

На правах рукописи



Яблонский Артем Николаевич

**ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ, СПЕКТРЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ
И КИНЕТИКА ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕЛАКСАЦИИ
В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУРАХ,
ЛЕГИРОВАННЫХ ЭРБИЕМ**

*05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нанoeлектроника,
приборы на квантовых эффектах*

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2011

Работа выполнена в Институте физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН), г. Нижний Новгород.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Андреев Борис Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Теруков Евгений Иванович
кандидат физико-математических наук,
Дроздов Михаил Николаевич

Ведущая организация: МГУ, физический факультет, г. Москва

Защита состоится 8 декабря 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.098.01 при Институте физики микроструктур РАН (607680, Нижегородская обл., Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д.7).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН.

Автореферат разослан 7 ноября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д. ф.-м.н., профессор



К.П. Гайкович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Создание эффективного источника излучения на основе кремния представляет собой важную задачу современной оптоэлектроники. Как известно, кремний является основным материалом микроэлектроники, подавляющее большинство микроэлектронных чипов и солнечных батарей изготавливаются из кремния и по всей вероятности такая ситуация сохранится в ближайшие годы. В области оптоэлектроники положение кремния совершенно другое. Кремний является непрямозонным материалом, с чем связана низкая эффективность излучательной рекомбинации электронов и дырок. Долгое время считалось, что кремний малопригоден для нужд оптоэлектроники. Однако задача интеграции на одном чипе микроэлектронных и оптических компонент настоятельно требует создания эффективных излучающих структур на основе кремния. Работы в этом направлении интенсивно ведутся последние два десятилетия [1,2]. Значительный интерес в области телекоммуникаций привлекает задача создания на базе кремния источника излучения с длиной волны около 1,5 мкм, так как эта длина волны соответствует максимуму прозрачности кварцевых волоконно-оптических линий связи.

Данная работа посвящена исследованию светоизлучающих центров в кремниевых структурах, легированных ионами эрбия (Si:Er/Si). В настоящее время кремний, легированный эрбием, рассматривается как один из потенциальных источников излучения с длиной волны 1,5 мкм. Отсутствие детальных представлений о механизмах возбуждения и безызлучательного девозбуждения ионов эрбия в кремнии в условиях оптической и электрической накачки, а также о причинах значительного температурного гашения эрбиевой ФЛ в кремнии сдерживает процесс создания на основе этих структур эффективных источников излучения, работающих при комнатной температуре. Кроме того, задача достижения в структурах Si:Er/Si инверсной населенности и реализации стимулированного излучения обуславливает необходимость изучения процессов, происходящих в указанных структурах в условиях интенсивного оптического возбуждения.

В настоящей работе исследовались светоизлучающие структуры Si:Er/Si , полученные методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ). Указанные структуры характеризуются низким содержанием дефектов и демонстрируют при низких температурах измерения интенсивный сигнал ФЛ, связанный с излучательной релаксацией ионов эрбия. Детальное понимание процессов переноса энергии в таких структурах и взаимодействия ионов эрбия с электронной подсистемой кремния отсутствует. Данная работа развивает представления о процессах возбуждения и девозбуждения эрбия в структурах Si:Er/Si , в том числе в условиях интенсивного импульсного оптического возбуждения, необходимого для реализации инверсной населенности, оптического усиления и лазерной генерации.

Основные цели работы

1. Исследование эффективности возбуждения и температурного гашения ФЛ ионов эрбия в эпитаксиальных кремниевых структурах, изучение влияния послеростового отжига структур на температурную стабильность ФЛ.

2. Изучение временных характеристик процесса возбуждения излучающих эрбиевых центров в кремниевых структурах.

3. Исследование процессов взаимодействия ионов эрбия с электронной подсистемой кремния при высоких уровнях оптического возбуждения, в том числе в условиях возникновения в структурах электронно-дырочной плазмы.

4. Исследование зависимости люминесцентных свойств эпитаксиальных структур Si:Er/Si от энергии кванта возбуждающего излучения в широком спектральном диапазоне и определение особенностей возбуждения ионов эрбия в кремнии в условиях межзонного, подзонного и прямого оптического возбуждения.

Научная новизна

1. Определена зависимость внешней квантовой эффективности ФЛ ионов эрбия в СМЛЭ структурах Si:Er/Si при температуре 4,2 К от мощности межзонного оптического возбуждения. Показано, что максимальное значение внешней квантовой эффективности ФЛ составляет 1,6% при мощности накачки менее 1 мВт.

2. В СМЛЭ структурах Si:Er/Si показано наличие нескольких типов оптически активных центров иона Er^{3+} с существенно различным характером температурной зависимости эрбиевой ФЛ. Определены условия термической обработки структур Si:Er/Si, приводящие к снижению температурного гашения эрбиевой ФЛ.

3. В условиях интенсивной импульсной оптической накачки структур Si:Er/Si продемонстрировано наблюдение сигнала эрбиевой ФЛ в широком спектральном диапазоне возбуждающего излучения (0,5-1,5 мкм), включая области межзонного, подзонного и прямого оптического возбуждения.

4. Впервые исследованы излучательные свойства эпитаксиальных волноводных структур Si:Er/SOI, выращенных на подложках "кремний-на-изоляторе" (SOI), демонстрирующих интенсивную ФЛ ионов эрбия на длине волны 1,54 мкм.

5. Впервые изучены особенности ФЛ, возникающей при прямом оптическом возбуждении ионов эрбия в кремнии (на длинах волн 1,48 и 1,54 мкм), и проведено сравнительное исследование температурного гашения эрбиевой ФЛ в условиях прямого и межзонного оптического возбуждения.

Научная и практическая значимость работы

Полученные в работе результаты являются важными как для понимания фундаментальных свойств излучающих кремниевых структур, легированных эрбием, так и для разработки оптоэлектронных приборов на основе кремниевых структур.

Научная значимость полученных в работе результатов состоит в установлении особенностей взаимодействия ионов эрбия с носителями заряда в матрице кремния в условиях интенсивного оптического возбуждения эпитаксиальных структур Si:Er/Si

и определении механизмов возбуждения и температурного гашения ФЛ ионов эрбия в кремнии в различных условиях оптической накачки.

Практическая значимость полученных результатов состоит в определении условий роста и послеростовой обработки эпитаксиальных структур Si:Er/Si, приводящих к снижению температурного гашения эрбиевой ФЛ; определении методики корректного измерения спектров возбуждения эрбиевой ФЛ и величины эффективного сечения возбуждения ФЛ ионов эрбия в кремнии; получении излучающих волноводных эпитаксиальных структур Si:Er/SOI с шириной линии ФЛ менее 10 мкэВ, перспективных с точки зрения реализации активных кремниевых волноводов ближнего ИК диапазона и создания лазерных структур на основе кремния, легированного эрбием.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Внешняя квантовая эффективность ФЛ ионов эрбия на длине волны 1,54 мкм в структурах Si:Er/Si, полученных методом сублимационной МЛЭ, достигает значения 1,6% при низких температурах измерения ($T = 4,2$ К) и малой мощности оптического возбуждения ($P < 1$ мВт), соответствующей линейному участку зависимости интенсивности ФЛ от мощности накачки.

2. Температурная зависимость спектров эрбиевой ФЛ в СМЛЭ структурах Si:Er/Si определяется конкуренцией нескольких типов оптически активных эрбиевых центров, возбуждение которых осуществляется экситонами, связанными на примесных уровнях с различной энергией ионизации в запрещенной зоне кремния. Отжиг структур Si:Er/Si оказывает существенное влияние на состав излучательных центров иона эрбия и температурную стабильность эрбиевой ФЛ.

3. Неоднородность оптического возбуждения структур Si:Er/Si существенно влияет на вид зависимостей интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности и длины волны возбуждающего излучения. Эффективное сечение возбуждения ФЛ ионов Er в кремнии, получаемое при однородном возбуждении, составляет $5 \cdot 10^{-14}$ см² при $T = 4,2$ К и на порядок превосходит ранее опубликованные значения. Достоверные данные о спектрах возбуждения ФЛ и величине эффективного сечения возбуждения ФЛ эрбия могут быть получены только в экспериментах с однородной оптической накачкой.

