

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МИКРОСТРУКТУР**

На правах рукописи

Яблонский Артем Николаевич

**Фотолюминесценция, спектры возбуждения и кинетика
излучательной релаксации в эпитаксиальных кремниевых
структурах, легированных эрбием.**

*Специальность 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах*

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Научный руководитель:
доктор физ.-мат. наук
Андреев Борис Александрович

Нижний Новгород, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1 Излучающие структуры на основе кремния, легированного эрбием ·	15
1.1 Структуры на основе кремния, излучающие в ближнем ИК диапазоне · ·	15
1.2 Излучающие структуры Si:Er/Si	19
1.3 Механизм возбуждения ионов Er в кремнии	21
1.4 Методы получения кремниевых структур, легированных эрбием	27
Глава 2 Методика получения и экспериментального исследования светоизлучающих кремниевых структур, легированных эрбием	31
2.1 Сублимационная молекулярно-лучевая эпитаксия структур Si:Er/Si и Si:Er/SOI	31
2.2 Спектроскопия фотолуминесценции структур Si:Er/Si в ближнем ИК диапазоне	34
2.3 Методика измерения квантовой эффективности ФЛ излучающих структур Si:Er/Si в ближнем ИК диапазоне	37
2.4 Методика исследования кинетики и спектров возбуждения ФЛ структур Si:Er/Si в условиях импульсного оптического возбуждения	40
Глава 3 Эффективность и температурное гашение эрбиевой ФЛ в СМЛЭ структурах Si:Er/Si	43
3.1 Низкотемпературная ФЛ ионов эрбия в СМЛЭ структурах Si:Er/Si	43
3.2 Квантовая эффективность ФЛ эрбия в СМЛЭ структурах Si:Er/Si	48
3.3 Температурное гашение эрбиевой ФЛ в СМЛЭ структурах Si:Er/Si	52
3.4 ФЛ волноводных эпитаксиальных слоев Si:Er, выращенных на подложках "кремний-на-изоляторе" (SOI)	62
3.5 Выводы к Главе 3	65
Глава 4 ФЛ структур Si:Er/Si в условиях интенсивного импульсного оптического возбуждения	66
4.1 Особенности импульсного оптического возбуждения структур Si:Er/Si · ·	67
4.2 Зависимость интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности возбуждения: область межзонного оптического возбуждения	69
4.3 Влияние неоднородности оптической накачки на зависимость интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности возбуждения	74
4.4 Механизм насыщения эрбиевой ФЛ в условиях интенсивного импульсного оптического возбуждения	83

4.5	Межзонная ФЛ в структурах Si:Er/Si в условиях импульсного оптического возбуждения	88
4.6	Кинетика эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si и Si:Er/SOI	96
4.7	Выводы к Главе 4	109
Глава 5	Спектры возбуждения эрбиевой ФЛ в эпитаксиальных структурах Si:Er/Si.	
	Межзонное и прямое оптическое возбуждение ионов эрбия в кремнии	110
5.1	Спектры возбуждения эрбиевой ФЛ в эпитаксиальных структурах Si:Er/Si	111
5.2	Механизм подзонного возбуждения эрбиевой ФЛ в кремнии	118
5.3	Прямое оптическое возбуждение ионов эрбия в структурах Si:Er/Si	130
5.4	Температурное гашение эрбиевой ФЛ в условиях межзонного и прямого оптического возбуждения	137
5.5	Выводы к Главе 5	142
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	145
	Список работ автора по теме диссертации	147
	Список цитируемой литературы	154

ВВЕДЕНИЕ

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 кремний считался малоприменимым для нужд оптоэлектроники. Однако задача интеграции на одном чипе микроэлектронных и оптических компонент настоятельно требует создания эффективно излучающих структур на основе кремния. Работы в этом направлении интенсивно ведутся последние два десятилетия. 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 данных структурах в условиях интенсивной оптической накачки.

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 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 ($T = 4.2$ К) и низких уровнях оптического возбуждения ($P < 1$ мВт), соответствующих 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.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [A1-A54] и докладывались на V-X Российских конференциях по физике полупроводников (Нижний Новгород 2001, Санкт-Петербург 2003, Екатеринбург 2007, Новосибирск-Томск 2009, Нижний Новгород 2011), 26 Международной конференции по физике полупроводников (Эдинбург 2002), 22 и 25 Международных конференциях по дефектам в полупроводниках (Аархус 2003, Санкт-Петербург 2009), международных конференциях Европейского материаловедческого сообщества E-MRS (Страсбург 2003, 2004, 2005), всероссийских совещаниях "Нанофотоника" (Нижний Новгород 2002-2004), X-XV Международных симпозиумах "Нанофизика и наноэлектроника" (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 $T = 800-900^\circ\text{C}$ приводит к изменению типа доминирующих эрбиевых комплексов. В результате однократного отжига при $T = 800^\circ\text{C}$ в СМЛЭ 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 ($6500-6550$ 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. 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 $4.2-40$ К наряду с монотонным падением интенсивности доминирующей линии, отвечающей центру Er-O1, наблюдается аномальный рост интенсивности ФЛ эрбиевых комплексов, излучающих в спектральном диапазоне $6520-6550$ см⁻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 $\sim 40-50$ мэВ. Возрастание интенсивности ФЛ в спектральной области $6520-6550$ см⁻¹ при повышении температуры связывается с отрывом экситонов от мелких примесных центров и их захватом на более глубокие центры с энергией ионизации $250-300$ мэВ.

Исследовано влияние отжига СМЛЭ структур Si:Er/Si на температурное гашение эрбиевой ФЛ. Эрбиевые центры, излучающие в спектральном диапазоне $6520\text{-}6550\text{ см}^{-1}$, 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.

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 $\tau \sim 1\text{ нс}$ (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 известные из литературы значения эффективного сечения возбуждения структур Si:Er/Si.

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 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. 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. 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.

Глава 5 посвящена исследованию спектров возбуждения ФЛ ионов эрбия в эпитаксиальных структурах Si:Er/Si в широком спектральном диапазоне излучения накачки, включая области межзонного ($h\nu_{\text{ex}} > E_g$) и подзонного ($h\nu_{\text{ex}} < E_g$) 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 ($h\nu_{\text{ex}} < E_g$). 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.

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 $h\nu_{\text{ex}} < E_g$, генерация экситонов в исследуемых структурах Si:Er/Si осуществляется и при подзонном оптическом возбуждении. 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.

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 ($\lambda_{\text{ex}} > 1020$ 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.

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 прямой оптической накачки сигнал ФЛ ионов эрбия в кремнии наблюдается вплоть до комнатной температуры.

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 (оже-девозбуждение 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 Заключение сформулированы основные результаты, полученные в работе.

Глава 1. Излучающие структуры на основе кремния, легированного эрбием.

Данная глава посвящена описанию различных подходов к получению структур на основе кремния, излучающих в ближнем ИК диапазоне, в первую очередь кремниевых структур, легированных ионами эрбия. Рассматривается структура излучательных переходов во внутренней оболочке иона эрбия и основные механизмы возбуждения ионов эрбия в кремнии. Описываются основные методы получения структур Si:Er/Si.

1.1. Структуры на основе кремния, излучающие в ближнем ИК диапазоне.

Начиная с середины прошлого века кремний является основным материалом микроэлектроники, используемым для создания электронных приборов и интегральных схем. В настоящее время наблюдается повышенный интерес к созданию интегральных схем, в которых для передачи информации будут использоваться оптические сигналы, что позволит существенно увеличить скорость обмена информацией между различными элементами микросхем. Основным ограничением применения кремния в данной технологии является его низкая излучательная эффективность, связанная с непрямозонностью этого материала. В связи с этим в последнее время наблюдается повышенный интерес к созданию эффективных источников излучения на основе кремния. Конечной целью данных исследований является создание интегрированной кремниевой технологии, включающей в себя производство электронных и оптических элементов, входящих в состав единой интегральной схемы.

Значительный интерес в области телекоммуникационных применений привлекает также задача создания на базе кремния эффективного источника излучения с длиной волны в диапазоне 1.3-1.55 мкм, что соответствует окну прозрачности волоконно-оптических линий связи.

Существуют различные подходы к созданию излучающих структур ближнего ИК диапазона на основе кремния. В наиболее интересном для кремниевой оптоэлектроники диапазоне длин волн 1.5-1.6 мкм можно выделить несколько перспективных типов светоизлучающих структур:

- кремний, легированный ионами Er [1,2];
- кремний с преципитатами β -FeSi₂ [3];
- дислокационные кремниевые структуры [4];
- структуры SiGe с самоформирующиеся Ge(Si) островками [5,6];

На основе этих материалов уже получены светоизлучающие диоды, работающие вплоть до комнатной температуры. Однако параметры этих диодов далеки от значений, необходимых для успешного применения их в технике. К настоящему моменту ни один из материалов не продемонстрировал решающего преимущества над другими, что не позволяет делать ставку на какое-либо одно конкретное направление. У каждого из этих светоизлучающих материалов есть свои отдельные преимущества и недостатки.

Для структур Si:Er/Si, излучение на длине волны 1.54 мкм связано с переходами электрона между уровнями во внутренней 4f-оболочке Er ($^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$). Электроны 4f оболочки, экранированы полностью заполненными внешними оболочками иона Er, поэтому энергия излучательного перехода слабо зависит от кристаллического окружения иона. Кроме того, положение и форма линии люминесценции иона Er слабо зависит от температуры. По этим же причинам ширина линии люминесценции иона Er в кремнии достаточно мала. Методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) были выращены структуры Si:Er/Si, в которых ширина линии ФЛ ионов эрбия составляла менее 10 мкэВ [7]. Этот результат является чрезвычайно важным с точки зрения возможного использования Si:Er структур в качестве активной среды для создания лазера на основе кремния.

Исследования включений дисилицида железа (β -FeSi₂) в кремнии были вызваны идеей использования в качестве источника излучения кремния с включениями прямозонного полупроводника. Дисилицид железа был выбран как из-за подходящей ширины запрещённой зоны (~ 0.8 эВ), так и из-за хорошего согласования параметров решёток этого полупроводника и кремния (рассогласование решёток при наложении составляет менее 2%), что позволяет эпитаксиально встраивать преципитаты β -FeSi₂ в матрицу кремния [8,9]. Кроме того, в ряде теоретических и экспериментальных работ было показано, что в этом случае β -FeSi₂ становится прямозонным материалом [10]. На этих структурах наблюдалась интенсивная люминесценция с длиной волны около 1.5 мкм вплоть до комнатной температуры [11]. Существует, однако, большое количество работ, в которых показывается, что люминесценция, наблюдаемая в структурах β -FeSi₂/Si, имеет дислокационную природу [12,13]. Несмотря на это, актуальность исследований в данном направлении остаётся высокой. Во-первых, дислокационная природа люминесценции выявлена не для всех способов получения структур β -FeSi₂/Si. Во-вторых, структуры, для которых дислокационная природа люминесценции доказана, представляют интерес с точки зрения изучения способов формирования светоизлучающих дефектов в кремнии.

Исследование дефектно-дислокационной люминесценции в кремнии (особенно линии D1 отвечающей длине волны 1.5 мкм) ведётся, в последнее время, весьма интенсивно [4,14,15]. Удалось создать дислокационный кремниевый светодиод, излучающий свет с энергией кванта 0.75-0.8 эВ, с внешней квантовой эффективностью люминесценции $> 0.1\%$ при комнатной температуре, что соответствует уровню лучших кремниевых светодиодов [4]. Исследование структуры и свойств дефектных центров в кремнии (включая как точечные, так и протяжённые дефекты) позволило лучше изучить механизмы безызлучательной рекомбинации в Si, что чрезвычайно важно для всех видов светоизлучающих структур на основе кремния.

Одним из активно развивающихся направлений современной физики и технологии полупроводников является исследование полупроводниковых самоформирующихся нанообъектов (наноостровков, квантовых точек, квантовых проволок). За счет пространственного ограничения движения носителей заряда их энергетический спектр в полупроводниковых структурах пониженной размерности принципиально отличается от спектра носителей заряда в объемных полупроводниках. Предельным случаем локализации носителей заряда является их локализация во всех трех пространственных направлениях. Такой тип локализации реализуется в трехмерных самоформирующихся объектах – островках – одного полупроводника, заключенного в матрицу другого, более широкозонного полупроводника.

Практический интерес к структурам с GeSi наноостровками связан с потенциальной возможностью использования этих структур для создания оптоэлектронных приборов, интегрированных с современной кремниевой технологией. Исследования показали, что образование GeSi островков приводит к появлению в спектрах фото- и электролюминесценции таких структур сигнала в спектральном диапазоне 1.3-1.55 мкм [5,6,16], что соответствует области минимальных оптических потерь и минимальной дисперсии в кварцевых оптоволоконных линиях связи. Также в структурах с GeSi островками в этой спектральной области наблюдался сигнал фотопроводимости [17,18,19].

Было показано, что структуры с самоформирующимися GeSi островками обладают рядом преимуществ по сравнению со структурами с GeSi квантовыми ямами. В образцах с GeSi квантовыми ямами из-за ограничений, накладываемых критической толщиной эпитаксиального роста, и влияния эффектов размерного квантования на положение основного энергетического уровня дырок в яме не удается достигнуть длины волны фотолуминесценции 1.55 мкм [20,21]. В структурах с GeSi наноостровками, больший размер островков в направлении роста по сравнению с квантовыми ямами приводит к снижению влияния размерного квантования и уменьшению энергии (увеличению длины

волны) оптического перехода, связанного с излучательной рекомбинацией дырок в островках и электронов в Si [22,23]. Кроме того, усиление локализации дырок в островках приводит к существенному снижению температурного гашения люминесценции [24]. В результате в структурах с GeSi наноструктурами сигнал фото и электролюминесценции в области длин волн 1.3-1.55 мкм наблюдается вплоть до комнатной температуры [5,25,26].

Наряду с представленными подходами к реализации светоизлучающих структур ближнего ИК диапазона на основе объемного кремния, необходимо отметить направление исследований, связанное с созданием аморфных и кристаллических нанокластеров кремния, легированного эрбием, в диэлектрических матрицах, в частности в матрице SiO₂. Данное направление получило в последние годы широкое развитие в первую очередь в связи с получением структур nc-Si:Er/SiO₂, излучающих при комнатной температуре [27,28,29]. Было показано, что такие структуры демонстрируют гораздо более слабое температурное гашение эрбиевой ФЛ по сравнению со структурами на основе объемного кремния, легированного эрбием. В то же время данный класс структур также обладает рядом существенных недостатков, основным из которых является сложность осуществления электрической (токовой) накачки в матрице SiO₂.

1.2. Излучающие структуры Si:Er/Si.

Одним из перспективных путей получения излучающих структур на основе кремния является так называемое "оптическое легирование", состоящее в введении в матрицу кристаллического кремния ионов редкоземельных элементов, в частности эрбия. Эта идея, предложенная в работе [30], основывается на том факте, что ионы редкоземельных элементов имеют незавершенную электронную 4f-оболочку, и возможно ее возбуждение с последующим возвращением в основное состояние. Среди прочих редкоземельных элементов эрбий привлекает к себе повышенное внимание, поскольку излучение, возникающее при релаксации ионов эрбия из возбужденного в основное состояние, имеет длину волны 1.54 мкм, что соответствует максимуму прозрачности и минимуму дисперсии кварцевых волоконно-оптических линий связи. Вследствие экранировки 4f-оболочки иона эрбия электронами полностью заполненных 5s- и 5p-оболочек ширина и положение линии эрбиевой люминесценции слабо зависит от окружения ионов эрбия в кремниевой матрице, а также от температуры образца. Таким образом, достижение эффективной люминесценции ионов эрбия, находящихся в кремниевой матрице, позволило бы получить стабильный узкополосный источник излучения, интегрируемый с многочисленными электронными приборами на основе кремния.

Известно, что атомная конфигурация редкоземельных элементов, в том числе эрбия, имеет вид $[Xe]4f^{n+1}6s^2$ ([Xe] – конфигурация, соответствующая электронной оболочке атома ксенона), причем для эрбия $n = 11$. При введении эрбия в качестве примеси в матрицу кремния образуются ионы Er^{3+} с конфигурацией $[Xe]4f^{11}$. При этом значения орбитального и спинового моментов равны: $L=6$, $S=3/2$. В результате спин-орбитального взаимодействия между электронами f-оболочки возникает основное состояние $^4I_{15/2}$ и ряд возбужденных состояний $^4I_{13/2}$, $^4I_{11/2}$, $^4I_{9/2}$ и т.д. (рис.1.1). Энергия перехода из основного в первое возбужденное состояние составляет 0.8 эВ (соответствующая длина волны составляет 1.54 мкм).

Важным является тот факт, что переход $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ для изолированного иона Er^{3+} является запрещенным в дипольном приближении. Однако, если ион эрбия находится в окружении атомов кристаллической решетки, а также атомов других примесей (кислород, углерод, азот) то под действием полей этих атомов происходит подмешивание состояний противоположной четности к 4f-состояниям и переход становится частично разрешенным. Тем не менее, вероятность такого перехода остается достаточно низкой, что определяет большое время жизни иона эрбия в возбужденном состоянии ($\sim 10^{-3}$ с) [31].

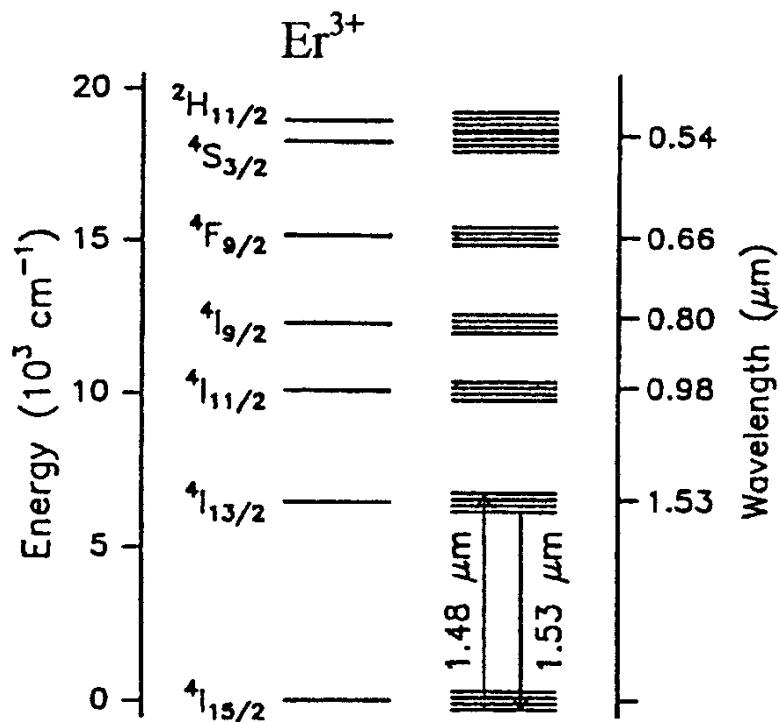


Рис.1.1. Диаграмма энергетических уровней иона эрбия в свободном состоянии и в кристаллической решетке.

Характер спектра излучения, соответствующего переходу $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, существенным образом зависит от условий получения структур и, как правило, представляет собой набор узких линий. Дело в том, что под действием полей атомов, находящихся вблизи иона эрбия, происходит расщепление уровней основного и возбужденных состояний 4f-оболочки иона эрбия на несколько подуровней (эффект Штарка) (рис.1.1). Каждая из линий в спектре соответствует переходу с нижнего подуровня возбужденного состояния в один из подуровней основного состояния. Расщепление уровней определяется симметрией ближайшего окружения иона эрбия в излучающем эрбиевом комплексе [32]. Поскольку в одном образце может существовать большое число центров с различным типом симметрии, спектр излучения часто имеет весьма сложную структуру, что затрудняет исследование эрбиевой люминесценции. С другой стороны, исследование тонкой структуры спектра эрбиевой ФЛ дает возможность получения информации о типе симметрии эрбиевых центров [33]. Было показано, что излучающие эрбиевые центры могут иметь кубическую, аксиальную и др. типы симметрии [32,33].

1.3. Механизм возбуждения ионов Er в кремнии.

Явление люминесценции редкоземельных элементов известно достаточно давно. Например, на основе кварца с примесью эрбия созданы лазеры на длине волны 1.54 мкм. Излучение в таких структурах возникает в результате прямого оптического возбуждения ионов эрбия светом ближнего ИК или видимого диапазона. Известно, что вероятность такого возбуждения является весьма низкой [34], и интенсивную люминесценцию получают за счет высокой (до 10^{20} см⁻³) концентрации ионов эрбия и большого объема активной области, легированной эрбием. Показано, что сечение возбуждения при прямой оптической накачке ионов Er в SiO₂ составляет $\sim 10^{-20}$ см² [35].

Гораздо более высокая эффективность возбуждения ФЛ наблюдается для ионов эрбия, введенных в полупроводниковую матрицу, в частности в матрицу кремния, в условиях межзонного возбуждения структур. Экспериментально установлено, что эффективность такого возбуждения на несколько порядков превышает эффективность прямого оптического возбуждения ионов эрбия. Эффективное сечение возбуждения ионов эрбия в кремнии при межзонном оптическом возбуждении составляет, согласно различным оценкам, $(1-5) \cdot 10^{-15}$ см² [34,36]). Это связано с тем, что основную роль в процессе возбуждения ионов эрбия в полупроводниковой матрице играют неравновесные носители заряда, создаваемые путем межзонной оптической накачки. На сегодняшний день общепринятой является следующая модель возбуждения ионов эрбия в кремнии [37,38]. При возбуждении структур Si:Er/Si излучением с энергией фотона, превышающей ширину запрещенной зоны кремния (межзонное возбуждение), происходит поглощение фотона и генерация в структуре электронно-дырочных пар. При низкой температуре неравновесные электроны и дырки с большой вероятностью связываются в экситоны, которые в свою очередь могут быть захвачены на примесные центры, имеющиеся в структурах. Установлено, что формирование эрбиевых комплексов в кремнии сопровождается возникновением ряда донорных уровней в запрещенной зоне кремния, энергия ионизации которых может варьироваться от 10 до 400 мэВ [2,39,40,41]. Экситоны, связанные на таких уровнях, могут рекомбинировать безызлучательным образом, передавая свою энергию во внутреннюю оболочку иона эрбия. При этом избыток энергии, равный разности энергии связанного экситона и энергии перехода $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ (≈ 0.8 эВ), может быть передан электрону, находящемуся на примесном уровне. Возбужденный ион эрбия может вернуться в основное состояние, излучив при этом фотон с длиной волны 1.5-1.6 мкм, в зависимости от подуровня основного состояния, на который происходит переход. Наиболее вероятным является переход с нижнего

подуровня возбужденного состояния на нижний подуровень основного состояния, имеющий наибольшую энергию, поэтому соответствующая линия в спектре эрбиевой люминесценции с длиной волны ~ 1.54 мкм является, как правило, наиболее интенсивной.

Существует большое число экспериментальных фактов, подтверждающих участие экситонов в процессе возбуждения эрбиевых центров. В работе [42] была исследована зависимость интенсивности эрбиевой и экситонной ФЛ от мощности возбуждающего излучения (непрерывное возбуждение Ag^+ лазером, 514 нм) при температуре $T = 20$ К в кремниевых структурах, имплантированных ионами эрбия (рис.1.2). Зависимость интенсивности эрбиевой люминесценции от мощности возбуждения демонстрировала линейный рост при малых значениях мощности и насыщение при больших. Для линии излучения свободных экситонов наблюдался очень медленный рост интенсивности в области слабых накачек и заметное его ускорение при более высоких мощностях возбуждающего излучения, когда начиналось насыщение эрбиевой люминесценции. Такое поведение связывалось с тем, что механизм возбуждения ионов эрбия включает в себя процесс захвата свободного экситона на эрбиевый центр. Указывалось также, что вероятность такого процесса существенно выше, чем вероятность излучательной рекомбинации свободного экситона.

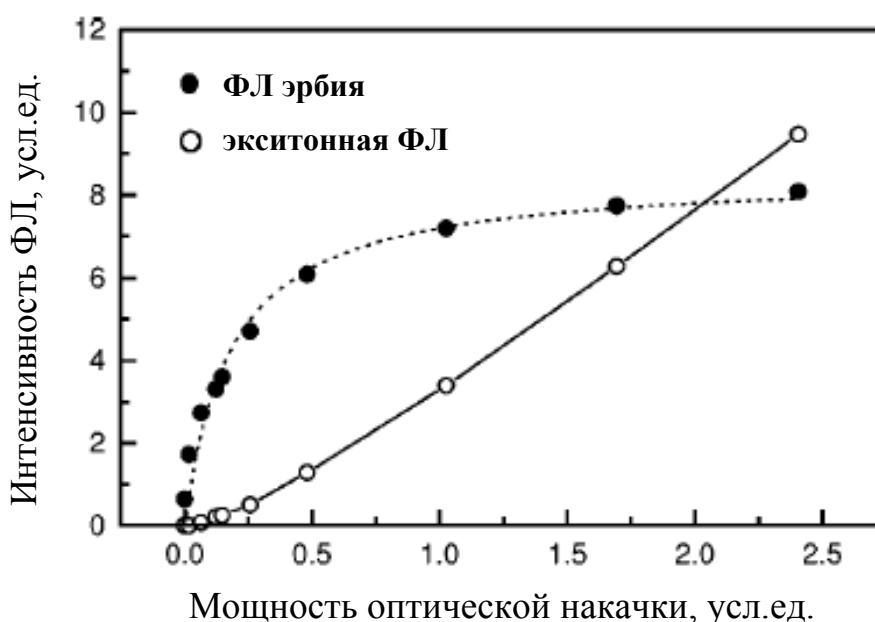


Рис.1.2. Зависимость интенсивности эрбиевой и экситонной ФЛ в структуре Si:Er/Si от мощности накачки. $T = 20$ К [42].

Другим экспериментальным фактом, подтверждающим экситонный механизм возбуждения, является корреляция между интенсивностью ФЛ ионов эрбия и ФЛ экситонов, связанных на мелких примесных центрах, при приложении к структуре Si:Er/Si электрического поля, которая наблюдалась в работе [43]. В данной работе было показано, что при приложении к структуре Si:Er/Si электрического поля одновременно наблюдается падение интенсивности ФЛ экситонов, связанных на мелких примесных центрах, и рост интенсивности эрбиевой ФЛ (рис.1.3). Такое поведение объяснялось освобождением экситонов с мелких примесных центров вследствие ударной ионизации этих центров свободными носителями и последующим захватом экситонов на более глубокие центры, связанные с эрбием. Данный результат свидетельствует, в частности, о том, что захват экситонов на мелкие примесные центры может являться важным конкурирующим процессом, снижающим эффективность возбуждения эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si.

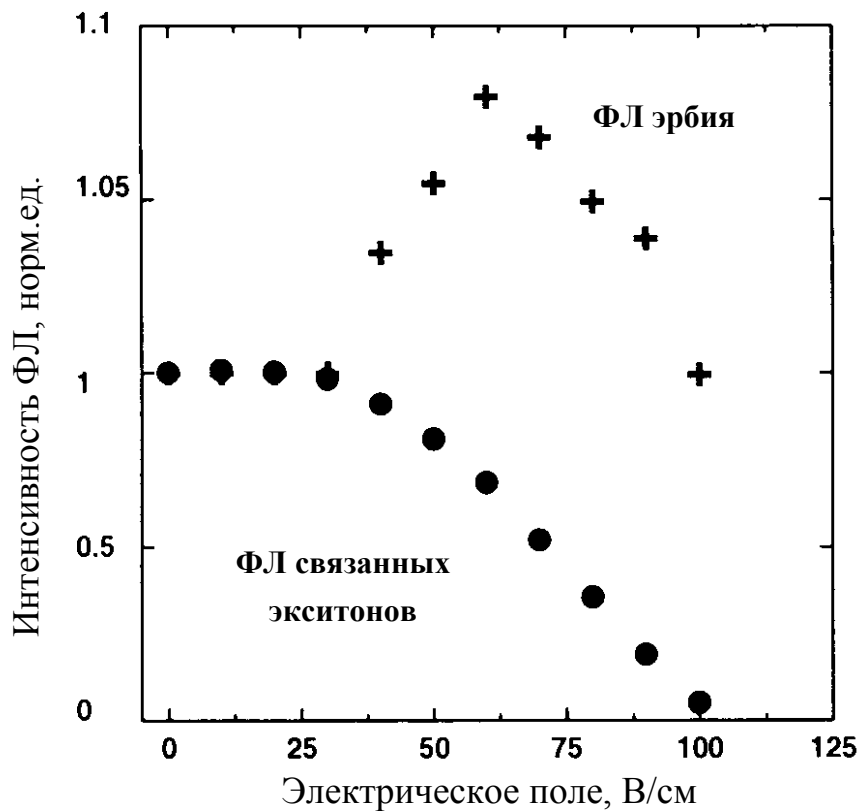


Рис.1.3. Зависимость интенсивности эрбиевой ФЛ и ФЛ экситонов, связанных на мелких примесных центрах, от приложенного внешнего электрического поля. T = 4.2 К [43].

Наконец, в работе [44] была исследована ФЛ ионов эрбия при возбуждении структур Si:Er/Si межзонным светом (Ag^+ -лазер) как со стороны слоя, легированного эрбием, так и со стороны подложки. В обоих случаях наблюдался сигнал эрбиевой ФЛ, причем в случае возбуждения со стороны подложки интенсивность эрбиевой ФЛ была всего на порядок ниже, чем при возбуждении со стороны легированного слоя Si:Er. Поскольку при низких температурах в кремнии практически все сгенерированные межзонным светом электроны и дырки объединяются в экситоны, полученный результат является непосредственным свидетельством участия экситонов в возбуждении ионов эрбия в кристаллическом кремнии.

Рассмотрим более подробно экситонный механизм возбуждения эрбиевой люминесценции, схема которого изображена на рис.1.4. В этой схеме помимо основного процесса передачи энергии ионам эрбия, выделенного более жирными линиями, указаны многочисленные альтернативные процессы, приводящие к потерям энергии и, как следствие, к снижению эффективности генерации излучения.

Создание неравновесных электронно-дырочных пар может осуществляться либо оптически с помощью межзонного излучения с энергией фотона большей ширины запрещенной зоны кремния (фотолюминесценция), либо электрически, путем инжекции носителей в область, легированную эрбием при прямом смещении на p-n переходе (электролюминесценция). Образовавшиеся электронно-дырочные пары могут рекомбинировать либо безызлучательным образом, либо излучив фотон с энергией, близкой к ширине запрещенной зоны кремния (1.17 эВ). Кроме этого они могут образовывать свободные экситоны с энергией связи ≈ 15 мэВ [45]. Аналогично, свободные экситоны могут либо рекомбинировать (излучательным или безызлучательным образом), либо связаться на примесном центре. Вклад в возбуждение эрбиевой люминесценции могут давать экситоны, связанные в окрестности оптически активных эрбиевых центров, т.е. центров, которые могут быть переведены в возбужденное состояние и затем релаксировать в основное состояние, излучив фотон с длиной волны 1.54 мкм. По оценкам, приведенным в ряде работ [46,47], доля оптически активных центров среди всех ионов эрбия составляет от одного до нескольких процентов. Считается, что возбуждение оптически активных эрбиевых центров происходит в результате безызлучательной рекомбинации экситонов, связанных на этих центрах, и передачи энергии связанного экситона во внутреннюю 4f-оболочку иона эрбия. Отметим, что для возможности передачи энергии иону Er достаточно, чтобы расстояние между примесным центром и ионом Er было меньше диаметра экситона.

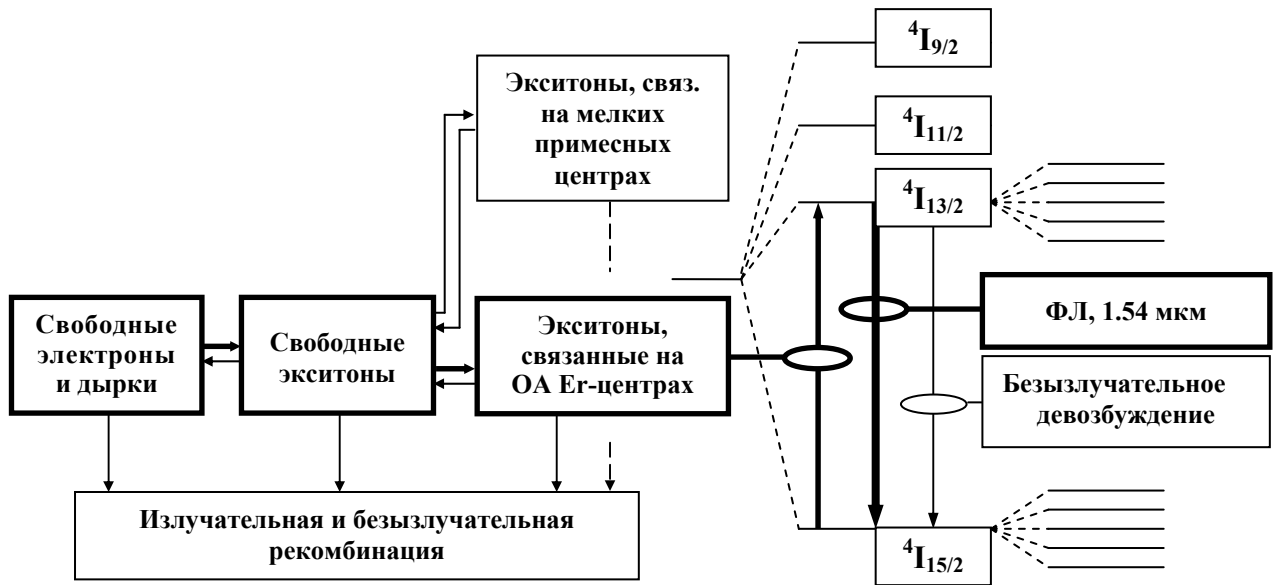


Рис.1.4. Схема экситонного механизма возбуждения ионов Er в кремнии [37,38].

Энергия ионизации глубоких уровней в запрещенной зоне кремния, в том числе уровней создаваемых при введении ионов эрбия в кристаллический кремний, может быть измерена методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) и составляет по различным данным 100-400 мэВ [2,40,48]. Энергия связи экситонов, захваченных на такие центры, должна составлять согласно эмпирическому правилу Хайнса [49] приблизительно 0.1 от энергии ионизации, т.е. 10-40 мэВ. В результате энергия рекомбинации связанного экситона при низких температурах составляет приблизительно 1055-1085 мэВ, что существенно превосходит энергию излучательного перехода ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$, равную 805 мэВ. Избыточная энергия 260-280 мэВ может быть передана второму электрону, присутствующему в комплексе нейтральный донор - связанный экситон.

Помимо рекомбинации, к процессам, снижающим эффективность возбуждения эрбиевой люминесценции, относится распад свободных экситонов на электронно-дырочные пары и отрыв связанных экситонов от эрбиевых центров. Также существенную роль в снижении интенсивности эрбиевой люминесценции играет безызлучательное девозбуждение ионов эрбия, основными причинами которого являются Оже-взаимодействие со свободными носителями, а также процесс, обратный возбуждению иона эрбия связанными экситонами ("back-transfer"). Все эти процессы становятся более эффективными с повышением температуры, что обуславливает значительное температурное гашение сигнала эрбиевой люминесценции в кремниевых структурах. Как правило, интенсивность эрбиевой ФЛ в

структурах Si:Er при комнатной температуре оказывается на несколько порядков ниже, чем при температуре жидкого гелия.

Наконец, к диссипативным процессам можно отнести захват свободных экситонов на мелкие примесные центры (ионы фосфора, бора, дефекты кристаллической решетки и др.) с последующей рекомбинацией. Энергия связи экситонов на таких центрах составляет, согласно правилу Хайнса, 4-5 мэВ (энергия ионизации для примесных центров, связанных с бором, равна 38 мэВ, с фосфором – 48 мэВ [45]). Следовательно, отрыв связанных экситонов от этих центров может происходить при гораздо более низкой температуре, чем для глубоких уровней, соответствующих эрбиевым центрам. Таким образом, в отличие от предыдущих альтернативных процессов диссипации энергии (процессов обратной передачи энергии), рекомбинация экситонов, связанных на мелких примесных центрах, существенна только при низких температурах. При больших температурах начинается отрыв экситонов от более глубоких (по энергии уровня) эрбиевых центров, а затем преобладающими становятся процессы оже-рекомбинации. При этом энергия рекомбинации экситонов может передаваться свободным носителям заряда, концентрация которых в структуре возрастает с ростом температуры.

1.4. Методы получения кремниевых структур, легированных эрбием.

Эффективность механизмов возбуждения и девозбуждения люминесценции эрбия могут существенно зависеть от типа излучающих центров, связанных с эрбием. Их структура в свою очередь определяется условиями изготовления исследуемых образцов. Поэтому большое внимание уделяется разработке эффективных способов введения эрбия в кристаллический кремний.

Одним из основных условий создания эффективно излучающих структур на основе кремния, легированного эрбием, является высокая концентрация ионов эрбия ($\sim 10^{18} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$). Известно, что предельная растворимость эрбия в кремнии составляет $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, при попытке получить из расплава кремний с большим содержанием эрбия происходит сегрегация ионов эрбия и образование металлических кластеров. Поэтому для создания излучающих структур Si:Er, применяют неравновесные методы, позволяющие получить структуры с концентрацией ионов эрбия существенно выше равновесной. Основными из этих методов являются ионная имплантация и молекулярно-лучевая эпитаксия.

Метод ионной имплантации [2,34,50] состоит в бомбардировке подложки кристаллического кремния ускоренными высоким напряжением ионами эрбия и различными солегирующими примесями. Основными параметрами этого метода являются энергия имплантируемых ионов и доза имплантации (число ионов эрбия на единицу площади). В результате имплантации вблизи поверхности подложки получают легированный слой Si:Er с концентрацией ионов эрбия до 10^{20} см^{-3} . Как правило, структуры, полученные методом ионной имплантации, подвергают высокотемпературному отжигу, в результате которого частично устраняются радиационные дефекты, а также происходит формирование оптически активных эрбиевых центров. К преимуществам данного метода можно отнести возможность получения слоев с высокой концентрацией ионов эрбия (до 10^{20} см^{-3}) и прочих примесей, а также относительно низкая стоимость данного метода. Среди недостатков можно указать трудность получения однородно легированных слоев (для получения слоя толщиной $\sim 1 \text{ мкм}$ с равномерным распределением примеси приходится осуществлять несколько имплантаций с различными энергиями имплантируемых ионов), а также образование в имплантированном слое большого числа дефектов, неустраняемых полностью даже в результате отжига.

При выращивании слоёв Si:Er методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [39,51] кристаллическое совершенство получаемых структур значительно улучшается. Кроме того, данный метод позволяет получать резкие профили распределения примесей [52]. Однако

МЛЭ имеет и свои недостатки: высокая стоимость оборудования, высокая температура греющихся частей внутри ростовой камеры, невысокая (0.1-0.2 мкм/ч) скорость роста.

По сравнению с вышеупомянутыми методами метод сублимационной МЛЭ (СМЛЭ) демонстрирует ряд преимуществ [53,54,55,56]. Особенностью метода СМЛЭ является получение атомарных потоков Si и легирующей примеси путем сублимации разогретого током поликристаллического источника Si, легированного заданной примесью, в частности эрбием [53]. Прямой резистивный нагрев источника обеспечивает высокую чистоту атомарных потоков, что позволяет получать кремниевые слои с минимальным числом дефектов и большим временем жизни неосновных носителей заряда. Было показано, что в процессе СМЛЭ можно воспроизводимо выращивать как однородно легированные монокристаллические слои Si с концентрацией электрически активных мелких примесей (P, As, Sb, B, Al) от $2 \cdot 10^{13}$ до $4 \cdot 10^{20}$ см⁻³, так и структуры с заданным сложным профилем легирования, в том числе с δ -легированными слоями [56].

Еще одной важной особенностью метода СМЛЭ является высокая скорость роста, что достигается за счет близкого расположения источников и подложки, возможного при использовании резистивного нагрева источников. Скорость осаждения слоев кремния на подложках Si(100) достигает 5 мкм/ч, что на порядок превосходит скорость роста в стандартном методе МЛЭ из твердотельных источников и позволяет выращивать слои кремния толщиной до 10 мкм. Кроме того, высокая скорость роста дает возможность получать эпитаксиальные слои высокого кристаллического совершенства с низкой концентрацией дефектов даже в условиях низкого вакуума (10⁻⁷ мбар).

Структуры Si:Er/Si, выращенные методом СМЛЭ, демонстрируют при низких температурах интенсивную фотолюминесценцию ионов эрбия [54,56,57]. Вид спектра и интенсивность эрбиевой ФЛ структур, полученных методом СМЛЭ, существенным образом зависят от условий их роста. Основными параметрами роста являются концентрация ионов эрбия и других примесей в источнике и в атмосфере ростовой камеры, температура подложки и источника. В частности, известно, что при одинаковых концентрациях эрбия гораздо более интенсивная фотолюминесценция наблюдается в образцах с высокой концентрацией кислорода. Наибольшую интенсивность получают, когда концентрация кислорода примерно на порядок превосходит концентрацию эрбия [58]. Кроме того, вид спектров фотолюминесценции в образцах с высоким и низким содержанием кислорода существенно отличается [32]. Эти факты свидетельствуют о том, что наличие кислорода приводит к формированию оптически активных эрбий-кислородных комплексов, структура

которых существенным образом зависит от температуры роста эпитаксиального слоя, температуры и длительности отжига структуры и других условий.

Условия изготовления образцов Si:Er/Si сильно влияют на микроскопическую структуру эпитаксиального слоя и, как следствие на форму спектров эрбиевой люминесценции. Температура роста структур Si:Er является одним из наиболее важных параметров, которые определяют тип формирующихся излучающих эрбиевых центров. Было показано, что максимальную интенсивность эрбиевой ФЛ демонстрируют СМЛЭ структуры Si:Er/Si, полученные при температурах роста 500-600°C [54,55].

Структура электрически активных центров в СМЛЭ слоях Si:Er исследовалась методами релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) и адмиттанс-спектроскопии [57]. Независимо от условий роста все слои Si:Er демонстрировали *n*-тип проводимости. Концентрация носителей при $T = 300$ К составляла 10^{16} - 10^{18} см⁻³ и определялась мелкими донорами с энергией 16-45 мэВ. В исследованных СМЛЭ структурах был обнаружен ряд глубоких центров с энергией ионизации 150-450 мэВ. Концентрация этих центров была не велика (менее 10% от общей концентрации электрически активных примесей) и сильно зависела от условий роста и последующего отжига. Количество глубоких центров было максимальным в структурах, выращенных при малой температуре ($T < 500^\circ\text{C}$), и уменьшалось с увеличением температуры роста. Глубокие центры полностью пропадали после 30 мин. отжига при температуре 900°C. В то же время сигнал ФЛ в зависимости от температуры отжига проходил через минимум при 750°C и возрастал при последующем увеличении температуры отжига вплоть до 900°C. Таким образом, было продемонстрировано наличие сигнала эрбиевой ФЛ в отсутствие глубоких центров (в том числе уровня с энергией $E = 150$ мэВ, обычно связываемого с ионами эрбия в кремнии).

Одним из основных достоинств метода сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии является возможность получения многослойных структур с произвольным заданным профилем легирования ионами эрбия. Для этого в ростовую камеру добавляется второй источник кремния, не легированного эрбием. Это позволяет создавать периодические селективно легированные структуры, в которых слои кремния с высоким содержанием ионов эрбия разделены прослойками слабелегированного кремния. Минимальная толщина слоев при этом составляет приблизительно 1 нм. Возможность получения таких структур была подтверждена исследованиями выращенных образцов методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Было показано [56,А16], что использование селективного легирования позволяет существенно увеличить эффективность эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si за счет пространственного разделения этапов генерации экситонов и возбуждения

ионов эрбия. На рис.1.6 приведены спектры ФЛ однородно легированной и периодической селективно легированной структур Si:Er/Si. За исключением профиля легирования, все параметры структур и условия роста были идентичными. Параметры структур были выбраны таким образом, чтобы суммарная толщина слоев Si:Er в многослойной структуре соответствовала толщине слоя Si:Er в однородно легированной структуре. Как видно из приведенных спектров, интенсивность селективно легированной структуры в несколько раз превышала интенсивность однородно легированной структуры [A16].

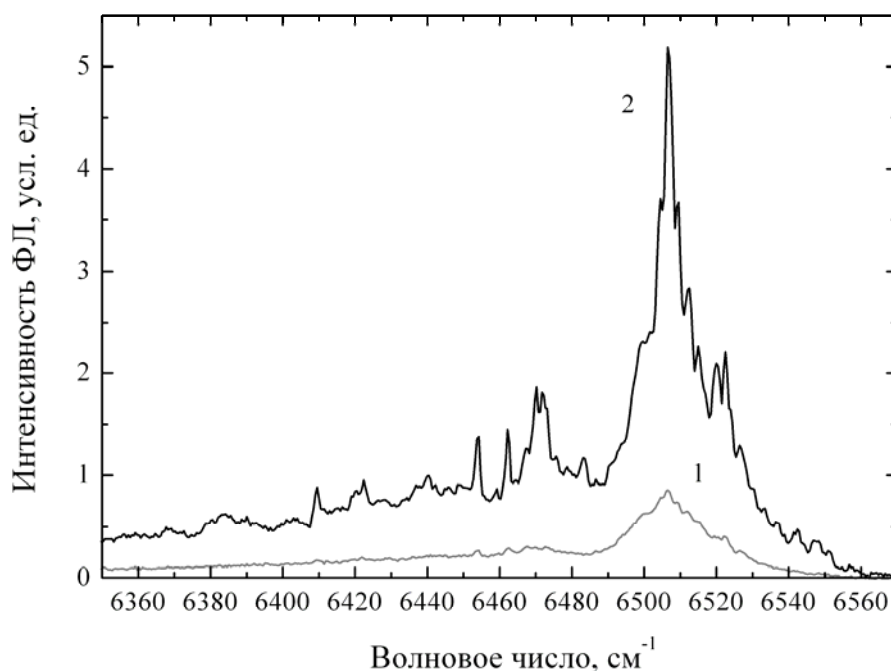


Рис.1.6. Спектры ФЛ однородно легированной (1) и многослойной селективно легированной (2) структуры Si:Er/Si. T = 4.2 К.

Глава 2. Методика получения и экспериментального исследования светоизлучающих кремниевых структур, легированных эрбием.

2.1. Сублимационная молекулярно-лучевая эпитаксия структур Si:Er/Si и Si:Er/SOI.

Эпитаксиальные структуры Si:Er/Si и Si:Er/SOI, исследованные в настоящей работе, были выращены методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) [53,55]. Структуры были получены в НИФТИ ННГУ к.ф.-м.н. В.П.Кузнецовым и в Институте физики микроструктур РАН к.ф.-м.н. Д.В.Шенгуровым.

Установка для роста структур Si:Er/Si методом СМЛЭ схематично изображена на рис.2.1. Структуры Si:Er/Si выращивались в вакууме при остаточном давлении $\sim 10^{-7}$ мбар на подложках Si(100) n- и p-типа проводимости с удельным сопротивлением 10 Ом·см. Для откачки рабочей камеры использовался паромасляный диффузионный насос с азотной ловушкой. С целью очистки поверхности подложки от слоя окисла и поверхностных загрязнений перед началом роста производился отжиг подложки при температуре 1150°C, при этом происходило испарение поверхностного слоя толщиной ~ 1 мкм. Разогрев как источников, так и подложек осуществлялся резистивно, путем пропускания электрического тока через пластины. Процесс роста слоев Si:Er в методе СМЛЭ является неравновесным, поэтому концентрация Er в осажденных слоях Si:Er может достигать 10^{20} см⁻³, что на несколько порядков превышает растворимость Er в Si ($\sim 10^{15}$ см⁻³). Было показано, что максимальный сигнал эрбиевой ФЛ в структурах, выращенных методом СМЛЭ, наблюдается при концентрации атомов эрбия 10^{18} - 10^{19} см⁻³. Поэтому в качестве сублимирующего источника Si и Er при выращивании слоев Si:Er использовались кристаллические пластины, вырезанные из слитков Si:Er с содержанием Er $\sim 5 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Было показано, что высокое содержание остаточных газов в рабочей камере во время роста не приводит к увеличению дефектности слоёв. Более того, высокое остаточное давление кислорода в камере роста позволяло автоматически получать оптимальное соотношение атомов Er и O в выращенных слоях.

По данным инфракрасной спектроскопии фотопроводимости и поглощения основной электрически активной примесью в источниках являлся бор (концентрация $\sim 10^{15}$ см⁻³). Температура роста эпитаксиальных слоев кремния варьировалась от 500 до 600°C, толщина слоев составляла ~ 1 мкм. Часть выращенных структур подвергалась дополнительному отжигу в вакууме или в потоке водорода при температурах 800-900°C.

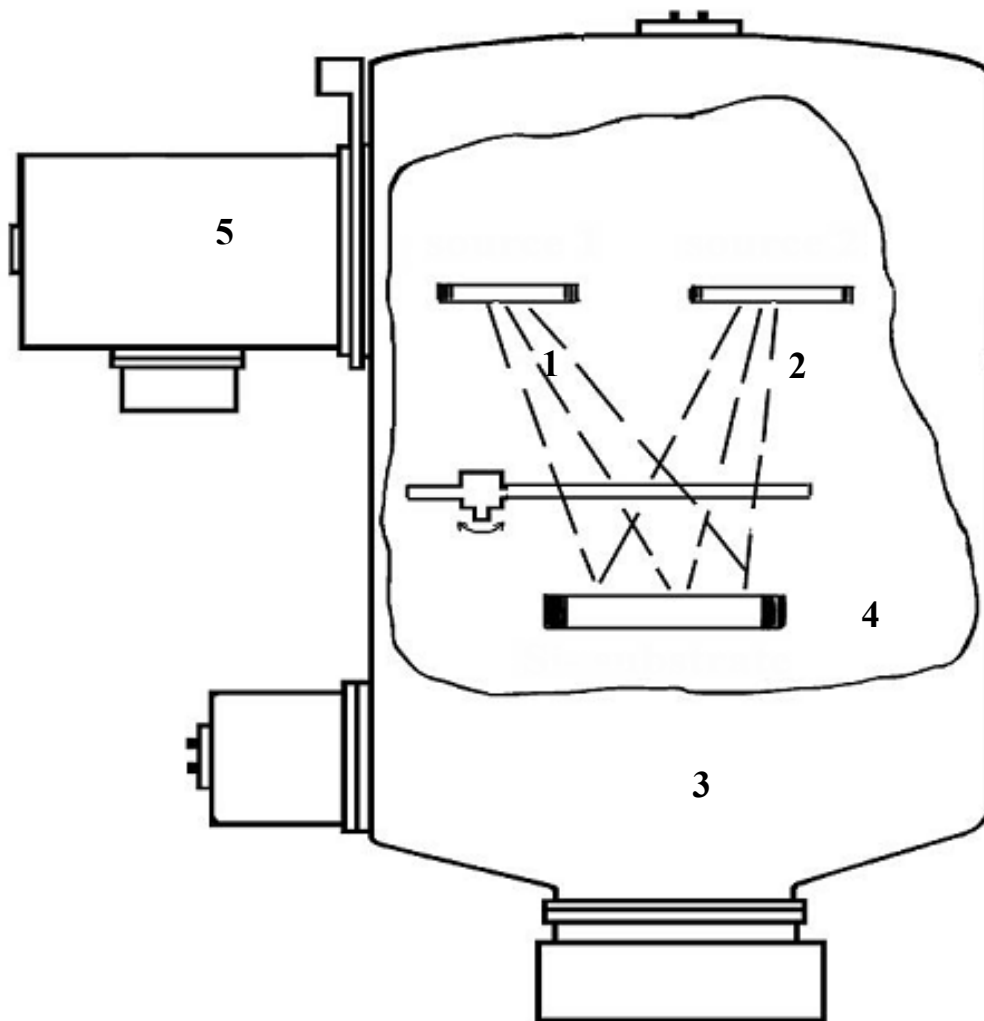


Рис. 2.1. Установка для сублимационной МЛЭ структур Si:Er/Si:

- 1 – источник Si:Er;
- 2 – источник нелегированного Si;
- 3 – Si подложка;
- 4 – заслонка,
- 5 – паромасляный диффузионный насос.

