

На правах рукописи

Красильникова Людмила Владимировна

**ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУР
Si/SiGe, ЛЕГИРОВАННЫХ ПРИМЕСЬЮ ЭРБИЯ**

05.27.01 — твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нанoeлектроника,
приборы на квантовых эффектах

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород - 2007

Работа выполнена в Институте физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Красильник Захарий Фишелевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Теруков Евгений Иванович

кандидат физико-математических наук,
доцент Филатов Дмитрий Олегович

Ведущая организация: Казанский государственный университет,
физический факультет

Защита состоится 1 ноября 2007 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 002.098.01 при Институте физики микроструктур РАН (603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН.

Автореферат разослан 1 октября 2007 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

К. П. Гайкович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Создание эффективного источника излучения на кремнии является одной из приоритетных задач оптоэлектроники. Интенсивные исследования, проводимые в последнее время в этой области, открывают новые возможности и решения в создании светоизлучающих структур на кремнии. Особый интерес здесь представляют структуры кремния, легированного редкоземельной примесью эрбия. Излучательный переход ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ иона Er^{3+} на длине волны 1,54 мкм совпадает с окном прозрачности кварцевого волокна, что позволяет говорить о перспективах использования структур на основе Si:Er в системах волоконно-оптической связи. К настоящему времени на основе кремния, легированного эрбием, разработан целый ряд приборных структур, работающих в диапазоне температур от 4,2 до 300 К [1]. Кроме того, как показывают результаты теоретического анализа [A1], коэффициент усиления в структурах Si:Er с выделенным типом оптически активных центров может достигать значительной величины, порядка 30 см^{-1} , что позволяет говорить о перспективах создания лазера.

Одним из необходимых условий для создания лазерных структур на основе Si:Er является эффективная локализация излучения в активном слое. Возможным вариантом реализации этого условия может быть использование гетероструктур Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si с активным волноводным каналом Si_{1-x}Ge_x, легированным эрбием. Показатель преломления слоев Si_{1-x}Ge_x зависит от содержания германия (x) и составляет $n_{\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x} > 3,53$ при $x > 10\%$ [2], обеспечивая, таким образом, необходимый для формирования эффективного волновода скачок показателя преломления.

К моменту проведения исследований, результаты которых приведены в данной диссертации, было известно лишь незначительное число работ, посвященных изучению люминесцентных свойств легированных эрбием структур с гетерослоями Si_{1-x}Ge_x. В частности, авторы работы [3], исследовавшие возможность совмещения люминесцентных свойств иона эрбия и волноводных свойств слоев Si_{1-x}Ge_x на кремнии, показали, что в многослойных структурах Si/Si_{1-x}Ge_x/.. при легировании ионами Er^{3+} слоев Si_{1-x}Ge_x интенсивность эрбиевой фотолюминесценции значительно выше, чем при легировании ионами Er^{3+} слоев Si. В литературе обсуждалось также влияние упругих напряжений, возникающих в структурах Si:Er/Si_{1-x}Ge_x и Si_{1-x}Ge_x:Er/Si на интенсивность фотолюминесценции ионов эрбия [4, 5] и увеличение эффективности электролюминесценции в содержащих слой Si_{1-x}Ge_x светоизлучающих диодных и транзисторных структурах с активным слоем Si:Er [6, 7]. Содержание германия во всех исследовавшихся слоях Si_{1-x}Ge_x не превышало 16,5%. Отсутствовали систематические исследования люминесцентных свойств легированных эрбием слоев Si_{1-x}Ge_x, в том числе, с достаточной

для волноводного распространения излучения толщиной слоя и содержанием германия в нем.

В данной диссертационной работе изучены люминесцентные свойства структур с легированными эрбием гетерослоями $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ толщиной до 2,3 мкм и содержанием германия до 30%. Исследованы процессы формирования оптически активных центров иона Er^{3+} , вносящих преимущественный вклад в сигнал фотолюминесценции. В исследованных гетероструктурах проведен теоретический и экспериментальный анализ таких важных с точки зрения оптоэлектронных приложений характеристик, как волноводное распространение излучения, квантовая эффективность фотолюминесценции и условия достижения инверсной населённости энергетических состояний иона Er^{3+} .