4. Возбуждение эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si при высоких уровнях оптического возбуждения осуществляется как при межзонной, так и при подзонной оптической накачке исследуемых структур. Как в первом, так и во втором случае реализуется экситонный механизм возбуждения ионов эрбия. Характерное время передачи возбуждения от электронной подсистемы кремния ионам эрбия в структурах Si:Er/Si составляет менее 5 нс. В условиях прямого оптического возбуждения ионов эрбия в структурах Si:Er/Si основные процессы безызлучательного девозбуждения существенно подавлены, и сигнал ФЛ эрбия наблюдается вплоть до комнатной температуры.

Личный вклад автора в получение результатов

– основной в исследование эффективности возбуждения и температурного гашения ФЛ ионов эрбия в эпитаксиальных кремниевых структурах, изучение влияния послеростового отжига структур на температурную стабильность ФЛ (совместно с Б.А. Андреевым, М.В. Степиховой, В.П. Кузнецовым [A2, A3, A7, A8, A13-A15, A17, A22]);

– определяющий в экспериментальное исследование спектров возбуждения и кинетики ФЛ ионов эрбия в структурах Si:Er/Si и Si:Er/SOI в условиях импульсной оптической накачки, основной в анализ и интерпретацию полученных экспериментальных данных, определение механизма возбуждения ионов эрбия в кремнии в условиях подзонного оптического возбуждения (совместно с Б.А. Андреевым, Д.И. Крыжковым, Л.В. Красильниковой [A4-A6, A10, A19-A21, A23, A25, A27, A36, A40-A44, A48-A53]);

– равноценный в получение и исследование люминесцентных свойств волноводных структур Si:Er/SOI (совместно с Б.А. Андреевым, М.В. Степиховой, В.П. Кузнецовым, Д.В. Шенгуровым [A31, A32, A34, A37, A39, A45, A47, A54]);

– определяющий в исследование эрбиевой ФЛ в кремнии в условиях прямого оптического возбуждения ионов эрбия, сравнительное исследование температурного гашения ФЛ эрбия в структурах Si:Er/Si в условиях прямого и межзонного оптического возбуждения (совместно с Б.А. Андреевым и Д.И. Крыжковым [A10, A38, A40]).

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [A1-A54] и докладывались на V, VI, VIII-X Российских конференциях по физике полупроводников (Нижний Новгород 2001, Санкт-Петербург 2003, Екатеринбург 2007, Новосибирск-Томск 2009, Нижний Новгород 2011), 26-ой Международной конференции по физике полупроводников (Эдинбург, Великобритания 2002), 22ой и 25ой Международных конференциях по дефектам в полупроводниках (Аархус, Дания 2003, Санкт-Петербург, Россия, 2009), международных конференциях Европейского материаловедческого сообщества E-MRS (Страсбург 2003, 2004, 2005), всероссийских совещаниях "Нанопотоника" (Нижний Новгород 2002-2004), X-XV Международных симпозиумах "Нанопотоника и нанозлектроника" (Нижний Новгород 2006-2011), а также на внутренних семинарах Института физики микроструктур РАН и Научно-образовательного центра зондовой микроскопии ННГУ.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 54 печатных работы, в том числе 12 статей в реферируемых научных журналах и 42 публикации в сборниках тезисов докладов и трудов конференций, симпозиумов и совещаний.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации составляет 160 страниц, включая 81 рисунок и 2 таблицы. Список литературы содержит 90 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, показана ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цели работы, представлены сведения о структуре и содержании работы, а также приведены положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** приведено описание различных подходов к получению кремниевых структур, излучающих в ближнем ИК диапазоне, в частности кремниевых структур, легированных ионами эрбия. Рассмотрена структура излучательных переходов во внутренней оболочке иона эрбия. Приведено описание механизмов возбуждения ионов эрбия, а также диссипативных процессов и процессов безызлучательного девозбуждения, приводящих к снижению эффективности возбуждения эрбиевой ФЛ в кремнии. Описаны основные методы получения кремниевых структур, легированных эрбием.

В **Главе 2** описана методика и условия эпитаксиального роста кремниевых структур, легированных эрбием, исследованных в данной работе, а также основные экспериментальные методики исследования люминесцентных свойств структур Si:Er/Si. В разделе 1.1 приведено описание установки и условий эпитаксиального роста структур Si:Er/Si методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ), описаны основные параметры и характеристики полученных СМЛЭ структур Si:Er/Si, а также описан способ получения методом СМЛЭ волноводных структур Si:Er/SOI, выращенных на подложках "кремний-на-изоляторе". В разделе 1.2 описана экспериментальная установка для исследования спектров ФЛ и температурной зависимости ФЛ в структурах Si:Er/Si в ближнем ИК диапазоне на основе Фурье-спектрометра высокого разрешения BOMEM DA3. Раздел 1.3 посвящен описанию методики измерения внешней квантовой эффективности эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si. Наконец, в разделе 1.4 описана экспериментальная установка для исследования кинетики и спектров возбуждения ФЛ ближнего ИК диапазона на основе перестраиваемого импульсного источника излучения – параметрического генератора света (optical parametric oscillator, OPO).

Глава 3 посвящена экспериментальному исследованию спектров ФЛ структур Si:Er/Si, полученных методом сублимационной МЛЭ, эффективности и температурного гашения эрбиевой ФЛ, а также получению и исследованию люминесцентных свойств эпитаксиальных волноводных структур Si:Er/SOI.

В разделе 3.1 приведены спектры низкотемпературной ФЛ ионов эрбия в СМЛЭ структурах Si:Er/Si, полученных при различных температурах эпитаксиального роста, а также описана модификация спектра эрбиевой ФЛ в результате отжига исследуемых структур. Наиболее интенсивный сигнал эрбиевой ФЛ демонстрируют СМЛЭ структуры, полученные при температурах роста $T_p = 500-600^\circ\text{C}$. Основной

вклад в низкотемпературную ФЛ таких структур дают оптически активные эрбиевые центры Er-O1 с аксиальным типом симметрии (при $T_p \sim 500^\circ\text{C}$) или ионы эрбия, расположенные в SiO₂-подобных преципитатах (при $T_p \sim 600^\circ\text{C}$). Отжиг структур Si:Er/Si при температурах $T = 800\text{-}900^\circ\text{C}$ приводит к изменению типа доминирующих эрбиевых комплексов. В результате однократного отжига при $T = 800^\circ\text{C}$ в структурах Si:Er/Si возникает эрбиевый центр Er-1, характеризующийся рекордно узкой линией ФЛ ионов эрбия в кремнии (< 10 мкэВ). Повторный отжиг структур при температуре 900°C приводит к падению интенсивности линий центра Er-1 и возникновению широкой полосы ФЛ в высокочастотной области спектра ($6500\text{-}6550$ см⁻¹).

В разделе 3.2 приведены результаты измерения внешней квантовой эффективности ФЛ ионов эрбия (на длине волны $1,54$ мкм) в СМЛЭ структурах Si:Er/Si в зависимости от мощности оптического возбуждения. Показано, что максимальное значение внешней квантовой эффективности в эпитаксиальных структурах Si:Er/Si составляет $1,6\%$ и наблюдается при температуре жидкого гелия ($T = 4,2$ К) и низких уровнях оптического возбуждения ($P < 1$ мВт), соответствующих линейному участку зависимости интенсивности ФЛ от мощности оптической накачки. Полученная величина почти на порядок превосходит значения внешней квантовой эффективности эрбиевой ФЛ ($0,2\%$) известные для структур Si:Er/Si, полученных методом имплантации ионов эрбия в кремниевую подложку [3]. Данный результат свидетельствует о высоком качестве структур Si:Er/Si, получаемых методом СМЛЭ, а также подтверждает высокую эффективность экситонного механизма возбуждения ионов эрбия в кремниевой матрице при низкой температуре и малой мощности оптического возбуждения.