Концентрация примесей в выращенных структурах Si:Er/Si и распределение атомов примесей по толщине эпитаксиальных слоев измерялись методом ВИМС. Исследования структур методом ВИМС были выполнены Б.Я.Бэром в Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН в г. Санкт-Петербурге. Полученные данные показали, что концентрация ионов эрбия в структурах составляет $(1-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Основными примесями, содержащимися в структурах наряду с эрбием, являлись атомы кислорода и углерода, концентрация которых составляла $(0.5-1) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и $(0.3-4) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, соответственно. Концентрация атомов кислорода в эпитаксиальном слое Si:Er приблизительно на порядок превосходила содержание атомов эрбия. Также в полученных структурах присутствовали такие примеси как алюминий, бор и фосфор, образующие в матрице кристаллического кремния мелкие примесные центры. Концентрация этих примесей составляла $10^{15}-10^{16} \text{ см}^{-3}$. Как будет показано далее, наличие мелких примесных центров в исследованных структурах оказывало существенное влияние на излучательные свойства структур при низких температурах измерения.

Метод сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии был впервые применен для роста эпитаксиальных слоев Si:Er на подложках "кремний-на-изоляторе" (SOI). Структуры Si:Er/SOI представляют значительный интерес в качестве активной волноводной среды, излучающей на длине волны 1.54 мкм. Подложки "кремний-на-изоляторе", использовавшиеся для получения структур Si:Er/SOI, представляли собой кремниевые подложки n-типа (100), на поверхности которых был расположен слой кремния p-типа толщиной ~ 1 мкм, отделенный от остальной части подложки слоем SiO₂. Толщина оксидного слоя, как и толщина верхнего слоя кремния, составляла ~ 1 мкм. Перед началом эпитаксиального роста часть верхнего слоя кремния удалялась путем резистивного разогрева подложки. Рост эпитаксиальных слоев Si:Er на подложках SOI осуществлялся аналогично росту на подложках Si. При этом время предростовой обработки структур сокращалось для сохранения части верхнего слоя кремния. Наличие структурных дефектов в полученных структурах Si:Er/SOI оценивалось методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

2.2. Спектроскопия фотолюминесценции структур Si:Er/Si в ближнем ИК диапазоне.

Схема экспериментальной установки для исследования спектров фотолюминесценции в условиях непрерывного оптического возбуждения представлена на рис.2.2. В качестве источников возбуждающего излучения (1) использовался аргоновый лазер ЛГ106М ("ЛВР", Рязань) работающие на длине волны 514 нм или твердотельные лазеры Nd⁺YAG с удвоением частоты АТС-53-500 ("Полупроводниковые приборы", Санкт-Петербург) и Millenia Pro 2S ("Spectra-Physics", США) с длиной волны излучения 532 нм. Максимальная выходная мощность излучения лазеров накачки составляла 2 Вт. Размер лазерного пучка составлял ~ 2 мм. Мощность лазерного излучения определялась с помощью измерителя мощности Ophir 3A ("Ophir Optronics", Израиль). Изменение мощности возбуждающего излучения осуществлялось путем ослабления лазерного излучения с помощью калиброванных нейтральных светофильтров серии НС из стандартного набора цветных оптических стекол. При необходимости увеличения плотности мощности возбуждающего излучения лазерный луч фокусировался на исследуемом образце (4) с помощью кварцевой линзы (3). При этом размер возбуждающего пучка уменьшался до ~ 0.1 мм. В связи с тем, что в спектре излучения лазеров помимо основной линии (514 нм для Ar⁺ и 532 нм для Nd⁺YAG) как правило присутствует ряд дополнительных линий, в том числе в ИК диапазоне, на пути луча перед исследуемым образцом располагались стеклянные фильтры из серии СЗС (2), прозрачные в видимом диапазоне и поглощающие излучение ближнего ИК диапазона.

Регистрация спектров ФЛ структур Si:Er/Si в условиях непрерывного оптического возбуждения осуществлялось с использованием фурье-спектрометра высокого разрешения WOMEM DA3. Исследуемые образцы располагались в одном из фокусов металлического параболического зеркала (5). Второй фокус зеркала был совмещен с входным окном фурье-спектрометра (6). Для отсекающего рассеянного лазерного излучения на входном окне спектрометра устанавливался инфракрасный фильтр ИКС-1. В состав оптического тракта фурье-спектрометра входят поворотное зеркало (7), сферические зеркала (8,12), кварцевый делитель пучка (9), неподвижное и сканирующее зеркала (10,11). Излучение, прошедшее через фурье-спектрометр, регистрировалось высокочувствительным германиевым фотоприемником EI-A ("Edinburgh Instruments"), охлаждаемым жидким азотом (13). Рабочий диапазон детектора составлял 0.9-1.7 мкм.

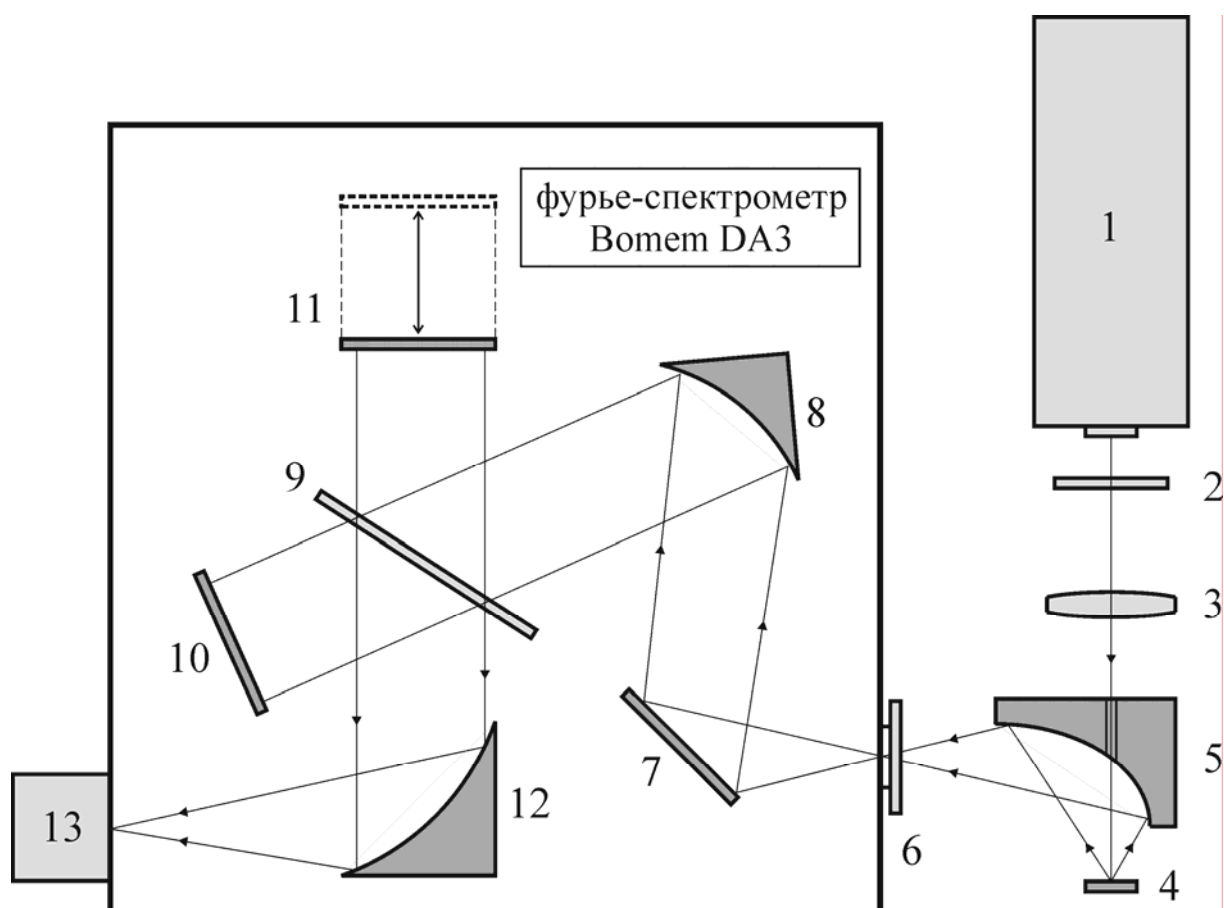


Рис.2.2. Схема экспериментальной установки для исследования спектров ФЛ:

- 1 – лазер накачки (Ar^+ или Nd:YAG);
- 2 – фильтр видимого диапазона СЗС;
- 3 – линза;
- 4 – исследуемый образец;
- 5 – параболическое зеркало;
- 6 – входное окно фурье-спектрометра Bomem DA3 с ИК фильтром ИКС1;
- 7 – поворотное зеркало;
- 8 – сферическое зеркало, формирующее параллельный пучок;
- 9 – кварцевый делитель пучка;
- 10 – неподвижное зеркало;
- 11 – сканирующее зеркало;
- 12 – сферическое зеркало, фокусирующее излучение на выходное окно;
- 13 – Ge детектор.

Переменный сигнал с выхода детектора, пропорциональный интенсивности излучения, выходящего из фурье-спектрометра, и представляющий собой интерферограмму сигнала ФЛ исследуемой структуры, усиливался с помощью усилителя PAR 113, подавался на вход АЦП фурье-спектрометра и поступал в компьютер. В ходе записи автоматически осуществлялось многократное накопление интерферограммы, после чего производилось обратное фурье-преобразование сигнала и вычисление спектра ФЛ. Полученные спектры ФЛ нормировались на аппаратную функцию спектрометра, в качестве которой использовался спектр излучения широкополосного источника (лампы белого света), помещенного в фокус эллиптического зеркала (4) вместо исследуемого образца. Питание лампы осуществлялось с помощью стабилизированного источника постоянного тока Б5-43А.

Часть спектров ФЛ регистрировалась с использованием решеточного монохроматора SP2300 ("Acton research"), совмещенного с охлаждаемым жидким азотом многоканальным детектором ОМА-V на основе линейки фотодиодов InGaAs ("Princeton Instruments"), рабочий диапазон которой составляет 0.8-2.2 мкм.

Для исследования низкотемпературной ФЛ образцы помещались в заливной гелиевый криостат или в стеклянную колбу с жидким азотом. При этом структуры находились непосредственно в жидком гелии (или азоте), что позволяло существенно снизить возможный перегрев образцов при высокой мощности возбуждающего излучения. Для проведения сравнительных измерений спектров ФЛ различных структур образцы располагались на вращающемся держателе, поворот которого осуществлялся механически с помощью ручки, находящейся снаружи криостата.

Для исследования температурной зависимости спектров ФЛ в диапазоне 4.2-300 К использовался заливной гелиевый оптический криостат OptCryo105 ("РТИ") или гелиевый криостат замкнутого цикла CS202 ("Advanced Research Systems") с системой автоматической регулировки температуры. Измерение температуры образцов осуществлялось с помощью калиброванного кремниевого диода с известной зависимостью сопротивления от температуры. При работе с заливным криостатом образец находился в парах гелия, а регулировка температуры осуществлялась путем изменения давления паров гелия в рабочей камере. В обоих случаях для уменьшения разогрева исследуемых структур излучением накачки образцы наклеивались на металлический держатель с помощью теплопроводящей пасты. С этой же целью измерение спектров ФЛ исследуемых структур осуществлялось при низкой мощности возбуждающего излучения (< 10 мВт).

2.3. Методика измерения квантовой эффективности ФЛ излучающих структур Si:Er/Si в ближнем ИК диапазоне.

Одной из важнейших характеристик светоизлучающих структур является квантовая эффективность люминесценции, которая представляет собой отношение числа излученных фотонов к числу фотонов возбуждающего излучения, поглощаемых в структуре. Различают внутреннюю и внешнюю квантовую эффективность ФЛ. В первом случае в качестве числа фотонов, излученных образцом, рассматривают количество всех квантов излучения, сгенерированных в структуре. Во втором случае за эту величину принимают число фотонов, вышедших из структуры. Поскольку показатель преломления большинства полупроводниковых структур в несколько раз превосходит показатель преломления вакуума, большая часть излучения испытывает отражение от границы структуры и может быть снова поглощена в образце. Вследствие этого внешняя квантовая эффективность излучающих полупроводниковых структур оказывается, как правило, существенно (в десятки раз) ниже внутренней квантовой эффективности.

Схема измерения квантовой эффективности эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si представлена на рис.2.3. Исследуемые образцы помещались в заливной гелиевый оптический криостат непосредственно в жидкий гелий. Для оптического возбуждения структур использовалось излучение твердотельного лазера Nd:YAG ($\lambda_{ex} = 532$ нм) мощностью $P_{ex} = 0.1-200$ мВт. Для измерения интенсивности ФЛ в абсолютных единицах использовался измеритель мощности PD300-IRG ("Ophir Optronics") на основе фотодиода InGaAs. Измеритель мощности размещался вблизи окна криостата напротив исследуемого образца. Для отсеечения рассеянного от исследуемого образца лазерного излучения, а также межзонной ФЛ кремния использовался полосовой оптический ИК фильтр. Отношение между измеренным значением мощности излучения P и полной мощностью, излучаемой с поверхности структуры $P_{изл}$, определялось как отношение телесного угла Ω , ограниченного апертурой измерителя мощности, к телесному углу, равному 4π :

$$\frac{P}{P_{изл}} = \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{R}{\sqrt{R^2 + r^2}} \right),$$

где R – расстояние между исследуемым образцом и измерителем мощности, r - радиус апертуры измерителя мощности ($r = 2$ мм).

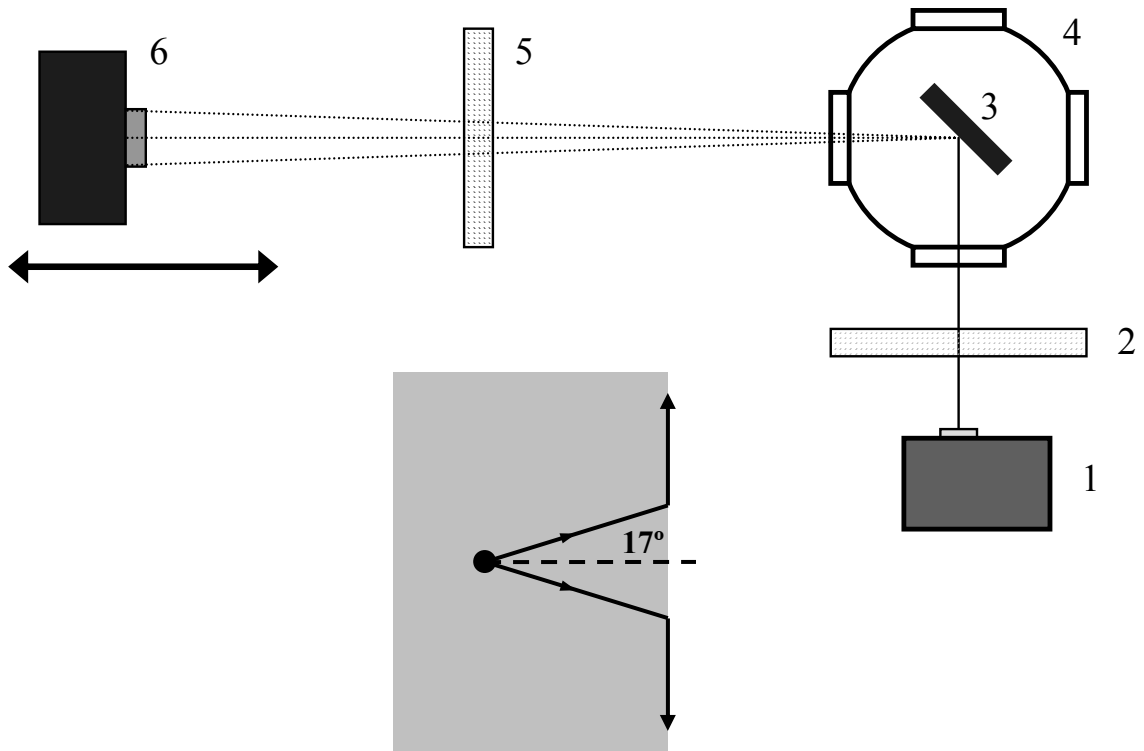


Рис.2.3. Схема измерения квантовой эффективности структур Si:Er/Si:

- 1 – лазер накачки Nd:YAG;
- 2 – фильтр видимого диапазона C3C25;
- 3 – исследуемый образец;
- 4 – оптический криостат;
- 5 – полосовой оптический ИК фильтр;
- 6 – измеритель мощности оптического излучения PD300-IRG ("Ophir").

На вставке: полное внутреннее отражение излучения в структурах Si:Er/Si на границе "кремний-вакуум".

Поскольку при работе с гелиевым криостатом точное измерение расстояния от образца до измерителя мощности было затруднено, для определения полной мощности излученного сигнала ФЛ использовалась следующая методика. Измеритель мощности помещался на подвижный столик, и снималась зависимость мощности регистрируемого излучения от изменения расстояния между образцом и измерителем мощности. Полученная зависимость аппроксимировалась формулой:

$$P = P_{изл} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{R_0 + x}{\sqrt{(R_0 + x)^2 + r^2}} \right),$$

где R_0 – исходное (неизвестное) расстояние от образца до измерителя мощности, x – измеряемое с помощью микрометрического винта смещение измерителя мощности относительно начального положения, r – радиус апертуры измерителя мощности. В результате определялось значение $P_{изл}$, соответствующее полной мощности эрбиевой ФЛ.

Внешняя квантовая эффективность излучения $\eta_{внешн.}$ (отношение числа излученных фотонов к числу поглощенных фотонов возбуждающего излучения) рассчитывалась с помощью следующей формулы:

$$\eta_{внешн.} = \frac{P_{изл} / h\nu_{изл}}{0.65 \cdot P_{возб} / h\nu_{возб}} = \frac{P_{изл} \cdot \nu_{возб}}{0.65 \cdot P_{возб} \cdot \nu_{изл}},$$

где $\nu_{изл}$ – частота излучения структуры ($h\nu_{изл} = 0.805$ эВ для $\lambda_{изл} = 1540$ нм), $\nu_{возб}$ и $P_{возб}$ – частота и мощность возбуждающего излучения ($h\nu_{возб} = 2.33$ эВ для $\lambda_{возб} = 532$ нм). Множитель 0.65 перед значением мощности возбуждающего излучения учитывает частичное (~ 35%) отражение лазерного излучения от поверхности исследуемой структуры [59].

Расчет внутренней квантовой эффективности ФЛ $\eta_{внутр.}$ осуществляется путем учета полного внутреннего отражения излучения ионов эрбия в активном слое Si:Er от границы раздела "кремний-вакуум" на поверхности исследуемой структуры. Отношение значений внешней и внутренней квантовой эффективности ФЛ определяется отношением величины телесного угла, внутри которого излучение, падающее на поверхность структуры, выходит из образца, не испытывая полного внутреннего отражения, к величине полного телесного угла (2π), под которым излучение падает на поверхность (см. вставку на рис.2.3):

$$\frac{\eta_{внешн.}}{\eta_{внутр.}} = \frac{2\pi(1 - \cos \alpha)}{2\pi} = (1 - \cos \alpha),$$

где α – угол полного внутреннего отражения.

Угол полного внутреннего отражения света при падении на границу "кремний-вакуум" составляет $\alpha \approx 17^\circ$, следовательно:

$$\eta_{внутр.} = \frac{\eta_{внешн.}}{(1 - \cos \alpha)} \approx 23 \cdot \eta_{внешн.} \quad (2.1)$$

2.4. Методика исследования кинетики и спектров возбуждения ФЛ структур Si:Er/Si в условиях импульсного оптического возбуждения.

При исследовании спектров возбуждения и кинетики ФЛ в структурах Si:Er/Si в качестве источника возбуждающего излучения использовался параметрический генератор света (optical parametric oscillator, OPO) на основе нелинейного кристалла ВВО (β -BaB₂O₄). Накачка OPO осуществлялась излучением, представляющим собой третью гармонику импульсного лазера Nd:YAG ("Spectra-Physics") с длиной волны 355 нм. Принцип работы OPO основан на распаде кванта излучения накачки в нелинейном кристалле на два фотона с энергиями, зависящими от угла падения излучения на кристалл. Изменение длины волны возбуждающего излучения осуществляется путем поворота нелинейного кристалла ВВО. Таким образом, на выходе OPO присутствуют два луча с длинами волн, лежащими в видимом ("сигнальная волна", 415-700 нм) и ближнем ИК ("холостая волна", 720-2500 нм) диапазонах. Разделение "сигнальной" и "холостой" волн осуществляется с помощью специальных фильтров. Таким образом, использование OPO в качестве источника оптического возбуждения позволяет непрерывным образом изменять длину волны возбуждающего излучения в диапазоне от 0.4 до 2.5 мкм.

Для отрезания мощного излучения накачки при измерении спектров возбуждения и кинетики эрбиевой ФЛ использовался набор интерференционных фильтров ближнего ИК диапазона, пропускающих длинноволновое и отсекающих коротковолновое излучение с границей пропускания на длинах волн 1100, 1200, 1300, 1400 и 1500 нм. Выбор конкретного фильтра определялся длинами волн возбуждающего излучения и измеряемого сигнала ФЛ. Длительность импульсов накачки составляла ~ 5 нс, частота повторения импульсов – 10 Hz, максимальная энергия в импульсе ~ 5 мДж на длине волны 500 нм. Таким образом, максимальная мощность излучения в импульсе достигала 10⁶ Вт.

Измерение мощности возбуждающего лазерного излучения, как и в случае непрерывного возбуждения, осуществлялось с помощью измерителя мощности Ophir 3A. Изменение мощности возбуждения осуществлялась с помощью аттенюатора, состоящего из двух поляризационных призм Глана, расположенных на пути лазерного луча после выходного окна OPO (рис.2.4). Излучение OPO имело горизонтальную линейную поляризацию. Изменение мощности излучения осуществлялось поворотом первого поляризатора. Второй поляризатор при этом оставался неподвижным и ориентированным в горизонтальном направлении, что обеспечивало постоянную поляризацию излучения, падающего на исследуемый образец.

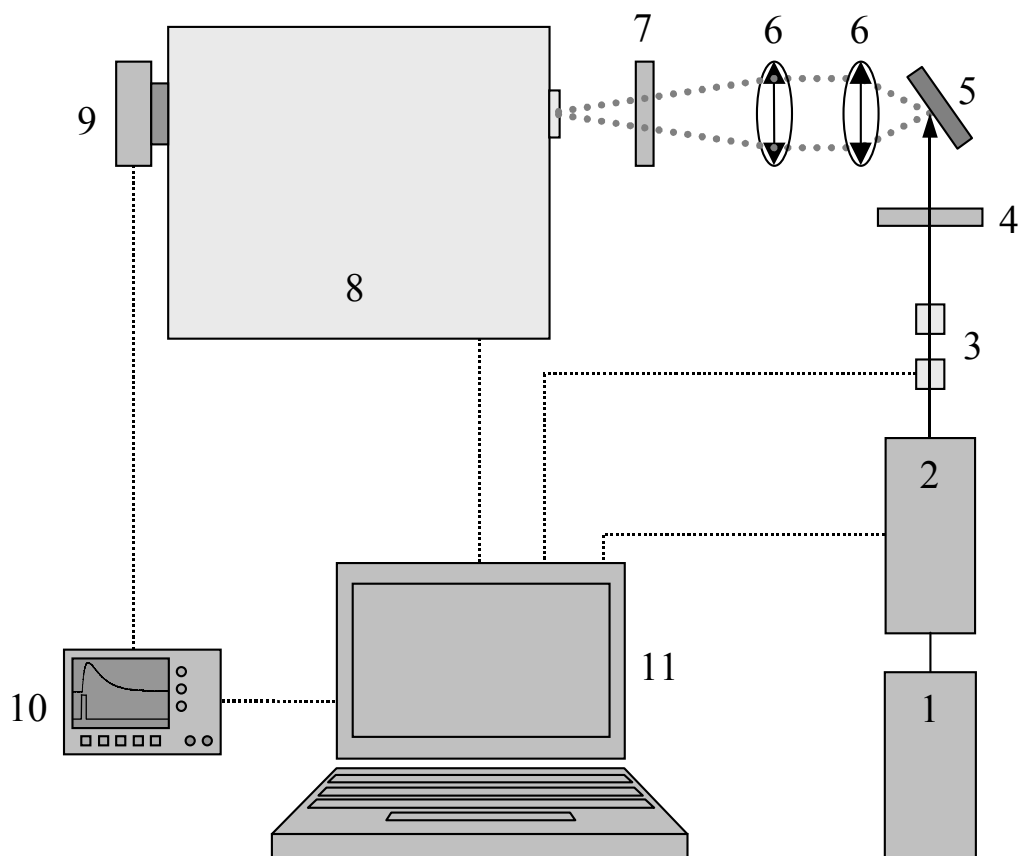


Рис.2.4. Схема экспериментальной установки для исследования кинетики и спектров возбуждения ФЛ:

- 1 – лазер накачки Nd:YAG;
- 2 – параметрический генератор света (ОРО);
- 3 – аттенюатор на основе призм Глана;
- 4 – светофильтр;
- 5 – исследуемый образец;
- 6 – фокусирующие линзы;
- 7 – ИК светофильтр;
- 8 – решеточный монохроматор;
- 9 – детектор;
- 10 – цифровой осциллограф;
- 11 – персональный компьютер.

Поскольку мощность излучения пропорциональна квадрату амплитуды электромагнитного поля, зависимость мощности возбуждающего излучения выражалась формулой:

$$P_{\text{возб}} = P_{\text{возб}}^{\text{max}} \cdot \cos^4 \alpha ,$$

где α – угол поворота первого поляризатора.

Запись спектров возбуждения эрбиевой ФЛ проводилась при температурах $T = 16\text{-}300$ К с использованием гелиевого криостата замкнутого цикла или при температуре $T = 77$ К в жидком азоте. Сигнал ФЛ регистрировался с помощью решеточного монохроматора Acton-2300, фотоэлектронного умножителя на основе InP/InGaAs (Hamamatsu) и цифрового осциллографа LeCroy. Временное разрешение системы определялось длительностью импульса возбуждающего излучения и составляло ~ 5 нс. При исследовании ФЛ в условиях импульсного возбуждения осуществлялась запись как временных, так и спектральных зависимостей сигнала ФЛ. Спектры ФЛ в данных условиях получались путем интегрирования временных зависимостей ФЛ, соответствующих различным длинам волн измеряемого сигнала.

Регистрация спектров ФЛ с высоким спектральным разрешением в условиях импульсного возбуждения осуществлялась с использованием фурье-спектрометра Bruker Vertex 80, работающего в режиме "step-scan".

Глава 3. Эффективность и температурное гашение эрбиевой ФЛ в СМЛЭ структурах Si:Er/Si.

Данная глава посвящена исследованию люминесцентных свойств кремниевых структур Si:Er/Si, полученных методом сублимационной МЛЭ при различных температурах роста и послеростового отжига структур. Определены значения внешней и внутренней квантовой эффективности ФЛ ионов эрбия в СМЛЭ структурах Si:Er/Si при низких температурах измерения и различной мощности оптического возбуждения. Основное внимание уделено изучению влияния природы излучающих центров, связанных с ионом Er^{3+} , на интенсивность и характер температурного гашения эрбиевой ФЛ.

3.1. Низкотемпературная ФЛ ионов эрбия в СМЛЭ структурах Si:Er/Si.

Как уже упоминалось в Главе 1, условия получения структур Si:Er/Si оказывают существенное влияние на микроскопическую структуру эпитаксиального слоя Si:Er и, как следствие, на интенсивность и форму спектра эрбиевой люминесценции. Температура роста эпитаксиального слоя Si:Er является одним из наиболее важных параметров, определяющих тип формирующихся в образце излучающих эрбиевых центров. Ранее было показано [54,55], что наиболее интенсивный сигнал эрбиевой ФЛ демонстрируют СМЛЭ структуры, полученные при температурах роста $T_p = 500\text{-}600^\circ\text{C}$, поэтому в данной работе основное внимание было уделено именно таким структурам. На рис.3.1 приведены характерные спектры низкотемпературной ФЛ СМЛЭ структур Si:Er/Si, выращенных при температурах 500°C и 580°C . Температура измерения спектров составляла 4.2 К. В спектре структуры, выращенной при 580°C доминирует широкий пик ($\sim 30\text{ см}^{-1}$), представляющий собой излучение ионов эрбия в SiO_2 -подобных преципитатах [32]. Кроме того, в спектре наблюдаются узкие линии (6502 см^{-1} , 6443 см^{-1}), относящиеся к изолированному кислород-содержащему эрбиевому центру Er-1 [7]. Для структур, выращенных при 500°C , спектр представляет собой совокупность большого числа линий ФЛ, связанных с различными излучательными эрбиевыми центрами, среди которых при низкой температуре измерения ($T < 100\text{ К}$) доминируют линии кислородсодержащего центра Er-O1 (линии 6507 см^{-1} , 6472 см^{-1} , 6437 см^{-1} и т.д.) [32,58]. Все вышеперечисленные типы эрбиевых центров характерны для структур Si:Er с высоким содержанием кислорода, что является одной из особенностей структур, полученных методом сублимационной МЛЭ.

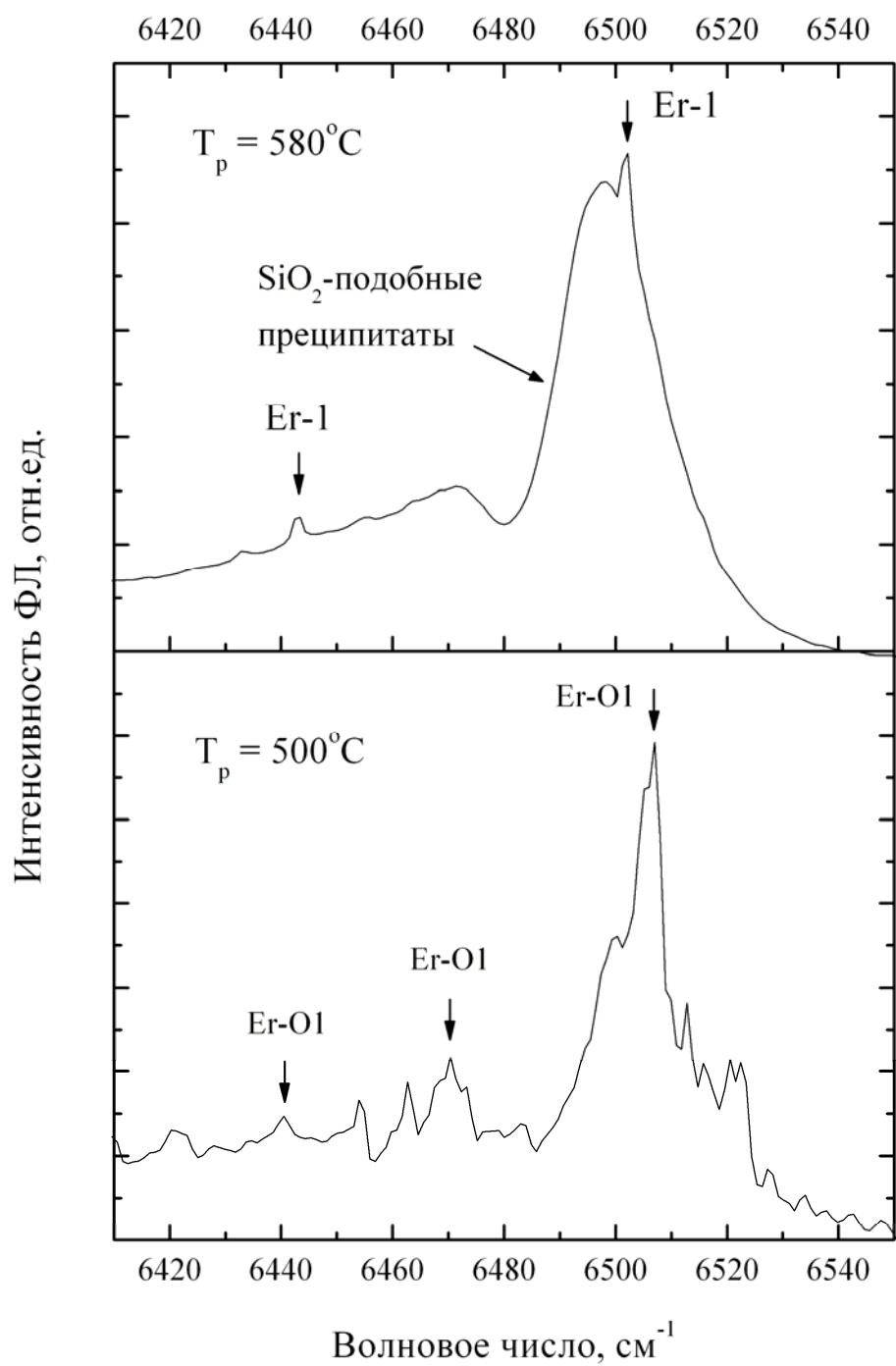


Рис.3.1. Спектры ФЛ структур Si:Er/Si, выращенных методом СМЛЭ при температурах 580°C и 500°C. $T = 4.2$ К.

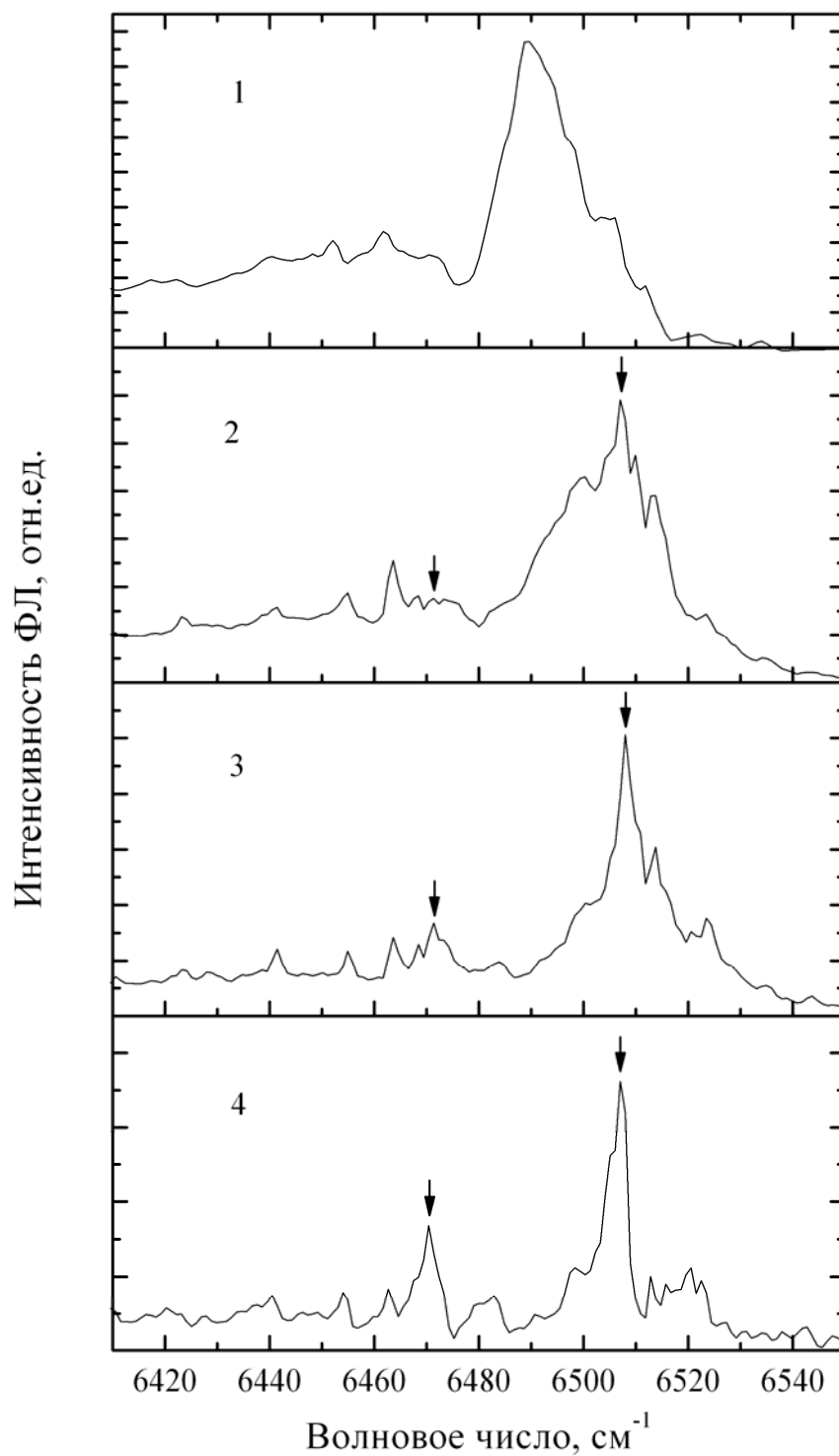


Рис.3.2. Модификация спектра эрбиевой ФЛ с изменением температуры роста. Номинальная температура роста – 500°C. Дополнительный излучательный разогрев структуры уменьшался от точки 1 к точке 4. Температура измерения – 4.2 К. Стрелками обозначены две основные линии излучательного центра Er-O1.

Более подробно модификацию формы спектра эрбиевой ФЛ с изменением температуры роста можно проследить на примере одной из структур, при получении которой нагретый источник кремния, легированного эрбием, был расположен над центром подложки на небольшом расстоянии от нее. Такая конфигурация используется в методе СМЛЭ для получения неоднородных по толщине слоев Si:Er, что позволяет исследовать зависимость интенсивности структур Si:Er/Si от толщины эпитаксиального слоя в пределах одного образца. В то же время такое расположение источника относительно подложки приводило к дополнительному, неравномерному по длине образца, разогреву структуры во время осаждения эпитаксиального слоя Si:Er. Таким образом, в центральной части образца (точка 1) реальная температура роста структуры была максимальной и уменьшалась к краю образца (точка 4). На рис.3.2 изображены спектры эрбиевой ФЛ, измеренные в разных точках структуры при $T = 4.2$ К. Как видно из рисунка, при высокой температуре роста в спектре доминирует широкая линия излучения ионов эрбия в SiO₂-подобных преципитатах, тогда как при уменьшении температуры вклад преципитатов уменьшается и преобладающей становится ФЛ изолированного центра Er-O1.

Отжиг выращенных структур Si:Er/Si приводит к существенной модификации спектров эрбиевой ФЛ. На рис.3.3 приведены спектры низкотемпературной ФЛ структуры Si:Er/Si, полученной при температуре 500°C без применения дополнительного отжига, а также после однократного отжига в течение 30 минут при температуре 800°C и двукратного отжига в течение 30 минут при температурах 800°C и 900°C. Как было показано ранее, неотожженная структура характеризуется довольно широким спектром с доминирующей линией излучательного центра Er-O1 (6507 см⁻¹). В результате дополнительного отжига происходит существенная перестройка структуры оптически активных эрбиевых центров. Спектр ФЛ структуры, отожженной при 800°C, состоит из серии узких линий, относящихся к одному типу эрбиевых центров – центру Er-1, характерному для структур Si:Er/Si, полученных методом сублимационной МЛЭ [7]. Наиболее интенсивная из этих линий имеет частоту 6501 см⁻¹ и ширину менее 0.1 см⁻¹ (~ 10 мкэВ), что является рекордной величиной для линий эрбиевой ФЛ, наблюдавшихся в структурах на основе кремния, легированного ионами эрбия. Повторный отжиг структуры при температуре 900°C приводит к резкому падению интенсивности линии Er-1 и возникновению широкого набора линий в высокочастотной области спектра (6500-6550 см⁻¹), соответствующих различным оптически активным эрбиевым центрам с низкой симметрией. Такие линии наблюдались как в структурах Si:Er/Si, полученных методом имплантации, так и в эпитаксиальных слоях Si:Er с высоким содержанием кислорода. Наблюдаемое в исследованных структурах преобладание кислород-содержащих эрбиевых

центров объясняется значительным содержанием кислорода в эпитаксиальных слоях, полученных методом СМЛЭ. Основными источниками кислорода в структурах являются как остаточный кислород в камере роста, так и кислород в сублимирующих источниках поликристаллического Si:Er. Трансформация спектров эрбиевой ФЛ, происходящая в результате отжига структур, связывается с изменением локального кислородного окружения иона эрбия, обусловленным термоактивированной диффузией атомов кислорода в кремнии.

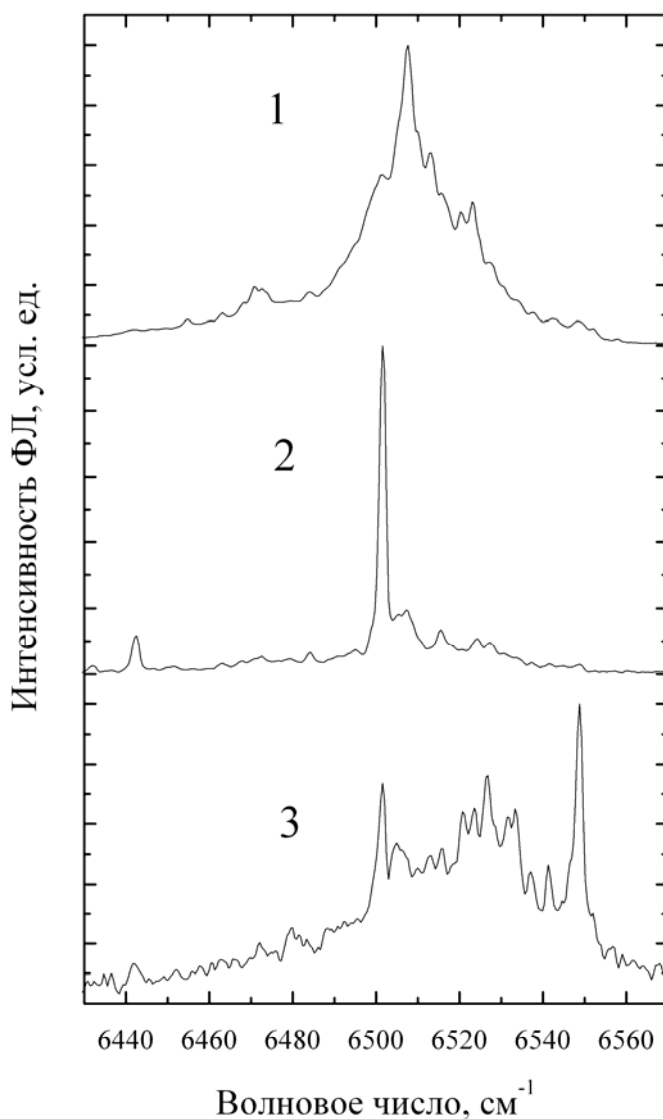


Рис.3.3. Спектры ФЛ структуры Si:Er/Si, выращенной при $T_p = 500^\circ\text{C}$, до отжига (1), после отжига в течение 30 мин. при $T = 800^\circ\text{C}$ (2) и после двукратного отжига в течение 30 мин. при $T = 800^\circ\text{C}$ и 900°C (3). Температура измерения – 4.2 К.

3.2. Квантовая эффективность ФЛ эрбия в СМЛЭ структурах Si:Er/Si.

В данной работе было проведено измерение квантовой эффективности ФЛ эрбия в структурах Si:Er/Si, полученных методом сублимационной МЛЭ. Максимальная интенсивность эрбиевой ФЛ наблюдалась в СМЛЭ структурах Si:Er/Si, выращенных при температурах 500-580°C без дополнительной термической обработки при низких температурах измерения ($T = 4.2$ К) Квантовая эффективность ФЛ наиболее интенсивно излучающей структуры Si:Er/Si (температура роста: 580°C, толщина эпитаксиального слоя Si:Er: 1.8 мкм) была определена при различных значениях мощности оптического возбуждения с помощью методики, описанной в разделе 2.3. В ходе эксперимента измерялись абсолютные значения мощности излучения ионов эрбия (в нановаттах), попадающего на приемную площадку измерителя мощности. Согласно описанной методике, детектируемая мощность ФЛ регистрировалась при различном удалении измерителя мощности от исследуемой структуры Si:Er/Si, помещенной в заливной гелиевый криостат. Мощность возбуждающего излучения при этом составляла 10 мВт. На рис.3.4 приведена полученная зависимость измеренной мощности ФЛ от смещения измерителя мощности x . Данная зависимость может быть описана формулой:

$$P = P_{изл} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{R_0 + x}{\sqrt{(R_0 + x)^2 + r^2}} \right), \quad (3.1)$$

где $P_{изл}$ – полная мощность излучения ионов эрбия в структуре, R_0 и x – начальное расстояние и изменение расстояния между структурой и измерителем мощности, r – радиус апертуры измерителя мощности ($r = 2$ мм).

В результате аппроксимации экспериментальных данных с помощью формулы (3.1) были определены значения полной мощности эрбиевой ФЛ и начального расстояния от структуры Si:Er/Si до измерителя мощности: $P_{изл} = 18.6$ мкВт, $R_0 = 65.6$ мм.

Внешняя квантовая эффективность эрбиевой ФЛ $\eta_{внешн.}$, была определена с помощью формулы (см. раздел 2.3):

$$\eta_{внешн} = \frac{P_{изл} \cdot \nu_{возб}}{0.65 \cdot P_{возб} \cdot \nu_{изл}} = \frac{18.6 \cdot 10^{-6} \text{ Вт} \cdot 2.33 \text{ эВ}}{0.65 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot 0.805 \text{ эВ}} = 0.0083 \quad (3.2)$$

и составила $\sim 0.8\%$ при мощности оптического возбуждения 10 мВт.

При мощности возбуждающего излучения 100 мВт мощность эрбиевой ФЛ и ее квантовая эффективность составили, соответственно, 55 мкВт и 0.25%, т.е. квантовая эффективность эрбиевой ФЛ уменьшалась с увеличением мощности возбуждения.

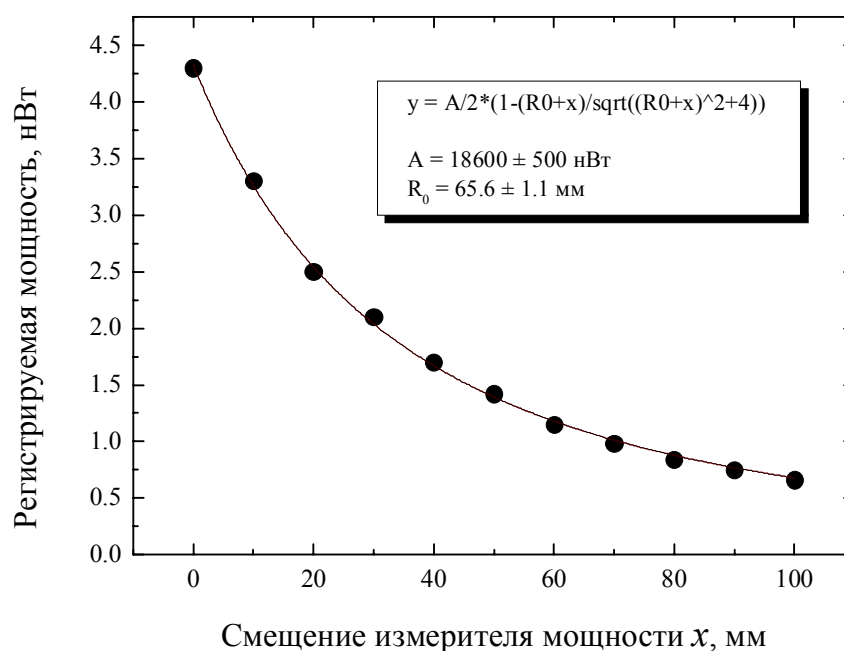


Рис.3.4. Зависимость регистрируемой мощности эрбиевой ФЛ от смещения измерителя мощности. Температура роста структуры – 580°C. Мощность возбуждающего излучения – 10 мВт. $T = 4.2$ К. Сплошная линия – аппроксимация экспериментальных данных с помощью формулы (3.1).

Для определения максимального значения квантовой эффективности эрбиевой ФЛ, была измерена зависимость интенсивности ФЛ от мощности возбуждения $I(P_{\text{возб}})$ при температуре 4.2 К. С учетом значений мощности эрбиевой ФЛ, полученных при $P_{\text{возб}} = 10$ мВт и $P_{\text{возб}} = 100$ мВт, была определена зависимость полной мощности эрбиевой ФЛ в широком интервале значений мощности возбуждения (рис.3.5). Максимальная мощность излучения структуры составила ~ 65 мкВт при наибольшей мощности оптического возбуждения 190 мВт. С помощью формулы (3.2) была определена внешняя квантовая эффективность эрбиевой ФЛ при всех значениях $P_{\text{возб}}$. Максимальное значение квантовой эффективности было получено при малых значениях мощности возбуждающего излучения ($P_{\text{возб}} < 1$ мВт), соответствующих линейному участку зависимости $I(P_{\text{возб}})$, и составило $\sim 1.6\%$ (рис.3.6). Полученная величина почти на порядок превосходит опубликованные ранее значения внешней квантовой эффективности эрбиевой ФЛ (0.2%) для структур Si:Er/Si, полученных методом ионной имплантации [60], и, по-видимому, является рекордной величиной внешней квантовой эффективности эрбиевой ФЛ для кремниевых структур без специальной обработки поверхности для вывода излучения [61].

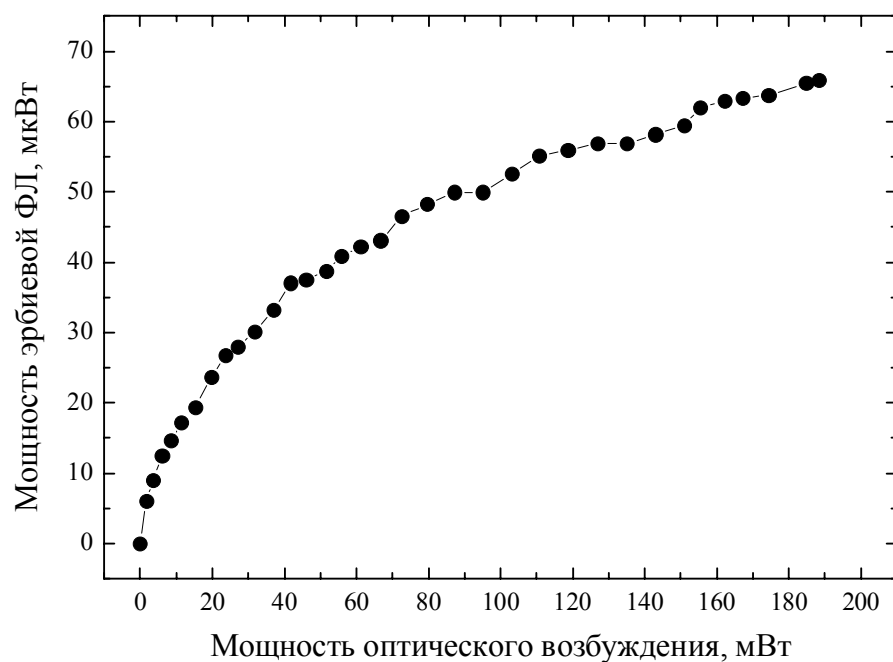


Рис.3.5. Зависимость мощности эрбиевой ФЛ структуры Si:Er/Si от мощности оптического возбуждения на длине волны 532 нм. $T = 4.2$ К.

