответствует энергии ионизации кремния в нашей структуре (ширина квантовой ямы 68 Å).

В четвертой главе описаны результаты экспериментальных исследований поглощения света при внутризонных межподзонных переходах горячих носителей заряда в квантовых ямах n-GaAs/AlGaAs в латеральном электрическом поле. При $T = 77$ К получены спектры модуляции поглощения света р-поляризации в латеральных электрических полях. В сильных электрических полях горячие электроны перераспределяются в реальном пространстве между квантовыми ямами, заполняя более высоколежащие подзоны в узких квантовых ямах, что приводит к увеличению коэффициента поглощения в коротковолновой области спектра. Аналогичный эффект наблюдается при увеличении температуры решетки. Сравнение спектров позволило найти температуру горячих электронов как функцию поля. Экспериментальные результаты для T_e сравниваются с расчетом.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Определены температура и изменение концентрации горячих носителей заряда как функция плотности тока в режимах спонтанного и индуцированного излучения в лазерных напряженных асимметричных структурах $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}/\text{GaAs}$
2. Исследована динамика фотолюминесценции методом “up-conversion”, установлены механизмы рекомбинации горячих носителей заряда и найдены их времена жизни по отношению к механизмам Шокли-Рида-Холла, излучательной и оже-рекомбинации в структурах с напряженными (~ 1.7%) квантовыми ямами двух типов: $\text{InGaAsSb}/\text{AlGaAsSb}$ и $\text{InGaAsSb}/\text{InAlGaAsSb}$. Оценен разогрев носителей заряда при оже-рекомбинации.
3. Исследованы спектры фотолюминесценции структур с туннельно-связанными квантовыми ямами $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ в отсутствии

электрического поля при разных температурах решетки и интенсивностях оптической накачки. Из анализа коротковолновой части спектров фотолюминесценции найдена зависимость электронной температуры от уровня оптической накачки. Исследованы спектры изменения фотолюминесценции в продольном электрическом поле.

4. Исследована зависимость изменения межподзонного поглощения света в структурах с легированными квантовыми ямами n- типа GaAs/AlGaAs в латеральных электрических полях. Определена электронная температура T_e . Результаты сравниваются с расчетом T_e как функции поля с учетом накопления неравновесных оптических фононов.

Список цитируемой литературы:

- [1] Слипченко С.О. Конечное время рассеяния энергии носителей заряда как причина ограничения оптической мощности полупроводниковых лазеров / С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.А. Пихтин, Д.А. Винокуров, К.С. Борщев, И.С. Тарасов // Физика и Техника Полупроводников. – 2006. – Том. 40 – Вып. 8. – С. 1017 – 1023.
- [2] Соколова З.Н. Расчеты вероятности излучательных переходов и времени жизни в квантово-размерных структурах / З.Н. Соколова, В.Б. Халфин. // Физика и Техника Полупроводников – 1989. – Том. 23 – Вып. 10. – С. 1806 – 1810.
- [3] Shah, J. Chapter 2 “Ultrafast Luminescence Spectroscopy of Semiconductors: Carrier Relaxation, Transport and Tunneling” / J. Shah, C.V. Shank, B.P. Zakharchenya // Spectroscopy of nonequilibrium electrons and phonons – 1992 – North Holland; Amsterdam, London, New York, Tokyo - Pp. 61 - 85.

Публикации по теме диссертации

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК:

[A1]. Воробьев Л.Е. Электр люминесценция горячих носителей заряда в режиме спонтанного и стимулированного излучения из лазерных наноструктур и поглощение ИК-излучения горячими электронами в квантовых ямах / Л.Е.Воробьев, Д.А.Фирсов, В.Л.Зерова, В.А.Шалыгин, М.Я.Винниченко, В.Ю.Паневин, П.Тхумронгсилапа, К.С.Борщев, А.Е.Жуков, З.Н.Соколова, И.С.Тарасов, G. Belenky, S. Hanna, A. Seilmeier // Известия РАН. Серия Физическая – 2009 – Т. 73 – Вып. 1 – С. 79 – 82.

[A2]. Фирсов Д.А. Динамика фотолюминесценции и рекомбинационные процессы в Sb-содержащих лазерных наноструктурах / Д.А.Фирсов, L. Shterengas, G. Kipshidze, T. Hosoda, В.Л.Зерова, Л.Е.Воробьев, П. Тхумронгсилапа, G. Belenky // Физика и техника полупроводников – 2010 – Т. 44 – Вып. 1 – С. 53 – 61.