В разделе 3.3 приводятся результаты исследования температурной зависимости эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si, полученных методом СМЛЭ. В структурах Si:Er/Si, полученных при температуре роста 500°C , при увеличении температуры в интервале $4,2\text{-}40$ К наряду с монотонным падением интенсивности доминирующей линии, отвечающей центру Er-O1, наблюдается аномальный рост интенсивности ФЛ эрбиевых комплексов, излучающих в спектральном диапазоне $6520\text{-}6550$ см⁻¹ (рис.1). На основании анализа температурных зависимостей показано, что возбуждение оптически активных центров Er-O1, дающих основной вклад в низкотемпературный сигнал ФЛ, осуществляется экситонами, связанными на мелких примесных центрах с энергией ионизации $\sim 40\text{-}50$ мэВ. Возрастание интенсивности ФЛ в спектральной области $6520\text{-}6550$ см⁻¹ при повышении температуры связывается с отрывом экситонов от мелких примесных центров и их захватом на более глубокие центры с энергией ионизации $\sim 250\text{-}300$ мэВ.

Исследовано влияние отжига СМЛЭ структур Si:Er/Si на температурное гашение эрбиевой ФЛ. Эрбиевые центры, излучающие в спектральном диапазоне $6520\text{-}6550$ см⁻¹, доминируют в спектрах ФЛ структур, подвергнутых двукратному послеростовому отжигу при температурах 800 и 900°C , и характеризуются существенно более слабым температурным гашением сигнала ФЛ по сравнению с центром Er-O1, доминирующим в неотожженных структурах при низких температурах измерения.

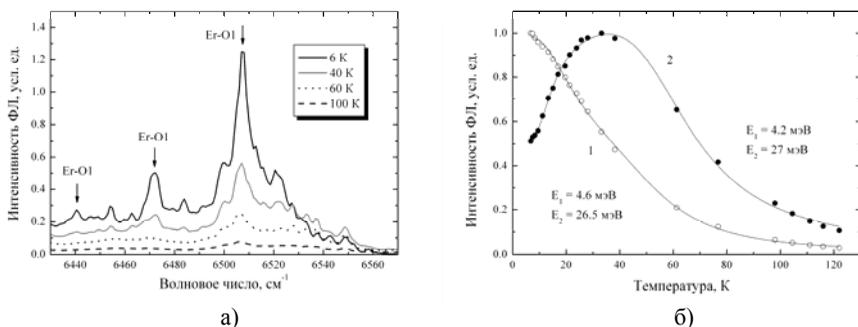


Рис.1. а) Спектры ФЛ СМЛЭ структуры Si:Er/Si ($T_p = 500^\circ\text{C}$) при $T = 6\text{ K}, 40\text{ K}, 60\text{ K}$ и 100 K . б) Температурные зависимости интенсивности ФЛ излучательного центра Er-O1 (6507 cm^{-1}) (1) и низкосимметричных эрбиевых центров, излучающих в диапазоне $6520\text{-}6550\text{ cm}^{-1}$ (2) в СМЛЭ структуре Si:Er/Si ($T_p = 500^\circ\text{C}$).

В разделе 3.4 приводятся результаты исследования люминесцентных свойств волноводных слоев Si:Er, выращенных методом СМЛЭ на подложках "кремний-на-изоляторе" (SOI). Показано, что основные особенности излучающих эрбиевых центров, характерные для структур Si:Er на кремнии (характер штарковского расщепления основного состояния, ширина спектральных линий, условия формирования и трансформации излучающих центров при термообработке), сохраняются при эпитаксии на подложках SOI. Для полученных структур Si:Er/SOI продемонстрирована интенсивная ФЛ ионов эрбия, в том числе излучательного центра Er-1 с рекордно узкой линией ФЛ ($< 10\text{ мкэВ}$). Измеренное значение характерного времени спада эрбиевой ФЛ $\tau \sim 1\text{ мс}$ (при низких температурах измерения) соответствует излучательному времени жизни иона Er в кремнии, что, наряду с результатами исследований методом просвечивающей электронной микроскопии, подтверждает высокое качество полученных структур Si:Er/SOI. Получение волноводных слоев Si:Er с центром Er-1 на подложках SOI в процессе, максимально совместимом с современной CMOS технологией открывает перспективу создания лазерных структур на основе кремния, легированного ионами эрбия.

В **Главе 4** приводятся результаты исследования люминесцентных свойств эпитаксиальных структур Si:Er/Si в условиях импульсного оптического возбуждения в широком интервале значений мощности и длины волны ($\lambda_{\text{ex}} = 500\text{-}960\text{ нм}$) возбуждающего излучения.

В разделе 4.1 указываются основные особенности, возникающие при исследовании структур Si:Er/Si в условиях импульсного возбуждения, а также приводится характерная временная зависимость (кинетика) сигнала ФЛ на длине волны излучательного перехода иона Er^{3+} (1535 нм).

В разделе 4.2 рассмотрены зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности оптического возбуждения при различных длинах волн возбуждающего излучения в спектральном диапазоне, соответствующем межзонному поглощению кремния.

Определены характерные значения мощности возбуждения, соответствующие переходу от линейного участка зависимости $I(P)$ к режиму насыщения ФЛ ионов эрбия, при различных значениях длины волны возбуждающего излучения.

В разделе 4.3 показано, что неоднородность оптического возбуждения структур Si:Er/Si может оказывать существенное влияние на вид зависимостей интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности и длины волны оптического возбуждения, если латеральный размер исследуемых структур превышает характерный размер пятна возбуждающего излучения, в частности при фокусировке лазерного луча. Это связано с тем, что в условиях насыщения эрбиевой ФЛ значительный вклад в суммарный сигнал ФЛ дают области, удаленные от центра пятна, с существенно меньшей плотностью мощности возбуждающего излучения. С использованием скорректированной методики измерения зависимостей интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности накачки (в условиях однородного возбуждения структур) было определено значение эффективного сечения возбуждения ионов эрбия в СМЛЭ структурах Si:Er/Si. Полученное значение эффективного сечения возбуждения $5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ (при $T = 4,2 \text{ К}$) более, чем на порядок превосходит величину, измеряемую в условиях неоднородного возбуждения исследуемых структур, а также на порядок превышает значения эффективного сечения возбуждения структур Si:Er/Si, опубликованные ранее в работах [4,5].

В разделе 4.4 рассматриваются возможные причины насыщения эрбиевой ФЛ в условиях интенсивного импульсного оптического возбуждения структур Si:Er/Si. Показано, что интенсивность ФЛ эрбия в насыщении существенно зависит от температуры измерения (падение интенсивности ФЛ составляет ~ 3 раза при увеличении температуры от 16 до 70 К), поэтому насыщение эрбиевой ФЛ в указанных условиях не может быть связано с возбуждением всех оптически активных эрбиевых центров, имеющих в исследуемых структурах. Для объяснения полученного результата проведен анализ системы уравнений баланса для концентрации электронно-дырочных пар, экситонов и возбужденных ионов эрбия при высоких уровнях возбуждения с учетом взаимодействия ионов эрбия и экситонов со свободными носителями заряда. Показано, что ограничение роста числа экситонов вследствие взаимодействия со свободными носителями заряда в совокупности с оже-девозбуждением ионов эрбия при высоких уровнях накачки может приводить к насыщению концентрации возбужденных ионов эрбия на уровне значительно меньшем полного числа оптически активных эрбиевых центров и существенно зависящем от температуры измерения.

В разделе 4.5 приводятся результаты исследования спектров и кинетики излучательной рекомбинации носителей заряда (межзонной ФЛ) в структурах Si:Er/Si в условиях интенсивного импульсного оптического возбуждения. Полученные спектры и кинетика межзонной ФЛ свидетельствуют о возникновении в исследуемых структурах Si:Er/Si электронно-дырочной плазмы (ЭДП) при высоких уровнях оптической накачки. Показано, что установление насыщения эрбиевой ФЛ происходит в том же диапазоне значений мощности возбуждения, в котором наблюдается переход Мотта от режима генерации свободных экситонов к образованию ЭДП. Таким образом, насыщение эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si в условиях импульсной

оптической накачки связывается с возрастанием безызлучательного оже-девозбуждения ионов эрбия и ограничением концентрации экситонов, участвующих в процессе возбуждения эрбиевых центров, при переходе от режима генерации свободных экситонов к образованию электронно-дырочной плазмы.