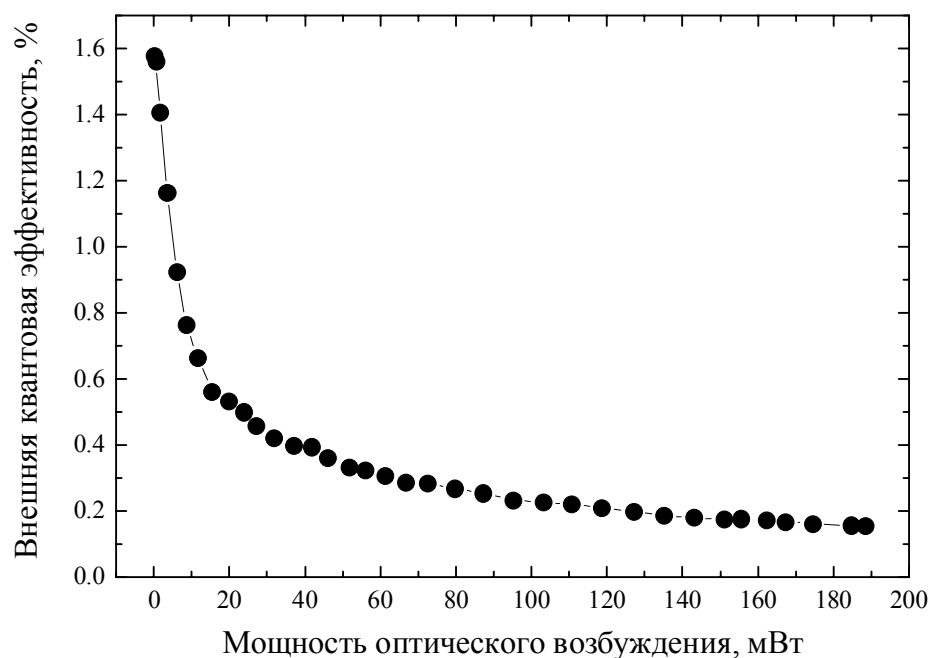


Рис.3.6. Зависимость внешней квантовой эффективности эрбиевой ФЛ СМЛЭ структуры Si:Er/Si от мощности оптического возбуждения. $T = 4.2$ К.

Полученное значение квантовой эффективности эрбиевой ФЛ свидетельствует о высоком качестве получаемых эпитаксиальных слоев Si:Er, а также о чрезвычайно высокой эффективности экситонного механизма возбуждения ионов эрбия в кремниевой матрице при низкой температуре и малой мощности оптического возбуждения. Это связано с тем, что в указанных условиях процессы безызлучательного девозбуждения ионов эрбия, протекающие с участием свободных носителей заряда (Оже-девозбуждение), а также ионизованных доноров (обратная передача энергии, "back-transfer") оказываются подавленными, и процесс возбуждения ионов эрбия посредством захвата экситонов на эрбиевые комплексы оказывается доминирующим. Существенное снижение квантовой эффективности эрбиевой ФЛ при увеличении мощности возбуждающего излучения связано с насыщением числа возбужденных оптически активных эрбиевых центров, а также с возрастанием концентрации неравновесных носителей заряда и, как следствие, с увеличением безызлучательного Оже-девозбуждения ионов эрбия.

Оценка внутренней квантовой эффективности ФЛ СМЛЭ структур Si:Er/Si с помощью формулы (2.1) дает величину $\sim 35\%$ при гелиевых температурах в пределе малой мощности оптического возбуждения. Следует отметить, что полученное значение внутренней квантовой эффективности эрбиевой ФЛ может быть значительно завышенным и представляет собой оценку сверху. Это связано с тем, что методика определения внутренней квантовой эффективности ФЛ с помощью формулы (2.1), описанная в разделе 2.3, не учитывает возможность многократного переотражения излучения ионов эрбия, сгенерированного в структуре, от границ исследуемого образца. Как будет показано в Главе 5, вследствие малости коэффициента поглощения света в кремнии на длине волны эрбиевой ФЛ (1540 нм) излучение ионов эрбия, прошедшее через Si подложку и отраженное от задней поверхности структуры, может давать значительный вклад в сигнал эрбиевой ФЛ, регистрируемый измерителем мощности.

Увеличение температуры измерения, как и увеличение мощности оптической накачки, приводит к существенному снижению эффективности эрбиевой ФЛ. Возрастание температуры с 4.2 до 77 К приводит к падению внешней квантовой эффективности ФЛ ионов эрбия приблизительно на порядок величины [A2,A17]. Падение интенсивности эрбиевой ФЛ с ростом температуры может быть обусловлено как снижением эффективности возбуждения, так и возрастанием безызлучательного девозбуждения ионов эрбия в кремниевых структурах. Более подробно эффект температурного гашения эрбиевой ФЛ в СМЛЭ структурах Si:Er/Si будет рассмотрен в следующем разделе.

3.3. Температурное гашение эрбиевой ФЛ в СМЛЭ структурах Si:Er/Si.

Особый интерес при изучении кремниевых структур, легированных эрбием, представляет исследование зависимости ФЛ ионов эрбия от температуры образца, поскольку оно позволяет получить информацию о механизмах возбуждения и безызлучательного девозбуждения иона эрбия в кремниевой матрице. Характер температурной зависимости эрбиевой ФЛ определяется, в частности, энергетическим спектром излучающего центра и состояний в запрещенной зоне кремния, участвующих в передаче возбуждения от электронной подсистемы кремния во внутреннюю оболочку иона Er^{3+} . Любое промежуточное состояние, возникающее в процессе передачи энергии (свободные экситоны, экситоны, связанные на примесных центрах и т.д.), может характеризоваться определенным значением энергии активации температурного гашения ФЛ. Например, для свободных экситонов характерной энергией является кулоновская энергия связи электрона и дырки в экситоне, которая составляет для кремния ≈ 15 мэВ [62]. Если энергия теплового движения носителей превосходит эту величину, начинается интенсивный распад экситонов на свободные электроны и дырки. Аналогично, для связанных экситонов, такой характерной энергией является энергия связи экситона на примесном центре. Таким образом, измерение зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от температуры позволяет определить глубину уровней в запрещенной зоне кремния, участвующих в процессе возбуждения оптически-активных эрбиевых центров.

В данном разделе приводятся результаты исследования температурной зависимости ФЛ ионов эрбия для структур Si:Er/Si, полученных методом сублимационной МЛЭ, а также рассматривается влияние послеростового отжига полученных структур на температурное гашение ФЛ. Исследования температурной зависимости ФЛ проводились при низких значениях мощности оптического возбуждения (< 10 мВт), чтобы исключить заметный перегрев исследуемых структур, а также избежать насыщения сигнала эрбиевой ФЛ.

На рис.3.7 представлены спектры ФЛ структуры Si:Er/Si, полученной при температуре роста $T_p = 500^\circ\text{C}$ без дополнительного отжига. Спектры были измерены при нескольких значениях температуры ($T = 6$ К, 60 К, 78 К и 120 К). Как было показано выше, при низких температурах наибольший вклад в ФЛ структур, выращенных при $T_p = 500^\circ\text{C}$, дает изолированный центр Er-O1, содержащий эрбий и кислород, с наиболее интенсивной линией на частоте 6507 см^{-1} , а также с серией линий на частотах 6472, 6437, 6384, 6314, 6229 и 6173 см^{-1} [32]. Как видно из рис.3.7, при увеличении температуры наблюдается значительное падение интенсивности эрбиевой ФЛ и одновременно с этим происходит

существенная модификация спектра ФЛ. Более наглядно это продемонстрировано на рис.3.8, на котором представлены те же спектры ФЛ, нормированные на максимальное значение интенсивности. Как видно из рисунка, с ростом температуры происходит значительное уширение спектра эрбиевой ФЛ, сопровождаемое существенным возрастанием вклада высокочастотного крыла спектра в области $6520-6550 \text{ см}^{-1}$. Более того, как видно из рис.3.7, в данной области спектра в диапазоне температур $T = 4.2-40 \text{ К}$ наблюдается возрастание абсолютного значения интенсивности эрбиевой ФЛ с ростом температуры.

В ряде работ [32,63] наблюдение сигнала в высокочастотной области спектра эрбиевой ФЛ связывалось с наличием так называемых "горячих" линий ФЛ, которые представляют собой излучение, соответствующее переходам с верхних, возбужденных подуровней мультиплета $^4I_{13/2}$ иона эрбия в основное состояние $^4I_{15/2}$ (см. рис.1.1). Это излучение проявляется в спектрах ФЛ в виде линий, сдвинутых в высокочастотную область относительно линий основных переходов (с первого подуровня), причем каждой линии основного перехода соответствует одна "горячая" линия ФЛ, смещенная на определенную частоту относительно основной [32]. Интенсивность "горячих" линий ФЛ действительно возрастает с ростом температуры, что связано с увеличением населенности верхних подуровней возбужденного состояния 4f-оболочки [63]. В то же время ряд экспериментальных результатов указывает на то, что излучение, наблюдавшееся нами в спектрах эрбиевой ФЛ в диапазоне $6520-6550 \text{ см}^{-1}$, несмотря на аналогичный характер температурной зависимости, представляет собой не "горячую" люминесценцию, а излучение оптически активных эрбиевых центров, отличных от основного центра Er-O1.

В работе [32] было показано, что для излучательного центра Er-O1, который является доминирующим в исследованной структуре при низких температурах, величина сдвига "горячих" линий ФЛ относительно основных составляет 28.8 см^{-1} , т.е. частота наиболее интенсивной "горячей" линии ФЛ, соответствующей центру Er-O1, составляет 6536.3 см^{-1} . Эта частота не соответствует ни одной из наблюдавшихся нами линий в спектрах ФЛ исследованной структуры. Кроме того, как видно из рис.3.8, с ростом температуры возрастание интенсивности излучения происходит не для отдельных линий ФЛ, как это наблюдается в случае "горячей" ФЛ, а одновременно во всем спектральном диапазоне $6520-6550 \text{ см}^{-1}$. Наконец, "горячие" линии ФЛ возникают, как правило, только при повышенных температурах и не наблюдаются при гелиевых температурах. В нашем случае возникновения новых линий ФЛ с возрастанием температуры не наблюдалось.

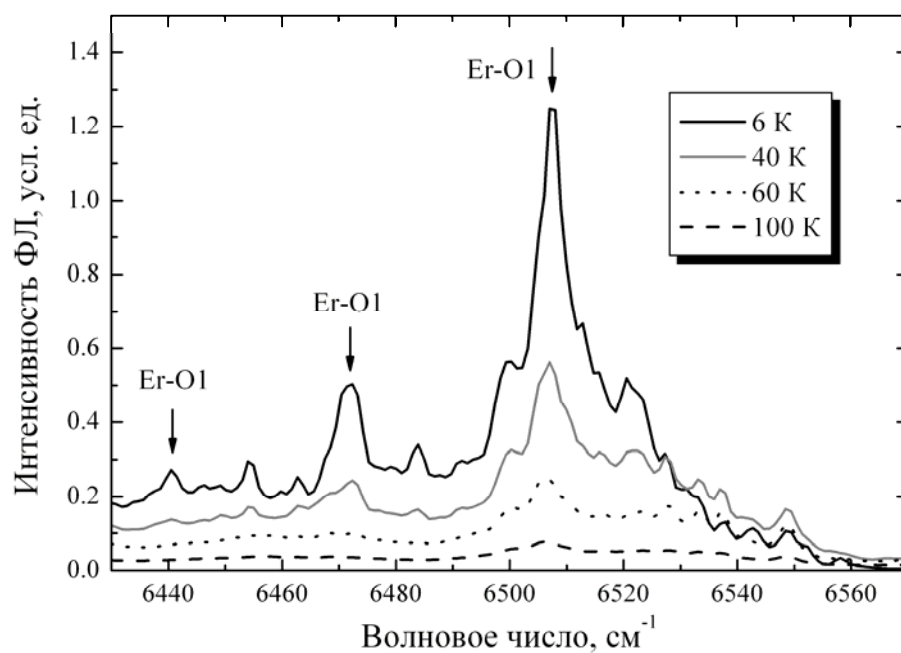


Рис.3.7. Спектры ФЛ СМЛЭ структуры Si:Er/Si ($T_p = 500^\circ\text{C}$) при $T = 6\text{ K}$, 40 K , 60 K и 100 K . Мощность оптического возбуждения – 4 мВт .

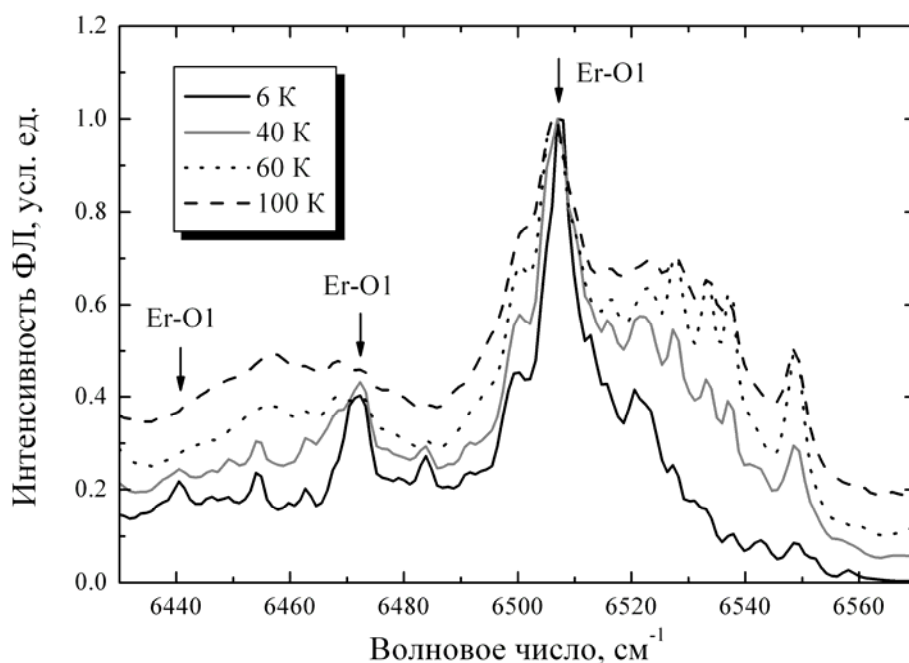


Рис.3.8. Спектры ФЛ СМЛЭ структуры Si:Er/Si ($T_p = 500^\circ\text{C}$) при $T = 6\text{ K}$, 40 K , 60 K и 100 K , нормированные на максимальное значение интенсивности ФЛ ионов эрбия. Мощность оптического возбуждения – 4 мВт .

Данное предположение подтверждается также следующим экспериментальным результатом. Было проведено сравнение спектров ФЛ высокого разрешения, полученных для неотожженной структуры Si:Er/Si ($T_p = 500^\circ\text{C}$) и аналогичной структуры, подвергнутой двукратному отжигу при температурах $T_{\text{ann.}} = 800^\circ\text{C}$ и 900°C . В первом случае спектр ФЛ был измерен при температуре 60 К, во втором случае – при температуре 4.2 К. Сравнение полученных спектров ФЛ (рис.3.9) показывает, что в неотожженной структуре основной вклад в сигнал ФЛ при повышенных температурах измерения дают те же оптически активные эрбиевые центры, что и в отожженной структуре при низких (гелиевых) температурах.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что сигнал эрбиевой ФЛ, наблюдаемый в спектральном диапазоне $6520\text{-}6550\text{ см}^{-1}$ и характеризующийся возрастающей интенсивностью с ростом температуры в интервале $T = 4\text{-}40\text{ К}$, связан с наличием в исследуемых структурах ряда оптически активных эрбиевых центров, отличных от центра Er-O1, доминирующего при гелиевых температурах.

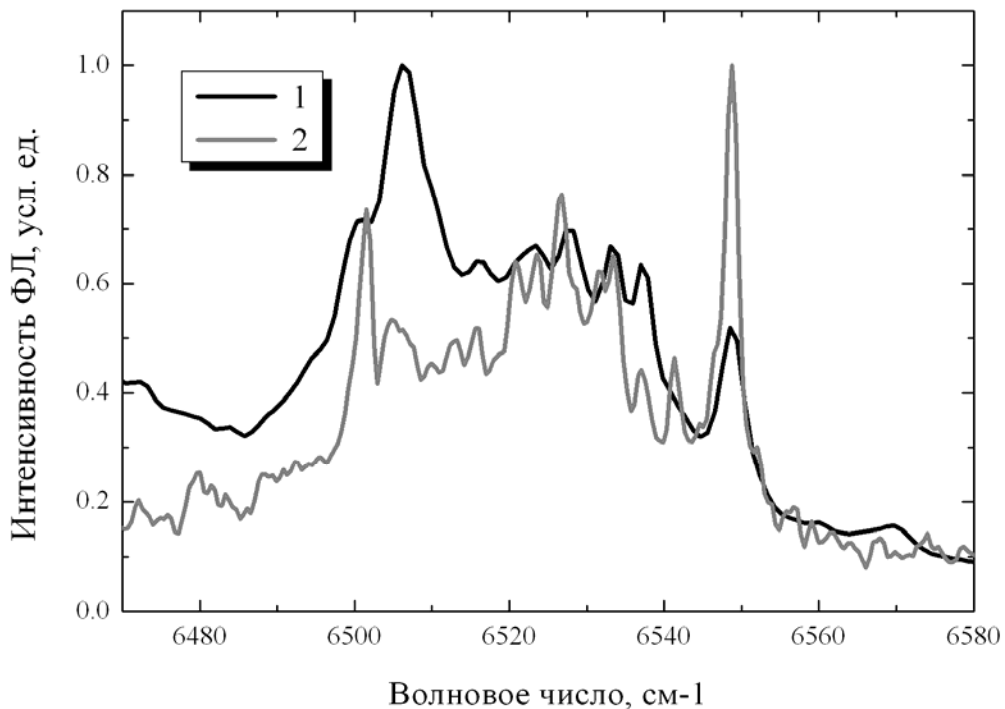


Рис.3.9. 1 – спектр ФЛ неотожженной структуры Si:Er/Si ($T_p = 500^\circ\text{C}$), температура измерения ФЛ: $T = 60\text{ К}$; 2 – спектр ФЛ структуры Si:Er/Si ($T_p = 500^\circ\text{C}$), подвергнутой двукратному отжигу при $T_{\text{ann.}} = 800^\circ\text{C}$ и 900°C , температура измерения ФЛ: $T = 4.2\text{ К}$. Спектры нормированы на максимальное значение интенсивности ФЛ.

Температурные зависимости интенсивности основной линии излучения центра Er-O1 с частотой 6507 см^{-1} и ФЛ низкосимметричных эрбиевых комплексов, излучающих в области $6520\text{-}6550 \text{ см}^{-1}$, приведены на рис.3.10. Как видно из рисунка, центр Er-O1, доминирующий в спектре при гелиевых температурах, характеризуется монотонным падением интенсивности ФЛ во всем рассмотренном интервале температур ($T = 6\text{-}120 \text{ К}$). Значение энергии активации температурного гашения ФЛ центра Er-O1 при низких температурах было определено путем аппроксимации экспериментальной зависимости $I(T)$ функцией:

$$I(T) = \frac{I(0)}{1 + C_1 e^{-\frac{E_1}{kT}} + C_2 e^{-\frac{E_2}{kT}}} \quad (3.1)$$

и составило $E_1 \approx 4.6 \text{ мэВ}$.

Как правило, рассматривают две основных причины гашения ФЛ иона Er в кремниевых структурах с ростом температуры. Первая состоит в снижении эффективности возбуждения иона Er^{3+} . Это может быть связано с падением времени жизни экситона, термически активированным отрывом экситона от связанного с ионом Er^{3+} донорного центра, ионизацией донорного центра и другими процессами. Вторая возможная причина состоит в падении эффективности излучения вследствие безызлучательной релаксации возбуждённого иона Er^{3+} , при которой энергия передаётся обратно в электронную подсистему кремния. Механизмы обратной передачи энергии могут быть различны: передача энергии кремниевой матрице в многофононном процессе; оже-процессы девозбуждения, включающие передачу энергии в ходе взаимодействия между электронами 4f оболочки иона Er^{3+} и свободными или связанными носителями.

В первом случае увеличение температуры не должно влиять на характерное время спада эрбиевой ФЛ. Во втором же случае должно наблюдаться падение времени релаксации эрбиевой ФЛ аналогичное падению интенсивности ФЛ. Для определения основной причины температурного гашения эрбиевой ФЛ в СМЛЭ структурах Si:Er/Si была измерена температурная зависимость времени релаксации эрбиевой ФЛ. На рис.3.11 приведены температурные зависимости интенсивности и времени спада эрбиевой ФЛ в структуре Si:Er/Si, выращенной при $T = 500^\circ\text{C}$. Как видно из рисунка, время спада эрбиевой ФЛ в отличие от интенсивности ФЛ практически не зависело от температуры измерения в интервале $T = 4\text{-}50 \text{ К}$. Это означает, что температурное гашение эрбиевой ФЛ в исследованных СМЛЭ структурах Si:Er/Si в интервале низких температур обусловлено снижением эффективности возбуждения ионов эрбия, т.е. эффективности передачи энергии носителей заряда, сгенерированных возбуждающим излучением, оптически активным эрбиевым центрам.

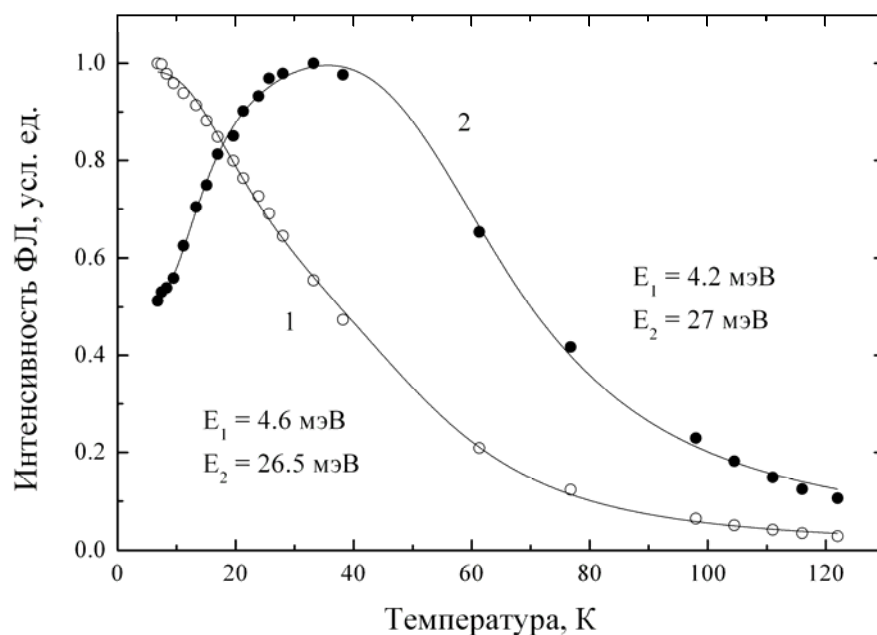


Рис.3.10. Температурная зависимость интенсивности ФЛ излучательного центра Er-O1 (6507 см^{-1}) (1) и низкосимметричных эрбиевых центров, излучающих в диапазоне $6520\text{-}6550 \text{ см}^{-1}$ (2) в структуре Si:Er/Si ($T_p = 500^\circ\text{C}$). Зависимости нормированы на максимум сигнала ФЛ. Сплошные кривые получены аппроксимацией экспериментальных зависимостей 1 и 2 функциями (3.1) и (3.2), соответственно.

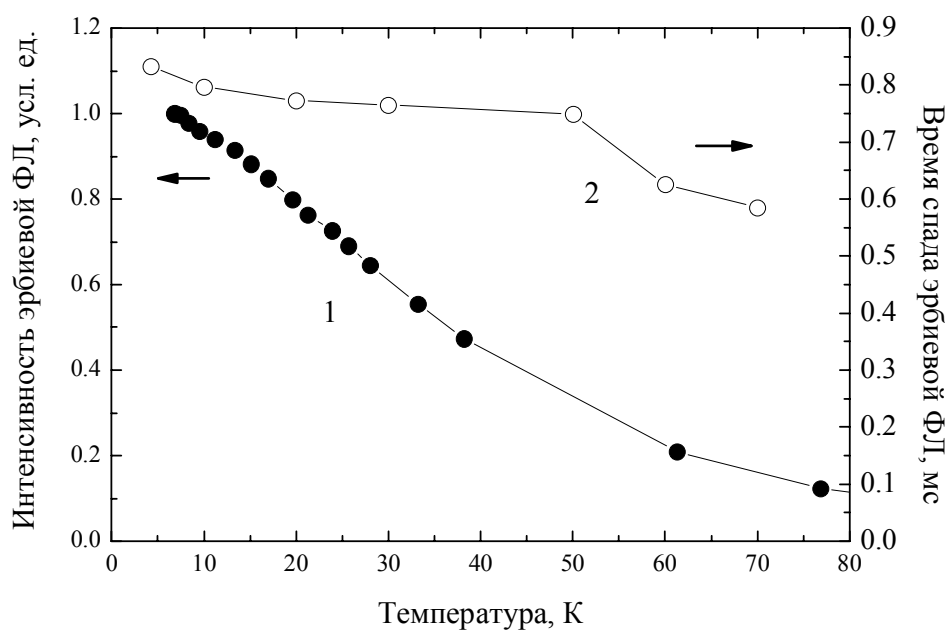


Рис.3.11. Температурные зависимости интенсивности (1) и времени спада (2) эрбиевой ФЛ в структуре Si:Er, выращенной при $T = 500^\circ\text{C}$.

Наиболее вероятной причиной снижения эффективности возбуждения ионов эрбия в структурах Si:Er/Si при увеличении температуры является термоактивированный отрыв связанных экситонов от примесных центров, участвующих в процессе возбуждения ионов эрбия. Указанный процесс отрыва экситонов от примесных центров рассматривался в ряде работ в качестве основного механизма температурного гашения эрбиевой ФЛ в области низких температур ($T < 100-150$ К) как для структур, выращенных методом МЛЭ, так и для структур, полученных методом ионной имплантации [32]. В этом случае энергия активации температурного гашения эрбиевой ФЛ соответствует энергии связи экситона на примесном центре, участвующем в возбуждении иона эрбия. Таким образом, полученное нами значение энергии активации 4.6 мэВ может быть интерпретировано, согласно правилу Хайнса [49], как энергия связи экситонов на примесных центрах с энергией ионизации $\sim 40-50$ мэВ. К таким примесным центрам в исследованных СМЛЭ структурах Si:Er/Si могут быть отнесены атомы бора и фосфора, концентрация которых, согласно результатам исследований методом ВИМС, составляет $\sim 10^{16}$ см⁻³ (см. рис.2.2). Следует упомянуть, что энергия активации температурного гашения ФЛ экситонов, связанных на мелких примесных центрах, измеренная в исследованных структурах Si:Er/Si, также составила ~ 4 мэВ (рис.3.12).

Другой возможной причиной возникновения в исследованных структурах Si:Er/Si мелких примесных центров может являться формирование термодоноров, которые представляют собой сложные комплексы, включающие в свой состав атомы кремния и кислорода. Известно, что значения энергии ионизации термодоноров в кремнии составляют от 40 до 70 мэВ [64]. Образование термодоноров может происходить в кремниевых структурах с высоким содержанием кислорода в процессе отжига структур при температурах, превышающих 400°C [65].

Наличие мелких электрически активных примесных центров в слоях Si:Er, полученных методом СМЛЭ, было подтверждено методом адмиттанс-спектроскопии с температурным сканированием [66]. Данные примесные центры могут либо непосредственно относиться к излучающим эрбиевым комплексам, либо представлять собой электрически активные примесные центры, находящиеся вблизи излучающих ионов эрбия на расстоянии сравнимом с размером волновой функции связанного экситона.

Таким образом, на основании полученных данных можно сделать вывод, что возбуждение эрбиевых центров Er-O1, доминирующих в спектрах ФЛ исследованных СМЛЭ структур Si:Er/Si при низких температурах, осуществляется экситонами, связанными на мелких примесных центрах в эпитаксиальном слое Si:Er.

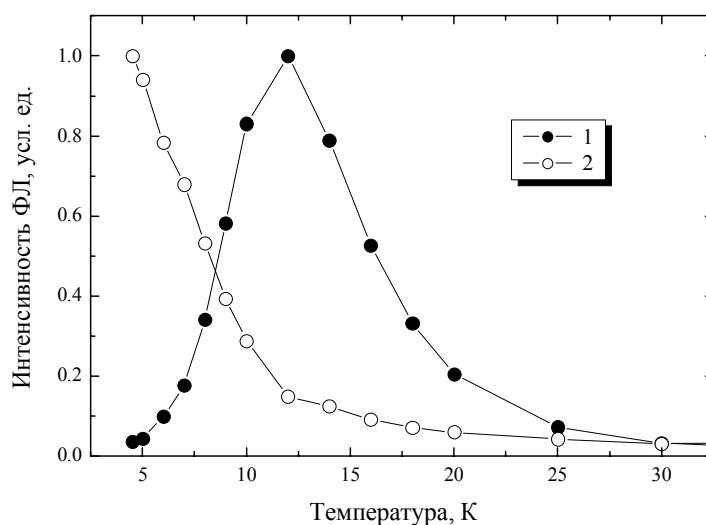


Рис.3.12. Температурная зависимость интенсивности ФЛ свободных экситонов (1) и экситонов, связанных на мелких примесных центрах в кремнии (2).

В отличие от линий ФЛ, относящихся к изолированному эрбиевому центру Er-O1, температурная зависимость ФЛ низкосимметричных эрбиевых комплексов, излучающих в спектральной области $6520-6550 \text{ см}^{-1}$, носит существенно немонотонный характер. Интенсивность ФЛ этих комплексов возрастает с увеличением T в области низких температур, достигая максимума при $T \sim 40 \text{ К}$ (рис.3.10). Аналогичное поведение было обнаружено ранее в работе [32] для ряда эрбиевых центров в структурах Si:Er/Si, полученных методом ионной имплантации. Как и в работе [32] немонотонный характер температурной зависимости эрбиевой ФЛ в спектральной области $6520-6550 \text{ см}^{-1}$ может быть объяснен термоактивированным отрывом связанных экситонов от мелких примесных центров и их захватом на более глубокие центры (по сравнению с центром Er-O1), связанные с ионами эрбия, излучение которых соответствует спектральному диапазону $6520-6550 \text{ см}^{-1}$. Таким образом, возрастание интенсивности эрбиевой ФЛ может происходить вследствие существенного различия в энергии связи экситонов на электрически активных центрах разной природы. При увеличении температуры начинается интенсивный отрыв экситонов от мелких центров и увеличивается вероятность захвата экситонов на более глубокие примесные центры.

Следует отметить, что немонотонный характер температурной зависимости ФЛ часто наблюдается в кремниевых структурах с различными типами излучающих центров. Так, в работе [45] было описано возрастание с ростом температуры интенсивности ФЛ экситонов,

связанных на глубоких примесных уровнях, которое объяснялось отрывом связанных экситонов от более мелких примесных центров. Этой же причиной объясняется возрастание интенсивности ФЛ свободных экситонов, наблюдаемое в кремниевых структурах (в том числе в структурах Si:Er/Si) в интервале температур $T = 4.2-12$ К (рис.3.12).

Для количественного анализа полученной температурной зависимости ФЛ низкосимметричных эрбиевых комплексов была использована формула, учитывающая конкуренцию между двумя типами излучающих центров с различными энергиями связи экситона E_1 и E_2 [45]:

$$I(T) = \frac{I_0}{\left(1 + \frac{C}{1 + C_1 \cdot e^{-\frac{E_1}{kT}}}\right) \cdot \left(1 + C_2 \cdot e^{-\frac{E_2}{kT}}\right)} \quad (3.2)$$

В результате аппроксимации экспериментальных данных с помощью функции (3.2) было получено значение энергии активации, характеризующее возрастающий участок температурной зависимости ФЛ низкосимметричных эрбиевых центров: $E \approx 4.2$ мэВ. Эта энергия близка к значению 4.6 мэВ, полученному для энергии активации температурного гашения ФЛ центра Er-O1 при низких температурах, что подтверждает связь между возрастанием интенсивности ФЛ в диапазоне $6520-6550$ см⁻¹ и падением интенсивности излучения центра Er-O1.

Значение энергии активации температурного гашения эрбиевой ФЛ в области более высоких температур $E_2 = 27$ мэВ (см. рис.3.10) может соответствовать энергии связи экситона на глубоких эрбиевых центрах с энергией ионизации ~ 270 мэВ. Необходимо отметить, однако, что на данный момент нам не удалось получить непосредственное подтверждение существования таких уровней в структурах Si:Er/Si, полученных методом СМЛЭ. При исследовании методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней в СМЛЭ структурах Si:Er/Si не было обнаружено электрически активных центров с энергией ионизации, превышающей 100 мэВ.

Как было показано на рис.3.9, отжиг СМЛЭ структур Si:Er/Si при $T \geq 900^\circ\text{C}$ приводит к существенной модификации спектра ФЛ ионов эрбия и смещению сигнала ФЛ в высокоэнергетическую область. Было обнаружено, что такой отжиг вызывает также значительное (на порядок) падение интенсивности низкотемпературной ФЛ ионов эрбия. В то же время сравнительное исследование температурных зависимостей эрбиевой ФЛ в неотожженных СМЛЭ структурах и структурах, подвергнутых послеростовому отжигу, показало, что структуры, двукратно отожженные при температурах 800 и 900°C,

характеризуются существенно более слабым температурным гашением эрбиевой ФЛ. Было обнаружено, что интенсивность ФЛ в таких структурах превосходит интенсивность эрбиевой ФЛ в неотожженных структурах Si:Er/Si при температуре измерения, превышающей 160 К (рис.3.13). Таким образом, продемонстрировано существенное снижение температурного гашения ФЛ ионов эрбия в СМЛЭ структурах Si:Er/Si в результате послеростового отжига структур.

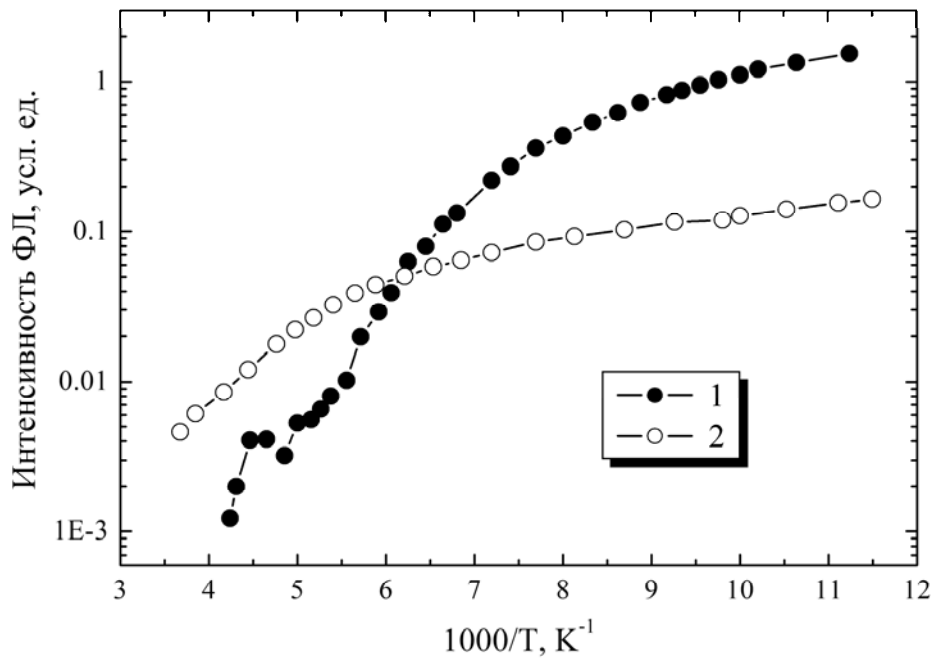


Рис.3.13. Сравнение температурных зависимостей эрбиевой ФЛ в СМЛЭ структурах Si:Er/Si: 1 – неотожженной структуры ($T_p = 500^\circ\text{C}$); 2 – структуры, подвергнутой двукратному отжигу при $T_{\text{ann.}} = 800$ и 900°C .

3.4. ФЛ волноводных эпитаксиальных слоев Si:Er, выращенных на подложках "кремний-на-изоляторе" (SOI).

Структуры кремний-на-изоляторе (SOI) обладают необходимыми свойствами для реализации кремниевых волноводов в ближней ИК области спектра благодаря достаточной разности показателей преломления на границе Si/SiO₂ ($\Delta n \sim 2$) и развитой технологии изготовления пластин SOI с требуемыми параметрами. В предшествующих работах [67,68] волноводные структуры Si:Er/SOI изготавливались методом ионной имплантации эрбия в подложку SOI. В этом случае отмечалось появление дополнительных оптических потерь, связанных с дефектами, вносимыми имплантацией, и интенсивность люминесценции в структурах была слабой. Кроме того, при имплантации весьма ограничены возможности получения структур с заданным профилем легирования и толщиной активного (легированного) слоя Si:Er более 1 мкм. В связи с этим эпитаксиальные слои Si:Er, выращенные на подложках SOI, с существенно меньшей плотностью дефектов по сравнению с имплантированными структурами представляют значительный интерес в качестве активной волноводной среды, излучающей в области длин волн 1.54 мкм. В настоящей работе впервые были получены и исследованы эпитаксиальные структуры Si:Er/SOI, выращенные методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии.

Эпитаксиальные слои Si:Er, выращенные на подложках "кремний-на-изоляторе" демонстрируют интенсивную ФЛ ионов эрбия, сравнимую и даже превышающую интенсивность эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si. Проведенные исследования показали, что основные особенности излучающих эрбиевых центров, характерные для структур на кремнии, сохраняются при эпитаксии на подложках SOI. При высокой температуре роста ($T_p = 560-600^\circ\text{C}$) в спектрах ФЛ наблюдаются широкие линии, связанные с излучением ионов эрбия в SiO₂-подобных преципитатах. Благодаря широкому спектру излучения, подобному спектру ионов эрбия в кварцевых волоконно-оптических усилителях, такие структуры являются перспективными для создания оптических усилителей ближнего ИК диапазона на основе кремния. При низких температурах роста ($T_p = 450-520^\circ\text{C}$) спектры ФЛ структур Si:Er/SOI состоят из большого числа узких линий с характерной шириной менее 30 мкэВ.

Отжиг структур Si:Er/SOI при температуре $T = 800-900^\circ\text{C}$ приводит, как и в структурах Si:Er/Si, к трансформации различных низкосимметричных эрбиевых центров в единственный кислород-содержащий эрбиевый центр Er-1 [A8,69] с серией характерных узких (~ 10 мкэВ) линий ФЛ (см. рис.3.14). Указанный центр является наиболее перспективным для достижения усиления на излучательном переходе $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ иона Er³⁺ [70,71].

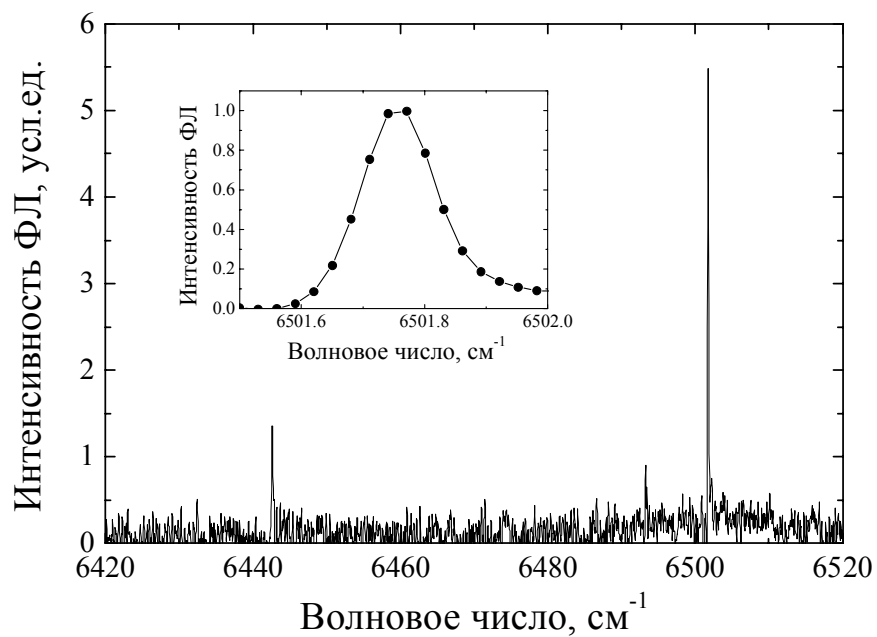


Рис.3.14. Спектр ФЛ структуры Si:Er/SOI, полученной методом СМЛЭ (температура роста – 500°C, температура отжига – 800°C). T = 77 К. На вставке: наиболее интенсивная линия центра Er-1, записанная с разрешением 0.05 см⁻¹.

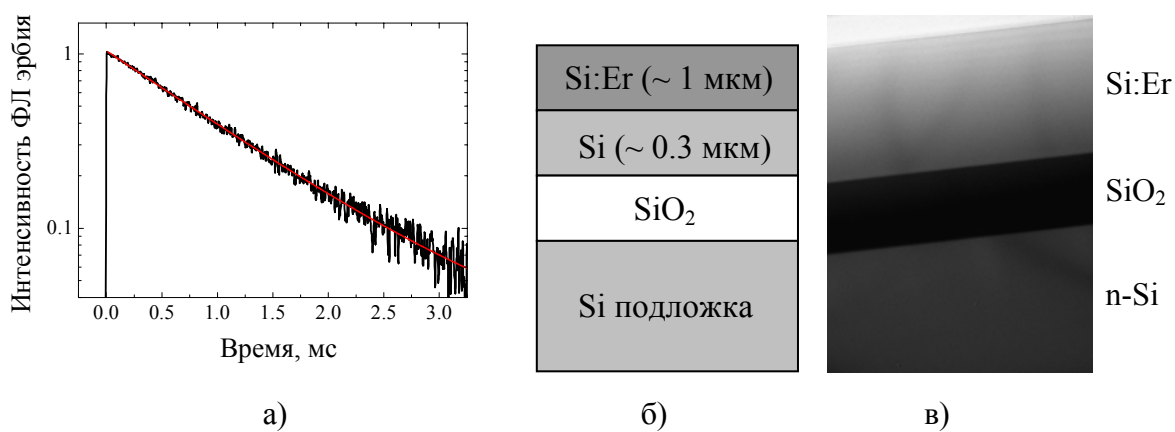


Рис.3.15. Кинетика спада эрбиевой ФЛ в структуре Si:Er/SOI, T = 77 К (а), а также схема (б) и ПЭМ снимок (в) полученной структуры Si:Er/SOI.

Измерения кинетики эрбиевой ФЛ при возбуждении импульсным источником излучения (ОРО) продемонстрировали близкие значения времени спада ФЛ эрбия (~ 1 мс при низких температурах измерения) в эпитаксиальных структурах Si:Er/Si и Si:Er/SOI, демонстрирующих наибольшую интенсивность ФЛ эрбия. Полученное значение времени спада ФЛ близко к излучательному времени жизни иона Er в кремнии, что подтверждает высокое качество полученных слоев Si:Er/SOI. Этот вывод подтверждается также результатами исследования полученных структур методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Таким образом, проведенные исследования показали, что при переходе к подложкам SOI сохраняются тип излучающих центров иона Er^{3+} (характер штарковского расщепления основного состояния), ширина спектральных линий, условия формирования и трансформации излучающих центров при термообработке, характерные для эпитаксиальных слоев Si:Er на кремнии.

Полученные в работе [71] оценки усиления $\beta = 8.8 \text{ см}^{-1}$ для СМЛЭ структур Si:Er/Si с имеющим рекордно узкую линию ФЛ центром Er-1 делают этот центр наиболее перспективным для достижения лазерной генерации на излучательном переходе ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ иона Er^{3+} . Получение высококачественных волноводных слоев Si:Er с центром Er-1 на подложках SOI в процессе, максимально совместимом с доминирующей CMOS технологией открывает перспективу создания лазерных структур на основе кремния, легированного ионами эрбия.

3.5. Выводы к Главе 3.

Исследованы люминесцентные свойства структур Si:Er/Si, выращенных методом сублимационной МЛЭ. Определена внешняя квантовая эффективность ФЛ ионов эрбия на длине волны 1.54 мкм. Максимальная эффективность ФЛ наблюдается в структурах Si:Er/Si, выращенных при температурах 520-580°C без дополнительной термической обработки, при низких температурах измерения ($T = 4.2$ К) и низких уровнях возбуждения ($P < 1$ мВт), соответствующих линейному участку зависимости интенсивности ФЛ от мощности оптической накачки. Максимальное значение внешней квантовой эффективности в эпитаксиальных структурах Si:Er/Si составляет 1.6%, что почти на порядок превосходит известные из литературы значения для структур Si:Er/Si, полученных методом ионной имплантации, и является рекордной величиной для кремниевых структур без специальной обработки поверхности для вывода излучения [A2, A15, A17].

Возбуждение оптически активных эрбиевых центров Er-O1, доминирующих в спектрах ФЛ эпитаксиальных структур Si:Er/Si при низких температурах измерения ($T < 60$ К), 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 с энергией 250-300 мэВ. 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 [A2, A3, A17].

Исследованы люминесцентные свойства волноводных слоев 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 мс и соответствует времени излучательной релаксации ионов эрбия в кремнии [A32, A34, A37, A39, A54].

Глава 4. ФЛ структур Si:Er/Si в условиях интенсивного импульсного оптического возбуждения.

Хорошо известно, что передача энергии ионам эрбия через электронную подсистему кремния является чрезвычайно эффективным механизмом возбуждения эрбиевой люминесценции в кремниевых структурах. Как было показано в предыдущей главе, внешняя квантовая эффективность эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si может достигать 1.6%. Столь высокие значения эффективности ФЛ наблюдаются, однако, только при низких температурах измерения и малой мощности оптического возбуждения, когда процессы безызлучательного девозбуждения ионов эрбия практически полностью подавлены. При более высоких уровнях возбуждения возникают процессы, приводящие к существенному снижению эффективности эрбиевой ФЛ, в частности, оже-девозбуждение ионов эрбия свободными носителями заряда. Несмотря на большое число работ, посвященных изучению данных процессов, большинство исследований было проведено в условиях непрерывного возбуждения исследуемых структур. В то же время процессы возбуждения и девозбуждения ионов эрбия, реализующиеся в условиях интенсивного импульсного возбуждения, к началу данной работы практически не изучались. Исследование ФЛ структур Si:Er/Si при высоких уровнях возбуждения чрезвычайно важно, в частности, для понимания условий достижения инверсной населенности ионов эрбия и возможности реализации в исследуемых структурах Si:Er/Si лазерной генерации. Не было исследовано влияние на процессы возбуждения ионов эрбия возникновения в структурах электронно-дырочной плазмы при концентрациях носителей заряда, превышающих 10^{17} см^{-3} .

В данной главе приводятся результаты исследования эрбиевой ФЛ в эпитаксиальных структурах Si:Er/Si в условиях импульсного оптического возбуждения в широком интервале значений мощности и длины волны возбуждающего излучения.

4.1. Особенности импульсного оптического возбуждения структур Si:Er/Si.

При исследовании люминесцентных свойств структур Si:Er/Si в условиях импульсного оптического возбуждения в качестве источника возбуждающего излучения использовался параметрический генератор света (optical parametric oscillator, OPO) с длительностью импульса ~ 5 нс. Использование данного прибора позволяет осуществлять перестройку длины волны возбуждающего излучения в широком спектральном диапазоне (от 400 до 2500 нм). В данной главе будет рассмотрен спектральный диапазон возбуждающего излучения $\lambda_{\text{ex}} = 500\text{-}960$ нм, соответствующий области межзонного возбуждения кремниевых структур.

Использование импульсного излучения для возбуждения структур Si:Er/Si приводит к ряду особенностей по сравнению с условиями непрерывного возбуждения. Во-первых, при импульсном возбуждении плотность мощности излучения, падающего на образец, может существенно превышать плотность мощности, достигаемую при непрерывной накачке. При импульсном возбуждении с использованием OPO плотность мощности в импульсе может достигать 10^7 Вт/см², при этом концентрация носителей заряда, рождаемых в структуре за время действия импульса может существенно превышать величину 10^{18} см⁻³. При столь высоких значениях концентрации носителей заряда происходит существенное изменение свойств электронной подсистемы кремния, в частности при концентрации $\sim 10^{17}$ см⁻³ происходит фазовый переход от режима генерации экситонного газа к режиму возбуждения электронно-дырочной плазмы (переход Мотта) [72,73]. Как будет показано в данной главе такой переход может оказывать существенное влияние на процессы возбуждения и безызлучательного девозбуждения ионов эрбия в кремнии.

Рассмотрим составляющие сигнала ФЛ, регистрируемого в условиях импульсного оптического возбуждения структур Si:Er/Si. На рис.4.1 приведена характерная временная зависимость интенсивности (кинетика) сигнала ФЛ, измеренного на длине волны излучательного перехода иона Er³⁺ (1535 нм) при межзонном оптическом возбуждении. В условиях импульсной накачки генерация неравновесных носителей заряда, участвующих в возбуждении ионов эрбия, осуществляется только в течение действия возбуждающего импульса, т.е. в течение 5-10 нс. Как будет показано в дальнейшем, время нарастания эрбиевой ФЛ существенно зависит от условий возбуждения, а именно от концентрации неравновесных носителей заряда, создаваемых в структуре. При низких уровнях оптической накачки нарастание эрбиевой ФЛ происходит в течение импульса лазерного излучения (~ 5 нс), однако при высокой мощности накачки время нарастания эрбиевой ФЛ может увеличиваться до нескольких микросекунд. Причины такого увеличения будут рассмотрены в разделе 4.6.

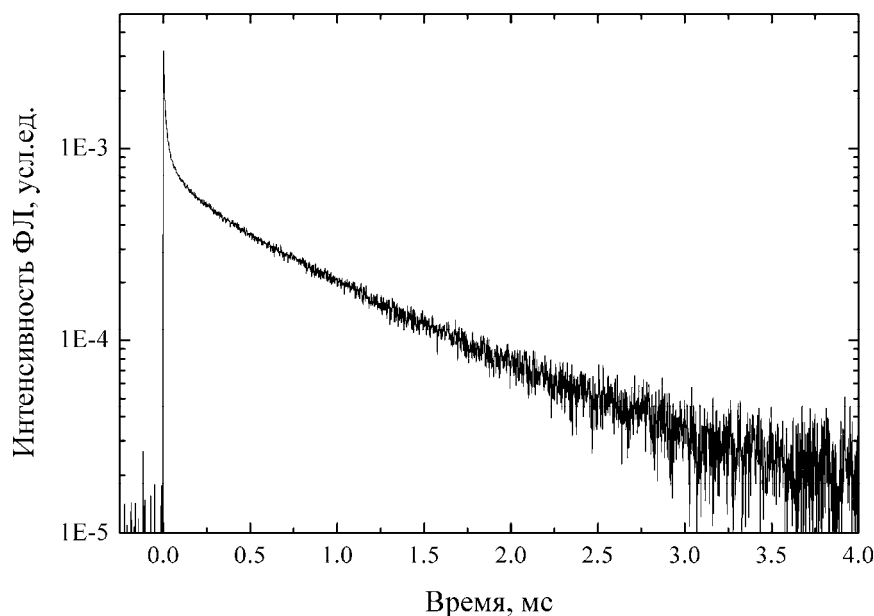


Рис.4.1. Характерная кинетика ФЛ структуры Si:Er/Si на длине волны излучательного перехода ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ иона эрбия ($\lambda = 1535$ нм) в условиях импульсного оптического возбуждения. $\lambda_{\text{ex}} = 500$ нм, $T = 77$ К.