Цели работы

1. Изучение люминесцентных свойств гетероэпитаксиальных структур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$. Экспериментальное исследование эффективности эрбиевой фотолюминесценции (ФЛ) и особенностей ФЛ ионов Er^{3+} в слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$ в зависимости от их структурных параметров.
2. Изучение оптически активных центров иона Er^{3+} , преобладающих в спектрах низкотемпературной фотолюминесценции структур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$. Определение условий их формирования и температурной зависимости интенсивности фотолюминесценции.
3. Проведение теоретического анализа и экспериментальных исследований волноводных свойств гетероструктур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ на длине волны 1,54 мкм.
4. Поиск условий достижения инверсной населенности энергетических уровней иона Er^{3+} при оптическом возбуждении.

Научная новизна

1. Проведено исследование люминесцентных свойств гетероструктур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$ с содержанием германия до 30%, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) кремния и эрбия из поликристаллических источников в атмосфере германа.
2. Определена внешняя и внутренняя квантовая эффективность фотолюминесценции в структурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ при температурах $T = 4,2 \text{ K}$ и $T = 77 \text{ K}$.
3. В структурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ обнаружен новый оптически активный центр иона Er^{3+} - центр Er-Ge1 . Определены условия формирования данного центра в зависимости от состава твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$.
4. Экспериментально показано наличие волноводного характера распространения излучения на длине волны 1,54 мкм в структурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$.
5. Показана возможность достижения инверсной населённости уровней ионов Er^{3+} в структурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$. Проведены детальные исследования зави-

симости концентрации оптически активных центров иона эрбия, находящихся в возбужденном состоянии, от плотности мощности оптического возбуждения.

Научная и практическая значимость работы

Научная значимость полученных результатов заключается в определении основных закономерностей люминесценции эрбиевой примеси в гетероструктурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ с содержанием германия до 30%, выявлении условий формирования оптически активных центров редкоземельной примеси в этих материалах, их взаимодействия с другими примесями и дефектами структуры. Установлено, что при $x \geq 25\%$ в спектре фотолюминесценции структур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ доминирует германий-содержащий оптически активный эрбиевый центр $\text{Er}-\text{Ge}1$, не характерный для легированных эрбием слоев кремния. Определена внутренняя квантовая эффективность ФЛ ионов Er^{3+} в структурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$, значение которой достигает 15% при $T = 4,2 \text{ K}$.

Практическая значимость работы заключается в обнаружении таких важных с точки зрения приборных применений свойств, как достижение инверсной заселенности уровней иона Er^{3+} и волноводное распространение излучения с длиной волны 1,54 мкм в структурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$.

Полученные в работе новые результаты являются важными как для понимания фундаментальных свойств легированных эрбием кремний-германиевых структур, так и для изучения физических основ их возможных оптоэлектронных приложений.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В слоях $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$, выращенных методом сублимационной МЛЭ кремния и эрбия из поликристаллических источников в атмосфере германа, формируются оптически активные центры иона Er^{3+} , свойства которых зависят от молевого состава твердого раствора и содержания кислорода в нем.
2. Внутренняя квантовая эффективность ФЛ центров иона Er^{3+} в структурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$ при $T = 4,2 \text{ K}$ достигает значений, сравнимых с аналогичной величиной для структур $\text{Si}/\text{Si}:\text{Er}$.
3. В эпитаксиальных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$ с содержанием германия $\geq 25\%$ формируется оптически активный центр иона Er^{3+} , центр $\text{Er}-\text{Ge}1$, с линиями люминесценции $6508,1 \text{ см}^{-1}$, $6481,6 \text{ см}^{-1}$, $6468,1 \text{ см}^{-1}$, $6443,5 \text{ см}^{-1}$, $6423,8 \text{ см}^{-1}$, 6333 см^{-1} , 6303 см^{-1} , не характерный для легированных эрбием слоев кремния.
4. Степень релаксации гетерослоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$ оказывает незначительное влияние на интенсивность люминесценции примеси Er в условиях оптического возбуждения.