В разделе 4.6 приведены результаты исследования кинетики ФЛ ионов эрбия в структурах Si:Er/Si, в том числе кинетики нарастания эрбиевой ФЛ с наносекундным временным разрешением, при различных значениях мощности и длины волны волны возбуждающего излучения. Показано, что характерное время передачи возбуждения от электронной подсистемы кремния ионам эрбия в структурах Si:Er/Si, определяющее кинетику нарастания эрбиевой ФЛ при низких уровнях оптической накачки, составляет менее 5 нс. При высоких уровнях оптического возбуждения в кинетике нарастания эрбиевой ФЛ возникает медленная компонента с характерным временем ~ 1 мкс (рис.2(а)). Появление данной компоненты связывается со снижением эффективности возбуждения ионов эрбия и интенсивным безызлучательным девозбуждением при высокой концентрации носителей заряда и образовании электронно-дырочной плазмы. Обнаружено снижение вклада медленной компоненты в кинетику нарастания ФЛ эрбия при уменьшении длины волны возбуждающего излучения (рис.2(б)). Этот результат указывает на существенное влияние диффузии носителей заряда из кремниевой подложки в легированный слой Si:Er на процессы возбуждения ионов эрбия в исследованных структурах.

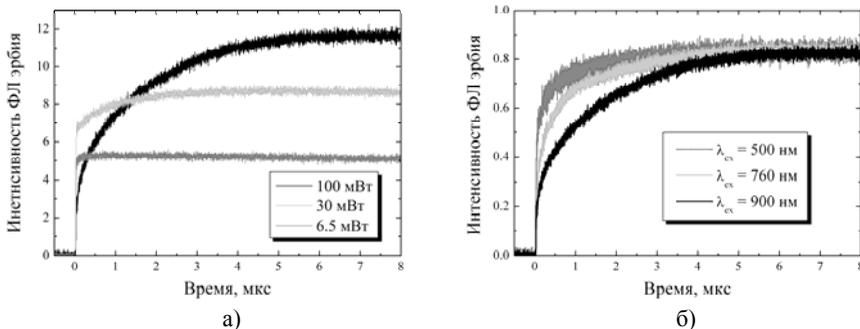


Рис.2. Кинетика нарастания эрбиевой ФЛ в структуре Si:Er/Si: а) при различных значениях мощности возбуждения ($\lambda_{ex} = 900$ нм); б) при различных значениях длины волны возбуждающего излучения ($P = 100$ мВт). $T = 77$ К.

Глава 5 посвящена исследованию спектров возбуждения ФЛ ионов эрбия в эпитаксиальных структурах Si:Er/Si в широком спектральном диапазоне излучения накачки, включая области межзонного ($h\nu_{ex} > E_g$) и подзонного ($h\nu_{ex} < E_g$) возбуждения кремния, а также прямого оптического возбуждения ионов эрбия. Исследование спектров возбуждения ФЛ осуществлялось с использованием параметрического генератора света (ОРО) с длительностью импульса ~ 5 нс.

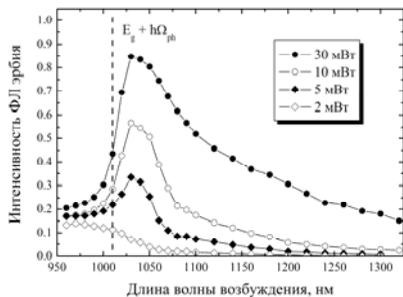
В разделе 5.1 представлены спектры возбуждения эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si, полученные при различных значениях мощности возбуждающего излучения.

Показано, что при высоких уровнях импульсной оптической накачки сигнал эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si (а также в структурах Si:Er/SOI и SiGe:Er/Si), наблюдается в широком диапазоне длин волн возбуждающего излучения, включая область энергий кванта меньших ширины запрещенной зоны кремния ($h\nu_{ex} < E_g$). Также обнаружено, что при высокой мощности оптической накачки в спектральной области, соответствующей краю межзонного поглощения кремния, наблюдается резкое возрастание интенсивности ФЛ эрбия с увеличением длины волны возбуждения и в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ возникает пик с максимумом на длине волны 1030 нм (рис.3(а)).

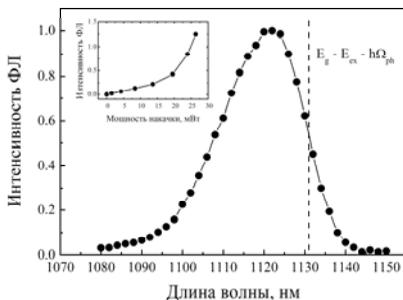
В разделе 5.2 приводятся результаты сравнительного исследования эрбиевой и экситонной ФЛ в структурах Si:Er/Si, на основании которых устанавливается механизм возбуждения ФЛ эрбия в условиях подзонной оптической накачки. Также в данном разделе приводятся экспериментальные факты, объясняющие возникновение пика в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ вблизи края межзонного поглощения кремния.

Для определения механизма возбуждения эрбиевой ФЛ при подзонной оптической накачке было проведено сравнительное исследование спектров возбуждения эрбиевой и межзонной (экситонной) ФЛ. Было обнаружено, что, несмотря на резкое падение интенсивности экситонной ФЛ при $h\nu_{ex} < E_g$, генерация экситонов в исследуемых структурах Si:Er/Si осуществляется и при подзонном оптическом возбуждении. На рис.3(б) приведен спектр межзонной ФЛ кремния, полученный на длине волны возбуждения $\lambda_{ex} = 1300$ нм, т.е. при энергии фотона излучения накачки существенно (более чем на 200 мэВ) меньшей ширины запрещенной зоны кремния. Приведенный спектр ФЛ соответствует излучательной рекомбинации свободных экситонов в кремнии с испусканием ТО-фонона. Соотношение интенсивностей эрбиевой и экситонной ФЛ, полученное при межзонной и подзонной накачке, показало, что возбуждение ионов эрбия в кремнии при подзонной накачке происходит, как и в случае межзонного возбуждения, вследствие генерации в исследуемых структурах свободных экситонов. Генерация экситонов в указанных условиях осуществляется, по-видимому, в результате двухступенчатого процесса поглощения с участием глубоких примесных состояний в запрещенной зоне кремния, что подтверждается сверхлинейной зависимостью интенсивности экситонной ФЛ от мощности излучения накачки (см. вставку к рис.3(б)).

Возникновение пика в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ вблизи края собственного поглощения кремния связано с увеличением возбуждаемой области активного слоя Si:Er (и числа возбуждаемых эрбиевых центров) при переходе к подзонному излучению накачки ($\lambda_{ex} > 1020$ нм) с низким коэффициентом поглощения в кремнии. В этом случае излучение накачки может эффективно распространяться в объеме исследуемой структуры вследствие многократного отражения от границ образца и возбуждать ионы эрбия в областях активного слоя Si:Er, расположенных вне пятна лазерного излучения. Показано, что при измерении спектра возбуждения ФЛ эрбия в условиях возбуждения всей площади активного слоя Si:Er наблюдается монотонное падение интенсивности эрбиевой ФЛ при увеличении длины волны излучения накачки, и пик в спектре возбуждения эрбиевой ФЛ отсутствует.



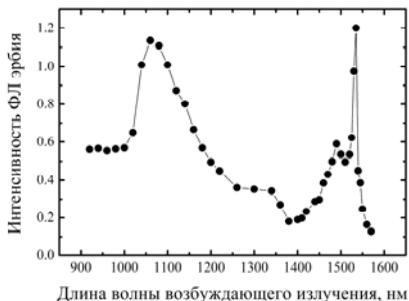
а)



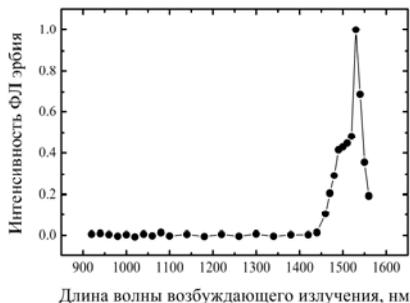
б)

Рис.3. а) Спектры возбуждения ФЛ ионов эрбия в структуре Si:Er/Si при различных значениях мощности оптической накачки. б) Спектр экситонной ФЛ в структуре Si:Er/Si в условиях подзонного оптического возбуждения ($\lambda_{\text{ex}} = 1300$ нм). $T = 77$ К. На вставке: зависимость интенсивности экситонной ФЛ от мощности возбуждающего излучения.