Как видно из рис.4.1, в кинетике ФЛ, измеренной на длине волны излучательного перехода иона Er (1535 нм), можно выделить два характерных участка. Первый участок определяется процессами релаксации неравновесных носителей заряда, возникающих в исследуемой структуре при поглощении импульса возбуждающего излучения. Как правило, характерные времена этих процессов составляют ~ 1 -10 мкс. После окончания рекомбинации неравновесных носителей заряда излучательная релаксация ионов эрбия происходит в отсутствие безызлучательного оже-девозбуждения свободными носителями. Поэтому в кинетике эрбиевой ФЛ наблюдается участок "медленной" излучательной релаксации ионов эрбия с характерным временем спада, не зависящим от условий оптического возбуждения и составляющим при низких температурах ~ 1 мс. В связи с большой длительностью этот участок кинетики дает основной вклад в интегральную интенсивность эрбиевой ФЛ. В то же время, именно процессы взаимодействия ионов эрбия с неравновесными носителями заряда, протекающие в течение нескольких микросекунд после импульса возбуждающего излучения, определяют амплитуду медленной (миллисекундной) компоненты эрбиевой ФЛ и, следовательно, вид зависимостей интегральной интенсивности ФЛ от мощности и длины волны возбуждающего излучения.

4.2. Зависимость интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности возбуждения: область межзонного оптического возбуждения.

В данном разделе будут рассмотрены зависимости интенсивности ФЛ ионов эрбия в структурах Si:Er/Si от мощности импульсного возбуждающего излучения при различных длинах волн возбуждения в области межзонной оптической накачки структур, т.е. при энергиях кванта возбуждающего излучения, превышающих ширину запрещенной зоны кремния. Как было сказано ранее, в этом случае реализуется экситонный механизм возбуждения ионов эрбия, включающий в себя этапы генерации электронно-дырочных пар, образования свободных экситонов, связывания экситонов на примесных центрах и рекомбинации связанных экситонов с передачей энергии ионам эрбия.

На рис.4.2 приведен характерный спектр эрбиевой ФЛ, получаемый при импульсном оптическом возбуждении структур Si:Er/Si. Максимум в спектре эрбиевой ФЛ на длине волны 1535 нм (отмечен стрелкой) соответствует основному излучательному переходу с первого подуровня возбужденного состояния $^4I_{13/2}$ на первый подуровень основного состояния $^4I_{15/2}$ иона эрбия. Значительная ширина линии ФЛ в приведенном спектре связана с низким спектральным разрешением измерительной системы при исследовании кинетики и спектров возбуждения эрбиевой ФЛ, а также с тем, что приведенный спектр был получен для структуры Si:Er/Si, содержащей ионы эрбия в SiO₂-подобных преципитатах.

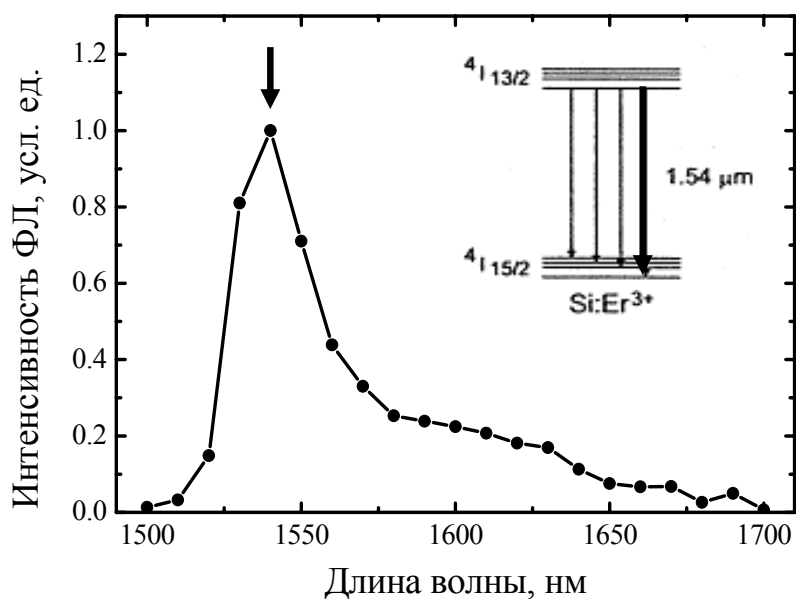


Рис.4.2. Спектр эрбиевой ФЛ при импульсном оптическом возбуждении (низкое спектральное разрешение). На вставке: схема излучательных переходов иона Er^{3+} в Si.

На рис.4.3 приведены зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности оптической накачки при различных длинах волн возбуждающего излучения в спектральном диапазоне, соответствующем области межзонного поглощения кремния. Средняя мощность излучения накачки изменялась в широком диапазоне от 0.01 мВт до 30 мВт, что соответствовало плотности мощности возбуждающего излучения от $1.5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^6$ Вт/см². При низкой мощности импульсного оптического возбуждения, как и в условиях непрерывной накачки, наблюдалась линейная зависимость интенсивности ФЛ от мощности. При увеличении мощности накачки наблюдалось насыщение сигнала эрбиевой ФЛ. Зависимости интенсивности ФЛ I от мощности возбуждения P могут быть с хорошей точностью описаны формулой:

$$I(P) = \frac{I_0 \cdot P}{P_0 + P}, \quad (4.1)$$

где I_0 – интенсивность ФЛ в насыщении, P_0 – характерное значение мощности накачки, соответствующее переходу от линейного режима к режиму насыщения. Как видно из зависимостей, приведенных на рис.4.3, интенсивность эрбиевой ФЛ в режиме насыщения (величина I_0) практически не зависит от длины волны возбуждающего излучения. В то же время наклон линейного участка зависимости $I(P)$ при малых значениях P , определяемый отношением I_0/P_0 , существенно зависит от длины волны возбуждения, а именно – монотонно падает с увеличением λ_{ex} (рис.4.4). В таблице 1 приведены значения величин I_0 и P_0 , полученные из аппроксимации зависимостей $I(P)$ при различных длинах волн возбуждения. В той же таблице приведены значения коэффициента поглощения излучения в кремнии на соответствующих длинах волн. Как видно из таблицы, при изменении λ_{ex} от 540 до 980 нм наклон линейного участка зависимости $I(P)$ (величина I_0/P_0), т.е. эффективность возбуждения эрбиевой ФЛ в линейном режиме падает в ~ 25 раз. Во столько же раз увеличивается характерная мощность P_0 , соответствующая переходу от линейного режима к режиму насыщения (от 0.007 мВт при $\lambda_{\text{ex}} = 540$ нм до 0.16 мВт при $\lambda_{\text{ex}} = 980$ нм).

λ_{ex} (нм)	I_0 (отн.ед.)	P_0 (мВт)	I_0/P_0	α , см ⁻¹
540	0.68	0.0067	101	4000
680	0.66	0.0076	87	1500
760	0.64	0.0116	55	700
900	0.63	0.043	15	100
980	0.62	0.162	3.8	30

Таблица 1. Коэффициенты, получаемые из аппроксимации зависимостей $I(P)$, приведенных на рис.4.3, функцией (4.1) при различных значениях λ_{ex} .

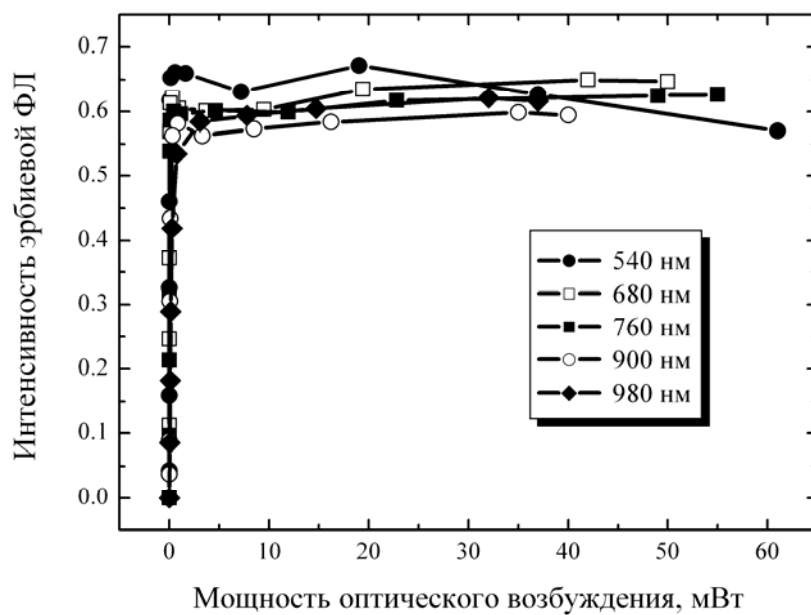


Рис.4.3. Зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности импульсного оптического возбуждения при различных длинах волн возбуждающего излучения. $T = 77$ К.

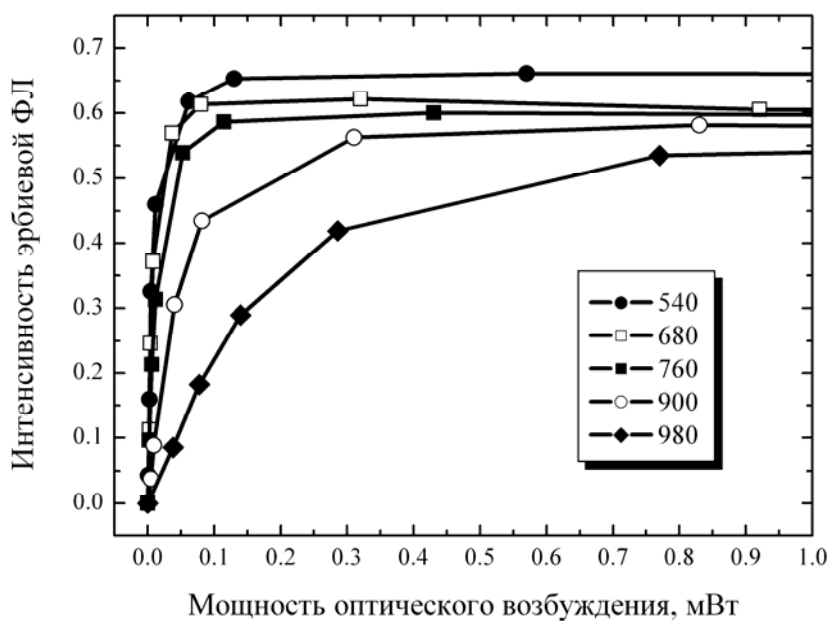


Рис.4.4. Зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности импульсного оптического возбуждения при различных длинах волн возбуждающего излучения (область малых Р).

Падение эффективности возбуждения эрбиевой ФЛ, наблюдаемое при малой мощности накачки с увеличением длины волны возбуждения, связано с уменьшением коэффициента поглощения излучения в кремнии с ростом длины волны. При возбуждении на длине волны 540 нм коэффициент межзонного поглощения излучения составляет $\sim 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ [74], т.е. глубина проникновения излучения в структуру составляет ~ 2 мкм. Поскольку толщина эпитаксиального слоя Si:Er в исследованных структурах также составляет $\sim 1-2$ мкм практически все возбуждающее излучение поглощается в эпитаксиальном слое Si:Er. При увеличении длины волны возбуждения в спектральном диапазоне 540-980 нм коэффициент поглощения уменьшается с $5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^1 \text{ см}^{-1}$ [75], т.е. характерная глубина проникновения излучения в структуру при 980 нм возрастает до 200 мкм. Соответственно, плотность мощности излучения, поглощаемого в слое Si:Er, падает в 100 раз. Таким образом, увеличение длины волны возбуждающего излучения эквивалентно уменьшению мощности излучения накачки. Необходимо учесть также, что наряду с падением коэффициента межзонного поглощения кремния, увеличение длины волны возбуждения (т.е. уменьшение энергии фотона возбуждающего излучения) приводит к возрастанию числа фотонов, приходящихся на единицу мощности падающего излучения. Для спектрального диапазона $\lambda_{\text{ex}} = 540-980$ нм это возрастание составляет 1.8. Таким образом, при увеличении λ_{ex} с 540 до 980 нм число фотонов, поглощаемых в эпитаксиальном слое Si:Er, а значит и создаваемая в слое Si:Er концентрация неравновесных носителей заряда, уменьшается в $100/1.8 = 55$ раз.

Из вышесказанного следует, что зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности накачки, полученные при различных длинах волн возбуждения, должны быть идентичными при соответствующем изменении горизонтального масштаба графиков $I(P)$. Как видно из рис.4.5, зависимость $I(P)$, полученная при $\lambda_{\text{ex}} = 980$ нм, преобразуется в зависимость $I(P)$, измеренную при $\lambda_{\text{ex}} = 540$ нм, путем умножения горизонтальной шкалы на 25. Расхождение данного коэффициента с теоретическим значением 55 объясняется, по-видимому, тем, что снижение поглощения излучения в активном слое Si:Er (увеличение глубины проникновения возбуждающего излучения в структуру) частично компенсируется уменьшением вклада поверхностной рекомбинации неравновесных носителей заряда, а также диффузией носителей заряда из кремниевой подложки в активный слой Si:Er. Известно, что длина диффузии носителей заряда (экситонов) в кремнии при низких температурах может составлять сотни микрон [44], поэтому диффузия экситонов из подложки может давать существенный вклад в возбуждение ионов эрбия в эпитаксиальном слое Si:Er.

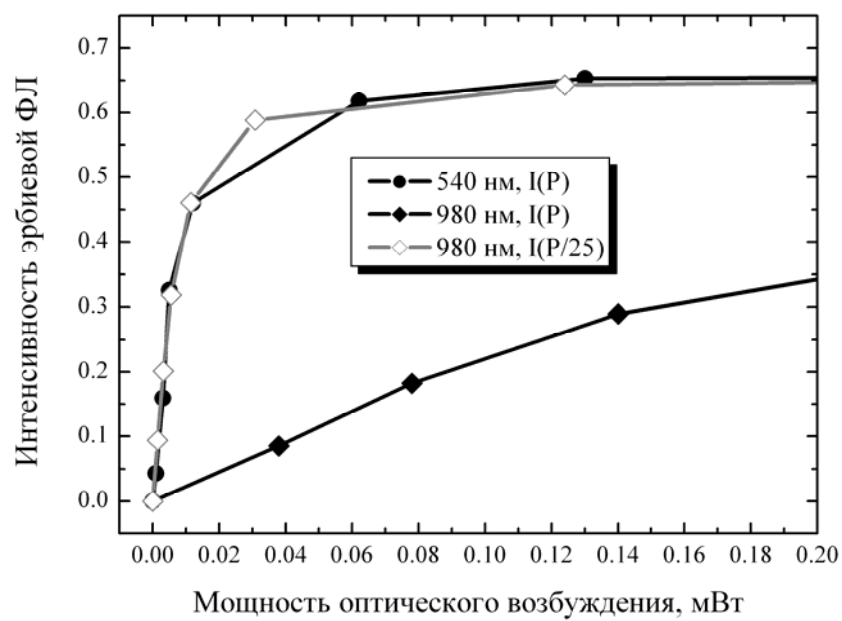


Рис.4.5. Зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности накачки при $\lambda_{\text{ex}} = 540$ и 980 нм, а также при $\lambda_{\text{ex}} = 980$ нм с изменением масштаба оси мощности накачки в 25 раз. $T = 77$ К.

4.3. Влияние неоднородности оптической накачки на зависимость интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности возбуждения.

В ходе исследования зависимостей интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности возбуждающего излучения был получен результат, важный с точки зрения методики проведения эксперимента и получения достоверных экспериментальных данных. Было обнаружено, что вид получаемых зависимостей от мощности накачки существенно образом зависит от однородности засветки поверхности исследуемых структур Si:Er/Si возбуждающим излучением. Дело в том, что при измерении сигнала ФЛ, в том числе зависимости интенсивности ФЛ от мощности накачки, латеральный размер исследуемой структуры может существенно превышать характерный размер пятна возбуждающего излучения, особенно в случае его фокусировки. При этом плотность мощности излучения накачки, попадающая на различные области исследуемого образца, может различаться на несколько порядков. В случае линейной зависимости интенсивности ФЛ от мощности накачки это не оказывает существенного влияния на результат измерения. Однако, если зависимость $I(P)$ нелинейна, как это имеет место для эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si (см. рис.4.3), неоднородное возбуждение структуры может приводить к существенным искажениям получаемых зависимостей $I(P)$. В данном разделе с помощью предложенной методики измерения зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности возбуждения будет определено и сопоставлено с результатами предшествующих работ значение сечения возбуждения ионов эрбия в кремнии в условиях межзонного оптического возбуждения.

На рис.4.6 приведены зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности накачки, полученные в условиях однородного и неоднородного оптического возбуждения структуры Si:Er/Si излучением с длиной волны 540 нм. В первом случае применялась стандартная схема измерения ФЛ: на центр исследуемого образца Si:Er/Si размером 10×10 мм направлялся луч возбуждающего излучения, диаметр пучка которого составлял ~ 3 мм. При этом плотность мощности возбуждения монотонно спадала от центра к краям пучка. Во втором случае на образец наклеивался экран из алюминиевой фольги с отверстием меньшим размера лазерного пучка (~ 2 мм) и возбуждалась только открытая область исследуемого образца. Таким образом достигалось близкое к однородному распределение плотности мощности падающего излучения по открытому участку структуры. Как видно из приведенных на рис.4.6 зависимостей $I(P)$ неоднородная засветка структуры приводит к существенному искажению зависимости интенсивности ФЛ от мощности накачки.

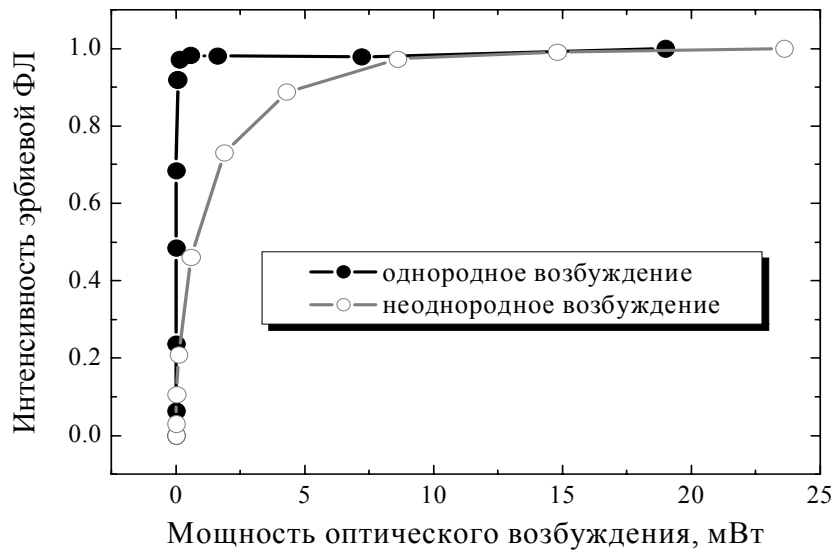


Рис.4.6. Зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности оптической накачки в условиях однородного и неоднородного возбуждения структуры Si:Er/Si. $\lambda_{\text{ex}} = 540$ нм. $T = 77$ К.

При однородной засветке характерное значение мощности, соответствующее переходу к режиму насыщения эрбиевой ФЛ, составляет, как было показано ранее, $P_0 \sim 0.01$ мВт. При неоднородном возбуждении структуры измеряемая зависимость интенсивности ФЛ эрбия от мощности возбуждения существенно изменяется. Аппроксимация зависимости $I(P)$, полученной при неоднородном возбуждении структуры, с помощью формулы (4.1) дает значение мощности насыщения ФЛ $P_0 \sim 0.5$ мВт, почти на два порядка превышающее значение мощности насыщения, полученное при однородном возбуждении.

Рассмотрим причину столь серьезного искажения зависимости $I(P)$. Если размер образца превышает размер пятна возбуждения, то вклад в ФЛ будут давать области структуры с существенно различающейся плотностью мощности накачки. Если при этом насыщение в зависимости интенсивности ФЛ от мощности накачки наблюдается при очень малых значениях мощности, как это имеет место для эрбиевой ФЛ в случае межзонной накачки (см. рис.4.4), то для центральной части пучка, начиная с некоторого значения мощности, сигнал ФЛ перестанет возрастать с увеличением мощности. Однако полный сигнал ФЛ, в отличие от случая однородного возбуждения, будет продолжать увеличиваться за счет вклада областей более удаленных от центра пучка, поскольку для этих областей плотность мощности все еще ниже значения, соответствующего насыщению. В итоге для интегральной интенсивности ФЛ насыщение может наблюдаться при значениях мощности существенно больших, чем в условиях однородного возбуждения.

Отметим, что в нашем рассмотрении не учитывалось неоднородное распределение мощности возбуждающего излучения по глубине образца, поскольку толщина исследуемых слоев Si:Er, не превышала, как правило, 1-2 мкм и для длин волн излучения накачки $\lambda_{ex} > 500$ нм возбуждение активного слоя можно было считать близким к однородному по глубине.

Рассмотрим более подробно влияние неоднородности возбуждения структур Si:Er/Si на вид зависимости $I(P)$. Допустим, что пучок возбуждающего излучения имеет гауссово распределение, и плотность мощности накачки p (в мВт/мм²) описывается функцией:

$$p(r) = \frac{P}{\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \quad (4.2)$$

где P – полная мощность в пучке в мВт, r – расстояние от центра пучка в мм, r_0 – радиус гауссова пучка. Рассмотрим для простоты пучок радиусом 1 мм, что близко к реальному размеру пучка в нашем эксперименте. Соответствующая зависимость плотности мощности излучения p от r при $P = 1$ мВт приведена на рис.4.7. Изменение мощности возбуждающего излучения соответствует изменению амплитуды в зависимости 4.2.

Для определения профилей распределения интенсивности эрбиевой ФЛ по поверхности исследуемой структуры при различных значениях мощности возбуждения воспользуемся формулой (4.1), описывающей зависимость интенсивности ФЛ от мощности. В случае неоднородного распределения плотности мощности возбуждения по поверхности структуры для интенсивности ФЛ i , приходящейся на единицу площади, имеем:

$$i(r, P) = \frac{i_0 p(r)}{p_0 + p(r)} \quad (4.3)$$

Величины i_0 и p_0 в данной формуле представляют собой интенсивность ФЛ, приходящуюся на единицу площади, и плотность мощности возбуждения, соответствующие насыщению эрбиевой ФЛ в исследуемой структуре в условиях однородного возбуждения. Величина p_0 определяется как отношение экспериментального значения мощности насыщения $P_0 = 0.01$ мВт к площади пучка в случае однородного возбуждения (радиус пучка $R_0 = 1$ мм):

$$p_0 = \frac{P_0}{\pi R_0^2} = \frac{0.01}{\pi} \text{ мВт/мм}^2$$

Подставляя в формулу (4.3) распределение плотности $p(r)$ из формулы (4.2), получаем следующее распределение интенсивности ФЛ (на единицу площади) по поверхности структуры:

$$i(r, P) = \frac{i_0 \frac{P}{\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right)}{\frac{P_0}{\pi R_0^2} + \frac{P}{\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right)} \quad (4.4)$$

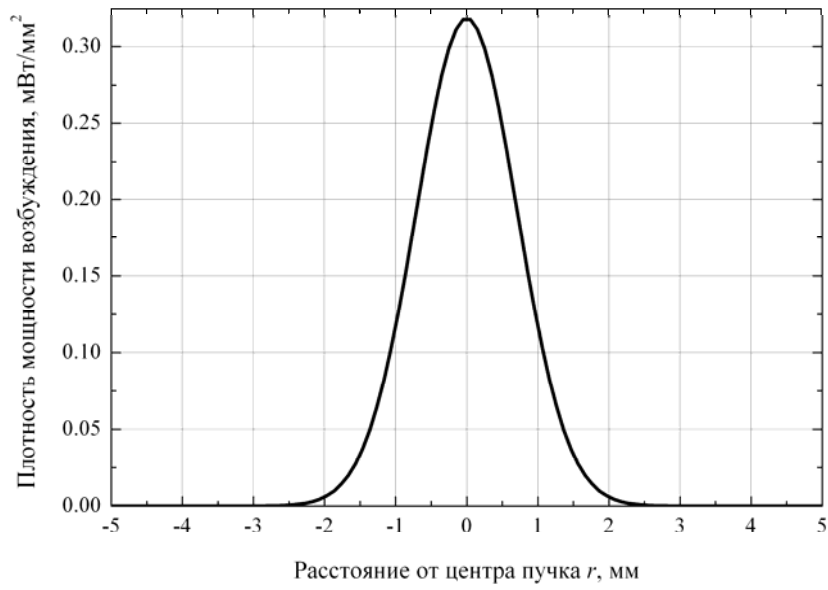


Рис.4.7. Профиль гауссова пучка с радиусом $r_0 = 1$ мм и мощностью $P = 1$ мВт.

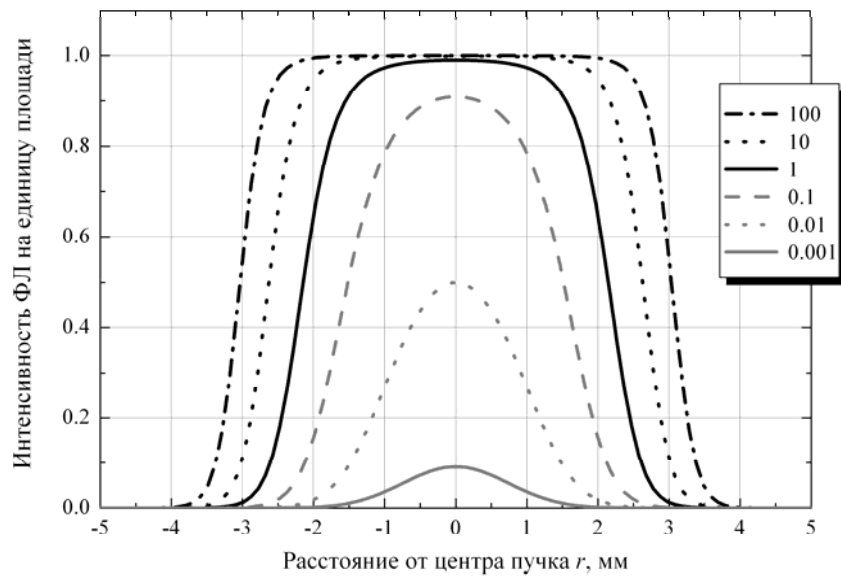


Рис.4.8. Профили распределения интенсивности ФЛ по площади структуры при возбуждении гауссовым пучком различной мощности ($P = 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100$ мВт), полученные с помощью формулы 4.4 ($i_0 = 1, P_0 = 0.01$ мВт, $R_0 = r_0 = 1$ мм).

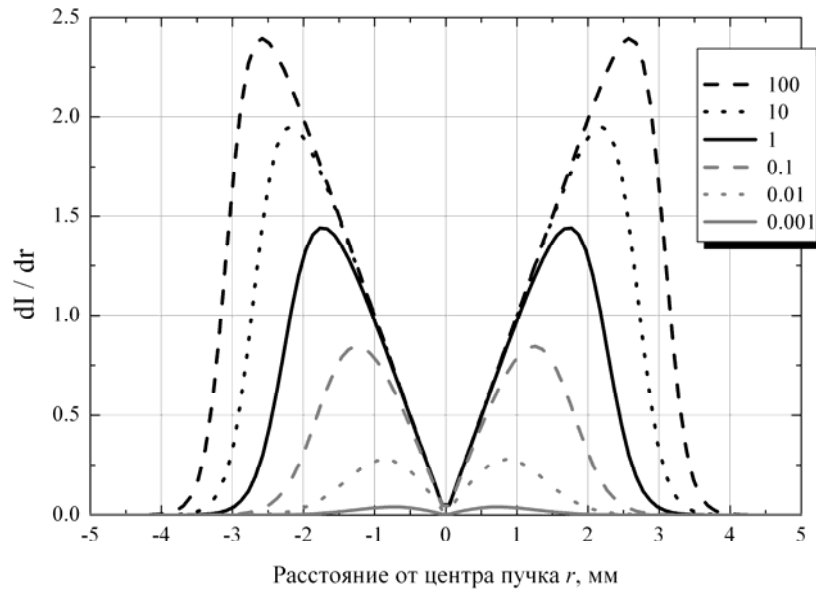


Рис.4.9. Интенсивность ФЛ, приходящаяся на кольцо единичной ширины, удаленное на расстояние r от центра пучка ($P = 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100$).

На рис.4.8 приведены профили распределения интенсивности ФЛ по поверхности активного слоя, полученные с помощью формулы (4.4) при различных значениях мощности P . Как видно из рисунка, при $P \geq 1$ мВт, когда мощность в максимуме существенно превышает величину, соответствующую насыщению эрбиевой ФЛ, области структуры, удаленные от центра луча на расстояние, превышающее радиус пучка, демонстрируют такую же интенсивность ФЛ (на единицу площади) как и центральная область пучка.

Полная интенсивность эрбиевой ФЛ при заданном значении мощности P может быть получена интегрированием выражения (4.4) по площади структуры (от 0 до ∞ , если размер образца существенно превосходит диаметр пучка):

$$I(P) = \int_0^{\infty} i(r, P) dS = 2\pi \int_0^{\infty} \frac{i_0 \frac{P}{r_0^2} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right)}{\frac{P_0}{R_0^2} + \frac{P}{r_0^2} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right)} r dr = \pi r_0^2 \ln \left(1 + \frac{R_0^2}{r_0^2} \cdot \frac{P}{P_0} \right) \quad (4.5)$$

Подставляя параметры $i_0 = 1$, $P_0 = 0.01$ мВт, $R_0 = r_0 = 1$ мм, получаем следующую зависимость $I(P)$:

$$I(P) = \pi \ln \left(1 + \frac{P}{P_0} \right)$$

На рис.4.9 приведены зависимости подынтегрального выражения в формуле (4.5), полученные при различной мощности возбуждения P . Данные зависимости характеризуют интенсивность эрбиевой ФЛ, приходящуюся на кольцо единичной ширины, удаленное от центра пучка возбуждающего излучения на расстояние r . Из данного рисунка видно, что при высокой мощности возбуждения основной вклад в интегральный сигнал ФЛ дают области, удаленные от центра пучка на расстояние, существенно превышающее диаметр пучка. Это связано с тем, что площадь кольца заданной ширины возрастает пропорционально квадрату расстояния от центра r , тогда как интенсивность ФЛ, приходящаяся на единицу площади в условиях насыщения, практически не зависит от r в рассматриваемой области структуры (см. рис.4.8).

На рис.4.10 приведена зависимость интегральной интенсивности ФЛ от мощности накачки, полученная по формуле 4.5. На том же рисунке для сравнения приведена зависимость $I(P)$, полученная по формуле 4.1 для условий однородного возбуждения структуры при $P_0 = 0.01$ мВт. Для удобства полученные кривые нормированы (как и на рис.4.6) на максимальные значения интенсивности ФЛ в рассматриваемом интервале мощности возбуждения. Сравнение рис.4.6 и рис.4.10 показывает, что проведенные расчеты качественно объясняют различие экспериментальных зависимостей $I(P)$, полученных в условиях однородного и неоднородного оптического возбуждения структуры Si:Er/Si.

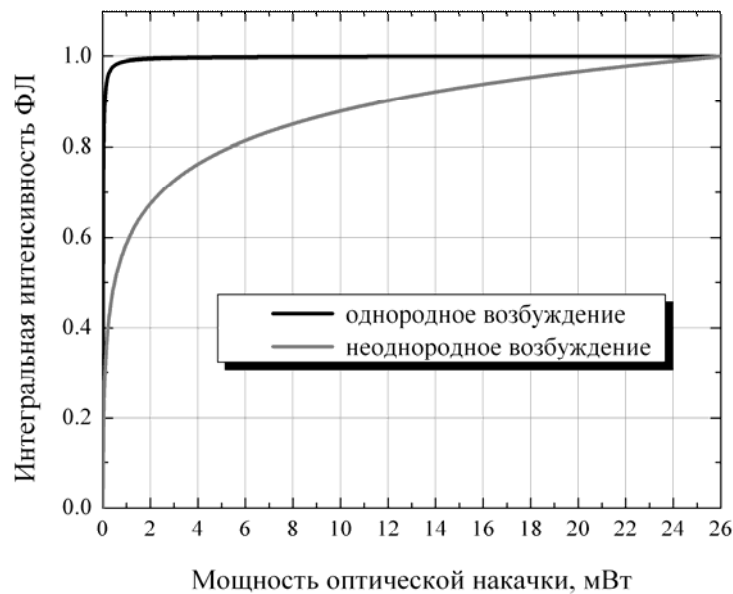
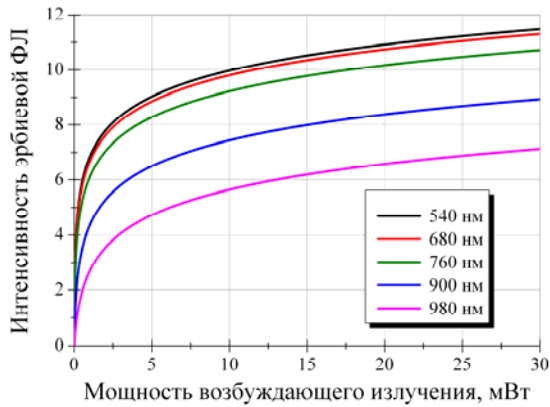


Рис.4.10. Рассчитанные зависимости интенсивности ФЛ эрбия от мощности накачки (норм.) в условиях однородного и неоднородного оптического возбуждения структуры.

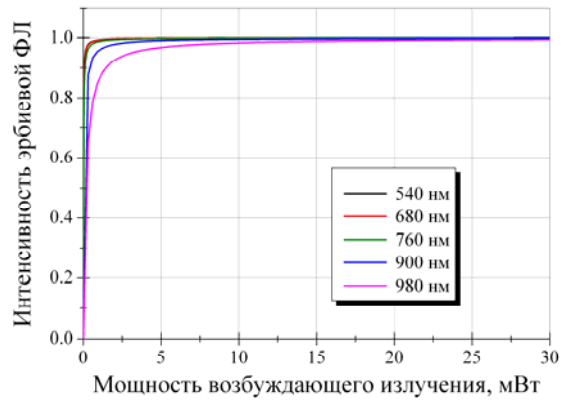
Необходимо пояснить, что излучение ионов эрбия на длине волны 1.54 мкм, вследствие малого поглощения в кремнии может эффективно распространяться внутри структуры. Как уже указывалось в разделе 2.3 только около 4% излучения, сгенерированного в слое Si:Er, выходит с поверхности структуры в области возбуждения. Остальная часть ФЛ может распространяться вдоль исследуемой структуры и либо поглощаться в кремниевой подложке, либо высвечиваться с остальной части поверхности и с торцов структуры после многократного отражения от границ образца. Таким же образом сигнал эрбиевой ФЛ, сгенерированный в областях, удаленных от центра пятна возбуждающего излучения, может давать существенный вклад в регистрируемый сигнал ФЛ.

Полученный результат имеет еще одно важное следствие – зависимость интенсивности эрбиевой ФЛ от длины волны возбуждающего излучения при высоких уровнях оптической накачки в условиях неоднородного возбуждения структур Si:Er/Si. Как было показано в предыдущем параграфе, значение мощности P_0 , соответствующее установлению насыщения зависит от длины волны возбуждения, а именно – монотонно возрастает с ростом λ_{ex} . На рис.4.11,а представлены зависимости $I(P)$, рассчитанные по формуле (4.5) для условий неоднородного возбуждения при различных значениях параметра P_0 . Для расчета кривых были взяты экспериментальные значения P_0 , соответствующие различным длинам волн возбуждающего излучения (см. таблицу 1). На рис.4.11,б для сравнения представлены зависимости $I(P)$, полученные по формуле (4.1) для условий однородного возбуждения с теми же значениями параметра P_0 . Как видно из рис.4.11,а, в условиях неоднородного возбуждения увеличение длины волны возбуждения (т.е. увеличение параметра P_0) приводит к падению интенсивности сигнала эрбиевой ФЛ во всем рассматриваемом интервале значений мощности накачки. Соответствующая рассчитанная зависимость $I(\lambda_{ex})$ приведена на рис.4.12,а. Такое монотонное падение интенсивности с ростом λ_{ex} действительно наблюдалось нами при измерении спектров возбуждения эрбиевой ФЛ в условиях фокусировки возбуждающего лазерного пучка (рис.4.12,б) [А4-А6]. В параграфе 4.7 будет показано, что в условиях однородного возбуждения структур Si:Er/Si интенсивность эрбиевой ФЛ при высоких уровнях оптической накачки не зависит от длины волны возбуждения и в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ наблюдается горизонтальный участок во всей области межзонного возбуждения кремния ($h\nu > E_g(\text{Si})$).

Таким образом, неоднородное распределение плотности мощности возбуждения по поверхности исследуемой структуры приводит к существенному искажению как зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности возбуждения, так и зависимости от длины волны возбуждающего излучения, т.е. спектров возбуждения эрбиевой ФЛ.

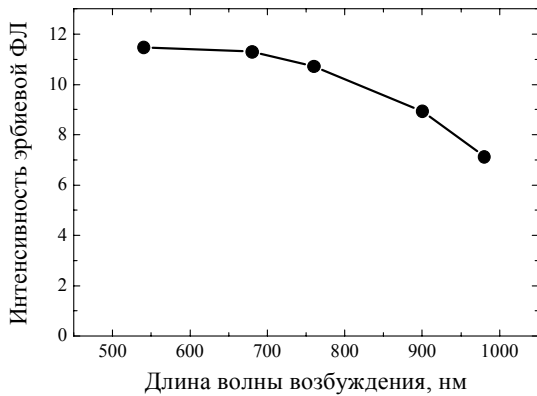


а)

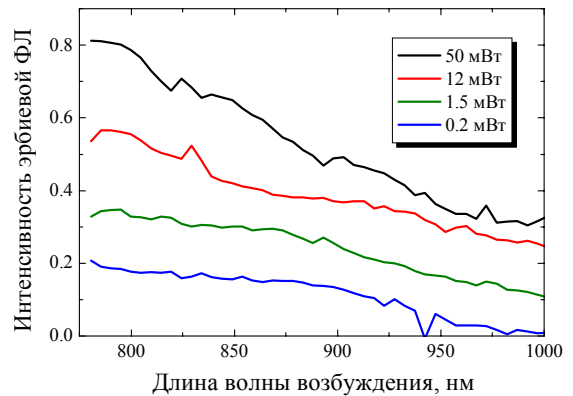


б)

Рис.4.11. Зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности накачки в условиях неоднородного (а) и однородного (б) оптического возбуждения, соответствующие различным экспериментальным значениям мощности насыщения P_0 (см. таблицу 1).



а)



б)

Рис.4.12. (а) – зависимость интенсивности эрбиевой ФЛ от длины волны возбуждения, рассчитанная по формуле (4.5) с использованием экспериментальных значений параметра P_0 (таблица 1), $P = 30$ мВт; (б) – спектры возбуждения эрбиевой ФЛ, измеренные в условиях фокусировки возбуждающего излучения [А4-А6]. Область межзонного возбуждения.

С использованием скорректированной методики измерения зависимостей интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности возбуждающего излучения (в условиях однородного возбуждения структур) было определено значение эффективного сечения возбуждения ионов эрбия в СМЛЭ структурах Si:Er/Si. По аналогии с сечением возбуждения ионов эрбия в диэлектрических матрицах (SiO₂, Al₂O₃) эффективное сечение возбуждения эрбия в кремнии σ определяется с помощью кинетического уравнения для концентрации возбужденных ионов эрбия [42]:

$$\frac{dN_{Er}^*}{dt} = \sigma(N_{Er} - N_{Er}^*)\Phi - \frac{N_{Er}^*}{\tau},$$

где N_{Er} и N_{Er}^* – полная концентрация и концентрация возбужденных оптически активных ионов эрбия, Φ – поток фотонов возбуждающего излучения, τ – время жизни иона эрбия в возбужденном состоянии.

В условиях непрерывного возбуждения имеем:

$$I \propto N_{Er}^* = \frac{\sigma\tau\Phi}{1 + \sigma\tau\Phi} N_{Er} \quad \text{или} \quad I = \frac{I_0\sigma\tau\Phi}{1 + \sigma\tau\Phi},$$

где I_0 – интенсивность эрбиевой ФЛ в условиях насыщения. Таким образом, эффективное сечение возбуждения ионов эрбия σ может быть определено как $1/\tau\Phi_0$, где Φ_0 – поток фотонов, соответствующих установлению насыщения ФЛ. При исследовании зависимости $I(P)$ в условиях непрерывного однородного по площади структуры оптического возбуждения (532 нм) при температуре 8 К было получено значение мощности насыщения ~ 1 мВт при площади пучка ~ 0.1 см², что соответствовало потоку фотонов, поглощенному в структуре, $1.9 \cdot 10^{16}$ см⁻²с⁻¹ (с учетом 30% отражения излучения от поверхности структуры). Время жизни ионов эрбия в возбужденном состоянии при низких температурах $\tau \sim 1$ мс. Таким образом, эффективное сечение возбуждения ионов эрбия составляет:

$$\sigma = \frac{1}{10^{-3} \text{с} \cdot 1.9 \cdot 10^{16} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}} \sim 5 \cdot 10^{-14} \text{см}^2 \quad [\text{A53}].$$

Полученное значение эффективного сечения возбуждения 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, полученных методами МЛЭ и ионной имплантации, опубликованные ранее в работах [34,36].

4.4. Механизм насыщения эрбиевой ФЛ в условиях интенсивного импульсного оптического возбуждения.

В разделе 4.2 были рассмотрены зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности возбуждающего излучения при межзонной импульсной оптической накачке и показано, что с ростом мощности накачки наблюдается насыщение сигнала эрбиевой ФЛ. При этом интенсивность ФЛ в условиях насыщения практически не зависит от длины волны возбуждения. Вопрос о причинах насыщения эрбиевой ФЛ, наблюдаемого при высокой мощности оптического возбуждения представляет на наш взгляд достаточный интерес. В большинстве работ, посвященных исследованию кремниевых структур, легированных эрбием, насыщение эрбиевой ФЛ при высоких уровнях оптической накачки связывают с возбуждением всех оптически активных эрбиевых центров, присутствующих в слое Si:Er [36,42]. При этом оптически активными центрами называют те комплексы, содержащие ионы эрбия, для которых возможен захват экситонов и передача энергии рекомбинации во внутреннюю оболочку иона эрбия.

Интенсивность ФЛ в насыщении I_0 в этом случае определяется только концентрацией оптически активных центров N_0 , которая является константой для заданной исследуемой структуры, а также временем жизни ионов эрбия в возбужденном состоянии. Если насыщение действительно обусловлено возбуждением всех оптически активных центров, интенсивность эрбиевой ФЛ в условиях насыщения не должна зависеть от условий измерения, в частности от длины волны возбуждения и температуры. В предыдущем разделе было показано, что при возбуждении структур Si:Er/Si импульсным лазерным излучением уровень сигнала в насыщении действительно не зависит от длины волны возбуждения. В то же время исследование температурной зависимости эрбиевой ФЛ при импульсной оптической накачке показало, что интенсивность ФЛ в условиях насыщения существенно зависит от температуры измерения и уменьшается с увеличением температуры.

Как видно из зависимостей $I(P)$, представленных на рис.4.13, насыщение эрбиевой ФЛ наблюдается независимо от температуры измерения, причем уровень сигнала ФЛ в состоянии насыщения падает почти в 3 раза при изменении температуры от 16 до 72 К. Падение интенсивности эрбиевой ФЛ может быть обусловлено двумя факторами: либо снижением числа возбуждаемых эрбиевых центров, либо сокращением времени релаксации эрбиевой ФЛ вследствие возрастания безызлучательного девозбуждения ионов эрбия. Чтобы определить причину наблюдаемого падения интенсивности были измерены кинетики ФЛ эрбия в условиях насыщения.

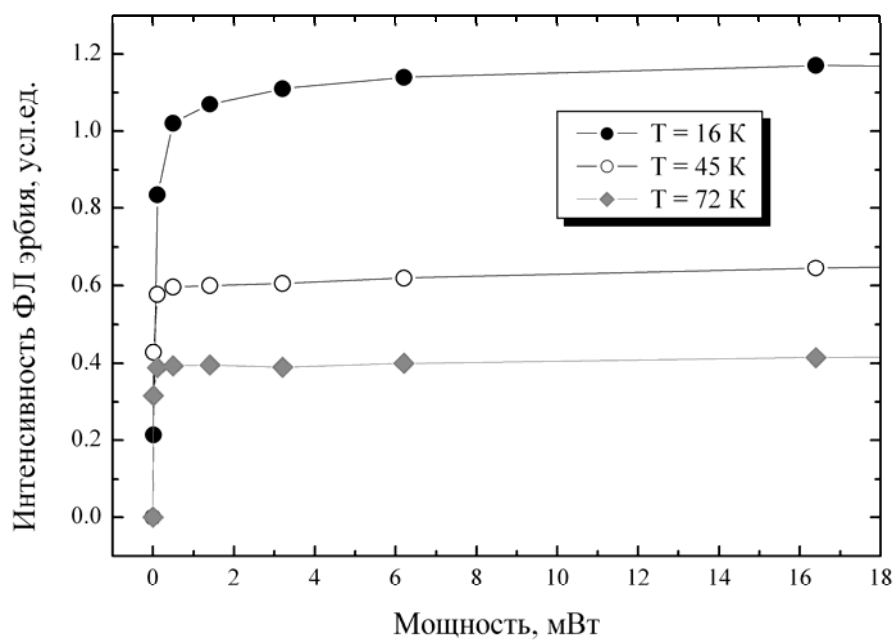


Рис.4.13. Зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности импульсного возбуждающего излучения при различных температурах измерения.

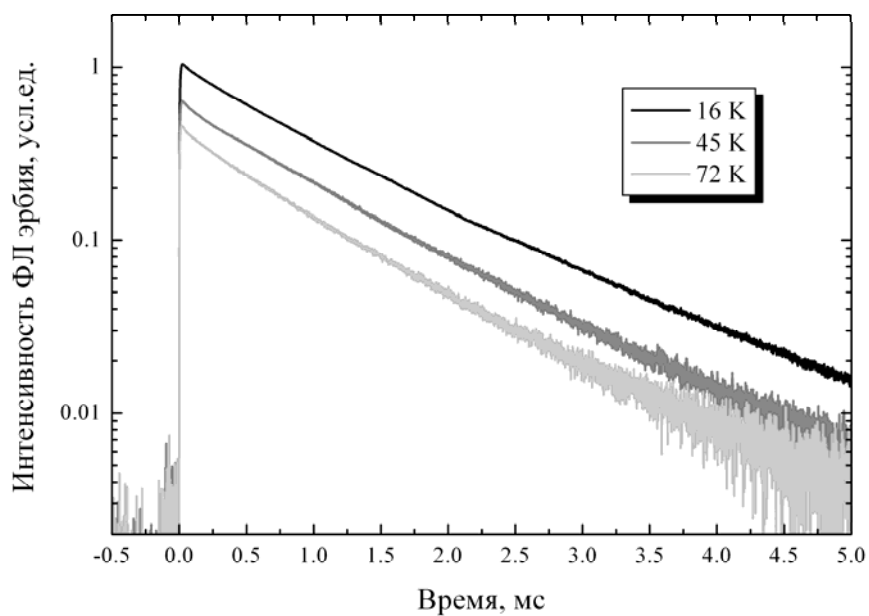


Рис.4.14. Кинетика спада эрбиевой ФЛ при различных температурах измерения ($P = 1.4$ мВт).

На рис.4.14 приведены кинетики спада эрбиевой ФЛ, полученные при нескольких температурах измерения ($T = 16-72$ К) и мощности импульсного оптического возбуждения $P = 1.4$ мВт, соответствующей насыщению эрбиевой ФЛ для всех температур из рассмотренного интервала. Как видно из рисунка, в указанном диапазоне время спада ФЛ эрбия слабо зависит от температуры измерения. Изменение времени спада составляет от 1 мс при $T = 16$ К до 0.9 мс при $T = 72$ К. При этом падение интенсивности эрбиевой ФЛ составляет ~ 3 раза. Таким образом, падение интенсивности с ростом температуры в указанном диапазоне не связано с изменением времени безызлучательной релаксации ионов эрбия и, по-видимому, определяется снижением эффективности возбуждения ионов эрбия.

Как указывалось ранее, возбуждение ионов эрбия в кремнии при межзонной оптической накачке представляет собой многоступенчатый процесс, этапами которого являются генерация свободных носителей заряда, образование экситонов, связывание экситонов на эрбиевых комплексах и рекомбинация экситонов с передачей энергии ионам эрбия. Наряду с процессами возбуждения ионов эрбия, существуют альтернативные процессы, приводящие к потере энергии возбуждающего излучения. К таким процессам относятся рекомбинация свободных носителей заряда и экситонов, распад свободных экситонов, отрыв связанных экситонов от эрбиевого комплекса, безызлучательное девозбуждение ионов эрбия. Указанные процессы могут быть описаны с помощью системы уравнений баланса для концентрации электронно-дырочных пар, экситонов и возбужденных ионов эрбия [37,38]:

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= G - \gamma n^2 - \gamma_{ex} n^2 ; \\ \frac{dn_{ex}}{dt} &= \gamma_{ex} n^2 - cn_{ex}(N_{Er} - N_{Er}^*) - \frac{n_{ex}}{\tau_{ex}} ; \\ \frac{dN_{Er}^*}{dt} &= cn_{ex}(N_{Er} - N_{Er}^*) - \frac{N_{Er}^*}{\tau} - c_{AEr} n N_{Er}^* . \end{aligned}$$

Здесь G – скорость генерации электронно-дырочных пар, пропорциональная мощности возбуждающего излучения, n – концентрация свободных носителей заряда, n_{ex} – концентрация экситонов, N_{Er}^* – концентрация возбужденных ионов эрбия, γ и γ_{ex} – вероятность рекомбинации свободных носителей заряда и их связывания в экситоны, c – вероятность передачи энергии экситона иону эрбия, N_{Er} – концентрация всех оптически активных ионов эрбия, τ_{ex} и τ – характерные времена жизни свободных экситонов и девозбуждения ионов эрбия. Второе слагаемое в последнем уравнении описывает оже-девозбуждение ионов эрбия свободными носителями заряда. Следует учесть, что вероятность возбуждения иона эрбия экситонами c включает в себя связывание экситона на эрбиевом комплексе и рекомбинацию экситона с передачей

энергии иону эрбия, а также обратные процессы, в частности отрыв экситона от примесного центра, связанного с эрбием. Вероятность последнего процесса существенно зависит от условий измерения, в частности возрастает с увеличением температуры исследуемого образца, поэтому коэффициент c должен уменьшаться с ростом температуры измерения.

В работе [37] было показано, что решение уравнений баланса без учета процессов оже-девозбуждения действительно дает насыщение интенсивности эрбиевой ФЛ при высокой мощности оптической накачки на уровне, определяемом возбуждением всех оптически активных ионов эрбия. Учет оже-девозбуждения ионов эрбия свободными носителями влияет на вид зависимости $I(P)$ в промежуточной области между участками линейного нарастания и насыщения, но не влияет на интенсивность эрбиевой ФЛ в условиях насыщения. Кроме того, в той же работе было показано, что даже при учете оже-девозбуждения ионов эрбия интенсивность эрбиевой ФЛ в пределе высоких уровней возбуждения не зависит от температуры, т.е. температурное гашение эрбиевой ФЛ в условиях насыщения отсутствует. Этот вывод противоречит полученному нами экспериментальному результату (рис.4.13).

Чтобы разрешить возникшее противоречие, рассмотрим выражение для концентрации свободных экситонов, получаемое из решения первых двух уравнений приведенной системы:

$$n_{ex} = \frac{\gamma_{ex}\tau_{ex}}{\gamma + \gamma_{ex}} \frac{1}{1 + c\tau_{ex}(N_{Er} - N_{Er}^*)} G$$

Из данного выражения следует, что концентрация свободных экситонов в структуре пропорциональна мощности возбуждающего излучения для всех рассматриваемых уровней возбуждения. Известно, однако, что при высоких уровнях оптического возбуждения данное условие перестает быть справедливым. Если концентрация носителей заряда в кремниевых структурах превышает величину $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ образование экситонов становится существенно подавленным вследствие экранировки кулоновского взаимодействия, и происходит переход Мотта от режима генерации свободных экситонов к генерации электронно-дырочной плазмы. При этом предельная концентрация свободных экситонов в структуре составляет $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ [76]. Таким образом, взаимодействие экситонов со свободными носителями заряда приводит к нарушению линейной зависимости $n_{ex}(G)$ при высоких уровнях возбуждения.