[A3]. Фирсов Д.А. Поглощение и модуляция излучения в наноструктурах с квантовыми ямами p-GaAs/AlGaAs / Д.А.Фирсов, Л.Е.Воробьев, В.А.Шалыкин, А.Н.Софронов, В.Ю.Паневин, М.Я.Винниченко, П. Тхумронгсилапа, С.Д.Ганичев, С.Н.Данилов, А.Е.Жуков // Известия РАН. Серия Физическая – 2010 – Т. 74 – Вып. 1 – С. 89 – 92.

Тезисы докладов:

[A4]. Тхумронгсилапа Папхави. Модуляция поглощения излучения при межподзонных переходах горячих электронов в туннельно-связанных квантовых ямах GaAs/AlGaAs / Папхави Тхумронгсилапа, Д.А.Фирсов, М.Я.Винниченко // XXXVI Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 26 ноября – 1 декабря, 2007. - С. 119 - 120

[A5]. Винниченко М.Я. Модуляция поглощения света в туннельно-связанных квантовых ямах в продольном электрическом поле / М.Я. Винниченко, Тхумронгсилапа Папхави, Д.А. Фирсов// IX Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- наноэлектроники: Тезисы докладов, Санкт-Петербург, 3 – декабря 2007 – С. 38.

[A6]. Воробьев Л.Е. Электр люминесценция горячих носителей заряда в режиме спонтанного и стимулированного излучения из лазерных наноструктур и поглощение ИК излучения горячими электронами в квантовых ямах / Л.Е.Воробьев, Д.А.Фирсов, В.А.Шалыгин, В.Л.Зерова, М.Я.Винниченко, В.Ю.Паневин, Т. Папхави, К.С.Борщев, А.Е.Жуков, З.И.Соколова, И.С.Тарасов, G. Velenky // Материалы XII Международного Симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 10–14 марта, 2008 – Т. 1 – С. 173 – 175.

[A7]. Воробьев Л.Е. Поглощение и модуляция излучения в наноструктурах с квантовыми ямами p-GaAs/AlGaAs / Л.Е.Воробьев, А.Н.Софронов, Д.А.Фирсов, В.А.Шалыгин, В.Ю.Паневин, М.Я.Винниченко, П. Тхумронгсилапа, С.Д.Ганичев, С.Н.Данилов, А.Е.Жуков // Материалы XIII Международного Симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 16 – 20 марта, 2009. – С. 10 – 11..

[A8]. Firsov, D.A. Light absorption related to hole transitions in quantum dots and impurity centers in quantum wells under external excitation / D.A. Firsov, L.E. Vorobjev, V.A. Shalygin, A.N. Sofronov, V.Yu. Panevin, M.Ya. Vinnichenko, P. Thumrongsilapa // 16th International Conference on Electron Dynamics In Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures, Montpellier, France, 24-28 august, 2009 – P. 231.

[A9]. Воробьев, Л.Е. Поглощение и модуляция излучения в наноструктурах с квантовыми ямами и квантовыми точками p-типа / Л.Е. Воробьев, Д.А. Фирсов, В.А. Шалыгин, В.Ю. Паневин, А.Н. Софронов, М.Я. Винниченко,

П. Тхумронгсилапа, С.Н. Данилов, А.Е. Жуков, А.И. Якимов, А.В. Двуреченский // IX Российская конференция по физике полупроводников «Полупроводники 2009»: Тезисы докладов, Новосибирск – Томск, 28 сентября – 3 октября, 2009. – С. 74

[A10]. Винниченко М.Я. Исследование фотолюминесценции и рекомбинации неравновесных носителей заряда в структурах с квантовыми ямами / М.Я.Винниченко, Д.А.Фирсов, Тхумронгсилапа Папхави // XI Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектроники, С.-Петербург, 30 ноября – 4 декабря 2009 – с. 42.

[A11]. Винниченко М.Я. Исследование Фотолюминесценции и рекомбинации неравновесных носителей заряда в структурах с квантовыми ямами / М.Я.Винниченко, Д.А.Фирсов, Тхумронгсилапа Папхави // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 30 ноября – 5 декабря 2009 – С. 166.