В разделе 5.3 приведены результаты исследования ФЛ ионов эрбия в кремнии в условиях прямой оптической накачки перехода ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ (на длинах волн 1,48 и 1,54 мкм). Описана методика исследования ФЛ эрбия в условиях прямой оптической накачки. Показано, что при высоких уровнях накачки прямое оптическое возбуждение ионов эрбия сопоставимо по эффективности с межзонным при низких температурах и на несколько порядков превосходит эффективность межзонного возбуждения при высоких температурах. В случае прямого оптического возбуждения сигнал ФЛ ионов эрбия в кремнии наблюдается вплоть до комнатной температуры (рис.4).



а)



б)

Рис.4. Спектры возбуждения эрбиевой ФЛ в СМЛЭ структуре Si:Er/Si при $T = 15$ К (а) и $T = 300$ К (б). Сигнал эрбиевой ФЛ при возбуждении в спектральном диапазоне 1450-1580 нм обусловлен прямым оптически возбуждением ионов эрбия в кремнии.

В разделе 5.4 приводятся результаты сравнительного исследования температурной зависимости и кинетики эрбиевой ФЛ в условиях межзонного и прямого оптического возбуждения ионов эрбия в структурах Si:Er/Si. Показано, что падение интегральной интенсивности эрбиевой ФЛ с увеличением температуры от 15 до 300 К составляет ~ 50 раз, т.е. значительно (более чем на 2 порядка) меньше, чем при межзонном возбуждении. При этом уменьшение времени релаксации эрбиевой ФЛ составило от 1 мс при 15 К до 0,4 мс при 300 К. Полученный результат свидетельствует о том, что в исследованных структурах Si:Er/Si для значительной доли излучающих эрбиевых центров, возбуждаемых при прямом поглощении излучения накачки, основные термоактивируемые процессы безызлучательного девозбуждения (ождевозбуждение равновесными носителями заряда, процесс обратной передачи энергии) являются существенно подавленными вплоть до комнатной температуры.

Исследовано влияние подсветки структур Si:Er/Si непрерывным межзонным излучением на кинетику эрбиевой ФЛ в условиях прямого оптического возбуждения ионов эрбия. Показано, что включение межзонной подсветки приводит к значительному (приблизительно в 2 раза) снижению времени спада эрбиевой ФЛ при комнатной температуре. Таким образом, продемонстрировано эффективное взаимодействие эрбиевых центров, возбуждаемых при прямой оптической накачке, с электронной подсистемой матрицы кремния.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в работе.

Основные результаты работы

1. Исследованы люминесцентные свойства структур Si:Er/Si, выращенных методом сублимационной МЛЭ. Определена внешняя квантовая эффективность ФЛ ионов эрбия на длине волны 1,54 мкм. Установлено, что максимальное значение внешней квантовой эффективности в эпитаксиальных структурах Si:Er/Si составляет 1,6% и наблюдается при температуре жидкого гелия ($T = 4,2$ К) и низких уровнях оптического возбуждения ($P < 1$ мВт), соответствующих линейному участку зависимости интенсивности ФЛ от мощности накачки.

2. Возбуждение оптически активных эрбиевых центров, доминирующих при низких температурах измерения ($T < 60$ К) в спектрах ФЛ эпитаксиальных структур Si:Er/Si без послеростовой термообработки, осуществляется экситонами, связанными на мелких примесных центрах с энергией ионизации 40-50 мэВ. При высоких температурах измерения основной вклад в спектры ФЛ дают эрбиевые комплексы, возбуждаемые с участием глубоких уровней в запрещенной зоне кремния. Отжиг структур при температурах 800-900°C приводит к увеличению вклада в спектр эрбиевой ФЛ второго типа оптически активных центров и существенно снижает температурное гашение эрбиевой ФЛ.

3. Исследованы люминесцентные свойства волноводных структур Si:Er, впервые выращенных методом МЛЭ на подложках "кремний-на-изоляторе" (SOI). Для полученных структур Si:Er/SOI продемонстрирована интенсивная ФЛ ионов эрбия, в том числе излучательного центра Er-1 с рекордно узкой линией ФЛ (< 10 мкэВ). Показано, что время спада эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/SOI при низких температурах измерения составляет ~ 1 нс и соответствует времени излучательной релаксации ионов эрбия в кремнии.

4. В структурах Si:Er/Si сигнал эрбиевой ФЛ наблюдается в широком диапазоне длин волн возбуждающего излучения, включая область энергий кванта меньших ширины запрещенной зоны кремния ($h\nu_{ex} < E_g$). Показано, что при подзонной оптической накачке структур Si:Er/Si и Si:Er/SOI, как и в случае межзонной накачки, реализуется экситонный механизм возбуждения ионов эрбия. Генерация экситонов в указанных условиях осуществляется в результате двухфотонного поглощения или двухступенчатого процесса поглощения с участием примесных состояний в запрещенной зоне кремния.

5. Продемонстрировано существенное влияние неоднородности оптического возбуждения структур Si:Er/Si на зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности и длины волны возбуждающего излучения. Эффективное сечение возбуждения ФЛ ионов эрбия в кремнии, измеренное в условиях однородного возбуждения структур Si:Er/Si, составляет $5 \cdot 10^{-14}$ см² при $T = 4,2$ К и на порядок превосходит ранее опубликованные значения. Возникновение пика в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ вблизи края межзонного поглощения кремния связано с существенным увеличением области возбуждения при переходе к подзонному излучению накачки ($\lambda_{ex} > 1020$ нм) с малым коэффициентом поглощения в кремнии вследствие эффективного распространения возбуждающего излучения в объеме исследуемых структур.

6. Характерное время передачи возбуждения от электронной подсистемы кремния ионам эрбия в структурах Si:Er/Si, определяющее кинетику нарастания эрбиевой ФЛ при низких уровнях оптической накачки, составляет величину менее 5 нс. При высоких уровнях накачки в кинетике нарастания эрбиевой ФЛ возникает медленная компонента с характерным временем порядка 1 мкс. Появление данной компоненты связывается со снижением эффективности возбуждения ионов эрбия и интенсивным безызлучательным девозбуждением при высокой концентрации носителей заряда и образовании электронно-дырочной плазмы.

7. Впервые исследованы излучательные свойства иона Er^{3+} в кремнии в условиях прямой оптической накачки перехода ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ (на длинах волн 1,48 и 1,54 мкм). Показано, что при высоких уровнях накачки прямое оптическое возбуждение ионов эрбия сопоставимо по эффективности с межзонным при низких температурах и на несколько порядков превосходит эффективность межзонного возбуждения при высоких температурах. Сравнение температурного гашения и кинетики ФЛ эрбия в условиях прямого и межзонного оптического возбуждения показало, что в условиях прямого оптического возбуждения основные термоактивируемые процессы безызлучательного девозбуждения ионов эрбия существенно подавлены. В случае прямого оптического возбуждения сигнал ФЛ ионов эрбия в кремнии наблюдается вплоть до комнатной температуры.

Цитируемая литература

- [1] A.J.Kenyon. Erbium in silicon. Topical review / A.J.Kenyon // *Semicond. Sci. Technol.* 2005. V.20. P.R65.
- [2] A.Polman. Erbium implanted thin film photonic materials / A.Polman // *J. Appl. Phys.* 1997. V.82. P.1.
- [3] F.Priolo. Excitation and nonradiative deexcitation processes of Er^{3+} in crystalline Si / F.Priolo, G.Franzo, S.Coffa, A.Carnera // *Phys.Rev.B.* 1998. V.57. P.4443.
- [4] J.Palm. Electroluminescence of erbium-doped silicon / J.Palm, F.Gan, B.Zheng, J.Michel, L.C.Kimmerling // *Phys. Rev. B* 1996. V.54. P.17603.
- [5] N.Q.Vinh. Concentration of Er^{3+} ions contributing to 1.5- μm emission in Si/Si:Er nanolayers / N.Q.Vinh, S.Minissale, H.Vrielinck, T.Gregorkiewicz // *Phys. Rev. B.* 2007. V.76. P.085339.