Рассмотрим систему уравнений баланса с учетом влияния свободных носителей заряда на концентрацию свободных экситонов. В первом приближении это взаимодействие может быть учтено добавлением в уравнение для концентрации экситонов слагаемого $c_{Aex}n_{ex}$, где c_{Aex} - вероятность оже-рекомбинации экситона при взаимодействии со свободным носителем заряда (электроном или дыркой):

$$\begin{aligned}\frac{dn}{dt} &= G - \gamma n^2 - \gamma_{ex} n^2; \\ \frac{dn_{ex}}{dt} &= \gamma_{ex} n^2 - c n_{ex} (N_{Er} - N_{Er}^*) - \frac{n_{ex}}{\tau_{ex}} - c_{Aex} n n_{ex}; \\ \frac{dN_{Er}^*}{dt} &= c n_{ex} (N_{Er} - N_{Er}^*) - \frac{N_{Er}^*}{\tau} - c_{AEr} n N_{Er}^*.\end{aligned}$$

В этом случае выражения для концентрации свободных носителей заряда и экситонов принимают вид:

$$\begin{aligned}n &= \sqrt{\frac{G}{\gamma + \gamma_{ex}}}, \\ n_{ex} &= \frac{\gamma_{ex}}{\gamma + \gamma_{ex}} \frac{G}{c(N_{Er} - N_{Er}^*) + \frac{1}{\tau} + c_{Aex} \sqrt{\frac{G}{\gamma + \gamma_{ex}}}},\end{aligned}$$

и концентрация свободных экситонов при высоких уровнях возбуждения становится пропорциональной \sqrt{G} . Тогда для концентрации возбужденных ионов эрбия имеем:

$$\frac{c\gamma_{ex}}{\gamma + \gamma_{ex}} G (N_{Er} - N_{Er}^*) = \left(\frac{N_{Er}^*}{\tau} + c_{AEr} \sqrt{\frac{G}{\gamma + \gamma_{ex}}} N_{Er}^* \right) \left(c(N_{Er} - N_{Er}^*) + \frac{1}{\tau} + c_{Aex} \sqrt{\frac{G}{\gamma + \gamma_{ex}}} \right)$$

и при $G \rightarrow \infty$ получаем:

$$\frac{N_{Er}^*}{N_{Er}} = \frac{1}{1 + \frac{c_{AEr} c_{Aex}}{c\gamma_{ex}}}$$

Как было указано выше, коэффициент c существенно зависит от температуры измерения, т.к. в него входит вероятность связывания экситона на эрбиевом центре, возбуждения иона эрбия, а также вероятность отрыва экситона от эрбиевого комплекса. Поэтому с ростом температуры коэффициент c может значительно уменьшаться, что приводит к падению интенсивности эрбиевой ФЛ в условиях насыщения.

Таким образом, учет влияния свободных носителей заряда на концентрацию экситонов при высоких уровнях оптического возбуждения позволяет даже при низких температурах получить в условиях насыщения концентрацию возбужденных ионов эрбия, существенно отличающуюся от величины N_{Er} , т.е. от концентрации всех оптически активных ионов эрбия. По-видимому, именно этим объясняется экспериментально наблюдаемая зависимость интенсивности эрбиевой ФЛ в условиях насыщения от температуры измерения (см. рис.4.13).

4.5. Межзонная ФЛ в структурах Si:Er/Si в условиях импульсного оптического возбуждения.

В связи с определяющим вкладом электронной подсистемы кремния (в первую очередь экситонов) в процесс возбуждения ионов эрбия, большой интерес представляет исследование спектров излучательной рекомбинации носителей заряда (межзонной ФЛ) в структурах Si:Er/Si в условиях интенсивного импульсного оптического возбуждения. В данном разделе будут приведены результаты исследования спектров и кинетики межзонной ФЛ, наблюдаемой в указанных условиях оптического возбуждения.

На рис.4.15 приведен характерный спектр межзонной ФЛ кремния, наблюдаемой в условиях непрерывного оптического возбуждения [77]. При температурах измерения выше 10-15 К и невысокой мощности возбуждающего излучения в спектре межзонной ФЛ кремния доминирует линия, соответствующая рекомбинации свободных экситонов с испусканием ТО-фонона. Наряду с наиболее интенсивной ТО-линией в спектре экситонной ФЛ наблюдаются менее интенсивные линии, обусловленные рекомбинацией экситонов с участием других фононов или их комбинаций, а также рекомбинацией экситонов без участия фононов. Форма этих линий может быть описана формулой [78]:

$$I(\nu) \sim \sqrt{h\nu - E_0} \exp[-(h\nu - E_0)/kT], \quad (4.6)$$

где $I(\nu)$ – интенсивность ФЛ на частоте ν , E_0 – низкочастотный (длинноволновый) край линии экситонной ФЛ ($E_0 = E_g - E_{ex} - h\Omega_{ph}$, E_g – ширина запрещенной зоны кремния, $E_{ex} \approx 15$ мэВ – энергия связи свободного экситона в кремнии, $h\Omega_{ph}$ – энергия фонона, принимающего участие в рекомбинации экситона).

Рассмотрим спектры межзонной ФЛ в исследуемых структурах Si:Er/Si в условиях импульсного оптического возбуждения. На рис.4.16 приведена наиболее интенсивная линия межзонной ФЛ, соответствующая рекомбинации с испусканием ТО-фонона, полученная при различных значениях мощности межзонного возбуждающего излучения. Как было отмечено в предыдущем разделе, экситоны, сгенерированные в слое Si:Er, эффективно захватываются ионами эрбия и практически не дают вклада в сигнал ФЛ. Поэтому для исследования межзонной ФЛ был выбран диапазон длин волн возбуждения, при котором значительная часть возбуждающего излучения поглощается в кремниевой подложке. В данном случае спектры межзонной ФЛ были измерены при $\lambda_{ex} = 960$ нм, при которой глубина проникновения излучения накачки существенно превышает толщину эпитаксиального слоя Si:Er.

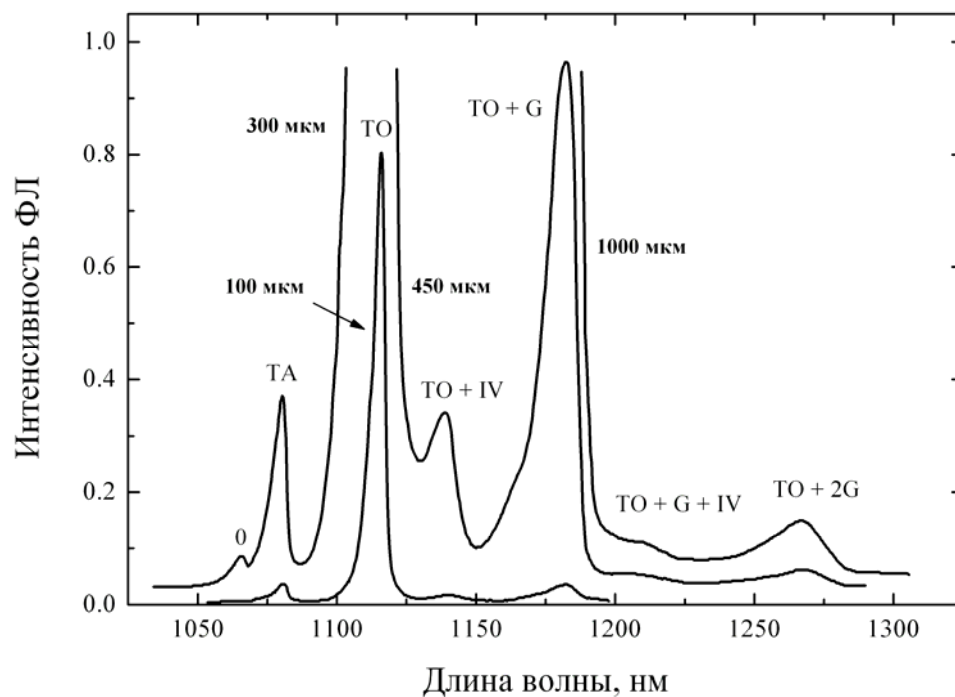


Рис.4.15. Спектры межзонной ФЛ объемного кремния ($T = 26$ К), полученные при нескольких значениях ширины щелей монохроматора (100-1000 мкм) [77].

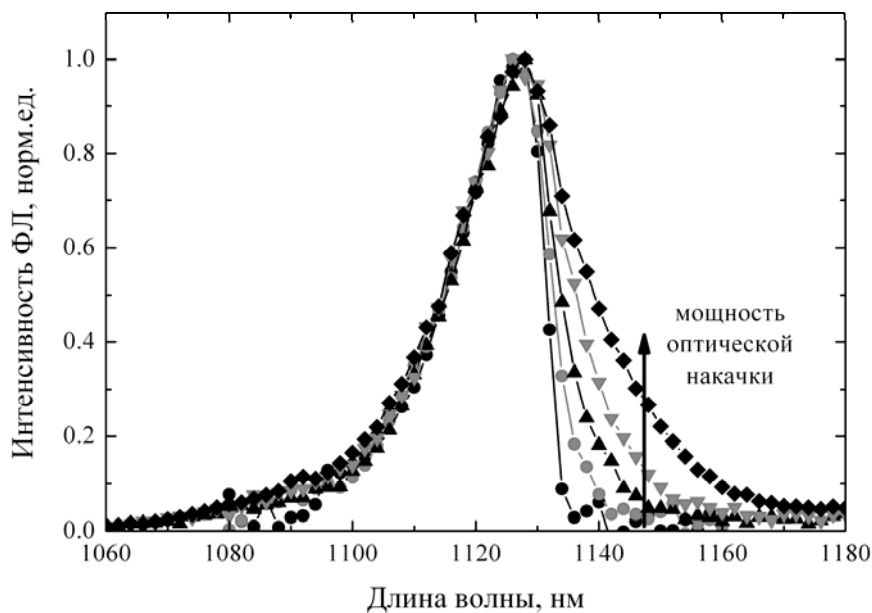


Рис.4.16. Нормированные спектры межзонной ФЛ в структуре Si:Er/Si при различной мощности оптического возбуждения. $\lambda_{ex} = 960$ нм. $T = 77$ К.

При невысокой мощности возбуждающего излучения в спектре межзонной ФЛ кремния наблюдается линия, соответствующая рекомбинации свободных экситонов. Эта линия имеет характерную асимметричную форму с резкой длинноволновой границей и с хорошей точностью описывается формулой (4.6). При увеличении мощности накачки в спектре межзонной ФЛ наряду с экситонной линией возникает длинноволновое плечо, которое становится доминирующим при высокой мощности возбуждения, при этом спектр ФЛ становится почти симметричным. Возникновение такого длинноволнового плеча в кремниевых структурах с ростом мощности оптического возбуждения при температурах измерения, превышающих 30 К, связано с образованием в структурах электронно-дырочной плазмы (ЭДП) [73,79]. При достаточно высокой концентрации носителей заряда экранирование кулоновского взаимодействия между носителями заряда приводит к исчезновению связанных экситонных состояний, и наблюдается фазовый переход от газа свободных экситонов к электронно-дырочной плазме (переход Мотта). В работе [80] было показано, что такой переход должен иметь место, когда радиус экранирования составляет величину $r_s = 0.84 \cdot a_0$, что в случае невырожденного газа соответствует средней плотности носителей заряда [79]:

$$n(T) = \frac{kT}{11.2 \cdot E_{ex} \cdot a_0^3}, \quad (4.7)$$

где a_0 – радиус боровской орбиты (4.4 нм), E_{ex} – энергия связи экситона (14.7 мэВ) в кремнии. Таким образом, концентрация носителей заряда, соответствующая переходу "экситонный газ – ЭДП" линейно зависит от температуры измерения и составляет в рассмотренном нами интервале $T = 15-120$ К от $6 \cdot 10^{16}$ до $5 \cdot 10^{17}$ см⁻³. В частности при температуре 77 К, при которой были измерены спектры ФЛ, приведенные на рис.4.16, данная величина составляет $\bar{n} \sim 3 \cdot 10^{17}$ см⁻³.

Еще одним отличительным признаком перехода от экситонного газа к электронно-дырочной плазме, наряду с изменением спектра ФЛ, является появление существенной зависимости времени релаксации сигнала ФЛ от длины волны измеряемого сигнала. Если линия рекомбинации свободных экситонов характеризуется одинаковым временем затухания во всем спектральном диапазоне, то для линии излучения ЭДП время спада сигнала ФЛ монотонно уменьшается с увеличением длины волны и зависит от мощности возбуждающего излучения. Характерное время существования ЭДП в кремнии составляет ~ 400 нс [76], тогда как время спада экситонной ФЛ может составлять единицы и даже десятки микросекунд [81]. Таким образом, условия, соответствующие возникновению ЭДП в исследуемых структурах, могут быть определены как из вида спектров межзонной ФЛ, так и с помощью кинетических исследований с наносекундным временным разрешением.

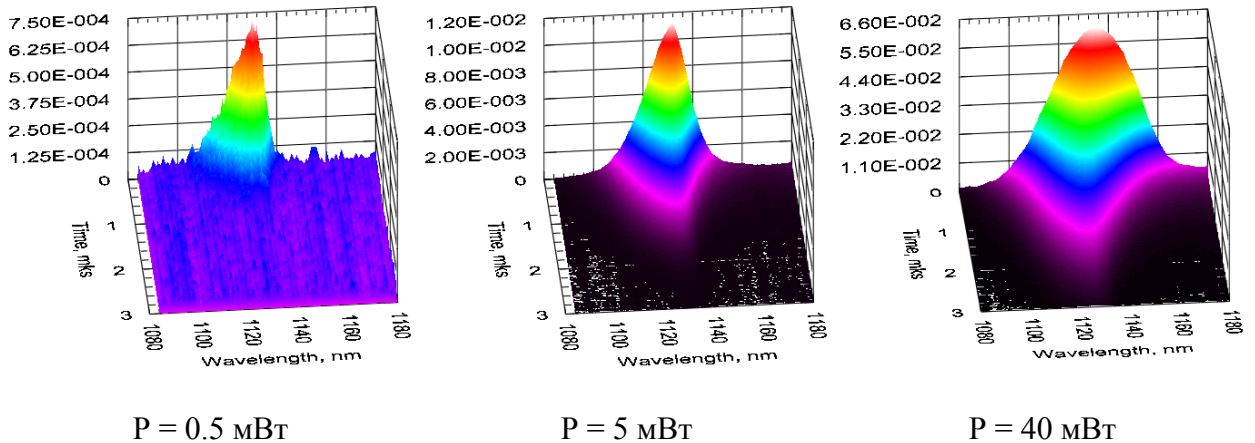


Рис.4.17. Спектры межзонной ФЛ с временным разрешением в структуре Si:Er/Si при различной мощности оптического возбуждения. $\lambda_{\text{ex}} = 960 \text{ нм}$. $T = 77 \text{ К}$.

На рис.4.17 приведены спектры межзонной ФЛ с временным разрешением (спектрокинетические зависимости межзонной ФЛ), измеренные в структуре Si:Er/Si при различной мощности импульсного возбуждения. Как видно из приведенных спектров, при увеличении мощности возбуждающего излучения наблюдается возникновение длинноволнового плеча с существенно более коротким временем спада по сравнению с временем релаксации экситонной ФЛ. На рис.4.18 приведено сравнение кинетики сигнала межзонной ФЛ, на длинах волн 1125 и 1175 нм, отвечающих соответственно максимуму линии экситонной ФЛ и сигналу ФЛ электронно-дырочной плазмы. На рис.4.19 показаны спектры межзонной ФЛ, полученные при различных значениях задержки времени регистрации сигнала ФЛ относительно импульса возбуждающего излучения при высокой мощности возбуждения. Как видно из рисунка, в течение 1-2 мкс после импульса возбуждения происходит сдвиг линии межзонной ФЛ в коротковолновую область, а также существенная модификация формы линии ФЛ.

Следует отметить, что в кремниевых структурах при высоких уровнях возбуждающего излучения наряду с возникновением ЭДП может происходить конденсация электронно-дырочных пар и образование электронно-дырочных капель (ЭДК). Данный эффект наблюдается в кремниевых структурах при температурах менее 25 К. Образование ЭДК, как и возникновение ЭДП, приводит к появлению на длинноволновом краю экситонной линии сигнала ФЛ, имеющего спектральную характеристику схожую со спектральной зависимостью сигнала ЭДП. В нашей работе измерения проводились в основном при температуре 77 К, поэтому мы можем не учитывать возможность образования ЭДК в исследуемых структурах Si:Er/Si в указанных условиях измерения.

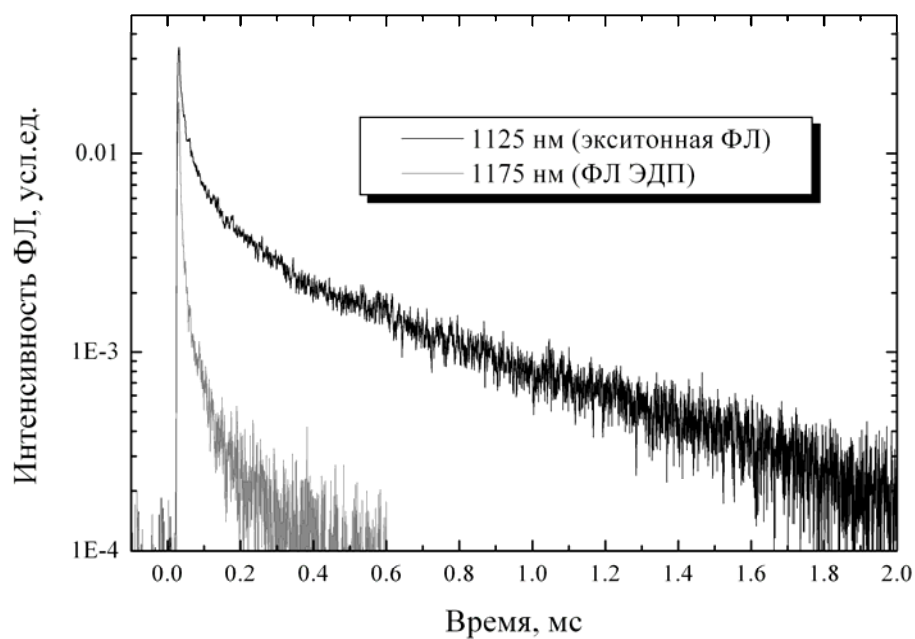


Рис.4.18. Временные зависимости сигнала экситонной ФЛ (1125 нм) и ФЛ электронно-дырочной плазмы (1175 нм). $T = 77$ К.

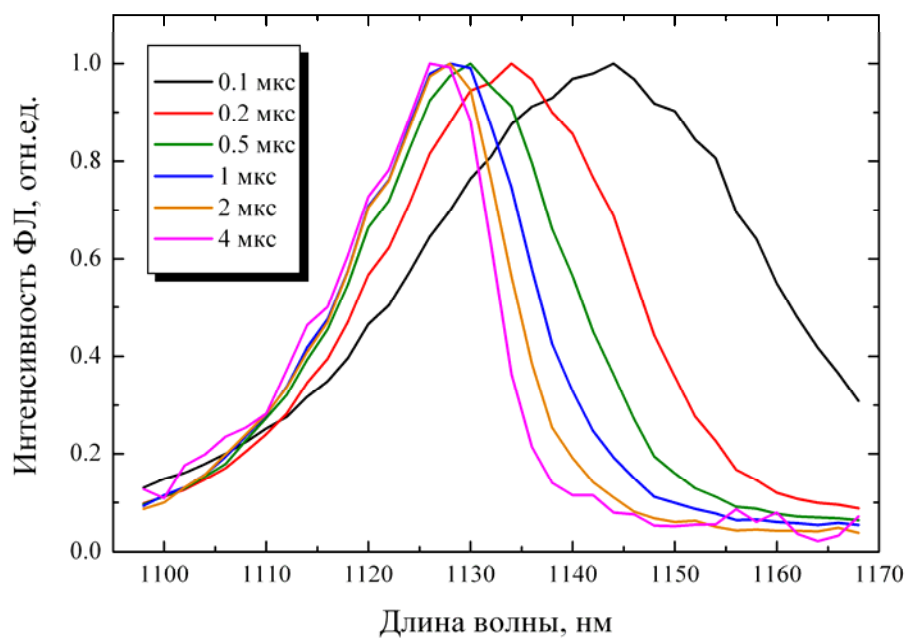


Рис.4.19. Модификация спектра межзонной ФЛ в зависимости от задержки после импульса возбуждения. $T = 77$ К. $P = 50$ мВт.

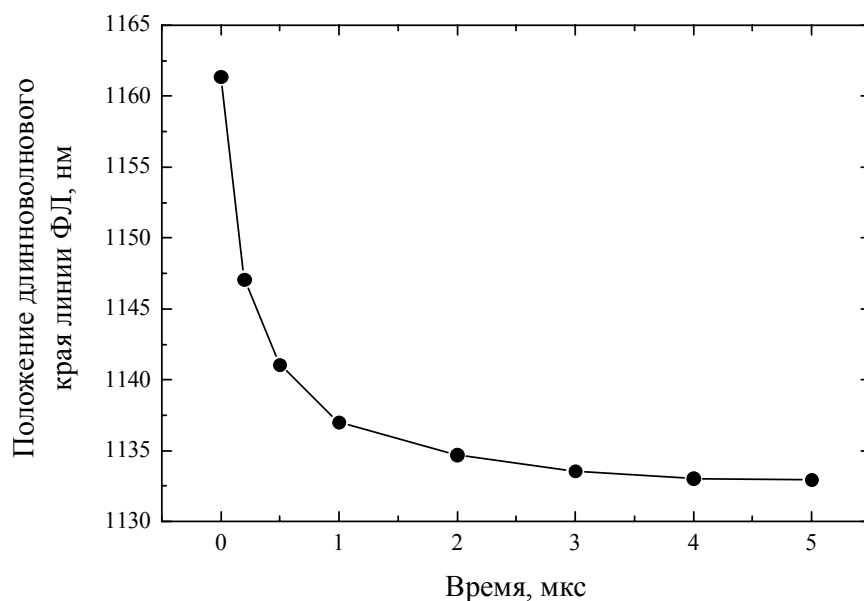


Рис.4.20. Зависимость положения длинноволнового края межзонной ФЛ (на полуспаде интенсивности) от длительности задержки после импульса накачки (см. рис.4.19). $T = 77$ К. $P = 50$ мВт.

Полученные спектры и кинетика межзонной ФЛ свидетельствуют о возникновении электронно-дырочной плазмы в исследуемых структурах Si:Er/Si при высоких уровнях импульсного оптического возбуждения. Характерное время релаксации ЭДП может быть определено из зависимости положения длинноволнового края межзонной ФЛ от длительности задержки после импульса возбуждения (рис.4.20). Полученное значение составляет ~ 400 нс, что хорошо согласуется с литературными данными о времени спада ФЛ ЭДП [76].

Оценка концентрации электронно-дырочных пар, при которой наблюдается появление длинноволнового плеча в спектрах межзонной ФЛ, дает величину $\sim 10^{17}$ см⁻³, что согласуется со значением концентрации носителей заряда, соответствующим переходу Мотта в системе "экситонный газ - ЭДП".

Как упоминалось ранее, доминирующим механизмом возбуждения ионов эрбия в кремнии при межзонной оптической накачке является передача энергии с помощью экситонов. Поэтому возникновение электронно-дырочной плазмы, ограничивающее образование экситонов при высоких уровнях оптической накачки, может существенно влиять на процессы возбуждения ионов эрбия в кремнии. В связи с этим было проведено сопоставление спектров эрбиевой и межзонной ФЛ в структурах Si:Er/Si в условиях импульсного возбуждения различной мощности. Было обнаружено (рис.4.21), что переход

от линейного участка возрастания интенсивности ФЛ к насыщению эрбиевой ФЛ происходит в том же диапазоне значений мощности возбуждения, в котором наблюдается переход Мотта от режима генерации свободных экситонов к образованию ЭДП. Это означает, что насыщение эрбиевой ФЛ при высоких уровнях возбуждения может быть связано с ограничением концентрации экситонов вследствие экранировки кулоновского взаимодействия, а также в результате оже-рекомбинации экситонов за счет взаимодействия со свободными носителями заряда. В предыдущем разделе было показано, что ограничение роста числа экситонов вследствие взаимодействия со свободными носителями заряда в совокупности с оже-девозбуждением ионов эрбия при высокой мощности накачки может приводить к насыщению числа возбужденных ионов эрбия на уровне значительно меньшем полного числа оптически активных эрбиевых центров и существенно зависящем от температуры измерения (рис.4.13).

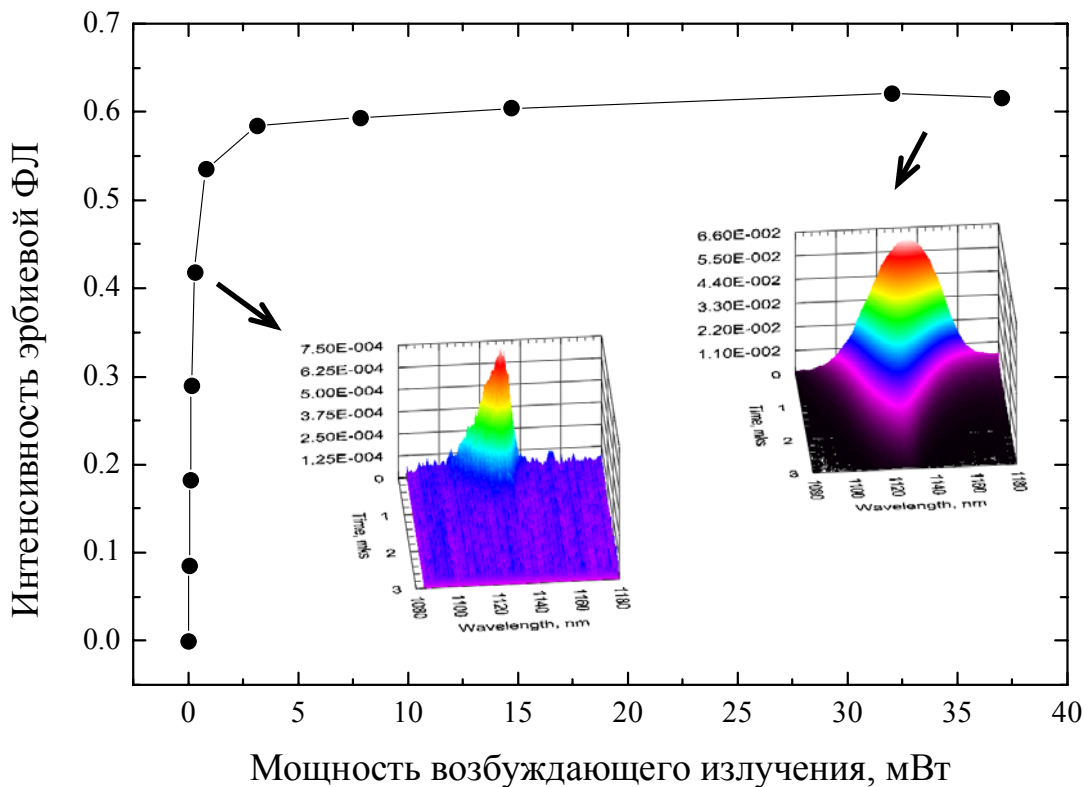


Рис.4.21. Сопоставление зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности возбуждения и спектров межзонной ФЛ. $\lambda_{ex} = 960$ нм. $T = 77$ К.

Как было показано ранее, характерное время релаксации ЭДП составляет ~ 0.4 мкс. Это означает, что даже при высоких уровнях оптического возбуждения спустя временной интервал ~ 1 мкс после импульса накачки концентрация носителей заряда оказывается ниже уровня, отвечающего переходу Мотта, и в структуре снова возникают условия для образования газа свободных экситонов аналогичные случаю малой мощности возбуждения. Поэтому для исследования влияния ЭДП на процессы возбуждения эрбия в кремнии необходимо изучение временных зависимостей интенсивности эрбиевой ФЛ в интервале времен ~ 1 мкс после импульса возбуждения. Результаты таких исследований будут представлены в следующем разделе.

4.6. Кинетика эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si и Si:Er/SOI.

Одним из важнейших параметров, определяющих процессы возбуждения ионов эрбия в кремнии, является характерное время передачи энергии от экситонов ионам эрбия. Оценка этой величины может быть проведена путем экспериментального определения времени нарастания сигнала эрбиевой ФЛ в условиях импульсного оптического возбуждения. Экспериментальные значения времени нарастания существенно различались в различных работах. В ряде работ были получены такие значения как 30 мкс [82], 50 мкс [83] и даже 100 мкс [84]. В дальнейшем было показано [85], что столь длительные времена нарастания ФЛ могут быть обусловлены ошибками измерения, связанными с низким быстродействием системы регистрации сигнала ФЛ. Время нарастания, полученное в работе [85] с использованием более быстродействующего детектора, составило ~ 1 мкс, однако данное значение также определялось временным разрешением измерительной системы и являлось оценочным.

В данном параграфе будет рассмотрено, каким образом кинетика эрбиевой ФЛ зависит от мощности возбуждающего излучения, в частности при высоких уровнях возбуждения, соответствующих образованию электронно-дырочной плазмы, а также от длины волны возбуждения. Для корректного выделения начального участка зависимости сигнала эрбиевой ФЛ от времени необходим детальный анализ кинетических кривых с высоким временным, а также спектральным разрешением.

На рис.4.22 представлены временные зависимости интенсивности ФЛ на длине волны, соответствующей излучательному переходу ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ иона эрбия (1535 нм), полученные при различной мощности межзонного импульсного оптического возбуждения. В представленных зависимостях можно выделить несколько компонент, характеризующихся различным временем спада ФЛ:

- I) Быстрая компонента с длительностью ~ 5 нс, определяемой формой импульса возбуждающего излучения (рис.4.23).
- II) Компонента с временем спада ~ 1 мкс.
- III) Медленная компонента с временем спада ~ 1 мс (показан начальный участок).

Первая, наиболее быстрая компонента в кинетике ФЛ (I) представляет собой лазерное излучение, рассеянное от поверхности исследуемой структуры, окон криостата и других элементов системы регистрации. Вследствие высокой мощности возбуждения в условиях импульсной оптической накачки, рассеянное лазерное излучение может давать вклад в суммарный сигнал ФЛ, несмотря на использование специальных оптических фильтров. Очевидно, что амплитуда данной компоненты возрастает с увеличением мощности накачки

(рис.4.23). Длительность данной компоненты определяется длительностью импульса возбуждающего излучения. Форма импульса возбуждения, представленная пунктирной кривой на рис.4.23, была определена путем регистрации сигнала рассеянного излучения на длине волны возбуждения. Поскольку длительность рассматриваемой компоненты (I) не превышает 10 нс, она может быть легко исключена из рассмотрения при исследовании эрбиевой ФЛ путем регистрации сигнала ФЛ с высоким временным разрешением. В нашем случае временное разрешение системы регистрации составляло ~ 2 нс.

Третья компонента в кинетике спада сигнала ФЛ (III) с характерным временем ~ 1 мс (при низких температурах измерения) обусловлена излучательными переходами возбужденных ионов эрбия в основное состояние. Как уже было сказано, данная компонента (III) с временем спада ~ 1 мс вносит основной вклад в интегральный сигнал эрбиевой ФЛ и амплитуда данной компоненты определяет вид спектров эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si (см. рис.4.2).

Рассмотрим теперь вторую компоненту (II) в кинетике ФЛ структур Si:Er/Si, имеющую характерное время спада ~ 1 мкс. Наблюдаемый сигнал ФЛ может быть связан с излучательной рекомбинацией неравновесных носителей заряда в исследуемых структурах. Известно, что характерные времена рекомбинации носителей заряда в кремнии при низких температурах составляют 1-10 мкс в зависимости от степени легирования и концентрации дефектов в исследуемых структурах [81]. Следует отметить, что глубина проникновения возбуждающего излучения при исследовании ФЛ структур Si:Er/Si в наших экспериментах, как правило, превышает толщину эпитаксиального слоя Si:Er, поэтому существенный вклад в сигнал ФЛ может давать излучательная рекомбинация носителей заряда, сгенерированных в кремниевой подложке исследуемых структур.

Для определения природы компоненты (II) были исследованы спектры ФЛ структур Si:Er/Si с временным разрешением. Для этого были измерены кинетики сигнала ФЛ при различных значениях длины волны и построены трехмерные зависимости сигнала ФЛ от длины волны и времени, прошедшего после импульса возбуждения. Полученный спектр с временным разрешением приведен на рис.4.24(а). Как видно из рисунка, рассматриваемая нами компонента сигнала ФЛ в интервале 0-1 мкс имеет широкий спектр, существенно отличающийся от спектра эрбиевой ФЛ. Ранее о наблюдении в структурах Si:Er/Si сигнала ФЛ с быстрым (~ 1 мкс) временем релаксации в рассмотренном спектральном диапазоне (на длинах волн 1400 и 1500 нм) сообщалось, например, в работе [85].

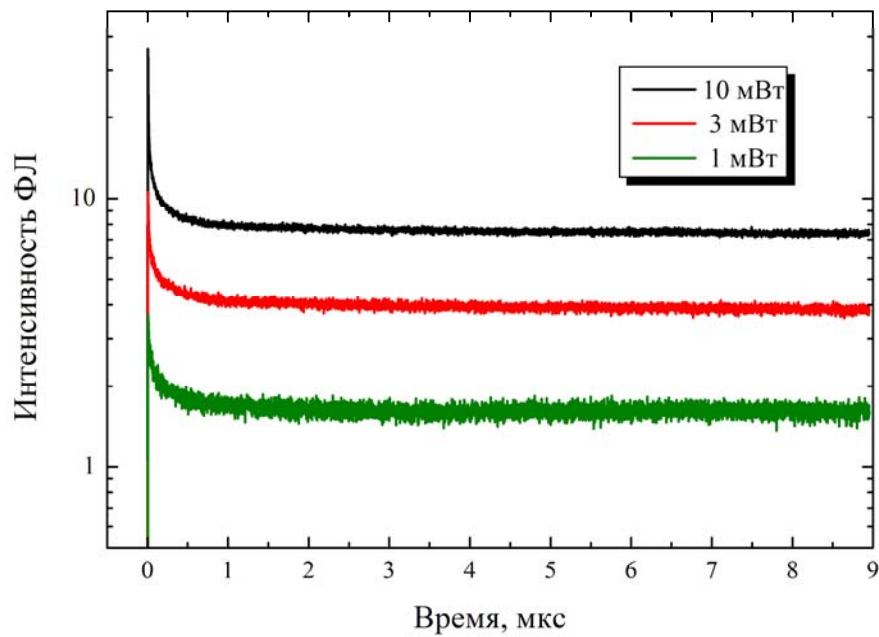


Рис.4.22. Временные зависимости интенсивности ФЛ на длине волны излучательного перехода ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ иона эрбия (1535 нм) при различной мощности межзонного импульсного оптического возбуждения, $T = 77$ К.

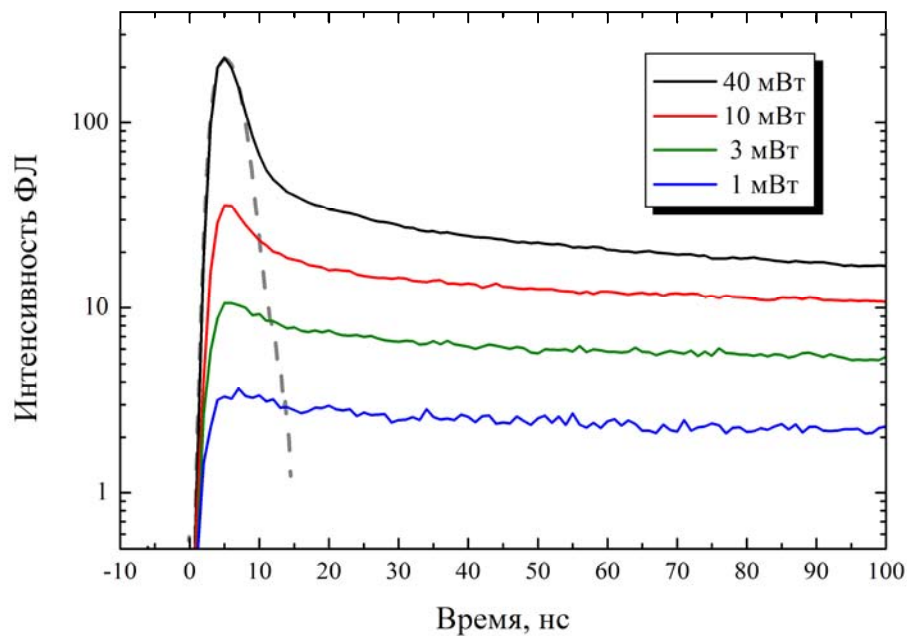


Рис.4.23. Временные зависимости интенсивности ФЛ на длине волны 1535 нм при различной мощности возбуждения, $T = 77$ К. Начальный участок кинетики (0-100 нс). Пунктирной линией изображена форма импульса возбуждающего излучения (длительность ~ 5 нс).

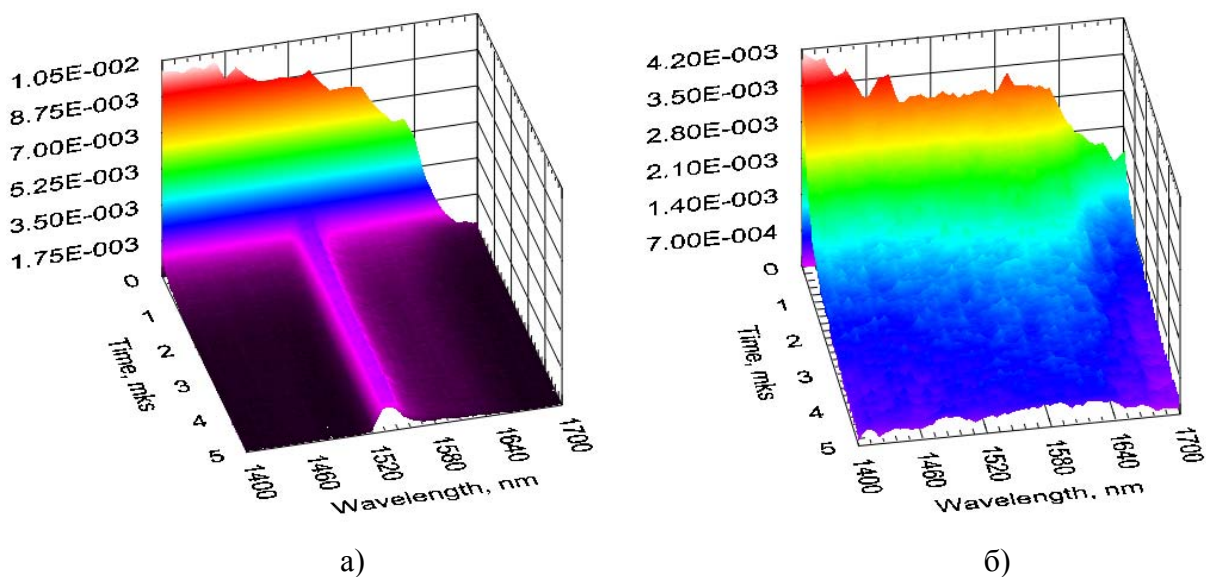


Рис.4.24. Спектры ФЛ с временным разрешением структуры Si:Er/Si (а) и объемного кремния (б) при межзонном импульсном оптическом возбуждении ($\lambda_{ex} = 800$ нм). $T = 77$ К.

На рис.4.25 приведены спектральные зависимости быстрой (II) и медленной (III) компонент сигнала ФЛ, полученные путем интегрирования кинетик ФЛ по временным интервалам 0-1 мкс и 1-10 мкс, соответственно. Видно, что в отличие от компоненты (III), имеющей спектральную зависимость характерную для эрбиевой ФЛ с максимумом на длине волны 1535 нм, сигнал ФЛ, связанный с компонентой (II), наблюдается во всем рассмотренном спектральном диапазоне 1400-1700 нм, и интенсивность данной компоненты монотонно падает с увеличением длины волны. Этот результат свидетельствует о том, что компонента (II) в регистрируемом сигнале ФЛ не имеет отношения к излучательным переходам иона эрбия. Еще одним подтверждением данного вывода является тот факт, что аналогичный сигнал ФЛ с временем спада ~ 1 мкс был обнаружен в данном спектральном диапазоне при исследовании ФЛ образцов объемного кремния без эпитаксиального слоя Si:Er (рис.4.24(б)).

Для установления механизма возникновения описанного сигнала ФЛ в области 1400-1700 нм, спектры ФЛ были исследованы в широком спектральном диапазоне, включая область экситонной ФЛ. Ранее в разделе 4.5 были представлены спектры межзонной ФЛ объемного кремния, полученные в работе [77] (рис.4.15). Максимум сигнала ФЛ на длине волны 1130 нм в представленном спектре соответствовал рекомбинации свободных экситонов в кремнии с испусканием ТО-фонона. Наряду с наиболее интенсивной ТО-линией в длинноволновой (низкоэнергетической) области спектра межзонной ФЛ кремния наблюдались менее интенсивные линии, обусловленные рекомбинацией экситонов с участием двух и более

фононов. Поскольку вероятность такой рекомбинации уменьшается с возрастанием числа фононов, участвующих в процессе рекомбинации, интенсивность соответствующих линий ФЛ быстро снижалась при удалении в длинноволновую область спектра.

Аналогичный результат был получен нами при исследовании спектров межзонной ФЛ в структурах Si:Er/Si в условиях импульсного оптического возбуждения. На рис.4.26 приведены спектры ФЛ, измеренные в условиях, при которых исследовался сигнал эрбиевой ФЛ, т.е. при межзонном возбуждении и $T = 77$ К. Как видно из представленных спектров, интенсивность сигнала ФЛ быстро падает с ростом длины волны измеряемого сигнала при удалении от максимума экситонной ФЛ на длине волны 1130 нм (кривая 1). Несмотря на это заметный сигнал ФЛ с характерным временем спада ~ 1 мкс наблюдается во всем исследованном спектральном диапазоне, включая область эрбиевой ФЛ. Для регистрации сигнала ФЛ в диапазонах 1200-1600 нм и 1300-1700 нм чувствительность системы регистрации была увеличена путем увеличения ширины щелей монохроматора с 50 до 400 и 1000 мкм, соответственно (кривые 2 и 3). Особенности, наблюдаемые в спектре ФЛ на длинах волн 1190 нм и 1260 нм соответствуют линиям рекомбинации экситонов с испусканием двух (TO+G) и трех (TO+2G) фононов (ср. с рис.4.15). Поэтому сигнал ФЛ в области 1400-1700 нм может быть связан с излучательной рекомбинацией неравновесных носителей заряда (экситонов) в кремнии с испусканием нескольких фононов.

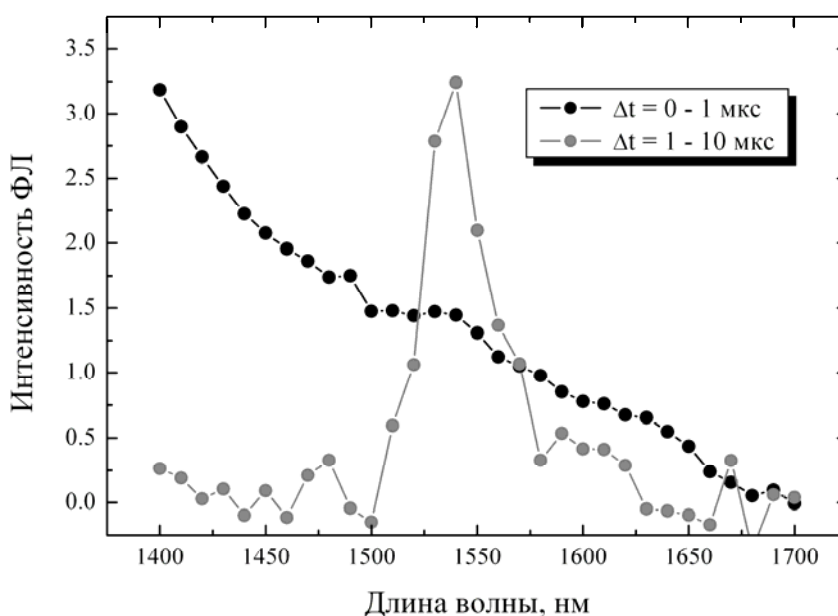


Рис.4.25. Спектральные зависимости быстрой (0-1 мкс) и медленной (1-10 мкс) компоненты сигнала ФЛ структуры Si:Er/Si. $T = 77$ К.

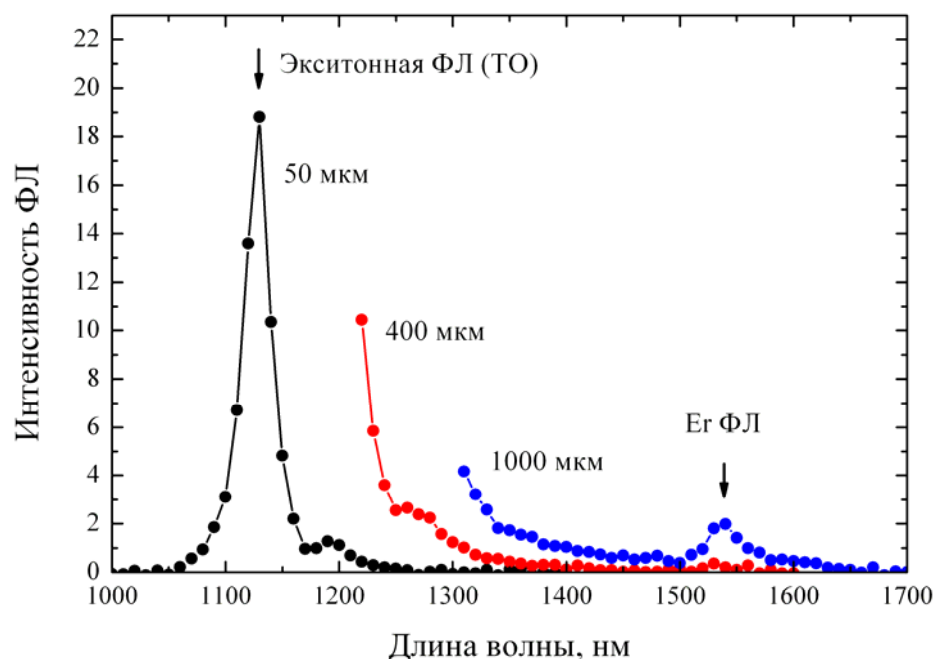


Рис.4.26. Спектры ФЛ структуры Si:Er/Si при межзонном импульсном оптическом возбуждении ($\lambda_{ex} = 800$ нм), полученные при ширине щелей монохроматора 50 мкм (1), 400 мкм (2) и 1000 мкм (3). $T = 77$ К. Спектры получены путем интегрирования кинетических кривых ФЛ по временному интервалу 0-5 мкс.

Другим возможным объяснением наблюдения сигнала ФЛ в данном спектральном диапазоне может быть рекомбинация фотосгенерированных носителей заряда на дефектно-примесных центрах в эпитаксиальном слое Si:Er. В то же время, как было показано ранее (рис.4.24(б)), аналогичный сигнал ФЛ наблюдался нами при исследовании образца слаболегированного кремния с низким содержанием примесных центров. Этот результат свидетельствует о том, что основной вклад в компоненту (II) сигнала ФЛ, наблюдаемую в структурах Si:Er/Si, дает рекомбинация неравновесных носителей заряда, сгенерированных в кремниевой подложке.

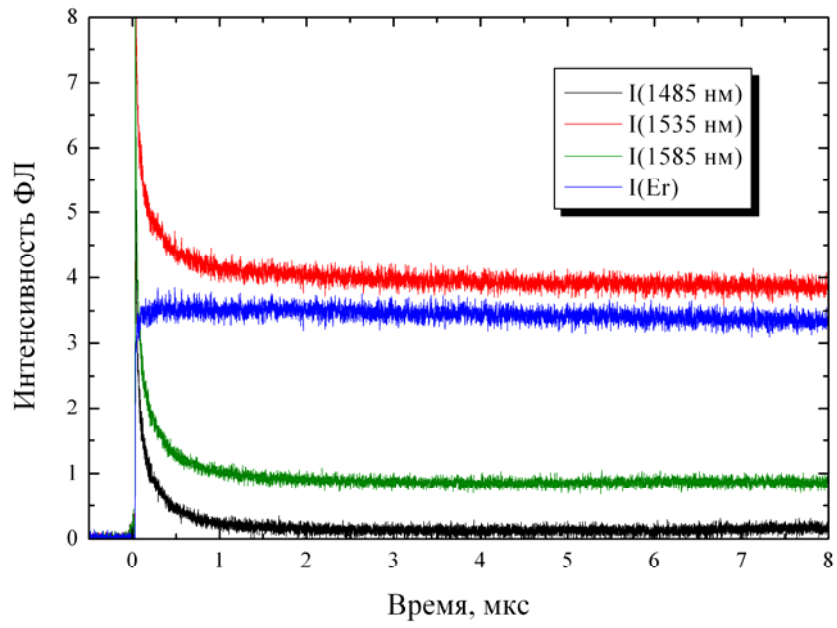
Таким образом, существенный вклад в начальный участок временной зависимости сигнала ФЛ (0-5 мкс) на длине волны излучательного перехода иона эрбия (1535 нм) дают процессы излучательной рекомбинации носителей заряда в кремнии, не связанные с излучательной релаксацией ионов эрбия. В то же время исследование начального участка кинетики эрбиевой ФЛ в данном временном интервале представляет большой интерес, поскольку именно в этом интервале осуществляются основные процессы возбуждения и безызлучательного девозбуждения ионов эрбия неравновесными носителями заряда в

условиях импульсного оптического возбуждения структур Si:Er/Si. Для корректного измерения временной зависимости сигнала эрбиевой ФЛ в интервале 0-10 мкс может быть использована методика, аналогичная примененной ранее в работе [85]. Согласно этой методике временная зависимость ФЛ регистрируется как в максимуме сигнала эрбиевой ФЛ (1535 нм), так и на близкой к ней длине волны (1485 нм), где сигнал эрбиевой ФЛ отсутствует, однако компонента (II), не связанная с излучательными переходами ионов эрбия, имеет практически такую же амплитуду, как и на длине волны 1535 нм (см. рис.4.24(а), 4.25). Сигнал ФЛ, измеренный на длине волны 1485 нм, вычитается из сигнала ФЛ на длине волны 1535 нм, и полученный разностный сигнал ФЛ с хорошей точностью отражает кинетику эрбиевой ФЛ. Описанная методика, однако, не учитывает зависимость интенсивности компоненты (II) от длины волны сигнала ФЛ. Для учета монотонного падения интенсивности компоненты (II) и увеличения точности определения кинетики эрбиевой ФЛ в наших измерениях регистрировался также сигнал ФЛ на длинноволновом краю спектра эрбиевой ФЛ (на длине волны 1585 нм). При этом предполагалось, что интенсивность компоненты (II) на участке 1485-1585 нм линейно спадает с ростом длины волны измеряемого сигнала, что близко к полученной экспериментальной зависимости (рис.4.25). Вид кинетики эрбиевой ФЛ определялся путем вычитания из сигнала ФЛ на длине волны 1535 нм среднего значения интенсивности сигналов ФЛ на краях рассматриваемого спектрального диапазона:

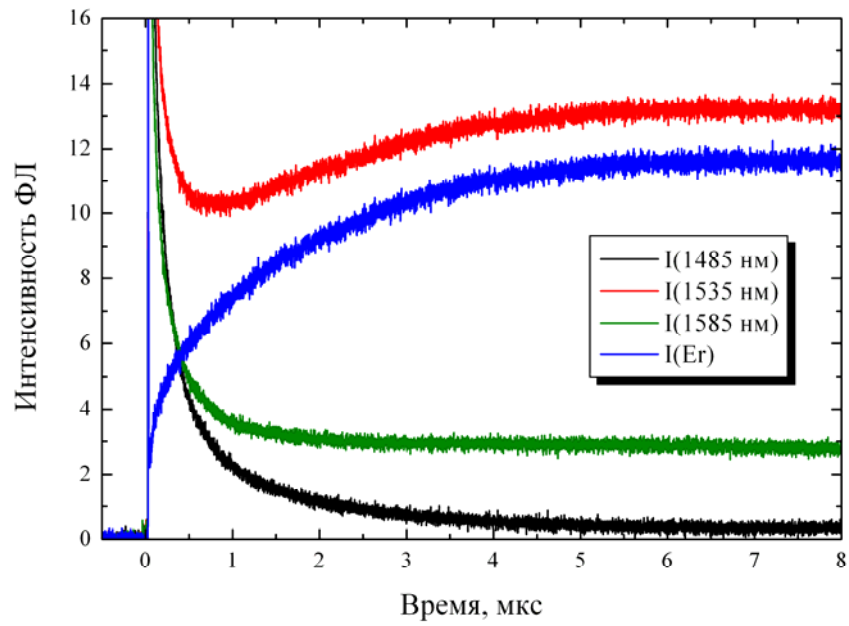
$$I(Er) = I(1535 \text{ нм}) - \frac{I(1485 \text{ нм}) + I(1585 \text{ нм})}{2} \quad (4.8)$$

На рис.4.27 представлена реализация описанной методики измерения кинетики эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si при двух различных значениях мощности возбуждающего излучения. Длина волны возбуждения составляла 900 нм, при этом характерная глубина проникновения возбуждающего излучения в структуру составляла ~ 100 мкм, что существенно превышало толщину эпитаксиального слоя Si:Er. Как видно из представленных рисунков, вид кинетики эрбиевой ФЛ существенно зависит от мощности возбуждающего излучения.