5. При высоких уровнях оптического возбуждения ($P_{возб} > 0,05 \text{ Вт/см}^2$) в структурах $\text{Si/Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:Er}$ достигается инверсная заселенность энергетических уровней иона Er^{3+} .
6. Структуры $\text{Si/Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:Er/Si}$ с толщиной слоя твердого раствора $\sim 1 \text{ мкм}$ обеспечивают волноводный характер распространения излучения на длине волны $1,54 \text{ мкм}$.

Личный вклад автора в получение результатов

- определяющий в исследовании люминесцентных свойств эпитаксиальных гетерослоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:Er}$, полученных методом сублимационной МЛЭ, в изучение люминесцентных особенностей примеси Er в гетероструктурах $\text{Si/Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:Er/Si}$ в зависимости от их структурных параметров, условий возбуждения и температуры измерений (совместно с М.В. Степиховой, В.Г. Шенгуровым, В.Ю. Чалковым [A1, A2, A7, A9 - A15, A18, A20 - A24, A26]);
- основной в проведение экспериментальных исследований и теоретических оценок квантовой эффективности фотолюминесценции гетероструктур $\text{Si/Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:Er/Si}$ (совместно с Б.А. Андреевым [A7, A20, A21, A26]);
- основной в обнаружение и анализ энергетической структуры оптически активного центра иона Er^{3+} , центра Er-Ge1, в определение условий его формирования в эпитаксиальных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:Er}$ (совместно с М.В. Степиховой и Н.А. Байдаковой [A25]);
- равноценный в исследовании люминесцентных свойств гетероструктур $\text{Si/Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:Er/Si}$ в условиях сильного оптического возбуждения и определение условий достижения инверсной населенности энергетических уровней иона Er^{3+} в этих материалах (совместно с Д.М. Жигуновым, В.Ю. Тимошенко и М.В. Степиховой [A3, A4, A6 - A8, A16, A18, A20, A21, A26]);
- основной в проведение теоретического анализа, и равноценный - в подготовку и проведение экспериментальных исследований волноводных свойств гетероструктур $\text{Si/Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:Er/Si}$ в диапазоне длин волн $1,54 \text{ мкм}$ (совместно с А.А. Дубиновым, В.В. Ивановым и С.С. Уставщиковым [A4 - A8, A18, A19, A26]).

Апробация результатов работы

Результаты диссертационной работы опубликованы в 9 статьях в реферируемых научных журналах и сборниках, и докладывались на 15 международных, национальных и всероссийских конференциях и совещаниях: международном совещании НАТО по передовым направлениям исследований в области создания лазера на кремнии (NATO Advanced Research Workshop “Towards the first silicon laser”, Тренто, Италия, 2002г.); 32-ой международной школе по физике полупроводниковых соединений (XXXII International School on the Physics of Semiconducting Compounds “Jaszowiec 2003”, Яшовец, Польша, 2003г.); 12 меж-

дународном Феофиловском симпозиуме по спектроскопии кристаллов, активированных редкоземельными ионами и ионами переходных металлов (XII Feofilov symposium on spectroscopy of crystals activated by rare-earth and transitional metal ions, Екатеринбург, Россия, 2004г.); 11 национальной конференции по росту кристаллов “НКПК-2004” (Москва, Россия, 2004г.); 5-ой международной конференции по фотонике, приборам и системам (The 5th International Conference on Photonics, Devices and Systems “PHOTONICS PRAGUE 2005”, Прага, Чехия, 2005г.); 3-й международной конференции по материалам для передовых технологий и 9-ой международной конференции по передовым материалам (3rd Int. Conference on Materials for Advanced Technologies ICMAT-2005 & 9th Int. Conference on Advanced Materials ICAM-2005, Сингапур, 2005); международных конференциях Европейского материаловедческого сообщества (E-MRS Spring Meeting, Страсбург, Франция 2004г., 2005г., 2007г., Ницца, Франция, 2006г.); 7-ой Российской конференции по физике полупроводников (Звенигород, Россия, 2005г.); всероссийском совещании “Нанофотоника 2004” (Н. Новгород 2004г.); всероссийских симпозиумах “Нанозлектроника и нанополупроводники” (Н. Новгород 2005г., 2006г., 2007г.). Результаты работы были представлены на VIII и IX Нижегородской сессиях молодых ученых, а так же обсуждались на семинарах ИФМ РАН и ННГУ.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 26 работ, в том числе 9 статей в реферируемых научных журналах и сборниках и 17 публикаций в сборниках тезисов докладов и трудов конференций, симпозиумов и совещаний.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объём диссертации составляет 145 страниц, включая 58 рисунков и 2 таблицы. Список цитируемой литературы включает 158 наименований, список публикаций автора по теме диссертации - 26 наименований.