Список публикаций автора по теме диссертации

- [A1] В.Г.Шенгуров. Светоизлучающие слои твердого раствора кремний-германий, легированные эрбием в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии / В.Г.Шенгуров, С.П.Светлов, В.Ю.Чалков, Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, Б.Я.Бэр, Ю.Н.Дроздов, А.Н.Яблонский // ФТП. 2002. Т.36. №6. С.662-665.
- [A2] Б.А.Андреев. Эффективность и температурное гашение люминесценции в эпитаксиальных кремниевых структурах, легированных эрбием / Б.А.Андреев, Т.Gregorkiewicz, З.Ф.Красильник, В.П.Кузнецов, Д.И.Курицын, М.В.Степихова, В.Г.Шенгуров, В.Б.Шмагин, А.Н.Яблонский, W.Jantsch // Известия РАН. Серия физическая. 2003. Т.67. №2. С.273-276.
- [A3] Z.F.Krasilnik. SMBE grown uniformly and selectively doped Si:Er structures for LEDs and lasers / Z.F.Krasilnik, V.Ya.Aleshkin, B.A.Andreev, O.V.Gusev, W.Jantsch, L.V.Krasilnikova, D.I.Kryzhkov, V.P.Kuznetsov, V.G.Shengurov, V.B.Shmagin, N.A.Sobolev, M.V.Stepikhova, A.N.Yablonsky // Towards the first silicon laser. Eds. L.Pavesi, S.Gaponenko, L.Dal Negro, Kluwer Academic Publishers. 2003. P.445.
- [A4] Б.А.Андреев. Особенности спектров возбуждения фотолюминесценции ионов Er^{3+} в эпитаксиальных кремниевых структурах, легированных эрбием / Б.А.Андреев, Т.Gregorkiewicz, М.А.Ж.Клик, З.Ф.Красильник, Д.И.Крыжков, В.П.Кузнецов, А.Н.Яблонский // ФТТ. 2004. Т.46. №1. С.98-101.
- [A5] Б.А.Андреев. Спектроскопия возбуждения эрбиевой фотолюминесценции в эпитаксиальных структурах Si:Er / Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, А.Н.Яблонский, В.П.Кузнецов, Т.Gregorkiewicz, М.А.Ж.Клик // ФТТ. 2005. Т.47. №1. С. 83.
- [A6] A.N.Yablonskiy. Photoluminescence excitation spectroscopy of erbium in epitaxially grown Si:Er structures / A.N.Yablonskiy, M.A.J.Klik, B.A.Andreev, V.P.Kuznetsov, Z.F. Krasilnik, T.Gregorkiewicz // Optical Materials. 2005. V.27. №5. P.890.
- [A7] Z.F.Krasilnik. Erbium doped silicon single- and multilayer structures for LED and laser applications / Z.F.Krasilnik, B.A.Andreev, T.Gregorkiewicz, W.Jantsch, M.A.J.Klik, D.I.Kryzhkov, L.V.Krasil'nikova, V.P.Kuznetsov, H.Przybylinska, D.Yu.Remizov, V.G.Shengurov, V.B.Shmagin, M.V.Stepikhova, V.Yu.Timoshenko, N.Q.Vinh, A.N.Yablonskiy, D.M.Zhigunov // Rare-Earth Doping for Optoelectronic Applications, edit. by T.Gregorkiewicz, Y.Fujiwara, M.Lipson, J.M.Zavada (Mater. Res. Soc. Symp. Proc.). Warrendale, PA. 2005. V.866. P.13.
- [A8] Z.F.Krasilnik. Outstanding Meeting Paper: Erbium doped silicon single- and multilayer structures for LED and laser applications / Z.F.Krasilnik, B.A.Andreev, T.Gregorkiewicz, W.Jantsch, D.I.Kryzhkov, L.V.Krasilnikova, V.P.Kuznetsov, H.Przybylinska, D.Yu.Remizov, V.B.Shmagin, M.V.Stepikhova, V.Yu.Timoshenko, N.Q.Vinh, A.N.Yablonskiy, D.M.Zhigunov // Journal of Materials Research. 2006. V.21. P.574.
- [A9] О.В.Белова. Электрофизические свойства слоев Si:Er/Si, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии / О.В.Белова, В.Н.Шабанов, А.П.Касаткин, О.А.Кузнецов, А.Н.Яблонский, М.В.Кузнецов, В.П.Кузнецов, А.В.Корнаухов, Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник // ФТП. 2008. Т.42. №2. С.136.
- [A10] A.N.Yablonskiy. Band-to-band and direct optical excitation of Er in silicon: Comparison of kinetics, temperature dependence of erbium PL / A.N.Yablonskiy,

- L.V.Krasilnikova, B.A.Andreev, D.I.Kryzhkov, V.P.Kuznetsov and Z.F.Krasilnik // *Physica B: Condensed Matter*. 2009. V.404. №23-24. P.4601.
- [A11] А.Н.Яблонский. Особенности механизмов возбуждения эрбиевой ФЛ в эпитаксиальных структурах Si:Er/Si / А.Н.Яблонский, Б.А.Андреев, Л.В.Красильникова, Д.И.Крыжков, В.П.Кузнецов, З.Ф.Красильник // *ФТП*. 2010. Т.44. №11. С.1519.
- [A12] Л.В.Красильникова. Особенности спектров возбуждения и кинетики ФЛ структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:Er/Si}$ с релаксированным гетерослоем / Л.В.Красильникова, А.Н.Яблонский, М.В.Степихова, Ю.Н.Дроздов, В.Г.Шенгуров, З.Ф.Красильник // *ФТП*. 2010. Т.44. С.1527.
- [A13] Б.А.Андреев. Светоизлучающие структуры на основе кремния, легированного эрбием в процессе сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии / Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, Д.И.Крыжков, В.П.Кузнецов, А.О.Солдаткин, М.В.Степихова, В.Б.Шмагин, А.Н.Яблонский, W.Jantsch, T.Gregorkiewicz // *Материалы V Российской конференции по физике полупроводников*. Нижний Новгород. 10-14 сентября 2001. С.89.
- [A14] B.A.Andreev. Er-related luminescence in Si:Er epilayers grown with Sublimation Molecular Beam Epitaxy / B.A.Andreev, Z.F.Krasilnik, D.I.Kryzhkov, V.P.Kuznetsov, V.B.Shmagin, N.A.Sobolev, M.V.Stepikhova, A.N.Yablonsky // *XI-th Feofilov Symposium on Spectroscopy of Crystals Activated by Rare-Earth and Transition Metal Ions*. Kazan. September 24-28 2001. *Proceedings of SPIE* 2002. V.766. P.89-93.
- [A15] Б.А.Андреев. Эффективность и температурное гашение люминесценции в эпитаксиальных кремниевых структурах, легированных эрбием / Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, Д.И.Курицын, В.П.Кузнецов, С.П.Светлов, М.В.Степихова, В.Ю.Чалков, В.Г.Шенгуров, В.Б.Шмагин, А.Н.Яблонский, W.Yanch, T.Gregorkiewicz // *Материалы всероссийского совещания "Нанопотоника"*, Нижний Новгород. 11-14 марта 2002. С.131.
- [A16] В.Г.Шенгуров. Светоизлучающие эпитаксиальные структуры на основе твердого раствора кремний-германий, легированные эрбием / В.Г.Шенгуров, С.П.Светлов, В.Ю.Чалков, Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, Ю.Н.Дроздов, А.Н.Яблонский, Б.Я.Бэр // *Материалы всероссийского совещания "Нанопотоника"*. Нижний Новгород. 11-14 марта 2002. С.297.
- [A17] B.A.Andreev. Quantum efficiency and temperature quenching of the luminescence of uniformly and selectively erbium-doped silicon structures produced by sublimation MBE method / B.A.Andreev, W.Jantsch, Z.F.Krasilnik, D.I.Kuritzyn, V.P.Kuznetsov, M.V.Stepikhova, A.N.Yablonsky // *Proceedings of the 26th International Conference on the Physics of Semiconductors*. Edinburgh. Great Britain. July 29 - August 2 2002. P63. ISBN:0750309245.
- [A18] Z.F.Krasilnik. Sublimation molecular beam epitaxy grown uniformly and selectively doped Si:Er structures for LEDs and lasers / Z.F.Krasilnik, V.Y.Aleshkin, B.A.Andreev, O.B.Gusev, W.Jantsch, L.V.Krasilnikova, D.I.Kryzhkov, V.P.Kuznetsov, E.N.Morozova, V.G.Shengurov, V.B.Shmagin, N.A.Sobolev, M.V.Stepikhova, A.N.Yablonsky // *NATO Advanced research workshop "Towards the first silicon laser"*, Trento, Italy. September 21-26 2002. *Book of Abstracts*. P.46.