При низкой мощности возбуждения (рис.4.27(а)) время нарастания сигнала эрбиевой ФЛ, определенное из полученной кинетической кривой, составляет ~ 5 нс, т.е. определяется длительностью импульса возбуждения. Таким образом, характерное время передачи энергии экситонов ионам эрбия в кремнии не превышает величины 5 нс, что более, чем на два порядка ниже ранее приводившегося в работе [85] значения 1 мкс. В кинетике спада эрбиевой ФЛ после вычитания по формуле (4.8) остается только медленная компонента (III) с временем спада ~ 1 мс при низких температурах измерения ($T < 100 \text{ K}$).



(а)



(б)

Рис.4.27. Кинетики ФЛ структуры Si:Er/Si, измеренные на длинах волн 1485, 1535 и 1585 нм, а также кинетика ФЛ ионов эрбия, полученная по формуле (4.8). $\lambda_{ex} = 900$ нм, $T = 77$ К. Мощность возбуждения: 3.5 мВт (а) и 100 мВт (б).

Полученный результат свидетельствует о том, что передача энергии от экситонов ионам эрбия происходит существенно быстрее характерного времени жизни экситонов в чистом кремнии, составляющего $\sim 1-60$ нс [81]. По-видимому, это также является причиной отсутствия сигнала экситонной ФЛ в структурах Si:Er/Si при малой мощности межзонного оптического возбуждения. В этих условиях большая часть экситонов, сгенерированных возбуждающим излучением, захватывается эрбиевыми комплексами и рекомбинирует, передавая энергию рекомбинации ионам эрбия.

При высокой мощности возбуждающего излучения (рис.4.27(б)) в кинетике эрбиевой ФЛ возникает медленная компонента нарастания с характерным временем $\sim 1-2$ нс. На рис.4.28 представлены кинетики нарастания эрбиевой ФЛ, полученные при различной мощности возбуждающего излучения с помощью описанной методики. При увеличении мощности возбуждения вклад медленной компоненты в кинетику нарастания эрбиевой ФЛ возрастает, и при максимальной мощности эта компонента становится доминирующей.

Рассмотрим возможную причину возникновения медленной компоненты нарастания в кинетике эрбиевой ФЛ. Тот факт, что данная компонента возникает при высоких энергиях возбуждения, указывает на то, что причина медленного нарастания интенсивности эрбиевой ФЛ может быть связана с девозбуждением ионов эрбия при высоких концентрациях неравновесных носителей заряда. В предыдущем разделе мы показали, что при высоких уровнях импульсного возбуждения в исследуемых структурах происходит образование электронно-дырочной плазмы, что приводит к ограничению концентрации свободных экситонов. В отличие от случая малой мощности возбуждения, при которой основная часть носителей связывается в экситоны за времена ~ 250 пс [86] (при низких температурах измерения), при высокой мощности возбуждающего излучения концентрация свободных носителей заряда может существенно (на несколько порядков) превышать концентрацию экситонов [76]. В результате увеличение мощности излучения накачки до значений, соответствующих образованию ЭДП, может приводить к значительному снижению эффективности возбуждения ионов эрбия и возрастанию их безызлучательного оже-девозбуждения свободными носителями заряда. В результате, при высоких уровнях оптической накачки сигнал эрбиевой ФЛ практически отсутствует в течение некоторого времени после окончания импульса возбуждающего излучения. Возрастание сигнала эрбиевой ФЛ в интервале 0-5 нс может быть вызвано снижением безызлучательного оже-девозбуждения ионов эрбия, связанным с падением концентрации свободных носителей заряда вследствие их излучательной или безызлучательной рекомбинации.

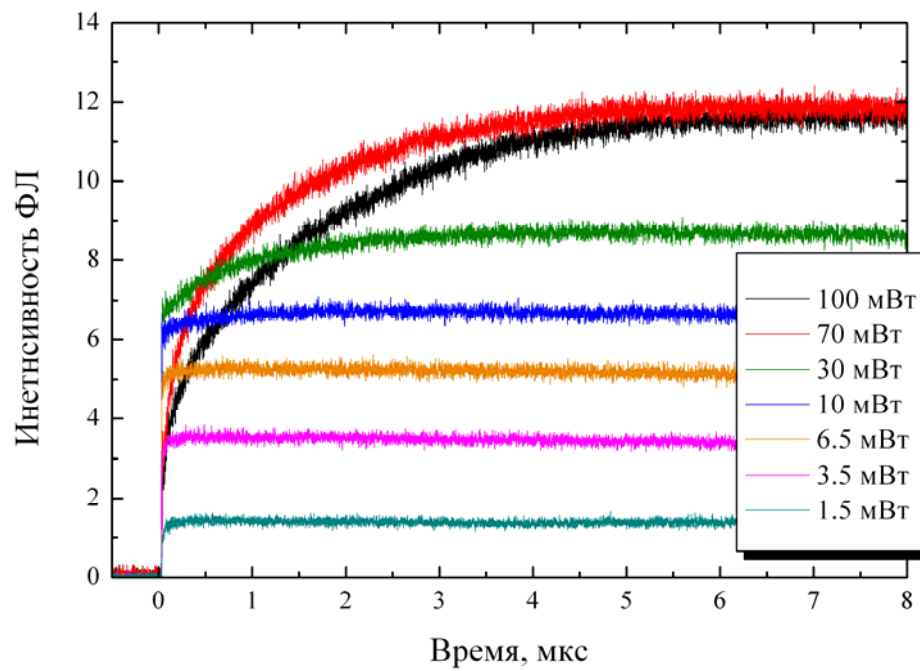


Рис.4.28. Кинетики нарастания эрбиевой ФЛ в структуре Si:Er/Si, полученные при различных значениях мощности возбуждения. $\lambda_{ex} = 900$ нм. $T = 77$ К.

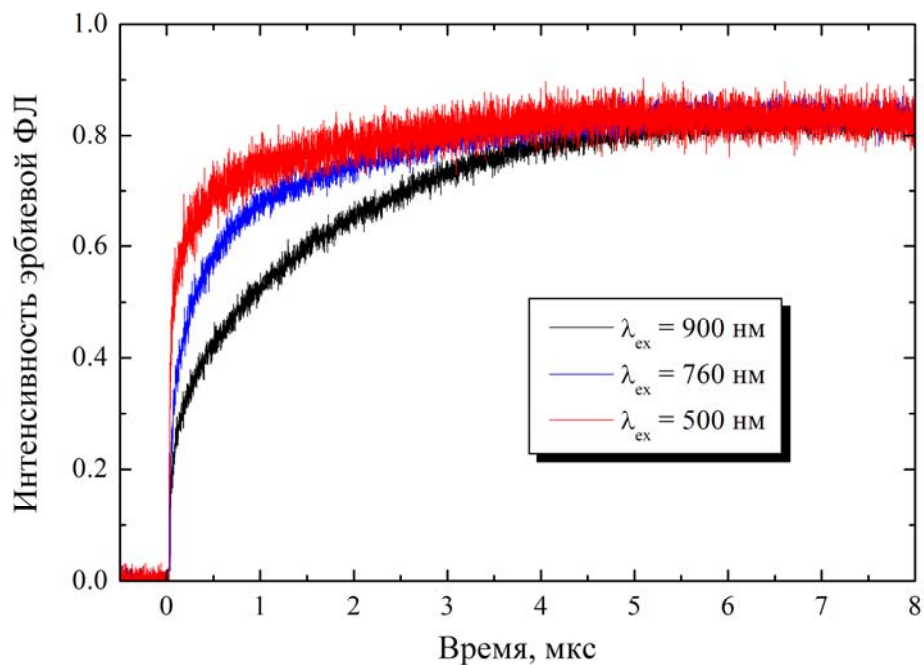


Рис.4.29. Кинетики нарастания эрбиевой ФЛ в структуре Si:Er/Si при различных длинах волн возбуждающего излучения. Мощность излучения накачки – 100 мВт. $T = 77$ К.

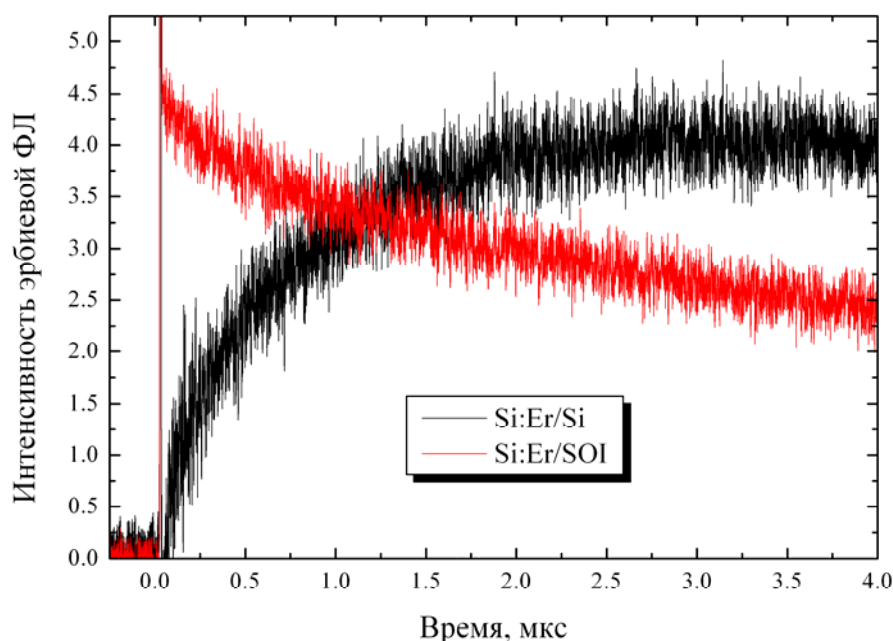


Рис.4.30. Сравнение кинетики нарастания эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si и Si:Er/SOI при высокой мощности импульсного возбуждения. $\lambda_{ex} = 900$ нм. $P = 100$ мВт. $T = 77$ К.

Следует подчеркнуть, что характерное время нарастания эрбиевой ФЛ при высоких уровнях возбуждения составляет $\sim 1-2$ мкс, что в несколько раз превышает время релаксации ЭДП в исследуемых структурах Si:Er/Si (~ 0.3 мкс). В связи с этим, возникновение медленной компоненты нарастания эрбиевой ФЛ не может быть объяснено исключительно образованием и последующей релаксацией ЭДП в структурах Si:Er/Si. По-видимому, даже после окончания релаксации ЭДП концентрация свободных носителей заряда в структуре остается достаточно высокой для реализации эффективного оже-девозбуждения ионов эрбия. В этом случае снижение концентрации свободных носителей заряда с характерным временем 1-2 мкс может приводить к возникновению нарастающего участка во временной зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ с аналогичным временем нарастания.

Еще одним фактором, влияющим на возникновение медленной компоненты в кинетике нарастания эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si, является, по-видимому, диффузия носителей заряда из кремниевой подложки в эпитаксиальный слой Si:Er. Этот вывод можно сделать на основании результатов исследования зависимости кинетики нарастания эрбиевой ФЛ от длины волны возбуждающего излучения. Было обнаружено (рис.4.29), что при уменьшении длины волны возбуждения (от 900 до 500 нм) происходит монотонное снижение вклада медленной компоненты в кинетику нарастания эрбиевой ФЛ. На первый взгляд, данный

результат не согласуется с зависимостью кинетики нарастания эрбиевой ФЛ от мощности возбуждения при фиксированной длине волны возбуждения (рис.4.28). Действительно, уменьшение длины волны возбуждения сопровождается увеличением коэффициента поглощения возбуждающего излучения в структуре и, как следствие, к возрастанию плотности мощности, поглощаемой в эпитаксиальном слое Si:Er. Согласно рис.4.28, это должно приводить к возрастанию вклада медленной компоненты нарастания эрбиевой ФЛ при меньших длинах волн возбуждающего излучения. Наблюдение обратной зависимости может быть объяснено существенным влиянием на процессы возбуждения и девозбуждения ионов эрбия в слое Si:Er носителей заряда, возникающих в кремниевой подложке и диффундирующих в эпитаксиальный слой Si:Er.

Чтобы проверить предположение о влиянии диффузии носителей заряда из кремниевой подложки на возникновение медленного нарастания эрбиевой ФЛ, мы провели сравнение кинетики нарастания ФЛ в структурах Si:Er/Si и в слоях Si:Er, выращенных на подложках "кремний-на-изоляторе" (SOI). Основное отличие структур Si:Er/SOI от структур Si:Er/Si состоит в том, что в этих структурах эпитаксиальный слой Si:Er отделен от кремниевой подложки слоем SiO₂ толщиной ~ 1 мкм. Наличие данного изолирующего слоя полностью исключает возможность диффузии носителей заряда из Si подложки в эпитаксиальный слой Si:Er. На рис.4.30 приведены кинетики нарастания эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si и Si:Er/SOI при высокой мощности импульсного возбуждения. Как видно из приведенных графиков, в структуре Si:Er/SOI возрастание интенсивности эрбиевой ФЛ даже при высоких уровнях возбуждения осуществляется в течение короткого времени, определяемого длительностью импульса возбуждения, и медленная компонента нарастания ФЛ отсутствует. Этот результат подтверждает, что медленное нарастание интенсивности эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si связано с диффузией носителей заряда из кремниевой подложки в слой Si:Er.

Чтобы объяснить полученный результат, напомним, что время жизни неравновесных носителей заряда в кремнии существенно зависит от качества рассматриваемых структур, а именно, от концентрации в этих структурах атомов примесей, дефектов роста, дислокаций и т.д. В частности, время жизни носителей заряда в эпитаксиальном слое Si:Er определяется в первую очередь процессами безызлучательной рекомбинации на дефектных центрах, а также захватом электронно-дырочных пар (экситонов) на эрбиевые комплексы. При этом время жизни неравновесных носителей в слое Si:Er может быть существенно короче времени жизни носителей заряда в слаболегированной кремниевой подложке. В случае возбуждения носителей заряда исключительно в слое Si:Er рекомбинация образованных носителей заряда может осуществляться за время сравнимое с длительностью импульса возбуждения. Такое возбуждение

реализуется в структурах Si:Er/SOI, а также в структурах Si:Er/Si при коротких длинах волн возбуждения, когда глубина проникновения возбуждающего излучения в структуру оказывается меньше толщины эпитаксиального слоя Si:Er. Это предположение подтверждается результатами исследования зависимости межзонной ФЛ в структурах Si:Er/Si от длины волны возбуждения при фиксированной мощности возбуждающего излучения (рис.4.31). Как видно из представленной зависимости, интенсивность межзонной ФЛ в структуре Si:Er/Si монотонно спадает с уменьшением длины волны возбуждения, что связано с увеличением доли возбуждающего излучения, поглощаемого в слое Si:Er, и с высокой вероятностью безызлучательной рекомбинации носителей заряда в данном слое. Для сравнения такая же зависимость была измерена для слаболегированной кремниевой подложки аналогичной подложкам, на которых были выращены исследуемые структуры Si:Er/Si (рис.4.31). В отличие от структуры Si:Er/Si интенсивность межзонной ФЛ в кремниевой подложке практически не зависит от длины волны возбуждения, что подтверждает существенный вклад эпитаксиального слоя Si:Er в подавление межзонной излучательной рекомбинации в структурах Si:Er/Si.

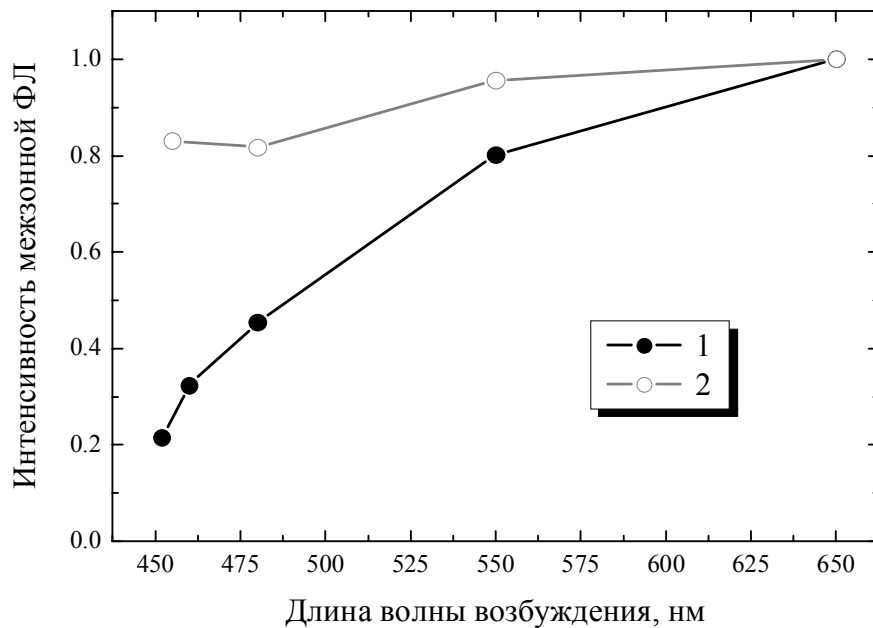


Рис.4.31. Нормированные зависимости интенсивности межзонной ФЛ от длины волны излучения накачки в структуре Si:Er/Si (1) и в слаболегированной кремниевой подложке (2). P = 100 мВт. T = 77 К.

Таким образом, в случае возбуждения неравновесных носителей заряда исключительно в слое Si:Er даже в условиях высокой мощности возбуждения концентрация носителей заряда может быстро снижаться до значений, соответствующих условиям эффективного образования экситонов и возбуждения ионов эрбия, что приведет к наблюдению быстрого нарастания интенсивности эрбиевой ФЛ. При возбуждении структур Si:Er/Si излучением с глубиной проникновения, превышающей толщину слоя Si:Er, высокая концентрация носителей заряда в слаболегированной кремниевой подложке может сохраняться в течение нескольких микросекунд после импульса возбуждения. В течение этого времени диффузия носителей заряда из подложки может приводить к эффективному девозбуждению ионов эрбия в слое Si:Er и, как следствие, к возникновению медленного нарастания эрбиевой ФЛ с характерным временем, определяемым временем жизни носителей заряда в кремниевой подложке.

4.7. Выводы к Главе 4.

Неоднородность оптического возбуждения структур Si:Er/Si оказывает существенное влияние на вид зависимостей интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности и длины волны оптического возбуждения. Эффективное сечение возбуждения ионов эрбия в кремнии, получаемое при однородном возбуждении структур Si:Er/Si, составляет $\sim 5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$, что на порядок превосходит ранее опубликованные значения [A11, A48, A50, A53].

Насыщение эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si в условиях интенсивного импульсного оптического возбуждения связано с ограничением концентрации экситонов, участвующих в процессе возбуждения ионов эрбия в матрице кремния, и возрастанием безызлучательного девозбуждения ионов эрбия свободными носителями заряда вследствие перехода от режима генерации свободных экситонов к образованию электронно-дырочной плазмы [A50, A53].

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 $\sim 1 \text{ мкс}$. Появление данной компоненты связывается со снижением эффективности возбуждения и интенсивным безызлучательным девозбуждением ионов эрбия в кремнии в условиях высокой концентрации носителей заряда и возникновения в структурах электронно-дырочной плазмы [A11, A48, A50, A53].

Глава 5. Спектры возбуждения эрбиевой ФЛ в эпитаксиальных структурах Si:Er/Si. Межзонное и прямое оптическое возбуждение ионов эрбия в кремнии.

Спектроскопия возбуждения фотолюминесценции является одним из эффективных методов исследования энергетических спектров, плотности состояний в полупроводниковых светоизлучающих структурах. Большой интерес с точки зрения изучения механизмов возбуждения эрбиевой ФЛ в кремниевых структурах представляет спектральная область вблизи края запрещенной зоны кремния. В этот спектральный диапазон попадает переход из основного $^4I_{15/2}$ во второе возбужденное состояние $^4I_{11/2}$ иона Er^{3+} (длина волны, соответствующая переходу – 980 нм). В эрбиевых лазерах и квантовых усилителях на основе диэлектриков этот переход используется для создания инверсной населенности на рабочем уровне $^4I_{13/2}$. Также в этой области происходит существенное изменение оптических свойств кремния, в частности резкое падение коэффициента поглощения света с ростом длины волны. Поэтому особое внимание в работе было уделено исследованию спектров возбуждения ФЛ в ближнем ИК диапазоне, включающем спектральную область вблизи края межзонного поглощения кремния ($\lambda_{ex} \approx 1060$ нм).

К началу наших исследований было опубликовано всего несколько работ, посвященных изучению спектров возбуждения эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si [87,88]. В работе [87] исследование спектров возбуждения осуществлялось с использованием лампы накаливания (100 Вт), излучение которой пропусклось через решеточный монохроматор. В данных условиях возбуждения сигнал эрбиевой ФЛ наблюдался только в условиях межзонного возбуждения, т.е. при энергиях фотона больших ширины запрещенной зоны кремния. В работе [88] было показано, что при возбуждении структур Si:Er/Si импульсным излучением параметрического генератора света (ОРО) сигнал эрбиевой ФЛ наблюдается также в области энергией кванта возбуждающего излучения меньших ширины запрещенной зоны кремния. Для установления подзонного механизма возбуждения ионов эрбия в кремнии нами совместно с группой профессора Грегоркиевича в Институте Ван-дер-Ваальса – Зеемана (Амстердам) и в дальнейшем в ИФМ РАН были проведены детальные исследования спектров возбуждения и кинетики эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si (а также Si:Er/SOI и SiGe:Er/Si), с различными типами оптически активных эрбиевых центров. Были исследованы структуры Si:Er/Si, содержащие как изолированные эрбиевые центры (Er-O1, Er-1), так и ионы эрбия в SiO₂-подобных преципитатах.

В ходе совместных исследований была обнаружена особенность в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ структур Si:Er/Si – широкий пик вблизи края запрещенной зоны кремния [A4-A6],

возникновение которого первоначально связывалось нами с возбуждением эрбия через примесные уровни, относящиеся к эрбиевым центрам. В дальнейших публикациях наших коллег данный пик интерпретировался как резонансное возбуждение экситонов, связанных на эрбиевом донорном центре с энергией ионизации 218 мэВ [89]. Ряд экспериментальных фактов противоречил "резонансной" модели и послужил причиной дальнейших исследований.

5.1. Спектры возбуждения эрбиевой ФЛ в эпитаксиальных структурах Si:Er/Si.

В данном разделе будут рассмотрены зависимости интенсивности ФЛ ионов Er^{3+} от длины волны возбуждающего излучения (спектры возбуждения ФЛ) в эпитаксиальных структурах Si:Er/Si в широком спектральном диапазоне ($\lambda_{\text{ex}} = 0.5\text{-}1.5$ мкм), включающем как область межзонного возбуждения кремния, так и область энергий кванта возбуждающего излучения меньших ширины запрещенной зоны кремния (подзонное возбуждение). Исследование спектров возбуждения ФЛ осуществлялось с использованием параметрического генератора света (ОРО) в условиях импульсного оптического возбуждения с длительностью импульса возбуждения ~ 5 нс. Средняя мощность излучения накачки составляла от 0.001 мВт до 50 мВт, что соответствовало плотности мощности возбуждающего излучения в импульсе от $2 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^7$ Вт/см². При исследовании спектров возбуждения эрбиевой ФЛ длина волны сигнала ФЛ фиксировалась на линии основного излучательного перехода иона эрбия (1535 нм). При этом для получения спектров возбуждения эрбиевой ФЛ из общего сигнала ФЛ выделялась "медленная" компонента (компонента III, см. раздел 4.6), отвечающая излучательной релаксации ионов эрбия. Основная часть измерений, представляемых в данном разделе, осуществлялась при температуре жидкого азота ($T = 77$ К).

На рис.5.1 представлены спектры возбуждения эрбиевой ФЛ структуры Si:Er/Si, полученные при различных значениях мощности возбуждающего излучения. В данном случае средняя мощность возбуждающего излучения изменялась от 0.2 до 50 мВт (плотность мощности в импульсе $4 \cdot 10^4\text{-}1 \cdot 10^7$ Вт/см²). При низкой мощности возбуждения ($P < 1$ мВт) наблюдалось монотонное падение интенсивности эрбиевой ФЛ с увеличением длины волны возбуждающего излучения. При этом сигнал эрбиевой ФЛ наблюдался только в области межзонного возбуждения кремния ($\lambda_{\text{ex}} < 1060$ нм). При увеличении мощности оптического возбуждения ($P > 1$ мВт) значительный сигнал эрбиевой ФЛ возникал также при энергиях кванта возбуждающего излучения существенно меньших ширины запрещенной зоны кремния ($\lambda_{\text{ex}} > 1060$ нм) вплоть до энергии излучательного перехода иона Er^{3+} (1535 нм). Более того, при высоких уровнях оптической накачки в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ возникал

интенсивный широкий пик вблизи края межзонного поглощения кремния с максимумом на длине волны $\lambda_{ex} \sim 1030\text{-}1040$ нм (рис.5.1). Высокочастотный (коротковолновый) край данного пика соответствовал энергии фотона: $h\nu_{ex} = E_g + h\Omega_{ph}$, где E_g – ширина запрещенной зоны кремния (1.17 эВ при низких температурах), $h\Omega_{ph}$ – энергия фонона, участвующего в непрямом переходе (≈ 0.06 эВ). Таким образом, возрастание интенсивности эрбиевой ФЛ в области 980-1030 нм совпадало с краем собственного поглощения объемного кремния (≈ 1010 нм).

На рис.5.2 приведены спектры ФЛ, полученные при значениях длины волны возбуждения 980 нм, 1030 нм и 1100 нм при максимальной мощности возбуждающего излучения (50 мВт). Полученные спектры ФЛ имеют вид, характерный для эрбиевой ФЛ с максимумом на длине волны 1537 нм, что подтверждает связь сигнала, регистрируемого при исследовании спектров возбуждения ФЛ (в том числе в условиях подзонного возбуждения), с излучательной релаксацией ионов эрбия в исследуемых структурах Si:Er/Si.

Для определения связи вида спектров возбуждения с кристаллическим окружением ионов эрбия в кремниевых структурах спектры возбуждения эрбиевой ФЛ были исследованы в структурах Si:Er/Si с различными типами эрбиевых центров. Методом спектроскопии высокого разрешения в условиях импульсного возбуждения (с использованием фурье-спектрометра, работающего в режиме "step-scan") было показано, что характер спектров возбуждения не зависит от конкретного типа эрбиевых центров. Сигнал эрбиевой ФЛ при подзонном возбуждении, а также пик вблизи края межзонного поглощения кремния наблюдался как для изолированных эрбиевых центров (Er-O1, Er-1), так и для ионов эрбия в SiO₂-подобных преципитатах.

Рассмотрим более подробно полученные спектры возбуждения эрбиевой ФЛ в различных спектральных диапазонах возбуждающего излучения. Как уже говорилось ранее, в области межзонного поглощения кремния, т.е. при энергиях кванта возбуждающего излучения, превышающих ширину запрещенной зоны кремния, реализуется экситонный механизм возбуждения ионов эрбия. Вид спектров возбуждения эрбиевой ФЛ напрямую связан с формой зависимостей интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности оптической накачки, приведенных в разделе 4.2. При низкой мощности возбуждения наблюдалось монотонное падение интенсивности эрбиевой ФЛ с увеличением длины волны возбуждающего излучения, и при приближении к краю межзонного поглощения кремния сигнал эрбиевой ФЛ практически исчезал. Наблюдаемое падение интенсивности эрбиевой ФЛ в данном спектральном диапазоне соответствовало уменьшению коэффициента поглощения излучения в кремнии и, как следствие, снижению скорости генерации электронно-дырочных пар.

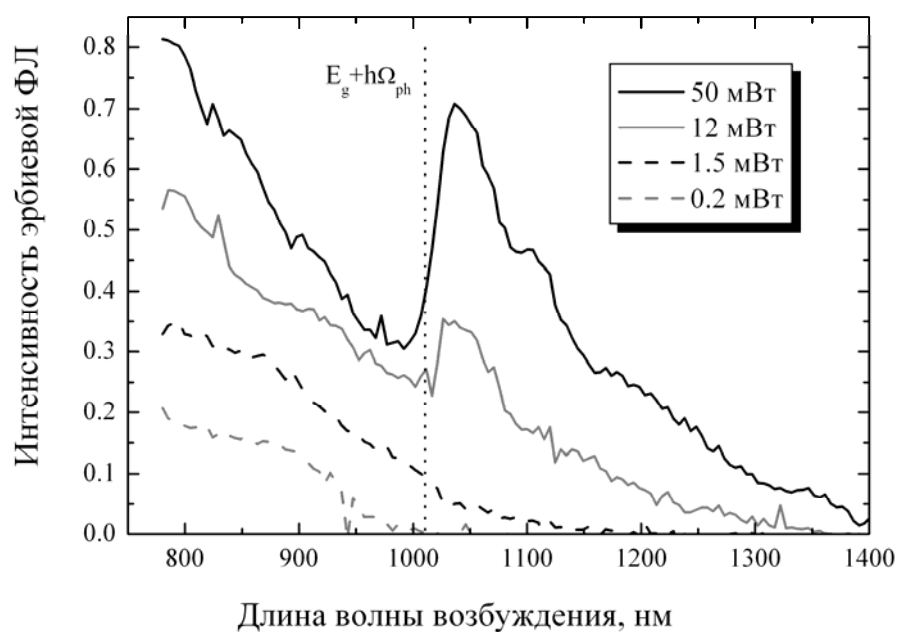


Рис.5.1. Спектры возбуждения эрбиевой ФЛ в структуре Si:Er/Si при различных значениях мощности оптической накачки (условия неоднородного возбуждения). Пунктиром отмечен край межзонного поглощения кремния ($E_g + h\Omega_{ph}$). $T = 77$ К.

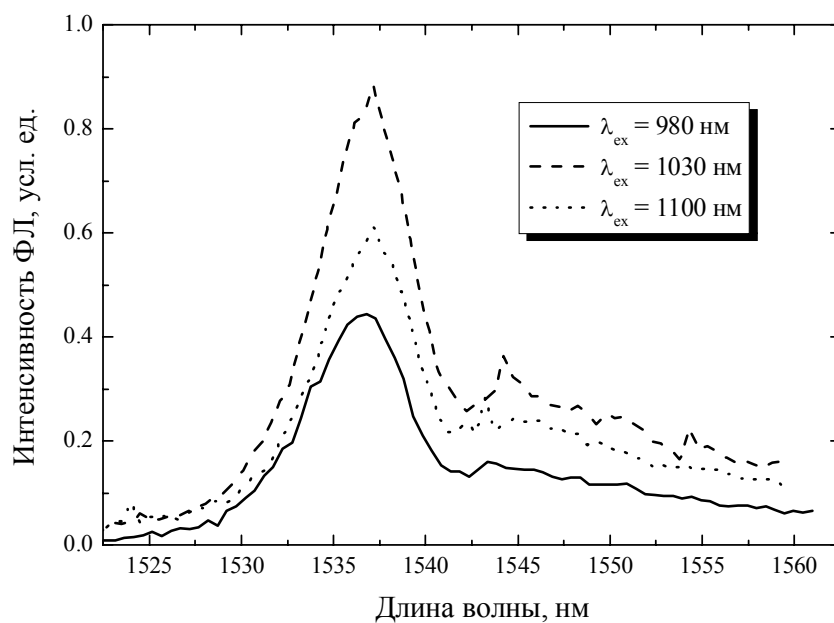


Рис.5.2. Спектры ФЛ, измеренные при $\lambda_{ex} = 980$ нм, 1030 нм и 1100 нм. Средняя мощность возбуждающего излучения 50 мВт (см. рис.5.1). $T = 77$ К.

Как было показано в разделе 4.2 (см. рис.4.3) при высоких уровнях межзонного возбуждения, наблюдалось насыщение эрбиевой ФЛ, причем интенсивность сигнала ФЛ в условиях насыщения, практически не зависела от длины волны возбуждающего излучения. В связи с этим при высоких уровнях оптической накачки в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ должен наблюдаться горизонтальный участок во всем спектральном диапазоне, соответствующем межзонному возбуждению кремния. В то же время в спектрах возбуждения, приведенных на рис.5.1, монотонное падение интенсивности эрбиевой ФЛ с ростом λ_{ex} в области межзонного поглощения кремния ($\lambda_{ex} < 1060$ нм) наблюдается при всех значениях мощности возбуждения, в том числе при максимальных значениях, близких к насыщению эрбиевой ФЛ.

Объяснение данного результата состоит в том, что спектры возбуждения эрбиевой ФЛ, приведенные на рис.5.1, были получены в условиях фокусировки луча возбуждающего лазерного излучения, т.е. в условиях сильно неоднородного по площади возбуждения структур Si:Er/Si. Как было показано в параграфе 4.3, неоднородное возбуждение исследуемых структур может влиять как на зависимость интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности возбуждения, так и на зависимость от длины волны возбуждения, т.е. на вид спектров возбуждения эрбиевой ФЛ. В результате вместо значения интенсивности ФЛ, не зависящего от длины волны возбуждения и определяемого уровнем насыщения эрбиевой ФЛ (рис.4.3) в спектрах возбуждения наблюдается монотонное падение интенсивности ФЛ с ростом λ_{ex} (см. рис.4.12). В связи с этим было проведено исследование спектров возбуждения эрбиевой ФЛ при однородном оптическом возбуждении в условиях описанных в параграфе 4.3. Для этого на исследуемый образец наклеивался экран из алюминиевой фольги с небольшим отверстием ($\sim 2 \times 2$ мм) и открытая область структуры возбуждалась лазерным пучком с размером, превосходящим размер апертуры. В результате достигалось однородное распределение плотности мощности падающего излучения на исследуемом участке структуры Si:Er/Si. На рис.5.3 представлены спектры возбуждения эрбиевой ФЛ структуры Si:Er/Si, полученные в условиях однородного возбуждения при различных значениях мощности межзонной оптической накачки. Как и следовало ожидать, в данных условиях интенсивность эрбиевой ФЛ при высоких уровнях оптической накачки практически не зависит от длины волны возбуждения. Полученные спектры возбуждения хорошо согласуются с зависимостями интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности возбуждения при различных λ_{ex} , приведенными на рисунках 4.3 и 4.4 в разделе 4.2. В дальнейшем будут представлены результаты исследований, полученные в условиях однородного возбуждения структур Si:Er/Si.

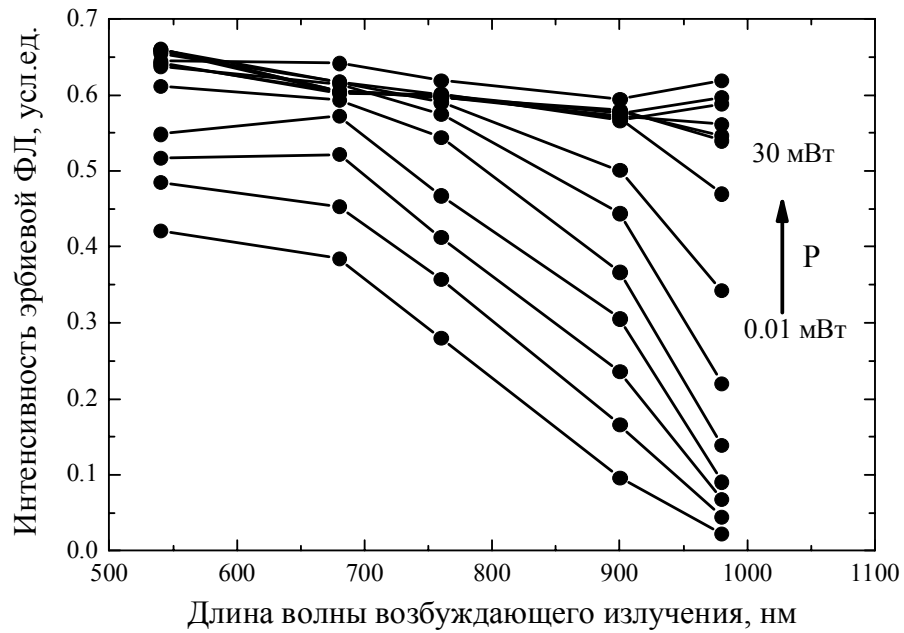


Рис.5.3. Спектры возбуждения эрбиевой ФЛ в структуре Si:Er/Si в условиях однородного оптического возбуждения. Область межзонного поглощения кремния. $T = 77$ К.

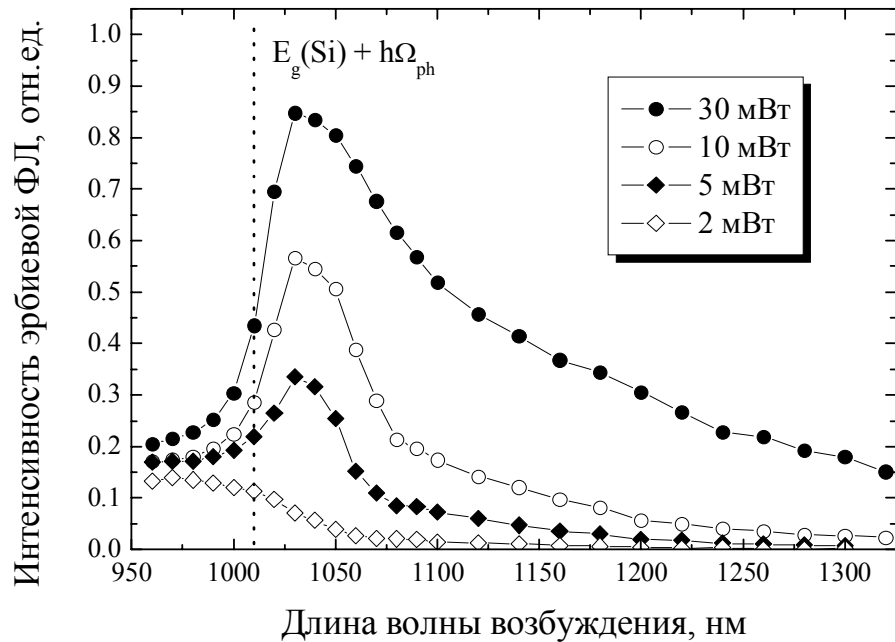


Рис.5.4. Спектры возбуждения эрбиевой ФЛ в структуре Si:Er/Si при различных значениях мощности оптической накачки. $T = 77$ К. Однородное возбуждение.

Рассмотрим теперь спектральный диапазон, соответствующий области энергий кванта возбуждающего излучения меньшей ширины запрещенной зоны кремния (область подзонного возбуждения). Было обнаружено, что в данной области длин волн возбуждающего излучения при высокой мощности оптической накачки ($P > 1$ мВт) также наблюдается значительный сигнал эрбиевой ФЛ. Кроме того, было показано, что при высоких уровнях оптической накачки в спектральной области, соответствующей краю межзонного поглощения кремния, наблюдается резкое возрастание интенсивности ФЛ ионов эрбия и в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ возникает пик с максимумом на длине волны $\lambda_{ex} \sim 1030-1040$ нм (рис.5.4). Интенсивность и ширина наблюдаемого пика существенно зависит от мощности излучения накачки. Следует отметить, что интенсивность сигнала эрбиевой ФЛ в максимуме пика значительно (в несколько раз) превосходит интенсивность эрбиевой ФЛ, соответствующую условиям насыщения при межзонном возбуждении структур Si:Er/Si.

Исследование температурной зависимости спектров возбуждения эрбиевой ФЛ показало, что повышение температуры приводит к уширению пика и смещению его коротковолнового края в область бóльших длин волн, что соответствует температурному изменению ширины запрещенной зоны кремния (рис.5.5). Полученный результат указывает на связь наблюдаемого эффекта (пика в спектре возбуждения ФЛ эрбия) с особенностью поглощения возбуждающего излучения при энергиях фотона близких к ширине запрещенной зоны кремния.

Как указывалось в разделе 2.5, в спектре излучения на выходе из ОРО присутствуют одновременно видимая и инфракрасная компоненты. При записи спектров возбуждения эрбиевой ФЛ в ближней ИК области осуществлялась фильтрация видимой компоненты возбуждающего излучения. Вследствие высокой мощности возбуждающего импульсного излучения небольшая доля видимого излучения, пройдя через фильтр, могла попадать на исследуемый образец одновременно с излучением ИК диапазона, вызывая генерацию электронно-дырочных пар и возбуждение эрбиевой ФЛ в исследуемых структурах. Чтобы убедиться, что сигнал, наблюдаемый в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ в области $\lambda_{ex} > 1000$ нм, не связан с межзонным поглощением остаточного излучения видимого диапазона, был проведен следующий эксперимент. На пути луча, выходящего из ОРО, перед исследуемым образцом была расположена кремниевая подложка, которая служила дополнительным фильтром излучения накачки. Использование такого фильтра позволяло гарантированно отрезать компоненту возбуждающего излучения с длиной волны менее 1060 нм, т.е с энергией фотонов, превышающей ширину запрещенной зоны кремния E_g .

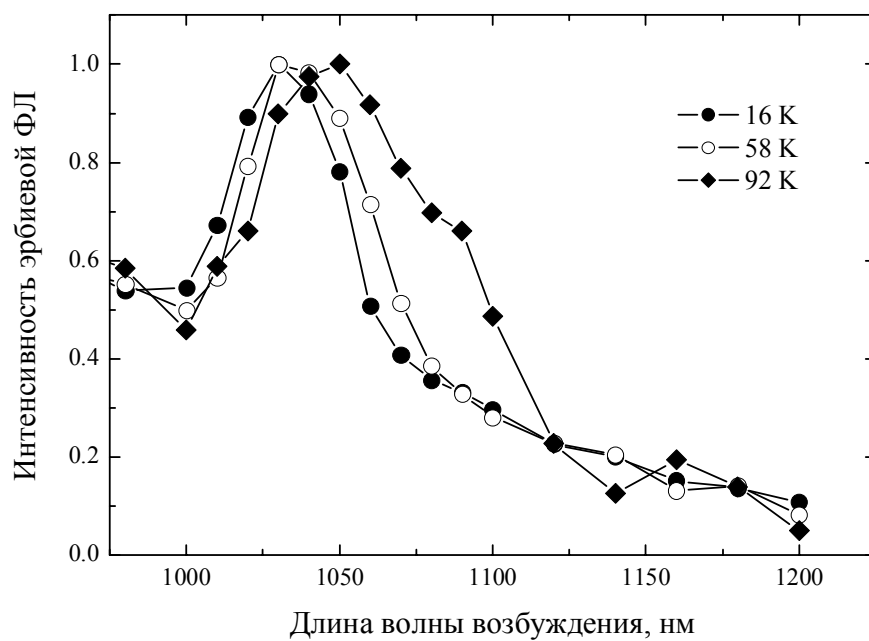


Рис.5.5. Нормированные спектры возбуждения эрбиевой ФЛ при различных температурах измерения, мощность возбуждающего излучения – 7 мВт.

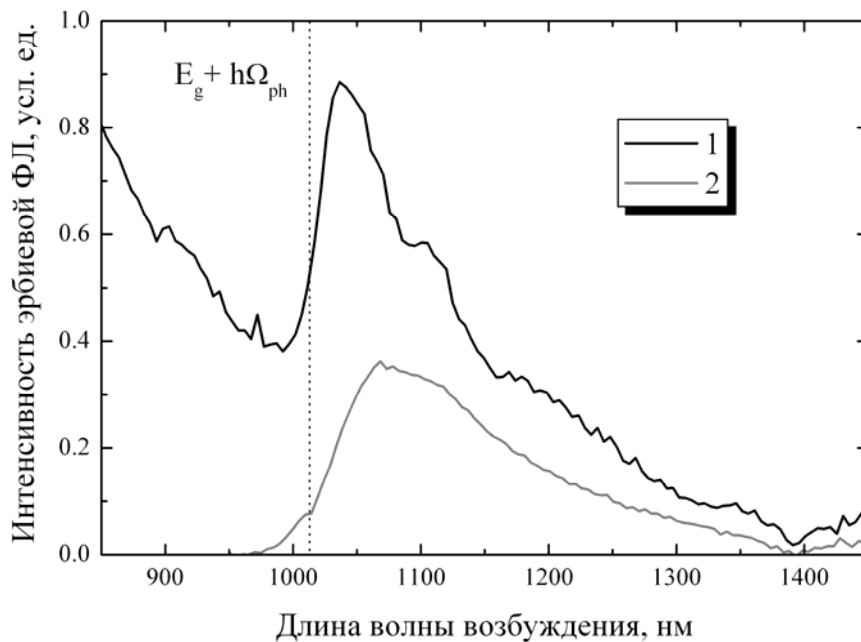


Рис.5.6. Спектры возбуждения эрбиевой ФЛ при максимальной мощности возбуждающего излучения (50 мВт), измеренные без использования (1) и с использованием (2) кремниевого фильтра на пути возбуждающего излучения. $T = 77$ К.

На рис.5.6 приведено сравнение спектров возбуждения эрбиевой ФЛ, измеренных при максимальной мощности накачки с использованием и без использования кремниевого фильтра на пути возбуждающего излучения. Как видно из рисунка, применение кремниевого фильтра приводит к исчезновению сигнала эрбиевой ФЛ при $\lambda_{ex} < 1000$ нм. В то же время при $\lambda_{ex} > 1060$ нм вид спектра остается практически неизменным. Небольшое падение интенсивности сигнала Er ФЛ в данной области возбуждения связано с отражением части возбуждающего излучения (~ 30%) от поверхности кремниевой пластины. Полученный результат подтверждает, что возбуждение эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si может осуществляться излучением с энергиями фотона существенно меньшими ширины запрещенной зоны кремния.

5.2. Механизм подзонного возбуждения эрбиевой ФЛ в кремнии.

При межзонной оптической накачке возбуждение ионов эрбия в кремнии осуществляется посредством генерации экситонов и их последующей рекомбинации с передачей энергии ионам эрбия [37,38]. Для определения механизма возбуждения ионов эрбия при энергиях кванта возбуждающего излучения, меньших ширины запрещенной зоны кремния, наряду со спектрами возбуждения эрбиевой ФЛ были исследованы спектры возбуждения ФЛ, обусловленной излучательной рекомбинацией экситонов в структурах Si:Er/Si. Полученный спектр возбуждения экситонной ФЛ приведен на рис.5.7. Для сравнения приведен также спектр возбуждения эрбиевой ФЛ. Оба спектра получены при максимальной мощности возбуждающего излучения (50 мВт). Было обнаружено, что в отличие от эрбиевой ФЛ интенсивность экситонной ФЛ монотонно снижается с увеличением длины волны возбуждения в интервале 1000-1050 нм. Очевидно, что наблюдаемое падение интенсивности экситонной ФЛ связано с резким снижением генерации электронно-дырочных пар и формирования экситонов в структурах Si:Er/Si в данном спектральном диапазоне возбуждения.

На основании данного результата в работах [A5,A6] был сделан вывод о том, что при подзонном возбуждении структур Si:Er/Si основное поглощение возбуждающего излучения происходит в эпитаксиальном слое Si:Er. Возбуждение ионов эрбия в данных условиях связывалось нами с наличием глубоких примесных уровней в запрещенной зоне кремния, образующихся при осаждении эпитаксиального слоя Si:Er. Было высказано предположение, что существование таких примесных центров может приводить к поглощению возбуждающего излучения с энергией фотона существенно меньшей ширины запрещенной зоны кремния посредством возбуждения электрона из валентной зоны на примесные уровни, связанные с эрбием. Была предложена модель возбуждения ионов эрбия, включающая рекомбинацию электрона, находящегося на примесном центре, с дыркой в валентной зоне кремния (рис.5.8).

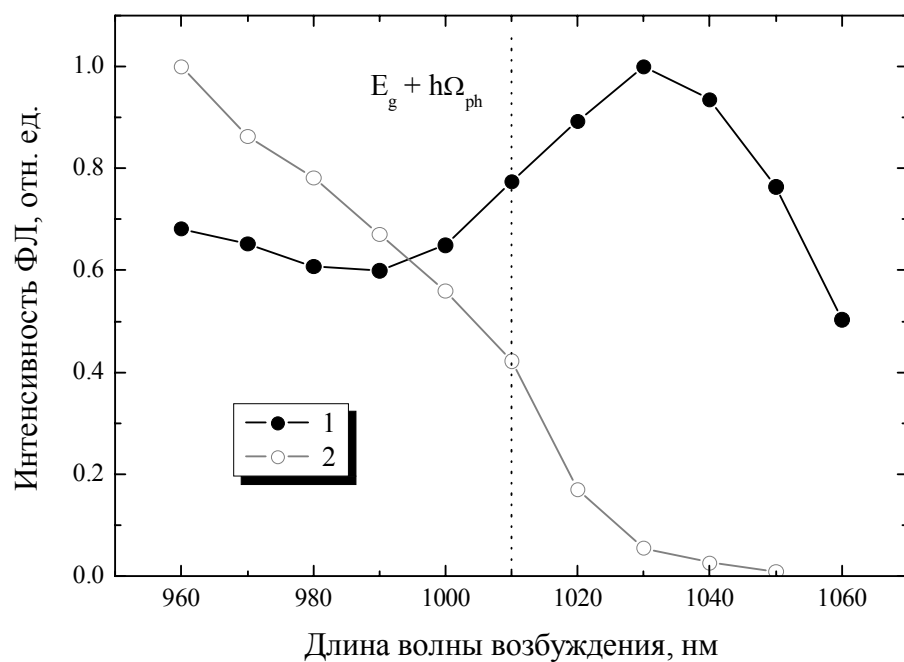


Рис.5.7. Спектры возбуждения эрбиевой (1) и экситонной (2) ФЛ при максимальной мощности возбуждающего излучения ($P = 50$ мВт). $T = 77$ К.