Основное содержание работы

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

В **Главе 1** обсуждается состояние проблемы, которой посвящена диссертационная работа. Глава представляет собой обзор литературы. В первом параграфе обсуждаются имеющиеся в литературе сведения о методах получения и люминесцентных свойствах структур кремния, легированных эрбием. Рассмотрены известные типы оптически активных центров иона эрбия, формирующихся в структурах Si:Er, полученных различными методами. Приводятся данные о меха-

низмах и процессах возбуждения и девозбуждения ионов Er^{3+} в кремниевых матрицах. Освещаются вопросы приборных применений структур на основе Si:Er , как реализованных к настоящему моменту, так и ожидаемых в перспективе.

Во втором параграфе приводится обзор существующих типов волноводных структур с волноводными слоями на основе кремния, в том числе и с гетерослоями $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований волноводных свойств данных структур, а именно – модового состава, условий одномодовости и величины потерь. Обсуждаются механизмы, вносящие основной вклад в значение величины потерь. Рассмотрены основные структурные и оптические характеристики материала $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$.

В третьем параграфе обсуждаются известные из литературы результаты исследований люминесцентных свойств легированных эрбием структур с гетерослоями $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$.

В последующих главах представлены оригинальные результаты. В **Главе 2** дается описание структурных параметров исследованных образцов и способа их получения, приводятся методики анализа элементного состава, структурных свойств и свойств поверхности изучаемых структур. В первом параграфе данной главы изложен метод роста исследуемых в работе легированных и нелегированных примесью эрбия гетероэпитаксиальных структур $\text{Si/Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$. Структуры выращивались методом сублимационной МЛЭ кремния и эрбия из поликристаллических источников в атмосфере германа. Дано подробное описание используемой методики и возможных режимов роста.

Во втором параграфе приведено описание методик исследования примесного состава и структурных параметров легированных и нелегированных эрбием образцов $\text{Si/Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$. В работе для этих целей использованы методы вторичной ионной масс-спектрометрии и рентгеновской дифракции. Кратко изложен метод атомно-силовой микроскопии, использовавшийся для исследования морфологии поверхности выращенных структур.

В третьем параграфе обсуждаются результаты проведенных в работе исследований зависимости содержания германия и концентрации редкоземельной примеси эрбия в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ от условий роста. Рассматриваются процессы релаксации гетерослоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, в частности, их зависимость от температуры роста. Приводятся условия роста исследуемых в настоящей работе легированных эрбием структур $\text{Si/Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$, а также результаты исследований элементного состава и структурных параметров выращенных слоев.

Глава 3 посвящена исследованию люминесцентных свойств волноводных гетероэпитаксиальных структур $\text{Si/Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$, выращенных методом сублимационной МЛЭ кремния и эрбия из поликристаллических источников в атмосфере германа. Основное внимание уделяется изучению спектров ФЛ, влиянию струк-

турных особенностей и примесного состава слоев на фотолюминесцентный отклик, изучению типов оптически активных центров иона Er^{3+} , формирующихся в гетерослоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$. В первом параграфе описана методика люминесцентных исследований.

Во втором параграфе представлены результаты исследований люминесцентных особенностей структур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$. Показано влияние молевого состава твердого раствора и содержания кислорода в нем на тип формирующихся оптически активных центров иона Er^{3+} (рис.1а, б). Рассмотрено влияние структурных параметров образцов $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$, в частности, толщины и степени релаксации гетерослоя на интенсивность фотолюминесценции редкоземельной примеси. В структурах с содержанием германия $\geq 25\%$ обнаружена серия линий фотолюминесценции (рис.1б), не характерная для структур кремния, легированного эрбием.