- [A19] Б.А.Андреев. Особенности спектров возбуждения ФЛ ионов Er^{3+} в эпитаксиальных кремниевых структурах, легированных эрбием / Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, Д.И.Крыжков, А.Н.Яблонский, В.П.Кузнецов, T.Gregorkiewicz, M.A.J.Klik // Материалы всероссийского совещания "Нанофотоника". Нижний Новгород. 17-20 марта 2003. С.343.
- [A20] M.A.J.Klik. Auger quenching in Si:Er investigated with near- and subbandgap excitation spectroscopy / M.A.J.Klik, T.Gregorkiewicz, A.N.Yablonskiy, B.A.Andreev // Proceedings of MRS Spring Meeting. Symposium I. San Francisco, USA. April 21-24 2003. I7.3. P.187.
- [A21] B.A.Andreev. Peculiarities of erbium excitation in sublimation MBE Si:Er structures / B.A.Andreev, T.Gregorkiewicz, M.A.J.Klik, Z.F.Krasilnik, D.I.Kryzhkov, V.P.Kuznetsov, A.N.Yablonskiy // Proceedings of E-MRS Spring Meeting. Strasbourg, France. June 10 - 13 2003.
- [A22] B.A.Andreev. Photoexcitation efficiency of Er^{3+} ions in silicon structures as a function of nature, concentration and distribution of optically and electrically active centers / B.A.Andreev, T.Gregorkiewicz, M.Klik, Z.F.Krasilnik, D.I.Kryzhkov, V.P.Kuznetsov, V.B.Shmagin, A.O.Soldatkin, A.N.Yablonskiy // 22nd International Conference on Defects in Semiconductors. Aarhus, Denmark. 28 July - 1 August 2003. Book of Abstracts II, PA72.
- [A23] Б.А.Андреев. Спектры возбуждения ФЛ ионов Er^{3+} в эпитаксиальных кремниевых структурах / Б.А.Андреев, T.Gregorkiewicz, M.A.J.Klik, З.Ф.Красильник, В.П.Кузнецов, А.Н.Яблонский // Материалы VI Российской конференции по физике полупроводников. Санкт-Петербург. 27-31 октября 2003. С.435.
- [A24] В.Я.Алешкин. Эффективность люминесценции в однородно и селективно легированных эрбием эпитаксиальных кремниевых структурах / В.Я.Алешкин, Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, Д.И.Крыжков, В.П.Кузнецов, М.В.Степихова, В.Б.Шмагин, А.Н.Яблонский, T.Gregorkiewicz, W.Jantsch // Материалы VI Российской конференции по физике полупроводников. Санкт-Петербург. 27-31 октября 2003. С.448.
- [A25] Б.А.Андреев. Спектроскопия возбуждения эрбиевой фотолюминесценции в эпитаксиальных структурах Si:Er и SiGe:Er / Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, В.П.Кузнецов, А.Н.Яблонский, T.Gregorkiewicz, M.A.J.Klik // Материалы всероссийского совещания "Нанофотоника". Нижний Новгород. 2-6 мая 2004. С.303.
- [A26] Б.А.Андреев. Люминесцентные свойства структур Si:Er/Si, выращенных методом сублимационной МЛЭ / Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, Д.И.Крыжков, А.Н.Яблонский, В.П.Кузнецов, T.Gregorkiewicz, M.Klik, N.Q.Vinh // Материалы всероссийского совещания "Нанофотоника". Нижний Новгород. 2-6 мая 2004. С.96.
- [A27] B.A.Andreev. Excitation spectroscopy of erbium PL in epitaxially grown Si:Er and SiGe:Er structures / B.A.Andreev, Z.F.Krasilnik, V.P.Kuznetsov, A.N.Yablonskiy, T.Gregorkiewicz, M.A.J.Klik // E-MRS Spring Meeting. Strasbourg, France. May 24-28 2004. A1-VI.4.
- [A28] T.Gregorkiewicz. Photonic properties of Er-doped Si multi-nanolayer structures / T.Gregorkiewicz, N.Q.Vinh, M.A.J.Klik, S.Minissale, B.A.Andreev, A.N.Yablonskiy // E-MRS-2005 Spring Meeting. Strasbourg, France. May 31 - June 3 2005.

- [A29] Z.F.Krasilnik. Erbium doped silicon single- and multilayer structures for LED and laser applications / Z.F.Krasilnik, B.A.Andreev, T.Gregorkiewicz, W.Jantsch, D.I.Kryzhkov, L.V.Krasilnikova, V.P.Kuznetsov, H.Przybylinska, D.Yu.Remizov, V.B.Shmagin, M.V.Stepikhova, V.Yu.Timoshenko, N.Q.Vinh, A.N.Yablonskiy, D.M.Zhigunov // Proceedings of 2005 MRS Spring Meeting. Symposium V. San Francisco, USA. March 28 - April 1 2005. V1.4. (Invited).
- [A30] Б.А.Андреев. Люминесцентные свойства редкоземельных элементов в кремнии / Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, Л.В.Красильникова, Д.И.Крыжков, В.П.Кузнецов, Д.Ю.Ремизов, М.В.Степихова, В.Ю.Чалков, В.Г.Шенгуров, В.Б.Шмагин, А.Н.Яблонский // Симпозиум "Нанофизика и нанoeлектроника". Нижний Новгород. 13-17 марта 2006. Т.1. С.55.
- [A31] Б.А.Андреев. Излучательные свойства примесных центров, связанных с эрбием, в структурах Si:Er/SOI, полученных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии / Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, Д.И.Крыжков, А.Н.Яблонский, В.П.Кузнецов, T.Gregorkiewicz // Материалы Симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника". Нижний Новгород. 10-14 марта 2007. С.392.
- [A32] Б.А.Андреев. Люминесцентные свойства волноводных структур Si:Er/SOI, полученных методом сублимационной МЛЭ / Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, Д.И.Крыжков, А.Н.Яблонский, В.П.Кузнецов, T.Gregorkiewicz // Тезисы докладов VIII Российской конференции по физике полупроводников. Екатеринбург. 30 сентября - 5 октября 2007. С.128.
- [A33] Б.А.Андреев. Эффект электро-оптической памяти (с оптическим выходом на длине волны 1.54 мкм) в структурах Si:Er/Si / Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, Д.И.Крыжков, А.Н. Яблонский, В.П.Кузнецов, T.Gregorkiewicz, W.Jantsch // Материалы Симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника". Нижний Новгород. 10-14 марта 2008. С.489.
- [A34] Б.А.Андреев. Излучательные свойства эпитаксиальных волноводных структур Si:Er/SOI / Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, Д.И.Крыжков, А.Н.Яблонский, В.П.Кузнецов, T.Gregorkiewicz, Ng.Ng.На // Тезисы V Международной конференции "Кремний-2008". Черноголовка. 1 - 4 июля 2008. С.247.
- [A35] Б.А.Андреев. Запасенная электролюминесценция в диодных структурах Si:Er/Si / Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, Д.И.Крыжков, А.Н.Яблонский, В.П.Кузнецов, T.Gregorkiewicz, W.Jantsch // Тезисы V Международной конференции "Кремний-2008". Черноголовка. 1 - 4 июля 2008. С.249.
- [A36] Л.В.Красильникова. Спектроскопия возбуждения эрбиевой люминесценции в структурах Si:Er/Si и Si_{1-x}Ge_x:Er/Si / Л.В.Красильникова, А.Н.Яблонский, М.В.Степихова, З.Ф.Красильник, В.П.Кузнецов, В.Г.Шенгуров // Материалы XIII Международного симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника". Нижний Новгород. 16 - 20 марта 2009. С.362.
- [A37] B.A.Andreev. Photoluminescence of erbium-doped Si structures grown on SOI by molecular beam epitaxy / B.A.Andreev, Z.F.Krasilnik, D.I.Kryzhkov, V.P.Kuznetsov, A.N.Yablonskiy, T.Gregorkiewicz, N.Ha // 25th International Conference on Defects in Semiconductors. St-Petersburg, Russia. July 20-24 2009. P.157.