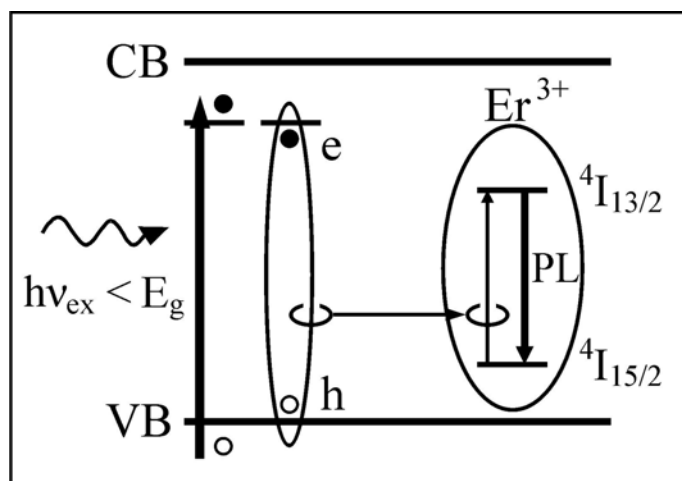


Рис.5.8. Схема механизма возбуждения ионов эрбия в структурах Si:Er/Si при $h\nu_{ex} < E_g$, предложенная в работах [A4,A5].

В рамках предложенного механизма подзонного возбуждения ионов эрбия в кремнии возрастание интенсивности эрбиевой ФЛ при увеличении длины волны возбуждения в области $\lambda_{ex} = 1000-1030$ нм объяснялось интенсивным безызлучательным оже-девозбуждением ионов Er свободными носителями заряда, возникающими в условиях межзонного возбуждения структур Si:Er/Si. Предполагалось, что увеличение длины волны возбуждения вблизи края межзонного поглощения кремния сопровождается резким снижением скорости генерации свободных носителей заряда и приводит к подавлению девозбуждения ионов эрбия и возрастанию интенсивности эрбиевой ФЛ.

Для проверки данной гипотезы был проведен следующий эксперимент. Спектры возбуждения эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si были измерены при одновременном возбуждении исследуемых структур двумя источниками импульсного излучения. Длина волны первого источника изменялась в широком спектральном диапазоне ($\lambda_{ex1} = 900-1400$ нм) как при стандартных исследованиях спектров возбуждения эрбиевой ФЛ, описанных выше. Длина волны второго источника λ_{ex2} лежала в области межзонного поглощения кремния и составляла 960 нм. Мощность излучения обоих источников составляла ~ 50 мВт, т.е. соответствовала максимальной мощности накачки при регистрации спектров возбуждения эрбиевой ФЛ с одним источником излучения. Импульсы излучения двух источников были синхронизованы между собой и одновременно попадали на исследуемую структуру Si:Er/Si. На рис.5.9 представлена зависимость интенсивности эрбиевой ФЛ от длины волны первого источника излучения λ_{ex1} при включенном втором источнике. Пунктиром отмечен уровень сигнала эрбиевой ФЛ, получаемый при возбуждении только вторым источником излучения на длине волны $\lambda_{ex2} = 960$ нм. Этот уровень соответствует интенсивности эрбиевой ФЛ в условиях насыщения при межзонном импульсном оптическом возбуждении.

Как видно из приведенной зависимости, пик в спектре возбуждения эрбиевой ФЛ вблизи края межзонного поглощения кремния наблюдался и в условиях дополнительного интенсивного межзонного возбуждения исследуемых структур Si:Er/Si. Таким образом, значительное увеличение концентрации свободных носителей заряда в структуре, вызванное дополнительной импульсной межзонной подсветкой, практически не влияло на интенсивность сигнала эрбиевой ФЛ в максимуме пика на длине волны 1030 нм. Аналогичный результат был получен при исследовании спектра возбуждения эрбиевой ФЛ в условиях дополнительного возбуждения структуры Si:Er/Si непрерывным излучением видимого диапазона (532 нм). Полученные результаты опровергают гипотезу о связи возрастания интенсивности эрбиевой ФЛ в области $\lambda_{ex} = 1000-1030$ нм со снижением безызлучательного оже-девозбуждения ионов эрбия свободными носителями заряда в кремнии.

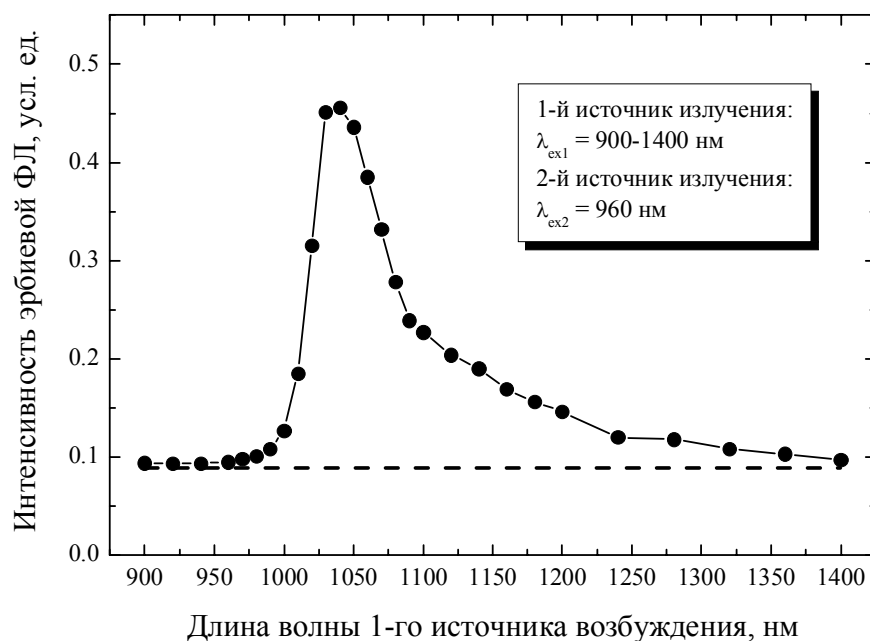


Рис.5.9. Спектр возбуждения эрбиевой ФЛ структуры Si:Er/Si при дополнительной накачке импульсным излучением на длине волны 960 нм. Мощность обоих источников возбуждения ~ 50 мВт. $T = 77$ К. Пунктиром отмечен уровень сигнала ФЛ, при возбуждении только вторым источником (960 нм).

Дальнейшие исследования межзонной (экситонной) ФЛ в структурах Si:Er/Si показали, что при высокой мощности излучения накачки, несмотря на резкое падение интенсивности экситонной ФЛ с увеличением длины волны возбуждения вблизи края межзонного поглощения кремния (см. рис.5.7), генерация экситонов в исследуемых структурах Si:Er/Si осуществляется и при энергиях кванта возбуждающего излучения существенно меньших ширины запрещенной зоны кремния ($\lambda_{ex} > 1060$ нм). На рис.5.10 приведен спектр межзонной ФЛ кремния, полученный при длине волны возбуждения 1300 нм, т.е. при энергии фотона излучения накачки существенно (более чем на 200 мэВ) меньшей ширины запрещенной зоны кремния. Полученный спектр ФЛ соответствует излучательной рекомбинации свободных экситонов в кремнии с испусканием ТО-фонона [45]. Генерация экситонов в данных условиях происходит, по-видимому, в результате двухступенчатого процесса поглощения возбуждающего излучения с участием дефектно-примесных уровней в запрещенной зоне кремния, что подтверждается сверхлинейной зависимостью интенсивности экситонной ФЛ от мощности излучения накачки при $\lambda_{ex} = 1300$ нм (рис.5.11(б)).

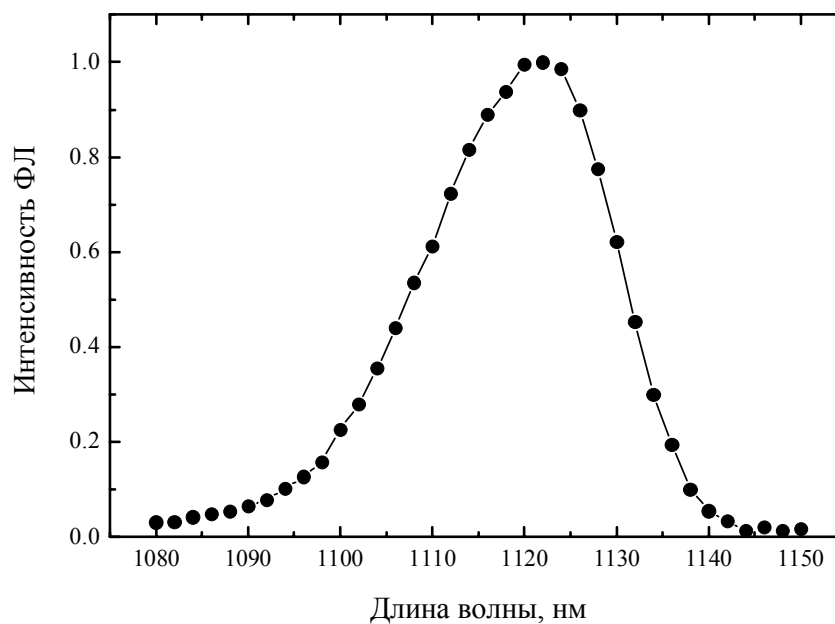
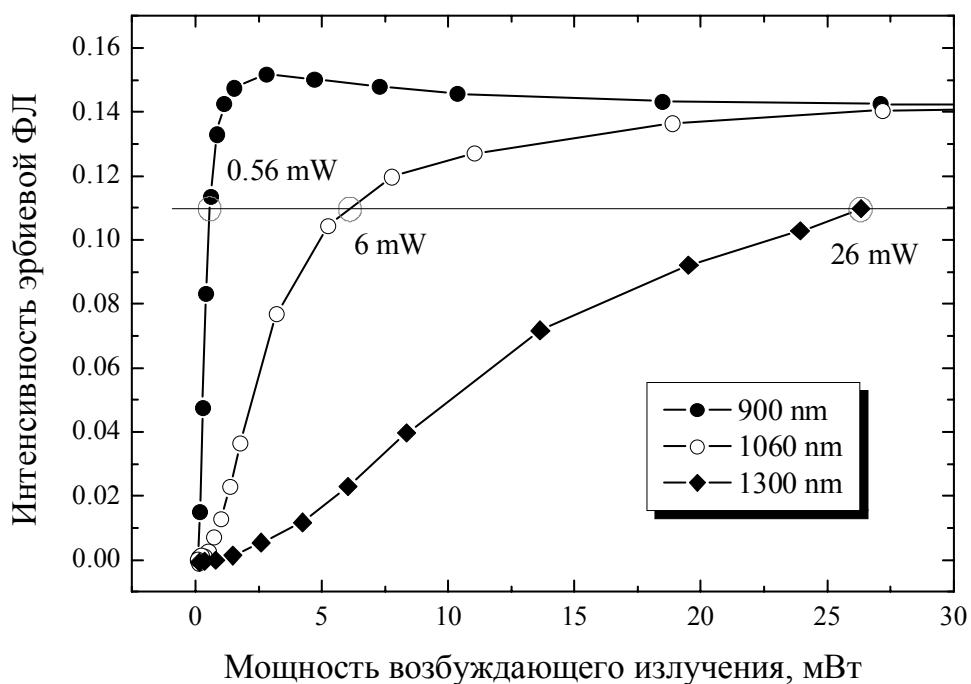
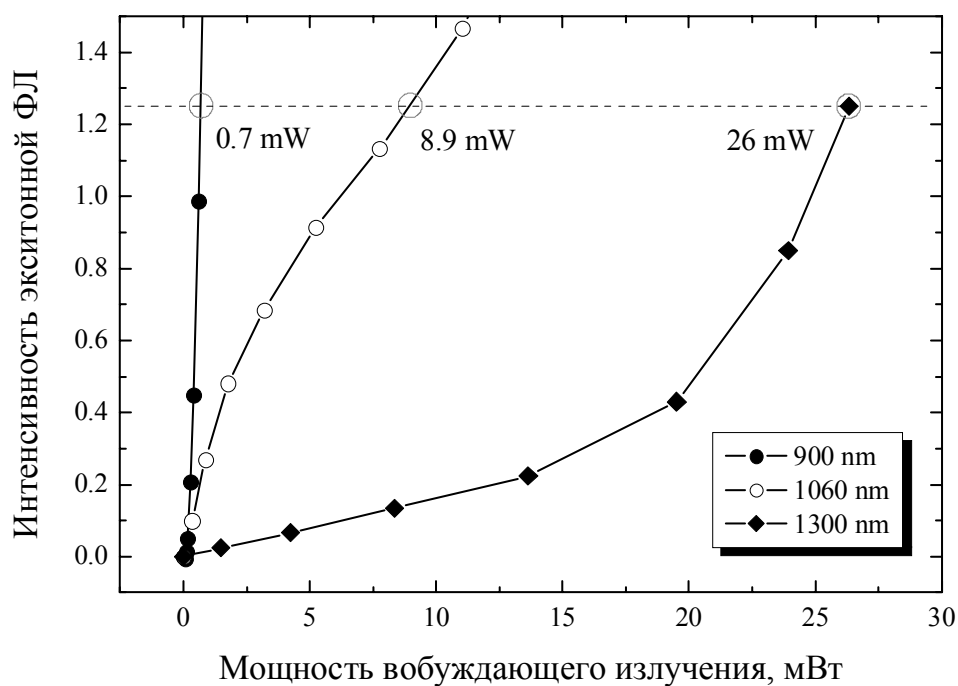


Рис.5.10. Спектр экситонной ФЛ в структуре Si:Er/Si в условиях подзонного оптического возбуждения ($\lambda_{ex} = 1300$ нм). $T = 77$ К.

На рис.5.11 приведены зависимости интенсивности эрбиевой и экситонной ФЛ в структуре Si:Er/Si от мощности возбуждающего излучения при межзонном и подзонном возбуждении ($\lambda_{ex} = 900, 1060$ и 1300 нм). Из полученных зависимостей эрбиевой и экситонной ФЛ были определены значения мощности возбуждающего излучения, соответствующие одинаковой интенсивности ФЛ в условиях межзонного и подзонного возбуждения. Как видно из таблицы 2, для эрбиевой и экситонной ФЛ наблюдается практически одинаковое соотношение полученных значений мощности возбуждения, т.е. одинаковой интенсивности эрбиевой ФЛ при межзонном и подзонном возбуждении соответствует практически одинаковая концентрация экситонов в исследуемых структурах Si:Er/Si. Этот результат свидетельствует о том, что возбуждение ионов эрбия в кремнии при подзонной оптической накачке осуществляется, как и в случае межзонного возбуждения, вследствие генерации в исследуемых структурах свободных электронно-дырочных пар и образования экситонов. Таким образом, при энергиях фотона меньших E_g , как и при межзонной накачке реализуется экситонный механизм возбуждения ионов эрбия в кремнии. Сделанный вывод не объясняет, однако, возникновение пика в спектре возбуждения эрбиевой ФЛ на краю межзонного поглощения кремния. Далее мы рассмотрим причину появления данного пика в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/Si.



а)



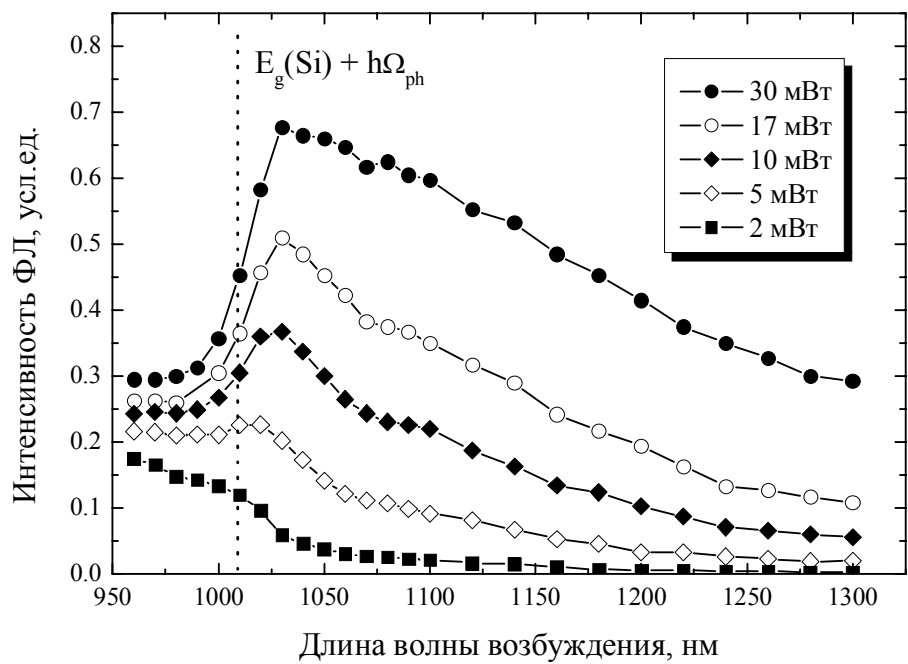
б)

Рис.5.11. Зависимости интенсивности эрбиевой (а) и экситонной (б) ФЛ в структуре Si:Er/Si от мощности возбуждающего излучения при $\lambda_{ex} = 900, 1060$ и 1300 нм. $T = 77$ К.

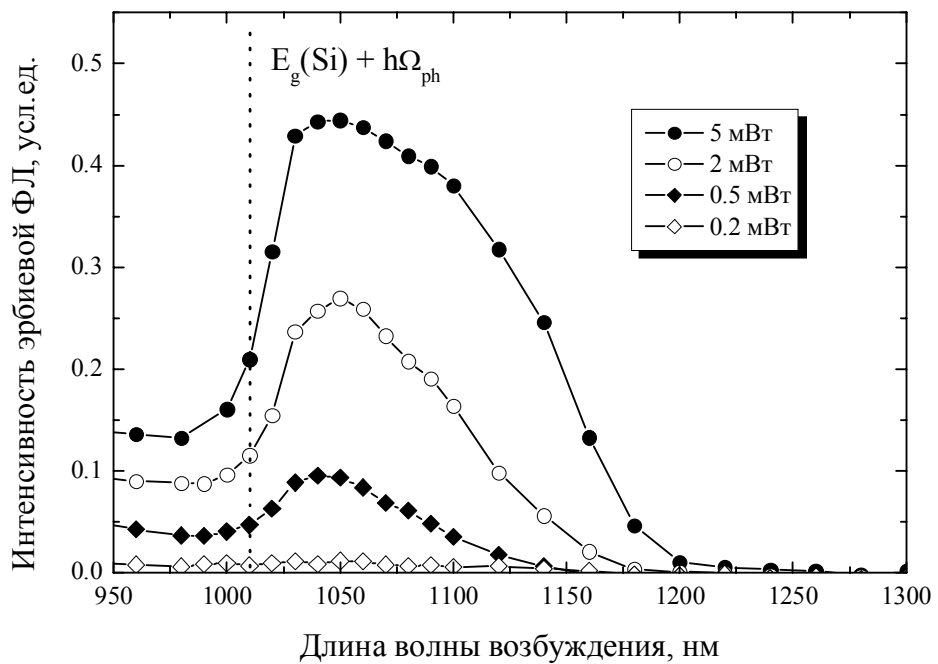
	900 нм	1030 нм	1300 нм
ФЛ эрбия	0.56 мВт	6 мВт	26 мВт
Экситонная ФЛ	0.7 мВт	8.9 мВт	26 мВт

Таблица 2. Значения мощности возбуждающего излучения на длинах волн возбуждения 900 нм, 1030 нм и 1300 нм, соответствующие одинаковой интенсивности сигнала ФЛ, полученные для эрбиевой и экситонной ФЛ.

Наряду со структурами Si:Er/Si спектры возбуждения эрбиевой ФЛ были исследованы в структурах Si:Er/SOI и SiGe:Er/Si (рис.5.12). Первый тип структур представлял собой эпитаксиальные слои Si:Er, выращенные на подложках "кремний-на-изоляторе" (см. раздел 3.4). В разделе 4.6 указывалось, что основное отличительное свойство таких структур по сравнению со структурами Si:Er/Si состоит в том, что эпитаксиальный слой Si:Er изолирован от кремниевой подложки слоем SiO₂ и в таких структурах невозможна диффузия носителей заряда из подложки в активный слой Si:Er. Второй тип структур представлял собой осажденные на кремниевую подложку эпитаксиальные слои SiGe, легированные эрбием [A1,A12]. Содержание германия в структурах составляло ~ 30%. Как видно из рис.5.12, в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ указанных структур, как и в структурах Si:Er/Si, наблюдался интенсивный пик с максимумом в области 1030-1040 нм. Необходимо обратить особое внимание на то, что во всех рассмотренных структурах, в том числе и в структуре SiGe:Er/Si, положение коротковолнового края пика в спектре возбуждения эрбиевой ФЛ было одинаковым и соответствовало краю собственного поглощения объемного кремния, несмотря на то, что ширина запрещенной зоны в слое SiGe с содержанием германия ~ 30% существенно (на 180 нм) отличалась от ширины запрещенной зоны кремния. Этот результат указывал на то, что возникновение пика в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ должно быть связано с особенностью поглощения возбуждающего излучения в кремниевой подложке. В то же время, наблюдение аналогичного пика в спектрах возбуждения структур Si:Er/SOI означало, что возникновение данного пика не может быть объяснено влиянием диффузии носителей заряда из кремниевой подложки в активный слой Si:Er.



а)



б)

Рис.5.12. Спектры возбуждения эрбиевой ФЛ в структурах Si:Er/SOI (а) и SiGe:Er/Si (б) при различных значениях мощности возбуждения. $T = 77$ К.

В ходе проводимых экспериментов по спектроскопии возбуждения эрбиевой ФЛ было замечено, что интенсивность пика вблизи края собственного поглощения кремния существенно зависит от размеров исследуемых образцов и размера пятна возбуждающего излучения. В связи с этим мы предположили, что появление пика в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ связано с увеличением области активного слоя Si:Er, возбуждаемой при энергиях кванта, меньших ширины запрещенной зоны кремния, когда кремниевая подложка становится прозрачной для возбуждающего излучения. В этом случае излучение накачки может эффективно распространяться в объеме структуры вследствие многократного отражения от границ образца и возбуждать ионы эрбия в областях активного слоя Si:Er, расположенных вне пятна лазерного излучения.

Для проверки этой гипотезы был проведен следующий опыт. Поверхность структуры Si:Er/Si размером $\sim 10 \times 10$ мм была закрыта алюминиевой фольгой как со стороны активного слоя, так и со стороны кремниевой подложки. С обеих сторон образца в фольге были сделаны отверстия размером $\sim 1 \times 1$ мм, разнесенные на расстояние ~ 10 мм (см. рис.5.13 и вставку к рис.5.14). На одно из отверстий направлялся луч возбуждающего излучения, со второго осуществлялась регистрация сигнала эрбиевой ФЛ (рис.5.13). Особенность описанной схемы измерения состоит в том, что сигнал ФЛ в этой схеме может быть зарегистрирован только в результате распространения возбуждающего излучения или излучения ионов эрбия внутри исследуемой структуры Si:Er/Si на расстояние ~ 10 мм. Разнесение "входной" и "выходной" апертур на указанное расстояние позволяет исключить из рассмотрения возможность диффузии носителей заряда из области возбуждения в область регистрации сигнала ФЛ. На рис.5.14 приведены спектры возбуждения эрбиевой ФЛ, измеренные при возбуждении со стороны активного слоя Si:Er (конфигурация 1) и со стороны Si подложки (конфигурация 2).

Рассмотрим полученные спектры возбуждения ФЛ. При возбуждении структуры межзонным излучением ($\lambda_{ex} = 800-1000$ нм) носители заряда (и ионы эрбия) могут возбуждаться только вблизи входной апертуры. Наблюдение заметного сигнала эрбиевой ФЛ при возбуждении в данной области спектра свидетельствует об эффективном распространении излучения ионов эрбия (на длине волны 1535 нм) из области возбуждения до выходной апертуры. Отметим, что в конфигурации 2, т.е. при возбуждении со стороны подложки возбуждение ионов эрбия в случае межзонной накачки происходит вследствие диффузии носителей заряда на расстояние, определяемое толщиной кремниевой подложки (~ 400 мкм), а также глубиной проникновения излучения в структуру. Поэтому с увеличением длины волны возбуждения (т.е. глубины проникновения излучения накачки в структуру) в области 800-1000 нм наблюдается монотонное возрастание интенсивности эрбиевой ФЛ.

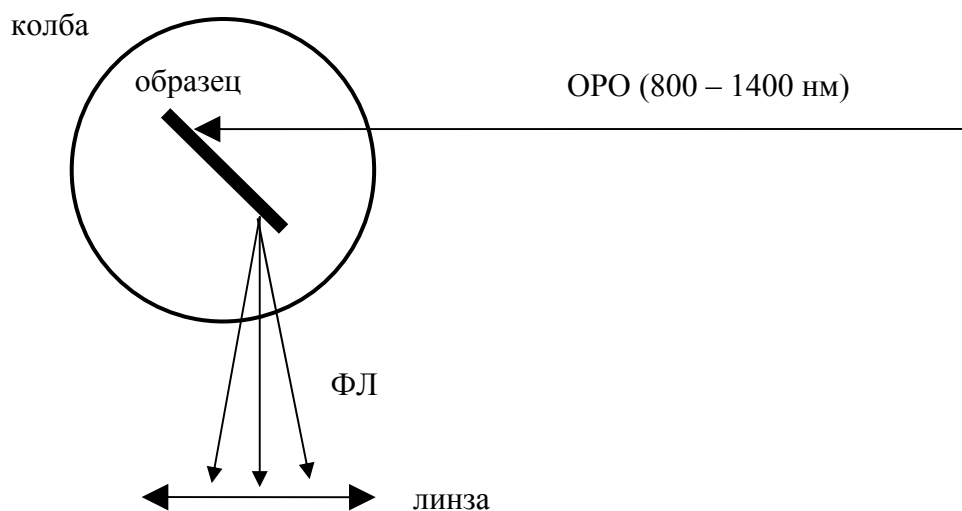


Рис.5.13. Схема эксперимента "с двумя апертурами".

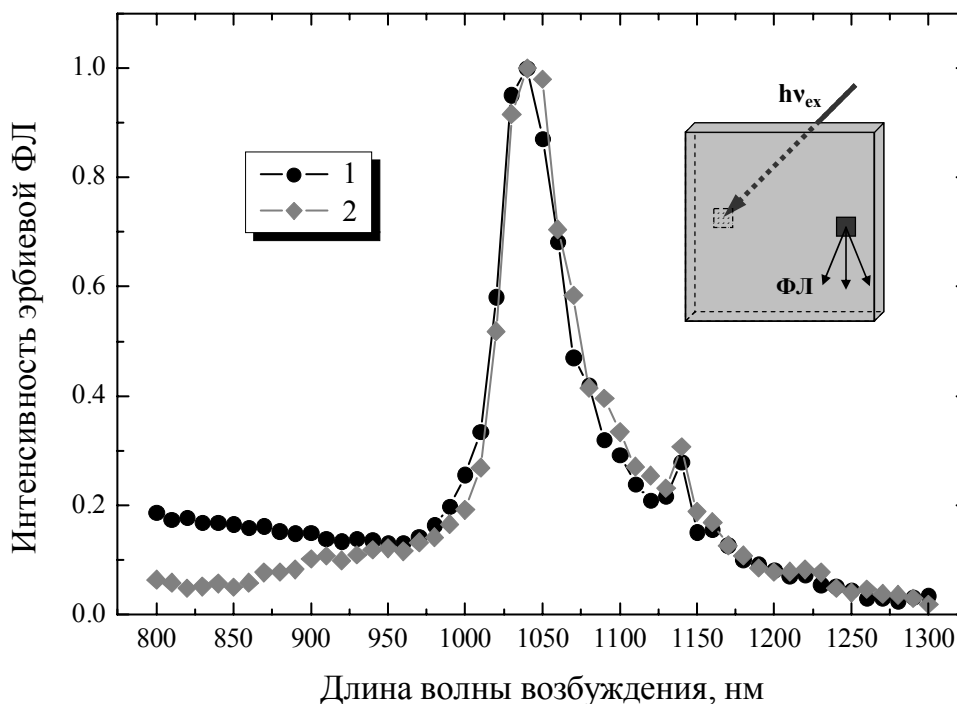


Рис.5.14. Спектры возбуждения эрбиевой ФЛ в структуре Si:Er/Si, полученные в схеме с двумя апертурами, при возбуждении со стороны активного слоя Si:Er (1) и со стороны Si подложки (2). Спектры нормированы на максимальное значение сигнала ФЛ. На вставке: схема эксперимента. $T = 77$ К.

Резкое (более чем на порядок) возрастание сигнала эрбиевой ФЛ в области 1000-1030 нм по сравнению с областью межзонного возбуждения свидетельствует о том, что в условиях подзонного возбуждения излучение накачки (также как и излучение ионов эрбия) эффективно распространяется в структурах Si:Er/Si и возбуждает ионы эрбия во всем объеме активного слоя, как вблизи "входной" апертуры, так и в остальных областях структуры. Аналогичный эффект приводит к возникновению пика в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ при стандартной схеме измерения (возбуждение и регистрация сигнала ФЛ со стороны активного слоя Si:Er), если возбуждающее излучение засвечивает небольшую часть поверхности исследуемой структуры, особенно в случае фокусировки пучка возбуждающего излучения.

Для подтверждения сделанного вывода из образца Si:Er/Si был выколот чип размером 2x2 мм, что позволило измерить спектр возбуждения эрбиевой ФЛ при однородной засветке всей поверхности активного слоя Si:Er без снижения максимальной плотности мощности возбуждающего излучения. Полученный спектр возбуждения приведен на рис.5.15 (кривая 2). Как видно из рисунка, при возбуждении всей площади активного слоя наблюдается монотонное падение интенсивности эрбиевой ФЛ с ростом длины волны возбуждения, и пик в спектре возбуждения эрбиевой ФЛ отсутствует.

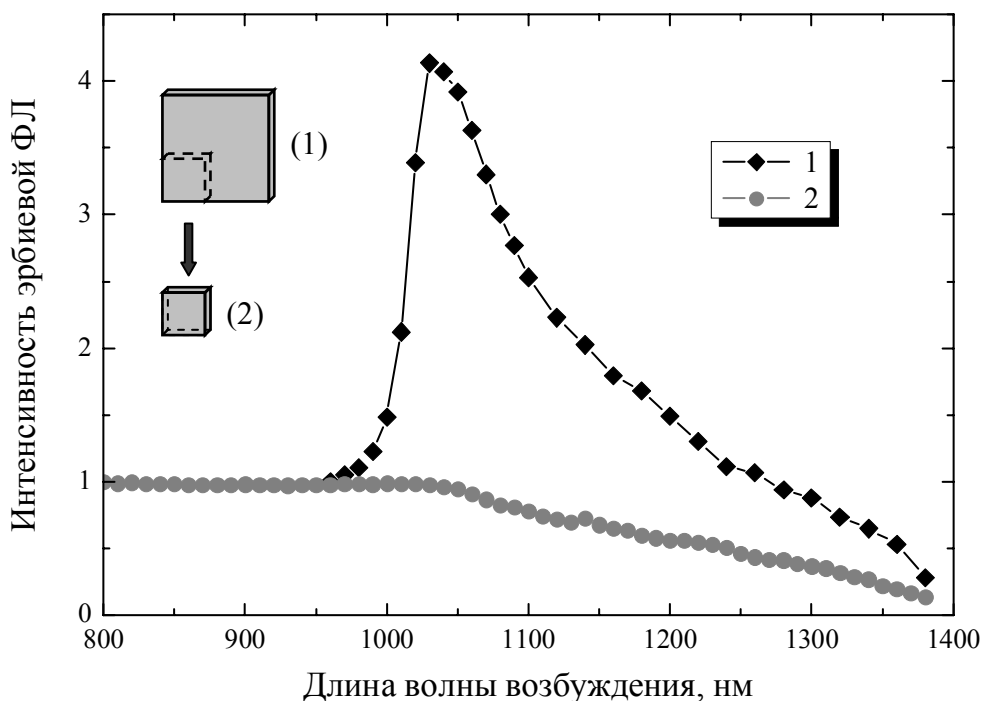


Рис.5.15. Спектры возбуждения эрбиевой ФЛ в структуре Si:Er/Si при высокой мощности оптической накачки (30 мВт): 1 – структура 10x10 мм, пятно возбуждения ~ 2 мм; 2 – размер образца – 2x2 мм, однородное возбуждение поверхности структуры. T = 77 К.

Расчет спектров возбуждения ФЛ эрбия для случаев однородной засветки и засветки части структуры Si:Er/Si подтверждает, что неоднородное возбуждение является причиной возникновения пика в спектрах возбуждения ФЛ. При моделировании в случае неоднородного возбуждения рассматривался образец Si:Er/Si размером 10 мм с диаметром пятна возбуждающего излучения 2 мм и предполагалось, что сигнал ФЛ равен сумме сигналов из пятна засветки (P_1) и "темной" части образца (P_2). Считалось что сигнал ФЛ эрбия P_2 возбуждается излучением, прошедшим через кремниевую подложку и отраженным от обратной (неосвещенной) стороны образца. В расчете использовались зависимость сигнала ФЛ от плотности мощности накачки, приведенная в разделе 4.2 (см. таблицу 1) и экспериментальная зависимость коэффициента поглощения кремния от длины волны излучения [90], определяющая размер области возбуждения для различных длин волн. На рис.5.16(а) приведены спектры возбуждения, рассчитанные при нескольких значениях мощности оптического возбуждения. Полученные зависимости $I(\lambda_{ex})$ хорошо описывают эффект возникновения пика в спектрах возбуждения ФЛ эрбия вблизи края межзонного поглощения кремния при высоких уровнях оптического возбуждения (ср. с рис. 5.4, 5.15). В то же время, в аналогичных зависимостях $I(\lambda_{ex})$, рассчитанных для случая однородного возбуждения всей поверхности структуры Si:Er/Si, как и в измеренном спектре возбуждения ФЛ, приведенном на рис.5.15, наблюдается монотонное изменение интенсивности с ростом λ_{ex} , во всем спектральном диапазоне возбуждающего излучения (рис.5.16(б)).

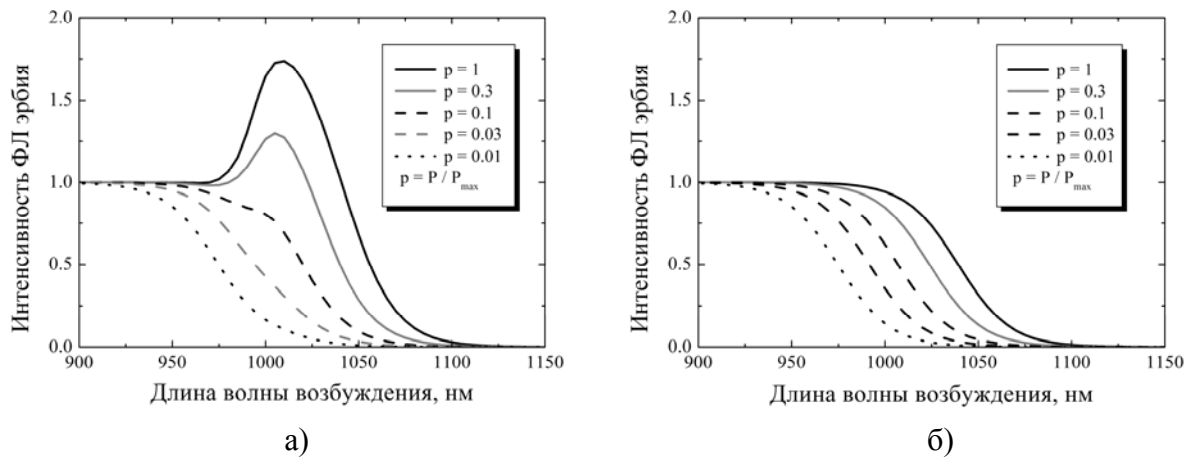


Рис.5.16. Рассчитанные спектры возбуждения ФЛ эрбия в структуре Si:Er/Si при различных значениях мощности накачки (P_{max} – максимальная мощность накачки в эксперименте):

а) размер образца – 10 мм, пятно возбуждения – 2 мм, в областях структуры, расположенных вне пятна возбуждения, ФЛ эрбия возбуждается излучением, прошедшим через кремниевую подложку в результате отражения от задней поверхности структуры;

б) размер образца – 2 мм, однородное возбуждение всей поверхности структуры.

5.3. Прямое оптическое возбуждение ионов эрбия в структурах Si:Er/Si.

Несмотря на большое число работ, посвященных исследованию излучения ионов эрбия в кремниевых структурах, механизмы возбуждения ионов эрбия через электронную подсистему кремния, а также девозбуждения ионов эрбия до сих пор остаются недостаточно изученными. В частности, исследование температурного гашения эрбиевой ФЛ в кремниевых структурах при возбуждении ионов эрбия неравновесными носителями заряда затруднено, т.к. гашение ФЛ в данных условиях определяется множеством факторов, приводящих с ростом температуры как к падению эффективности возбуждения, так и к возрастанию интенсивности безызлучательного девозбуждения ионов эрбия. Среди этих факторов можно перечислить снижение эффективности генерации экситонов, снижение вероятности связывания экситона на примесных центрах, возрастание интенсивности механизмов девозбуждения ионов эрбия, таких как оже-девозбуждение свободными носителями, процесс обратной передачи энергии от иона эрбия к электронной подсистеме кремния ("back-transfer") и т.д. В связи с этим было проведено сравнительное исследование температурного гашения эрбиевой ФЛ в условиях межзонного и прямого оптического возбуждения ионов эрбия. Во втором случае возбуждение иона эрбия осуществлялось в результате непосредственного поглощения фотона с энергией близкой к энергии излучательного перехода ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ в 4f-оболочке иона Er^{3+} без участия носителей заряда в матрице кремния. Таким образом, в данном случае удалось исключить из рассмотрения сложный многоступенчатый процесс передачи энергии от электронной подсистемы кремния к ионам эрбия.

В предыдущем разделе было показано, что при большой мощности оптического возбуждения сигнал эрбиевой ФЛ наблюдается при длинах волн возбуждающего излучения значительно меньших ширины запрещенной зоны кремния, что связывается с генерацией электронно-дырочных пар вследствие двухфотонного поглощения излучения накачки, либо двухступенчатых переходов с участием глубоких уровней в запрещенной зоне кремния. Особый интерес представляет область длин волн возбуждения 1460-1650 нм, соответствующая излучательным переходам иона эрбия (переход ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$). Исследование спектров возбуждения в данной области затруднено тем, что в этой же спектральной области осуществляется регистрация сигнала эрбиевой ФЛ. При приближении длины волны возбуждения к длине волны измеряемого сигнала ФЛ может происходить засветка детектора рассеянным лазерным излучением, имеющим гораздо более высокую интенсивность, чем измеряемый сигнал эрбиевой ФЛ. В нашей работе это препятствие было частично устранено, благодаря использованию в качестве источника возбуждающего излучения параметрического

генератора света с малой шириной линии ($\sim 1 \text{ см}^{-1}$ на длине волны 1500 нм) и низким уровнем фоновой засветки. Кроме того, разделение сигнала эрбиевой ФЛ и рассеянного лазерного излучения осуществлялось путем измерения кинетики сигнала ФЛ, поскольку рассеянное излучение имело длительность, не превышающую 10 нс, а характерное время спада эрбиевой ФЛ составляло 0.5-1 мс.

На рис.5.17 приведена методика исследования эрбиевой ФЛ в условиях прямого оптического возбуждения ионов эрбия. Ранее при исследовании спектров возбуждения эрбиевой ФЛ монохроматор устанавливался на длину волны, соответствующую максимуму сигнала ФЛ (1535 нм). Эта длина волны соответствует наиболее вероятному излучательному переходу иона эрбия с первого подуровня возбужденного состояния $^4I_{13/2}$ на первый подуровень основного состояния $^4I_{15/2}$. При записи спектров возбуждения в области, соответствующей прямой оптической накачке ионов эрбия сигнал ФЛ регистрировался на длине волны 1600 нм, отвечающей длинноволновому краю спектра эрбиевой ФЛ (рис.5.17). Этот диапазон соответствует излучательным переходам с нижнего подуровня возбужденного состояния $^4I_{13/2}$ на верхние подуровни основного состояния $^4I_{15/2}$ иона эрбия в кремниевой матрице.

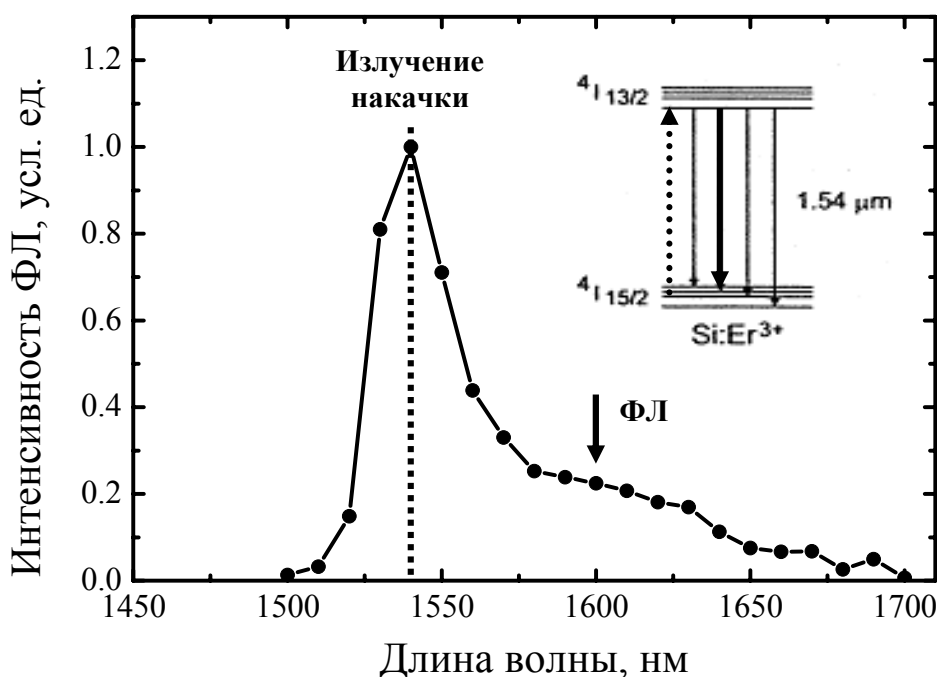


Рис.5.17. Методика исследования прямого оптического возбуждения эрбиевой ФЛ. Пунктиром обозначена длина волны возбуждения, сплошной стрелкой – длина волны измеряемого сигнала ФЛ (1600 нм). На вставке изображены соответствующие переходы между энергетическими уровнями иона эрбия.

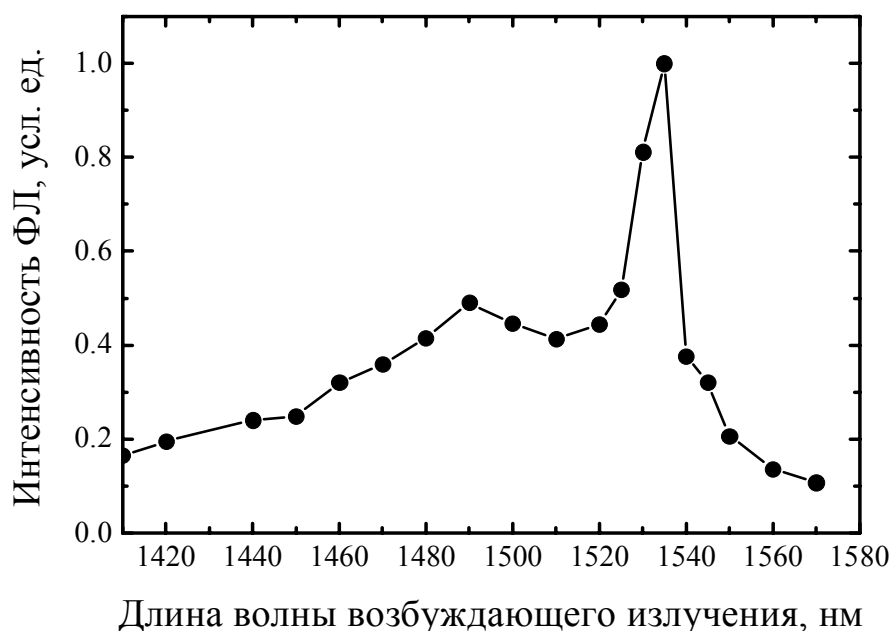
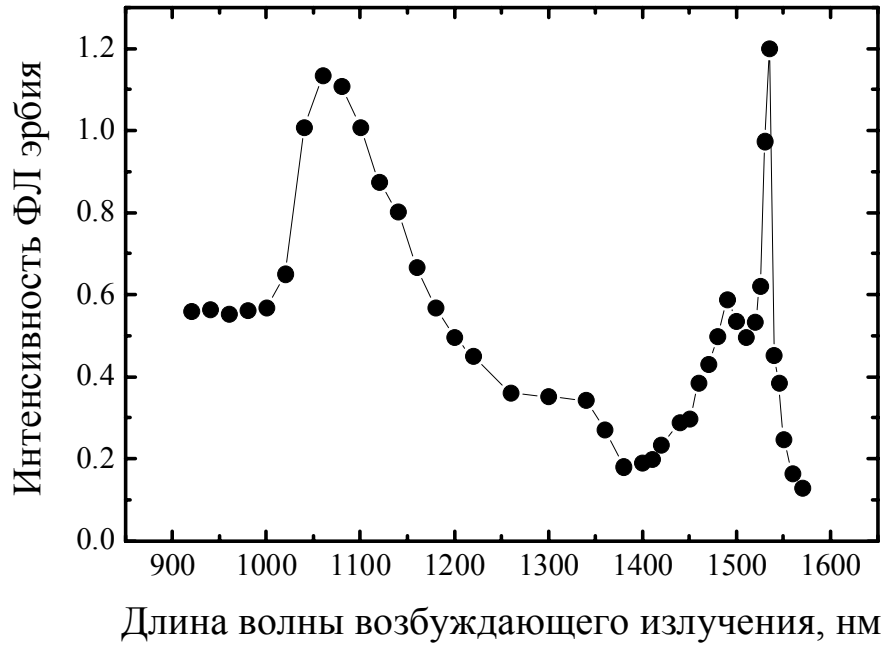


Рис.5.18. Спектр возбуждения эрбиевой ФЛ в структуре Si:Er/Si в области прямого оптического возбуждения ионов эрбия. Длина волны регистрируемого сигнала ФЛ – 1600 нм. T = 15 К.

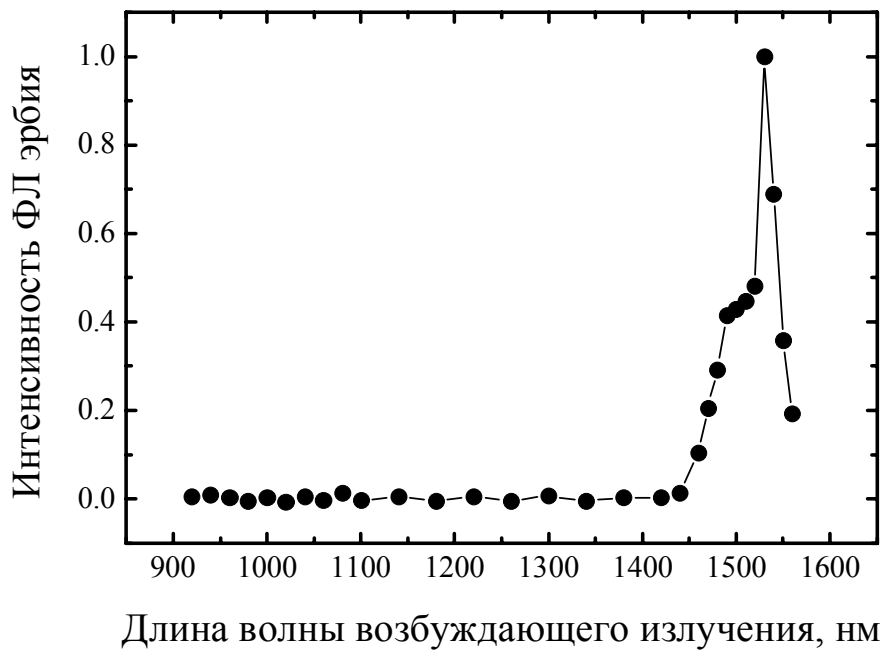
На рис.5.18 приведен спектр возбуждения эрбиевой ФЛ структуры Si:Er/Si в спектральном диапазоне, соответствующем прямому оптическому возбуждению ионов эрбия. Максимум в спектре возбуждения (1535 нм) совпадает с максимумом, наблюдаемым в спектрах ФЛ, и соответствует переходу с первого подуровня основного состояния $^4I_{15/2}$ на первый подуровень возбужденного состояния $^4I_{13/2}$. Наблюдается также второй пик (1490 нм), соответствующий переходу на более высокоэнергетические подуровни возбужденного состояния $^4I_{13/2}$.

Для сравнения сигнала эрбиевой ФЛ в различных условиях возбуждения спектр возбуждения эрбиевой ФЛ был измерен в широком диапазоне длин волн излучения накачки, включая области межзонного возбуждения ($h\nu_{ex} > E_g(\text{Si})$), "подзонного" возбуждения ($h\nu_{ex} < E_g(\text{Si})$) и прямого оптического возбуждения ($h\nu_{ex} \sim 0.8 \text{ eV}$) ионов эрбия. На рис.5.19(a) приведен спектр возбуждения, полученный при температуре 15 К и высокой мощности импульсной накачки ($\sim 10 \text{ мВт}$). Как видно из рисунка, эрбиевая ФЛ в условиях прямого оптического возбуждения превышает интенсивность ФЛ при межзонном возбуждении. На первый взгляд полученный результат является неожиданным, поскольку известно, что эффективное сечение возбуждения ионов эрбия в кремнии в условиях межзонной оптической накачки ($5 \cdot 10^{-15} - 5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ [34,36,A53]) на несколько порядков превосходит сечение прямого

оптического возбуждения ионов эрбия ($\sim 10^{-20}$ см² [35]). Следует учесть, однако, что высокая эффективность возбуждения ионов эрбия в кремнии при межзонной накачке наблюдается только при низкой мощности возбуждающего излучения, соответствующей линейному участку зависимости $I(P)$. При высоких уровнях межзонной оптической накачки эффективность возбуждения ионов эрбия оказывается существенно сниженной как из-за насыщения эрбиевой ФЛ, так и вследствие значительного безызлучательного оже-девозбуждения ионов эрбия фотосгенерированными неравновесными носителями заряда. На рис.5.20 приведены зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности накачки в условиях межзонного и прямого оптического возбуждения ионов эрбия. При межзонной накачке зависимость является сублинейной и наблюдается насыщение эрбиевой ФЛ. В случае прямого оптического возбуждения ионов эрбия интенсивность эрбиевой ФЛ линейно зависит от мощности накачки. Кроме того, в условиях прямого оптического возбуждения ($\lambda_{ex} = 1480$ нм) концентрация неравновесных свободных носителей заряда, создаваемых в структуре при поглощении возбуждающего излучения, низка, поэтому безызлучательное оже-девозбуждение ионов эрбия свободными носителями существенно подавлено по сравнению со случаем межзонной накачки. Наконец, концентрация ионов эрбия, возбуждаемых при прямом поглощении возбуждающего излучения, может оказаться существенно выше, чем концентрация эрбиевых центров, являющихся оптически активными при возбуждении экситонами в матрице кремния. Согласно литературным данным, доля эрбиевых центров, возбуждаемых в кремниевых структурах в рамках экситонного механизма составляет от 1 до 10% от общей концентрации ионов эрбия [46,47], тогда как прямое оптическое возбуждение может осуществляться для всех ионов эрбия присутствующих в исследуемых структурах. Все вышеупомянутые факторы, приводят к тому, что при достаточно высокой мощности возбуждения интенсивность эрбиевой ФЛ в условиях прямой оптической накачки может оказаться сравнимой и даже превосходить интенсивность эрбиевой ФЛ при межзонном возбуждении кремния.