- [A38] A.N.Yablonskiy. Photoluminescence excitation spectroscopy and time-resolved PL studies of erbium luminescence in epitaxial Si:Er/Si, SiGe:Er/Si and Si:Er/SOI structures / A.N.Yablonskiy, B.A.Andreev, D.I.Kryzhkov, L.V.Krasilnikova, V.P.Kuznetsov, Z.F.Krasilnik // 25th International Conference on Defects in Semiconductors. St-Petersburg, Russia. July 20-24 2009. P.249.
- [A39] Б.А.Андреев. Излучательные свойства эпитаксиальных структур Si:Er/SOI / Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, Д.И.Крыжков, А.Н.Яблонский, В.П.Кузнецов, Т.Gregorkiewicz, Ng.Ng.На // Тезисы IX Российской конференции по физике полупроводников. Новосибирск-Томск. 28 сентября - 3 октября 2009. С.77.
- [A40] А.Н.Яблонский. Особенности спектров возбуждения эрбиевой ФЛ в эпитаксиальных структурах Si:Er/Si, SiGe:Er/Si и Si:Er/SOI / А.Н.Яблонский, Л.В.Красильникова, Б.А.Андреев, Д.И.Крыжков, В.П.Кузнецов, В.Г.Шенгуров, З.Ф.Красильник // Тезисы IX Российской конференции по физике полупроводников. Новосибирск-Томск. 28 сентября - 3 октября 2009. С.221.
- [A41] Л.В.Красильникова. Кинетика эрбиевой люминесценции в структурах Si:Er/Si и Si_{1-x}Ge_x:Er/Si при межзонном и прямом оптическом возбуждении / Л.В.Красильникова, А.Н.Яблонский, Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, В.П.Кузнецов, В.Г.Шенгуров // Тезисы IX Российской конференции по физике полупроводников. Новосибирск-Томск. 28 сентября - 3 октября 2009. С.215.
- [A42] B.A.Andreev. Time-resolved electroluminescence, photoluminescence and photoluminescence excitation spectroscopy of the sublimation MBE Si:Er/Si and Si:Er/SOI structures / B.A.Andreev, Z.F.Krasilnik, L.V.Krasilnikova, D.I.Kryzhkov, K.E.Kudryavtsev, V.P.Kuznetsov, D.V.Shengurov, V.B.Shmagin, A.N.Yablonskiy // Abstracts of the 3rd Workshop on the Impurity Based Electroluminescence Devices and Materials. Barcelona, Spain. 30 September - 3 October 2009. Abstract 14.
- [A43] L.V.Krasilnikova. Peculiarities of the photoluminescence excitation spectra in Er doped Si and SiGe structures / L.V.Krasilnikova, A.N.Yablonskiy, M.V.Stepikhova, D.V.Shengurov, V.P.Kuznetsov, V.G.Shengurov, Z.F.Krasilnik // Abstracts of the 3rd Workshop on the Impurity Based Electroluminescence Devices and Materials. Barcelona, Spain. 30 September - 3 October 2009. Abstract 60.
- [A44] А.Н.Яблонский. Особенности механизмов возбуждения эрбиевой ФЛ в эпитаксиальных структурах Si:Er/Si / А.Н.Яблонский, Б.А.Андреев, Л.В.Красильникова, Д.И.Крыжков, В.П.Кузнецов, З.Ф.Красильник // Материалы XIV Международного симпозиума "Нанозфизика и нанозлектроника". Нижний Новгород. 15-19 марта 2010. С.271.
- [A45] Б.А.Андреев. Излучательные свойства эпитаксиальных структур Si:Er/SOI / Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, Д.И.Крыжков, К.Е.Кудрявцев, В.П.Кузнецов, Д.В.Шенгуров, А.Н.Яблонский, Т.Gregorkiewicz, N.N.На // Материалы XIV Международного симпозиума "Нанозфизика и нанозлектроника". Нижний Новгород. 15 - 19 марта 2010. С.273.
- [A46] Л.В.Красильникова. Влияние релаксации упругих напряжений на люминесцентные свойства и процессы возбуждения редкоземельной примеси в эпитаксиальных структурах Si_{1-x}Ge_x:Er/Si / Л.В.Красильникова, А.Н.Яблонский, М.В.Степихова,

- В.Г.Шенгуров, З.Ф.Красильник // Материалы XIV Международного симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника". Нижний Новгород. 15 - 19 марта 2010. С.452.
- [A47] Б.А.Андреев. Светоизлучающие структуры на основе Si:Er для кремниевой оптоэлектроники / Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник, Д.И.Крыжков, В.П.Кузнецов, К.Е.Кудрявцев, В.Б.Шмагин, А.Н.Яблонский // Тезисы докладов VII Международной конференции "Кремний-2010". Нижний Новгород. 6-9 июля 2010г. С.252. (Приглашенный доклад)
- [A48] А.Н.Яблонский. Особенности механизмов возбуждения эрбиевой ФЛ в эпитаксиальных структурах Si:Er/Si и Si:Er/SOI / А.Н.Яблонский, Б.А.Андреев, Л.В.Красильникова, Д.И.Крыжков, В.П.Кузнецов, Д.В.Шенгуров, З.Ф.Красильник // Тезисы докладов VII Международной конференции "Кремний-2010". Нижний Новгород. 6-9 июля 2010г. С.148.
- [A49] Л.В.Красильникова. Особенности возбуждения ионов Er в структурах Si/SiGe:Er с отрелаксированным гетерослоем / Л.В.Красильникова, А.Н.Яблонский, М.В.Степихова, В.Г.Шенгуров, Ю.Н.Дроздов, З.Ф.Красильник // Тезисы докладов VII Международной конференции "Кремний-2010". Нижний Новгород. 6-9 июля 2010г. С.142.
- [A50] А.Н.Яблонский. Спектры возбуждения люминесценции ионов эрбия в кремнии в условиях интенсивной оптической накачки / А.Н.Яблонский, Б.А.Андреев, Д.И.Крыжков, В.П.Кузнецов, Д.В.Шенгуров, З.Ф.Красильник // Материалы XV Международного симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника". Нижний Новгород. 14 - 18 марта 2011. С.535.
- [A51] Л.В.Красильникова. Особенности процессов возбуждения редкоземельной примеси эрбия в эпитаксиальных структурах Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si / Л.В.Красильникова, М.В.Степихова, А.Н.Яблонский, В.Г.Шенгуров, З.Ф.Красильник // Материалы XV Международного симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника". Нижний Новгород. 14 - 18 марта 2011. С.490.
- [A52] Л.В.Красильникова. Процессы возбуждения редкоземельной примеси эрбия в эпитаксиальных структурах Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si / Л.В.Красильникова, М.В.Степихова, А.Н.Яблонский, В.Г.Шенгуров, З.Ф.Красильник // X Российская конференция по физике полупроводников. Нижний Новгород. 19-23 сентября 2011.
- [A53] А.Н.Яблонский. Спектры возбуждения и кинетика люминесценции ионов эрбия в кремнии в условиях интенсивной оптической накачки / А.Н.Яблонский, Б.А.Андреев, Д.И.Крыжков, В.П.Кузнецов, В.Г.Шенгуров, З.Ф.Красильник // X Российская конференция по физике полупроводников. Нижний Новгород. 19-23 сентября 2011.
- [A54] B.A.Andreev. Light-emitting Si:Er/Si, Si:Er/SOI structures grown by sublimation MBE / B.A.Andreev, Z.F.Krasilnik, K.E.Kudryavtsev, V.P.Kuznetsov, D.V.Shengurov, V.B.Shmagin, A.N.Yablonskiy // E-MRS-2011 Fall Meeting. Warsaw, Poland. September 19-23 2011. Invited.

Яблонский Артем Николаевич

**ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ, СПЕКТРЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ
И КИНЕТИКА ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕЛАКСАЦИИ
В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУРАХ,
ЛЕГИРОВАННЫХ ЭРБИЕМ**

Автореферат

Подписано к печати 13.10.2011 г. Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН
603950, Нижний Новгород, ГСП-105