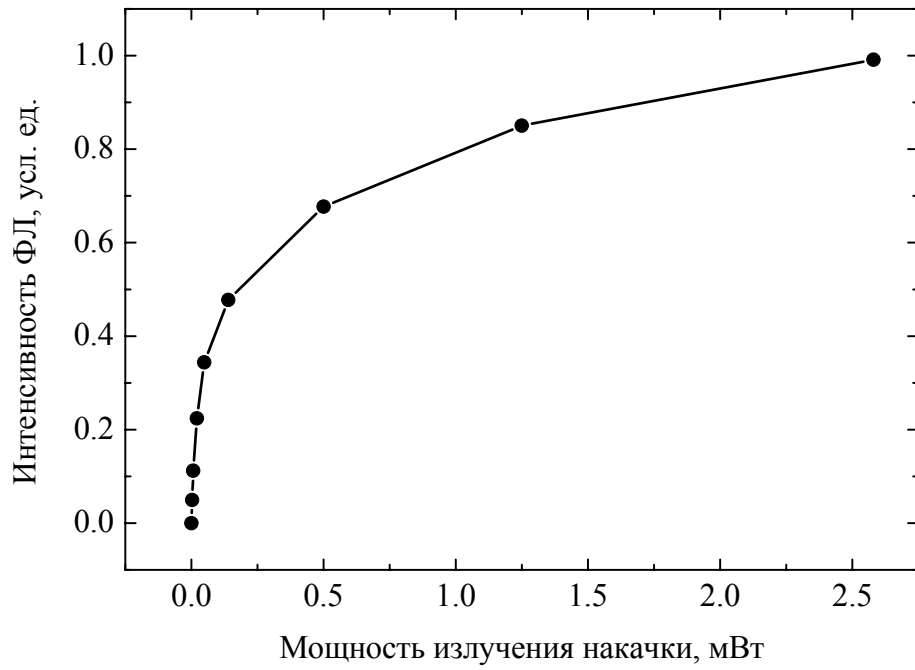


(a)

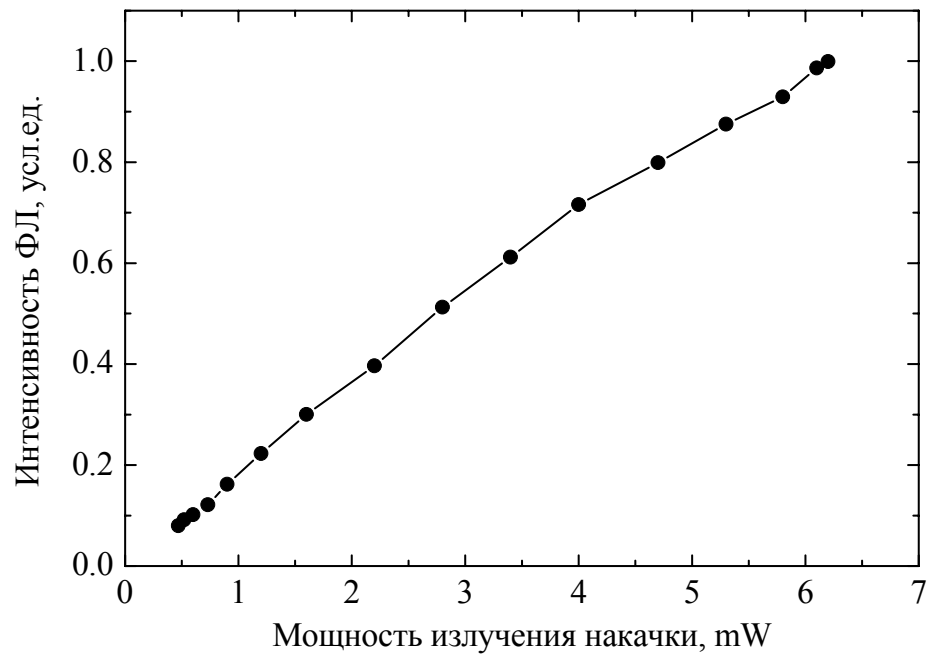


(б)

Рис.5.19. Спектры возбуждения эрбиевой ФЛ в СМЛЭ структуре Si:Er/Si при T = 15 К (a) и T = 300 К (б).



(а)



(б)

Рис.5.20. Зависимость интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности излучения накачки: (а) в условиях межзонного возбуждения ($\lambda_{\text{ex}} = 800$ нм); (б) в условиях прямого оптического возбуждения ($\lambda_{\text{ex}} = 1480$ нм). $T = 15$ К.

Явление прямого оптического возбуждения ионов эрбия является широко известным и хорошо изученным для ионов эрбия в диэлектрических матрицах. Насколько нам известно, прямое оптическое возбуждение ионов эрбия в кристаллическом кремнии ранее не наблюдалось. Полученный результат может представлять значительный интерес с точки зрения изучения механизмов температурного гашения эрбиевой ФЛ в кремниевых структурах. Дело в том, что в условиях возбуждения ионов эрбия фото-сгенерированными свободными носителями исследование температурного гашения эрбиевой ФЛ затрудняется тем, что гашение ФЛ в данных условиях определяется несколькими факторами, такими как падение эффективности возбуждения, возрастание интенсивности безызлучательного девозбуждения ионов эрбия и т.д. В случае прямой оптической накачки эффективность возбуждения ионов эрбия не должна существенно зависеть от температуры измерения и снижение интенсивности ФЛ с ростом температуры определяется только процессами девозбуждения ионов эрбия. По этой причине температурное гашение эрбиевой ФЛ в условиях прямого оптического возбуждения может быть значительно подавлено по сравнению со случаем межзонного возбуждения. Действительно, при температуре 300 К, как видно из соответствующего спектра возбуждения эрбиевой ФЛ (рис.5.19(б)), сигнал эрбиевой ФЛ в области, соответствующей возбуждению через кремниевую матрицу, отсутствует. В то же время, в условиях прямого оптического возбуждения ионов эрбия (область $\lambda_{ex} = 1450-1580$ нм) значительный сигнал эрбиевой ФЛ сохраняется вплоть до комнатной температуры.

В связи с этим было проведено сравнительное исследование температурной зависимости интенсивности и кинетики эрбиевой ФЛ в условиях прямого оптического возбуждения ионов эрбия ($\lambda_{ex} = 1480$ нм) и непрямого возбуждения с участием фото-сгенерированных носителей заряда ($\lambda_{ex} = 800$ нм).

5.4. Температурное гашение эрбиевой ФЛ в условиях межзонного и прямого оптического возбуждения.

В данном разделе приводятся результаты сравнительного исследования температурной зависимости эрбиевой ФЛ в условиях межзонного и прямого оптического возбуждения ионов эрбия в структурах Si:Er/Si. Как было показано в предыдущем разделе, зависимость интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности возбуждающего излучения в условиях межзонной накачки является нелинейной и характеризуется насыщением при высоких уровнях накачки. В связи с этим, для корректного измерения температурной зависимости эрбиевой ФЛ мощность межзонного возбуждающего излучения была снижена примерно на три порядка относительно максимального значения (до 0.05 мВт). Таким образом, температурная зависимость при межзонном возбуждении измерялась на линейном участке зависимости интенсивности ФЛ от мощности возбуждающего излучения. В условиях прямого оптического возбуждения (на длине волны 1480 нм) устанавливалась максимальная мощность накачки, которая составляла 10 мВт.

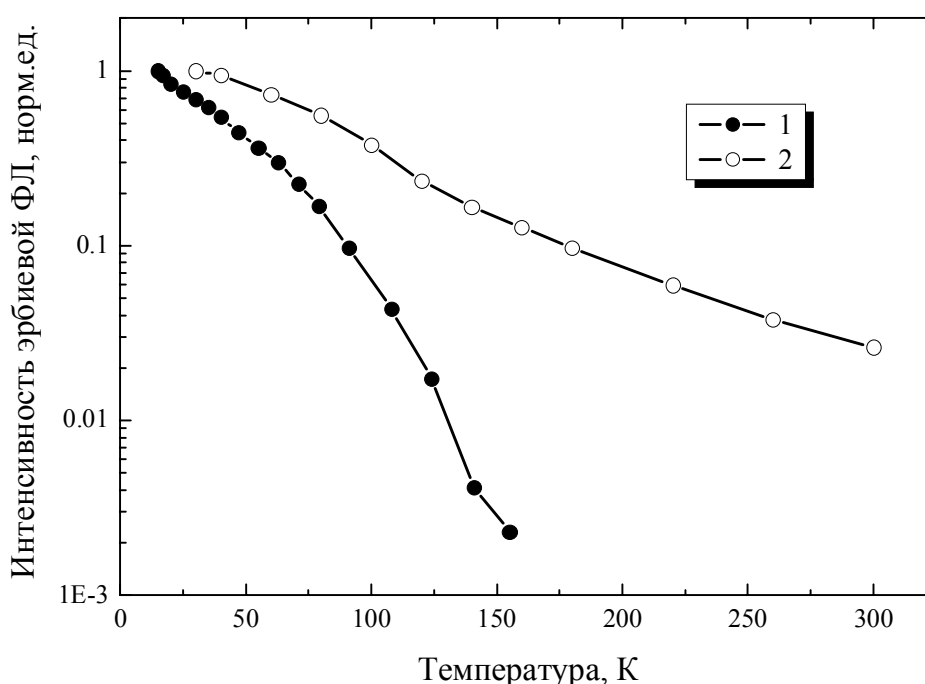


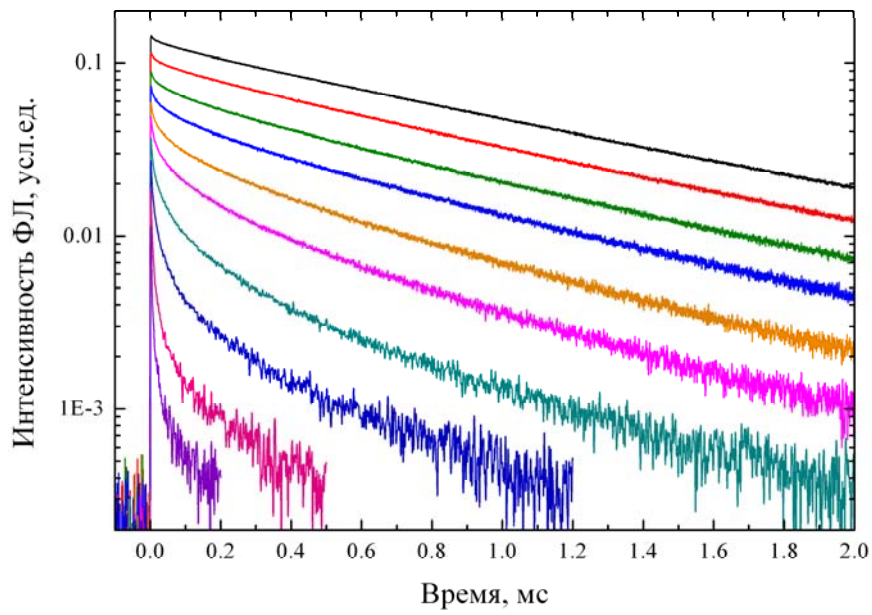
Рис.5.21. Температурные зависимости интегральной интенсивности эрбиевой ФЛ в структуре Si:Er/Si в условиях: 1 – межзонного возбуждения структур ($\lambda_{ex} = 800$ нм, $P = 0.05$ мВт); 2 – прямого оптического возбуждения ионов эрбия ($\lambda_{ex} = 1480$ нм, $P = 10$ мВт).

На рис.5.21 приведены температурные зависимости интегральной интенсивности эрбиевой ФЛ, полученные при межзонном ($\lambda_{\text{ex}} = 800 \text{ nm}$) и прямом ($\lambda_{\text{ex}} = 1480 \text{ nm}$) оптическом возбуждении ионов эрбия в структуре Si:Er/Si. Как видно из приведенного графика, при межзонном возбуждении сигнал эрбиевой ФЛ падает ниже порога обнаружения уже при температуре 160-180 К. При изменении температуры от 15 до 160 К интенсивность ФЛ падает ~ на 3 порядка. В условиях прямого оптического возбуждения наблюдается гораздо более слабое температурное гашение эрбиевой ФЛ. При увеличении температуры с 15 до 300 К падение интегральной интенсивности эрбиевой ФЛ составило ~ 50 раз.

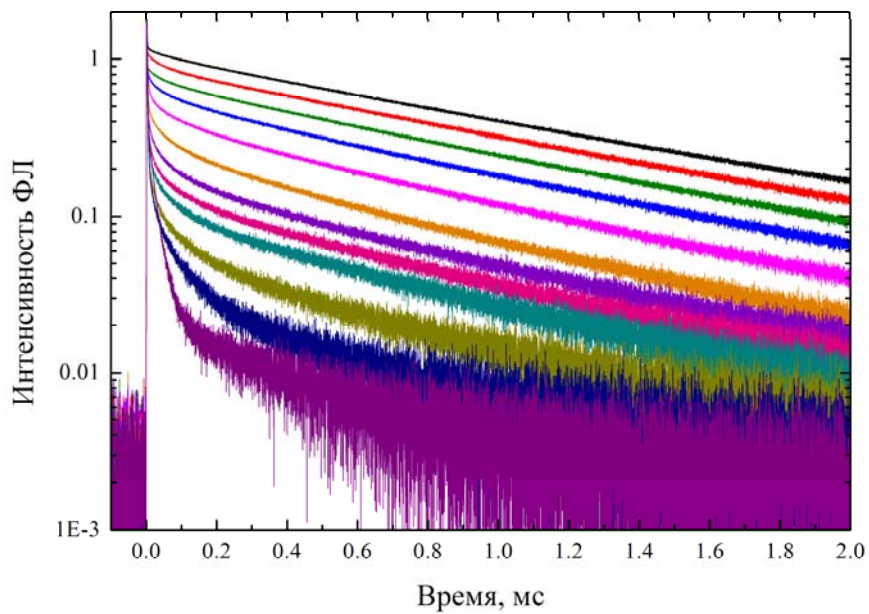
Для выяснения механизма температурного гашения в рассмотренных условиях возбуждения было проведено исследование временных зависимостей эрбиевой ФЛ при различных температурах измерения в условиях межзонного и прямого оптического возбуждения. Полученные кинетические кривые эрбиевой ФЛ приведены на рис.5.22. Необходимо отметить, что в условиях прямого оптического возбуждения сигнал ФЛ, регистрируемый во временном интервале 0-10 мкс, определялся в основном откликом детектора на рассеянное лазерное излучение близкое по длине волны к сигналу эрбиевой ФЛ. Поэтому анализ кинетики эрбиевой ФЛ в данных условиях может быть осуществлен только в области времен, превышающих ~ 100 мкс после импульса возбуждения.

При низких температурах как в условиях межзонной накачки, так и при прямом возбуждении ионов эрбия кинетика эрбиевой ФЛ может быть с хорошей точностью описана одной экспонентой с характерным временем спада ФЛ ~ 1 мс (рис.5.22). Данное значение соответствует излучательному времени жизни ионов эрбия в кремнии. При увеличении температуры наблюдается изменение вида кинетических кривых эрбиевой ФЛ. Как следует из рис.5.22(а) в условиях межзонного оптического возбуждения структур Si:Er/Si температурное гашение эрбиевой ФЛ в области 15-160 К определяется следующими двумя основными факторами:

а) падение эффективности возбуждения ионов эрбия приблизительно на порядок, что следует из снижения максимального значения интенсивности в кинетических кривых эрбиевой ФЛ (начальный участок кинетики в интервале 0-100 мкс в условиях межзонного возбуждения приведен на рис.5.23). Как было показано в главе 3, наблюдаемое падение эффективности возбуждения эрбиевой ФЛ может быть обусловлено термоактивированным отрывом экситонов, связанных на мелких примесных центрах, участвующих в возбуждении ионов эрбия в исследуемых СМЛЭ структурах Si:Er/Si.



(а)



(б)

Рис.5.22. Временные зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ при различных температурах измерения: а) межзонное возбуждение ($\lambda_{ex} = 800$ нм, $P = 0.05$ мВт); температура изменялась от 15 К (верхняя кривая) до 160 К (нижняя кривая); б) прямое оптическое возбуждение ($\lambda_{ex} = 1480$ нм, $P = 10$ мВт); температура изменялась от 15 К (верхняя кривая) до 300 К (нижняя кривая).

б) Снижение времени спада эрбиевой ФЛ, приводящее при высоких температурах к падению сигнала эрбиевой ФЛ более чем на порядок за время ~ 100 мкс после импульса лазерного излучения. Наблюдаемое уменьшение времени релаксации эрбиевой ФЛ объясняется возрастанием безызлучательного девозбуждения ионов эрбия с ростом температуры. Данное возрастание может быть вызвано как оже-девозбуждением ионов эрбия равновесными носителями заряда, концентрация которых в исследуемых структурах при высоких температурах составляет 10^{16} - 10^{17} см $^{-3}$, так и процессами обратной передачи энергии ("back-transfer").

В условиях прямого оптического возбуждения ионов эрбия ($\lambda_{ex} = 1480$ нм) интегральная интенсивность эрбиевой ФЛ уменьшается \sim в 50 раз при увеличении температуры с 15 до 300 К. Примечательно, что основной вклад в температурное гашение эрбиевой ФЛ в этих условиях, также как и при межзонной накачке, дают процессы, происходящие в течение первых 100 мкс после импульса возбуждающего излучения. Как уже было указано, анализ кинетических кривых на данном временном интервале затруднен в связи с существенным вкладом рассеянного лазерного излучения в регистрируемый сигнал ФЛ. Поэтому основной механизм, отвечающий за падение интенсивности ФЛ в условиях прямого оптического возбуждения ионов эрбия, на данный момент не определен.

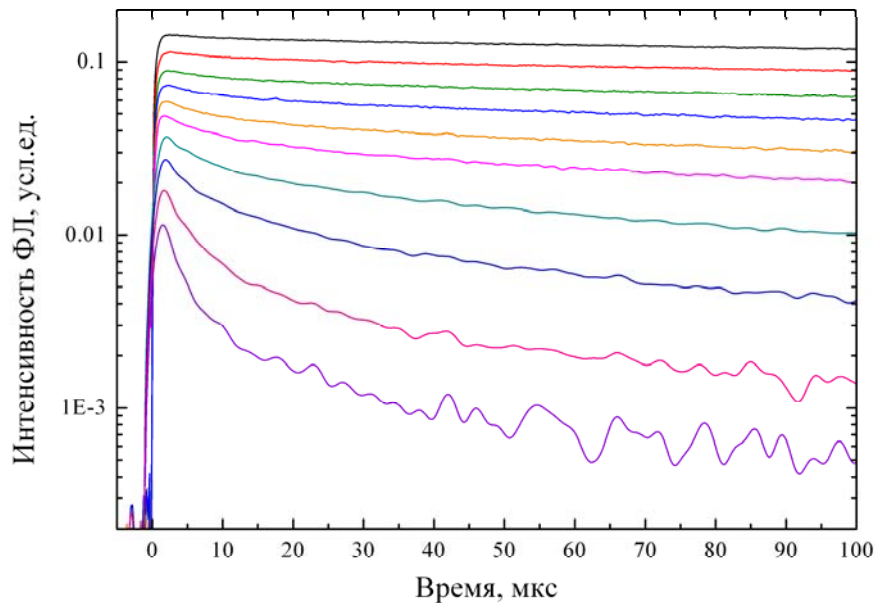


Рис.5.23. Временные зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ при различных температурах измерения, межзонное возбуждение ($\lambda_{ex} = 800$ нм, $P = 0.05$ мВт); температура изменялась от 15 К (верхняя кривая) до 160 К (нижняя кривая).

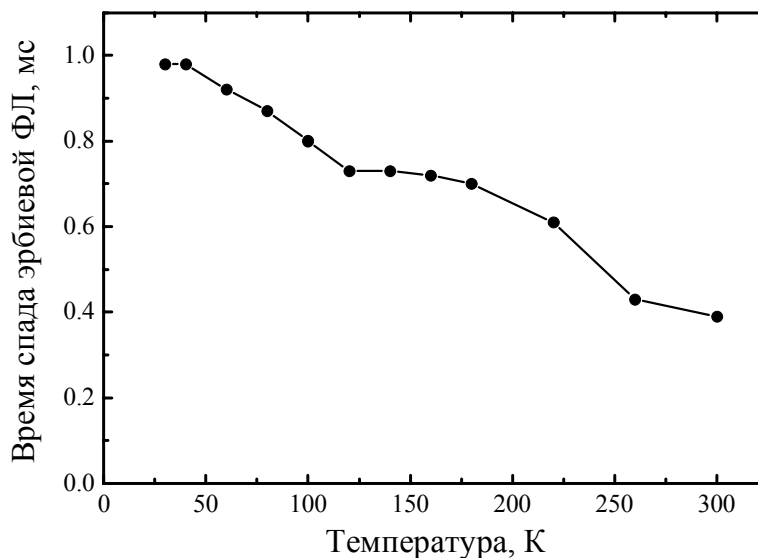


Рис.5.24. Температурная зависимость времени релаксации эрбиевой ФЛ в условиях прямого оптического возбуждения ионов эрбия ($\lambda_{ex} = 1480$ нм).

Наиболее интересным представляется тот факт, что время спада эрбиевой ФЛ (которое определялось из кинетик ФЛ на временном интервале 0.1-5 мс) очень слабо зависело от температуры измерения. В температурном интервале 15-300 К падение времени релаксации эрбиевой ФЛ составило всего 2.5 раза: от 1 мс при 15 К до 0.4 мс при 300 К (рис.5.24). 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 процессы безызлучательного девозбуждения (оже-девозбуждение равновесными носителями заряда, процесс обратной передачи энергии) являются существенно подавленными вплоть до комнатной температуры.

Одним из возможных вариантов объяснения слабого безызлучательного девозбуждения части эрбиевых центров при прямом оптическом возбуждении может быть подавленное взаимодействие этих центров с носителями заряда в кремниевой матрице, например, вследствие нахождения этих центров в SiO₂-подобных преципитатах. Такие центры не представляли бы большого интереса с точки зрения перспективы создания светоизлучающих приборов на основе кремния, легированного эрбием, поскольку для создания таких приборов необходима реализация электрического возбуждения структур Si:Er/Si, а следовательно существенное взаимодействие излучающих эрбиевых центров с электронной подсистемой кремния.

Для проверки этого предположения было исследовано влияние дополнительной подсветки структур непрерывным излучением видимого диапазона на кинетику эрбиевой ФЛ в условиях прямого оптического возбуждения при комнатной температуре. Для этого

наряду с импульсным возбуждением на длине волны 1480 нм исследуемая структура возбуждалась непрерывным лазерным излучением с длиной волны 800 нм и мощностью ~ 1 Вт. Дополнительная непрерывная накачка позволяла существенным образом изменять условия релаксации ионов эрбия, возбужденных импульсным излучением, за счет создания в структуре постоянной высокой концентрации неравновесных носителей заряда. Полученные временные зависимости эрбиевой ФЛ сравнивались с аналогичными зависимостями, измеренными в отсутствие непрерывной подсветки (рис.5.25). Было обнаружено, что включение межзонной подсветки приводит к значительному (приблизительно в 2 раза) снижению времени спада эрбиевой ФЛ. Полученный результат означает, что эрбиевые центры, излучающие при комнатной температуре в условиях прямого оптического возбуждения, могут эффективно взаимодействовать со свободными носителями заряда, образующимися в исследуемых структурах при поглощении видимого излучения. Это свидетельствует о потенциальной возможности возбуждения указанных эрбиевых центров как в условиях прямой оптической накачки, так и через электронную подсистему кремния, что, наряду со слабым температурным гашением, делает эти центры перспективными для реализации светоизлучающих структур на основе кремния, легированного эрбием.

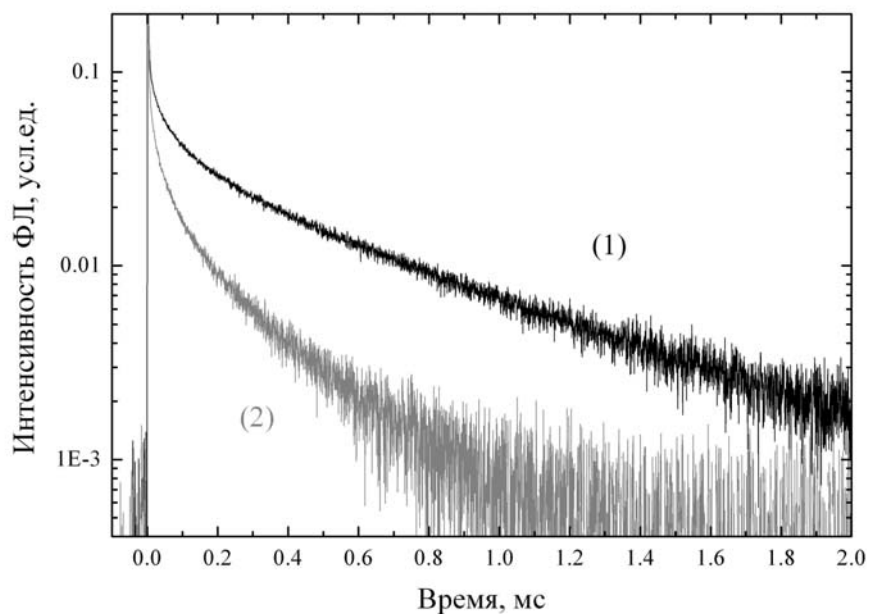


Рис.5.25. Временные зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ в условиях прямого оптического возбуждения эрбия ($\lambda_{\text{ex}} = 1480$ нм) без дополнительной подсветки (1) и при подсветке структуры непрерывным лазерным излучением видимого диапазона ($\lambda = 800$ нм) (2). $T = 300$ К.

5.5. Выводы к Главе 5.

Показано, что в структурах Si:Er/Si, Si:Er/SOI и SiGe:Er/Si сигнал эрбиевой ФЛ наблюдается в широком диапазоне длин волн возбуждающего излучения, включая область энергий кванта меньших ширины запрещенной зоны кремния ($h\nu_{ex} < E_g$). Установлено, что при подзонной оптической накачке кремниевых структур, легированных эрбием, 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 [A5-A6, A11, A12, A53].

При высоких уровнях импульсной оптической накачки в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ наблюдается интенсивный пик вблизи края межзонного поглощения кремния с максимумом на длине волны 1030 нм. Возникновение данного пика в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ связано с увеличением области возбуждения (и числа возбуждаемых эрбиевых центров) при переходе к подзональному излучению накачки ($\lambda_{ex} > 1020$ нм) с низким коэффициентом поглощения в кремнии, вследствие эффективного распространения возбуждающего излучения в объеме исследуемых структур [A4-A6, A11, A12, A53].

Впервые проведено исследование 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). 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 [A10, A38, A40].

Исследовано влияние подсветки структур Si:Er/Si непрерывным межзонным излучением на кинетику эрбиевой ФЛ в условиях прямого оптического возбуждения ионов эрбия. Продемонстрировано эффективное взаимодействие эрбиевых центров, возбуждаемых при прямой оптической накачке, с электронной подсистемой матрицы кремния [A38, A40].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенных в диссертационной работе исследований оптических свойств эпитаксиальных структур Si:Er/Si можно сформулировать следующим образом:

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 мс 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 ($\lambda_{\text{ex}} > 1020$ 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 ~ 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 ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ (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.

В заключение считаю своим приятным долгом выразить благодарность моему научному руководителю Андрееву Борису Александровичу за внимание, чуткое руководство и интересные научные дискуссии при выполнении данной работы. Также хочу выразить глубокую признательность большому коллективу сотрудников ИФМ РАН (Красильнику Захарию Фишелевичу, Крыжкову Денису Игоревичу, Шмагину Вячеславу Борисовичу, Антонову Александру Владимировичу, Кудрявцеву Константину Евгеньевичу, Сергееву Сергею Михайловичу, Степиховой Маргарите Владимировне, Красильниковой Людмиле Владимировне) за неоценимую помощь в выполнении данной работы. Хочу выразить благодарность Кузнецову Виктору Павловичу и Шенгурову Дмитрию Владимировичу за изготовление структур Si:Er/Si и Si:Er/SOI, исследовавшихся в данной работе.

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 фотолюминесценции структур Si_{1-x}Ge_x: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.Gregorkievicz // *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.Gregorkievicz // *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.Krasil'nik, 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.Krizhkov, 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 фото-люминесценции 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 "Нанопотоника". 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 фотолуминесценции 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 "Нанопотоника". 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 "Нанопотоника". 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.Yablonsky // 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 "Нанопотоника и наноэлектроника". 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 "Нанопотоника и наноэлектроника". 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, Т.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, Т.Gregorkiewicz, W.Jantsch // Материалы Симпозиума "Нанопизика и нанозлектроника". 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, Т.Gregorkiewicz, Ng.Ng.На // Тезисы V Международной конференции "Кремний-2008". Черногловка. 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, Т.Gregorkiewicz, W.Jantsch // Тезисы V Международной конференции "Кремний-2008". Черногловка. 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 "Нанопизика и нанозлектроника". 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.Na // 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 "Нанопизика 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, T.Gregorkiewicz, N.N.На // Материалы XIV Международного симпозиума "Нанопизика 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 "Нанопизика и нанозлектроника". 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 фотолюминесценции 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 "Нанопизика и нанопэлектроника". 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 "Нанопизика и нанопэлектроника". 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.

Список цитируемой литературы

- [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] T.Suemasu. Room temperature 1.6 μm electroluminescence from a Si-based light emitting diode with $\beta\text{-FeSi}_2$ active region / T.Suemasu, Y.Hegishi, K.Takakura and F.Hasegawa // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2000. V.39. P.L1013.
- [4] V.Kveder. Room-temperature silicon light-emitting diodes based on dislocation luminescence / V.Kveder, M.Badylevich, E.Steinman and A.Izotov // *Appl. Phys. Lett.* 2004. V.84. №12. P.2106.
- [5] R.Apertz. Photoluminescence and electroluminescence of SiGe dots fabricated by island growth / R.Apertz, L.Vescan, A.Hartmann, C.Dieker, H.Luth // *Appl. Phys. Lett.* 1995. V.66. P.445.
- [6] H.Sunamura. Island formation during growth of Ge on Si(100): A study using photoluminescence spectroscopy / H.Sunamura, N.Usami, Y.Shiraki, S.Fukatsu // *Appl. Phys. Lett.* 1995. V.66. P.3024.
- [7] Б.А.Андреев. Оптически активные центры в кремнии, легированном эрбием в процессе сублимационно-лучевой эпитаксии / Б.А.Андреев, А.Ю.Андреев, Д.М.Гапонова, З.Ф.Красильник, А.В.Новиков, М.В.Степихова, В.Б.Шмагин, В.П.Кузнецов, Е.А.Ускова, S.Lanzerstorfer // *Известия АН. Сер. физическая.* 2000. Т.64. №2. С.269.
- [8] S.Brehme. Hall effect and resistivity of $\beta\text{-FeSi}_2$ thin films and single crystals / S.Brehme, P.Lengsfeld, P.Stauss, H.Lange, W.Fuhs // *J. Appl. Phys.* 1998. V.84. P.3187.
- [9] A.Rizzi. Heteroepitaxy of beta - FeSi_2 on Si by gas-source MBE / A.Rizzi, B.N.E.Rösen, D.Freundt, Ch.Dieker, H.Lüth, D.Gerthsen. // *Phys.Rev. B.* 1995. V.51. P.17780.
- [10] M.C.Bost. Optical properties of semiconducting iron disilicide thin films / M.C.Bost and J.E.Mahan // *J. Appl. Phys.* 1985. V.58. P.2696.
- [11] T.Suemasu. Room temperature 1.6 μm electroluminescence from a Si-based light emitting diode with $\beta\text{-FeSi}_2$ active region / T.Suemasu, Y.Hegishi, K.Takakura, F.Hasegawa // *Jpn. J. Appl Phys.* 2000. V.39. P.L1013.
- [12] S.Schuller. Optical and structural properties of $\beta\text{-FeSi}_2$ precipitate layers in silicon / S.Schuller, R.Carius, S.Mantl // *J. Appl. Phys.* 2003. V.94. P.207.
- [13] Э.А.Штейнман. ФЛ и структурные дефекты слоев кремния, имплантированных ионами железа / Э.А.Штейнман, В.И.Вдовин, А.Н.Изотов, Ю.Н.Пархоменко, А.Ф.Борун // *ФТТ.* 2004. Т.46. С.26.

- [14] N.A.Sobolev. Correlation between defect structure and luminescence spectra in monocrystalline erbium-implanted silicon / N.A.Sobolev, A.M.Emel'yanov, E.I.Shek, V.I.Vdovin, T.G.Yugova, S.Pizzini // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2002. V.14. P.13241.
- [15] E.A.Steinman. Dislocation structure and photoluminescence of partially relaxed SiGe layers on Si(001) substrates / E.A.Steinman, V.I.Vdovin, T.G.Yugova, V.S.Avrutin, N.F.Izyumskaya // *Semicond. Sci. Technol.* 1999. V.14. P.582.
- [16] P.Schittenhelm. Photoluminescence study of the crossover from two-dimensional to three-dimensional growth for Ge on Si(100) / P.Schittenhelm, M.Gail, J.Brunner, J.F.Nutzel, G.Abstreiter // *Appl. Phys. Lett.* 1995. V.67. P.1292.
- [17] A.I.Yakimov. Normal-incidence infrared photoconductivity in Si p-i-n diode with embedded Ge self-assembled quantum dots / A.I.Yakimov, A.V.Dvurechenskii, Yu.Yu.Proskuryakov, A.I.Nikifirov, O.P.Pchelyakov, S.A.Teys and A.K.Gutakovskii // *Appl. Phys. Lett.* 1999. V.75. P.1413.
- [18] А.И.Якимов. Фотодиоды Ge/Si со встроенными слоями квантовых точек Ge для ближней инфракрасной области (1.3-1.5 мкм) / А.И.Якимов, А.В.Двуреченский, А.И.Никифоров, С.В.Чайковский, С.А.Тийс // *ФТП*. 2003. Т.37. С.1383.
- [19] S.Tong. Normal-incidence Ge quantum-dot photodetectors at 1.5 μm based on Si substrate / S.Tong, J.L.Liu, J.Wan, and Kang L.Wang // *Appl. Phys. Lett.* 2002. V.80. P.1189.
- [20] K.Eberl. Self-assembling quantum dots for optoelectronic devices on Si and GaAs / K.Eberl, M.O.Lipinski, Y.M.Manz, W.Winter, N.Y.Jin-Phillipp, O.G.Schmidt // *Physica E*. 2001. V.9. P.164.
- [21] J.W.Matthews. Defects in epitaxial multilayers: I. Misfit dislocations / J.W.Matthews and A.E.Blakeslee // *Journal of Crystal Growth* -1974. V. 27 – P. 118-125.
- [22] S.Fukatsu. Suppression of phonon replica in the radiative recombination of an MBE-grown type-II Ge/Si quantum dot / S.Fukatsu, H.Sunamura, Y.Shiraki, S.Komiyama // *Thin Solid Films*. 1998. V.321. P.65.
- [23] В.Я.Алешкин. Самоорганизующиеся nanoостровки Ge в Si, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии / В.Я.Алешкин, Н.А.Бекин, Н.Г.Калугин, З.Ф.Красильник, А.В.Новиков, В.В.Постников, Х.Сейрингер // *Письма в ЖЭТФ*. 1998. Т.67. С.46.
- [24] H.Sunamura. Growth mode transition and photoluminescence properties of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ quantum well structures with high Ge composition / H.Sunamura, Y.Shiraki, S.Fukatsu // *APL*. 1995. V.66. P.953.
- [25] W.-H.Chang. Effects of spacer thickness on optical properties of stacked Ge/Si quantum dots grown by chemical vapor deposition / W.-H.Chang, W.-Y.Chen, A.-T.Chou, T.-M.Hsu, P.-S.Chen, Z.Pei, L.-S.Lai // *J. Appl. Phys.* 2003. V.93. P.4999.

- [26] L.Vescan. Size distribution and electroluminescence of self-assembled Ge dots / L.Vescan, T.Stoica, O.Chretien, M.Goryll, E.Mateeva, A.Muck // J. Appl. Phys. 2000. V.87. P.7275.
- [27] J.H.Shin. Er-carrier interaction and its effects on the Er^{3+} luminescence of erbium-doped Si/SiO₂ superlattices / J.H.Shin, J.-H.Jhe, S.-Y.Seo, Y.H.Ha, D.W.Moon // Appl. Phys. Lett. 2000. V.76. P.3567.
- [28] G.Z.Ran. Room-temperature 1.54 μm electroluminescence from Er-doped silicon-rich silicon oxide films deposited on n^+ -Si substrates by magnetron sputtering / G.Z.Ran, Y.Chen, W.C.Qin, J.S.Fu, Z.C.Ma, W.H.Zong, H.Lu, J.Qin, G.G.Qin // J. Appl. Phys. 2001. V.90. P.5835.
- [29] Y.H.Ha. Er^{3+} photoluminescence properties of erbium-doped SiO/SiO₂ superlattices with subnanometer thin Si layers. Y.H.Ha, S.Kim, D.W.Moon, J.-H.Jhe, J.H.Shin // Appl. Phys. Lett. 2001. V.79. P.287.
- [30] H.Ennen. 1.54- μm luminescence of erbium-implanted III-V semiconductors and silicon / H.Ennen, J.Schneider, G.Pomrenke, and A.Axman // Appl. Phys. Lett. 1983. V.43. P.943.
- [31] P.B.Klein. Photoluminescence decay of 1.54 μm Er^{3+} emission in Si and III-V semiconductors / P.B.Klein, G.S.Pomrenke // Electron. Lett. 1988. V.24. P.1503.
- [32] H.Przybylinska. Optically active erbium centers in silicon / H.Przybylinska, W.Jantsch, Yu.Suprun-Belevitch, M.Stepikhova, L.Palmetshofer, G.Hendorfer, A.Kozanecki, R.J.Wilson, B.J.Sealy // Phys. Rev. B. 1996. V.54. P.2532.
- [33] B.A.Andreev. Observation of Zeeman effect in photoluminescence of Er^{3+} ion imbedded in crystalline silicon / B.A.Andreev, T.Gregorkiewicz, Z.F.Krasilnik, H.Przybylinska, N.Q.Vinh // Physica B: Condensed Matter. 2001. V.308-310. P.340.
- [34] 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.
- [35] N.Hamelin. Energy backtransfer and infrared photoresponse in erbium-doped silicon p-n diodes / N.Hamelin, P.G.Kik, J.F.Suyver, K.Kikoin, A.Polman, A.Schonecker, F.W.Saris // J. Appl. Phys. 2000. V.88. P.5381.
- [36] 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.
- [37] D.T.X.Thao. Photoluminescence of erbium-doped silicon: Excitation power and temperature dependence / D.T.X.Thao, C.A.J.Ammerlaan, T.Gregorkiewicz // J. Appl. Phys. 2000. V.88. P.1443.
- [38] М.С.Бреслер. Экситонный механизм возбуждения ионов эрбия в кремнии / М.С.Бреслер, О.Б.Гусев, Б.П.Захарченя, И.Н.Ясиевич // ФТТ. 1996. Т.38. №5. С.1474.

- [39] M.Markman. Enhancement of erbium photoluminescence by substitutional C alloying of Si / M.Markman, E.Neufeld, A.Sticht, K.Brunner, G.Abstreiter, Ch.Buchal // Appl. Phys. Lett. 1999. V.75. №.17. P.2584.
- [40] F.Priolo. The erbium-impurity interaction and its effects on the 1.54 μm luminescence of Er^{3+} in crystalline silicon / F.Priolo, G.Franzo, S.Coffa, A.Polman, S.Libertino, R.Barklie, D.Carey // J. Appl. Phys. 1995. V.78. P.3874.
- [41] L.Palmetshofer. / L.Palmetshofer, Yu.Suprun-Belevich, M.Stepikhova // Nucl. Instrum. Methods B. 1997. V.127. P.479.
- [42] O.B.Gusev. Excitation cross section of erbium in semiconductor matrices under optical pumping / O.B.Gusev, M.S.Bresler, P.E.Pak, I.N.Yassievich, M.Forcales, N.Q.Vinh, T.Gregorkiewicz. // Phys. Rev. B. 2001. V.64. P.075302.
- [43] D.T.X.Thao. Photoluminescence spectroscopy on erbium-doped and porous silicon / D.T.X.Thao // Ph.D Thesis. University of Amsterdam. Amsterdam. 2000. P.20.
- [44] N.Q.Vinh. Erbium excitation across the bulk of silicon wafer: an effect of p-n junction at Si/Si:Er interface / N.Q.Vinh, I.N.Yassievich, T.Gregorkiewicz // Physica B. 2001. V.308. P.357.
- [45] G.Davies. The optical properties of luminescence centres in silicon / G.Davies // Physics reports. 1989. V.176. №3-4. P.83.
- [46] S.Coffa. Temperature dependence and quenching processes of the intra-4f luminescence of Er in crystalline Si / S.Coffa, G.Franzo, F.Priolo, A.Polman, R.Serna // Phys. Rev. B. 1993. V.49. P.16313.
- [47] G.N. van den Hoven. Erbium in oxygen-doped silicon: Optical excitation / G.N. van den Hoven, J.H.Shin, A.Polman, S.Lombardo, S.U.Campisano // J. Appl. Phys. 1995. V.78. P.2642.
- [48] V.V.Emtsev Jr. Effects of oxygen coimplantation on the formation of donor centers in erbium-implanted silicon / V.V.Emtsev Jr, D.S.Poloskin, E.I.Shek, N.A.Sobolev, L.C.Kimerling // Mater. Sci. Eng. B. 2001. V.81. P.74.
- [49] J.R.Heynes. Experimental proof of the existence of a new electronic complex in silicon / J.R.Heynes // Phys. Rev. Lett. 1960. V.4. P.361.
- [50] S.Coffa. Direct evidence of impact excitation and spatial profiling of excited Er in light emitting Si diodes / S.Coffa, G.Franzò, F.Priolo, A.Pacelli, A.Lacaita // Appl. Phys. Lett. 1998. V.73. P.93.
- [51] M.Markman. Excitation efficiency of electrons and holes in forward and reverse biased epitaxially grown Er-doped Si diodes / M.Markman, E.Neufeld, A.Sticht, K.Brunner, G.Abstreiter // Appl. Phys. Lett. 2001. V.78. №.2. P.210.
- [52] J.F.Nutzel. Comparison of P and Sb as n-dopants for Si molecular beam epitaxy / J.F.Nutzel, G.Abstreiter // J. Appl. Phys. 1995. V.78. P.937.

- [53] В.П.Кузнецов. Особенности метода сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии Si и его возможности при получении структуры Si:Er/Si / В.П.Кузнецов, Р.А.Рубцова // ФТП. 2000. Т.34. С.519.
- [54] B.A.Andreev. Optical Er-doping of Si during sublimational molecular beam epitaxy / B.A.Andreev, A.Yu.Andreev, H.Ellmerb, H.Hutterc, Z.F.Krasilnik, V.P.Kuznetsov, S.Lanzerstorfer, L.Palmetshofer, K.Piplits, R.A.Rubtsova, N.S.Sokolov, V.B.Shmagin, M.V.Stepikhova, E.A.Uskova // Journal of Crystal Growth. 1999. V.201/202. P.534.
- [55] A.Yu.Andreev. Optically active layers of silicon doped with erbium during sublimation molecular-beam epitaxy / A.Yu.Andreev, B.A.Andreev, M.N.Drozdov, Z.F.Krasilnik, M.V.Stepikhova, V.B.Shmagin, V.P.Kuznetsov, R.A.Rubtsova, E.A.Uskova, Yu.A.Karpov, H.Ellmer, L.Palmetshofer, K.Piplits and H.Hutter. // Semiconductors. 1999. V.33. P.131.
- [56] M.Stepikhova. Uniformly and selectively doped silicon: erbium structures produced by the sublimation MBE method / M.Stepikhova, B.Andreev, Z.Krasil`nik, A.Soldatkin, V.Kuznetsov, O.Gusev // Materials Science and Engineerig B 2001. V.81. P.67.
- [57] C.A.J.Ammerlaan. Electrically active centers in light emitting Si:Er/Si structures grown by the sublimation MBE method / C.A.J.Ammerlaan, B.A.Andreev, Z.F.Krasilnik, D.I.Kryzhkov, V.P.Kuznetsov, E.N.Morozova, G.Pensl, V.B.Shmagin, E.A.Uskova // Physica B: Condensed Matter. 2001. V.308-310. P.361.
- [58] R.Serna. Incorporation and optical activation of erbium in silicon using molecular beam epitaxy. R.Serna, J.H.Shin, M.Lohmeier, E.Vlieg, A.Polman, P.F.A.Alkemade // J. Appl. Phys. 1996. V.79. P.2658.
- [59] A.Dargys. Handbook on physical properties of Ge, Si, GaAs and InP / A.Dargys, J.Kundrotas // Science and encyclopedia publishers. Vilnius. 1994.
- [60] F.Priolo. Excitation and nonradiative deexcitation processes of Er³⁺ in crystalline Si / F.Priolo, G.Franzo, S.Coffa, A.Carnera // Phys.Rev.B. 1998. V.57. P.4443.
- [61] M.A.Green. Efficient silicon light-emitting diodes. M.A.Green, J.Shao, A.Wang, P.J.Reece and M.Gal // Nature. 2001. V.412. P.805.
- [62] K.L.Shaklee. Valley-orbit splitting of free excitons? The absorption edge of Si / K.L.Shaklee and R.E.Nahory // Phys. Rev. Lett. 1970. V.24. P.942.
- [63] S.Lanzerstorfer. Er-doped materials for optical and optoelectronic applications for Infrared Region at wavelength 1.54 μm / S.Lanzerstorfer // Ph.D Thesis. 1999. Linz, Austria.
- [64] M.Suezawa. Nitrogen-oxygen complexes as shallow donors in silicon crystals / M.Suezawa, K.Sumino, H.Harada, T.Abe // Jpn. J. Appl. Phys. 1986. V.25. P.L859.

- [65] M.L.W.Thewalt. Thermal-donor-related isoelectronic center in silicon which can bind up to four excitons / M.L.W.Thewalt, A.G.Steele, S.P.Watkins // *Phys. Rev. Lett.* 1986. V.57. P.1939.
- [66] В.Б.Шмагин. Электрически активные центры в светоизлучающих слоях Si:Er, полученных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии / В.Б.Шмагин, Б.А.Андреев, А.В.Антонов, З.Ф.Красильник, В.П.Кузнецов, О.А.Кузнецов, Е.А.Ускова, С.А.J.Ammerlaan, G.Pensl // *ФТП.* 2002. Т.36. №2. С.178.
- [67] M.A.Lourenco. Extraordinary optical gain from silicon implanted with erbium / M.A.Lourenco, R.M.Gwilliam, and K.P.Homewood // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V.91. P.141122.
- [68] M.A.Gad. Loss measurements of Er-doped silicon-on-insulator waveguides / M.A.Gad, J.H.Evans-Freeman, N.Cinosi, J.Sarma // *Materials Sci. & Engineering B.* 2003. V.105. P.78.
- [69] N.Q.Vinh. Optical properties of a single type of optically active center in Si/Si:Er nanostructures / N.Q.Vinh, H.Przybylinska, Z.F.Krasilnik, T.Gregorkiewicz // *Phys. Rev. B.* 2004. V.70. P.115332.
- [70] В.Я.Алешкин. О возможности создания лазера на центрах Er³⁺ в кремнии / В.Я.Алешкин, Б.А.Андреев, З.Ф.Красильник // *Материалы совещания "Нанопотоника"*, Н.Новгород, Россия, 11-14 марта 2002, P.289-292.
- [71] N.N.Ha. Optical gain of the 1.54 μm emission in MBE-grown Si:Er nanolayers / N.N.Ha, K.Dohnalova, T.Gregorkiewicz, J.Valenta // *Phys. Rev. B.* 2010. V.81. P.195206.
- [72] N.F.Mott. Metal-insulator transitions / N.F.Mott // *Barnes and Nobel, New York, 1974.*
- [73] J.Shah. Investigation of exciton-plasma Mott transition in Si / J.Shah, M.Combescot, A.H.Dayem // *Phys. Rev. Lett.* 1977. V.38. P.1497.
- [74] W.C.Dash. Intrinsic optical absorption in single-crystal germanium and silicon at 77 K and 300 K / W.C.Dash, R.Newman // *Phys. Rev.* 1955. V.99. P.1151.
- [75] H.A.Weakliem. Temperature dependence of the optical properties of silicon / H.A.Weakliem, D.Redfield // *J. Appl. Phys.* 1979. V.50. P.1491.
- [76] L.M.Smith. Time-resolved study of electron-hole plasmas near the liquid-gas critical point in Si: Evidence for a second condensed phase / L.M.Smith and J.P.Wolfe. // *Phys. Rev. B.* 1995. V.51. P.7521.
- [77] P.J.Dean. New radiative recombination processes involving neutral donors and acceptors in silicon and germanium / P.J.Dean, J.R.Haynes, and W.F.Flood // *Phys. Rev.* 1967. V.161. P.711.
- [78] G.S.Mitchard. Photoluminescence of Si-rich Si-Ge alloys / G.S.Mitchard and T.C.McGill // *Phys. Rev. B.* 1982. V.25. №8. P.5351.
- [79] A.F.Dite. Gas-liquid phase diagram in a nonequilibrium electron-hole system in silicon / A.F.Dite, V.D.Kulakovskii, V.B.Timofeev // *JETP.* 1977. V.72. P.1156.

- [80] F.J.Rogers. Bound Eigenstates of the Static Screened Coulomb Potential / F.J.Rogers, H.C.Graboske, Jr., and D.J.Harwood // *Phys. Rev. A* 1970. V.1. P.1577.
- [81] R.B.Hammond. Temperature dependence of the exciton lifetime in high-purity silicon / R.B.Hammond, R.N.Silver // *Appl. Phys. Lett.* 1980. V.36. P.68.
- [82] J.H.Shin. Direct experimental evidence for trap-state mediated excitation of Er³⁺ in silicon / J.H.Shin, G.N. van den Hoven, A.Polman // *Appl. Phys. Lett.* 1995. V.67. P.377.
- [83] T.Gregorkiewicz, I.Tsimperidis, C.A.J.Ammerlaan, F.P.Widdershoven, N.A.Sobolev // *Rare Earth Doped Semiconductors II*, ed. by S.Coffa, A.Polman, and R.N.Schwarz. (Materials Research Society. Pittsburgh, PA, 1996, P.207).
- [84] H.Przybylinska. The role of oxygen in optical activation of Er implanted in Si / H.Przybylinska, G.Hendorfer, M.Bruckner, W.Jantsch, L.Palmetshofer // *J. Alloys Compd.* 1995. V.225. P.555.
- [85] A.Taguchi. Evaluation of the energy-transfer rate between an Er 4f shell and a Si host in Er-doped Si / A.Taguchi, K.Takahei, M.Matsuoka, S.Tohno // *J. Appl. Phys.* 1998. V.84. №8. P.4471.
- [86] T.Suzuki. Time-resolved formation of excitons and electron-hole droplets in Si studied using terahertz spectroscopy / T.Suzuki and R.Shimano. // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V.103. P.057401.
- [87] W.L.Ng. Photoluminescence and photoluminescence excitation spectroscopy of Er-doped Si prepared by laser ablation / W.L.Ng, M.P.Temple, P.A.Childs, F.Wellhofer, K.P.Homewood // *Appl. Phys. Lett.* 1999. V.75. №1. P.97.
- [88] M.A.J.Klik. Excitation of Si:Er with sub-band-gap energies / M.A.J.Klik, T.Gregorkiewicz // *Physica B.* 2001. V.308-310. P.348.
- [89] I.Izeddin. Donor-state-enabling Er-related luminescence in silicon: direct identification and resonant excitation / I.Izeddin, M.A.J.Klik, N.Q.Vinh, M.S.Bresler, T.Gregorkiewicz. // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V.99. P.077401.
- [90] G.G.Macfarlane. Fine Structure in the Absorption-Edge Spectrum of Si / G.G.Macfarlane, T.P.McLean, J.E.Quarrington and V.Roberts // *Phys. Rev.* 1958. V.111. P.1245.