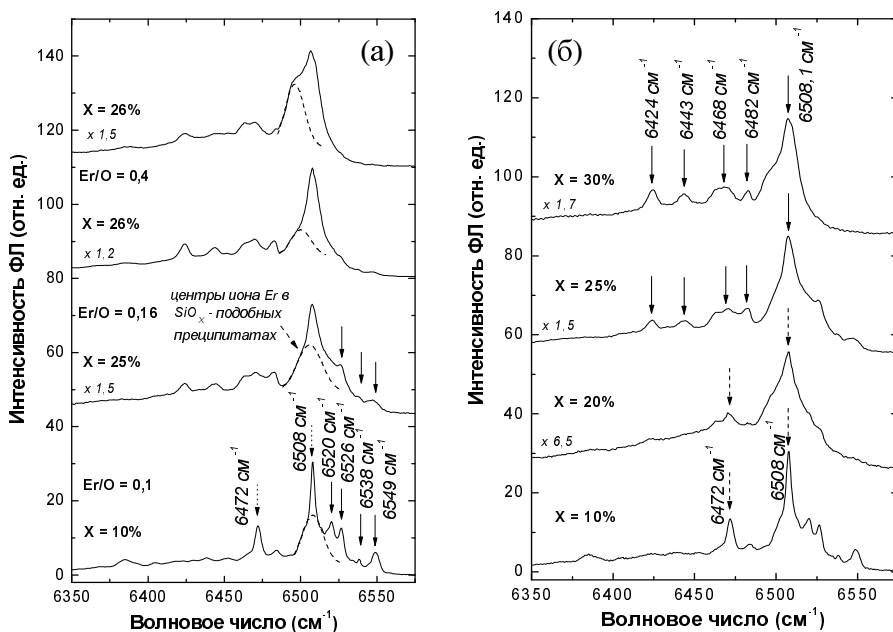


Рис. 1. Спектры ФЛ структур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ с различным содержанием примеси кислорода (а) и молевым составом твердого раствора (б).

В третьем параграфе представлены результаты исследований обнаруженной серии линий ФЛ, проведенных с целью выяснения их принадлежности конкретному типу оптически активных центров иона эрбия. По результатам анализа зависимости интенсивности линий ФЛ от мощности возбуждающего излучения и

температуры измерений делается вывод о том, что в слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$, выращенных методом сублимационной МЛЭ, происходит формирование нового, германий содержащего центра иона Er^{3+} , центра Er-GeI , представленного серией линий 6508,1 cm^{-1} , 6481,6 cm^{-1} , 6468,1 cm^{-1} , 6443,5 cm^{-1} , 6423,8 cm^{-1} , 6333 cm^{-1} , 6303 cm^{-1} (рис. 2). Формирование центра Er-GeI происходит при содержании германия в слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$ большим, или равным 25%.

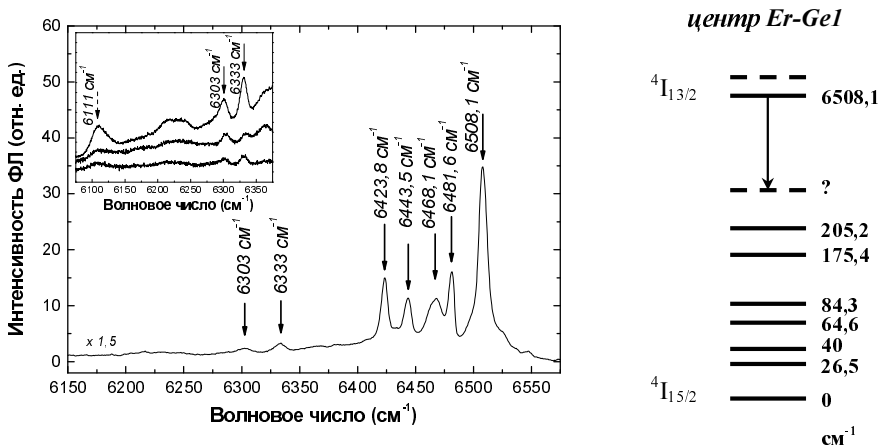


Рис. 2. Серия линий фотолуминесценции центра Er-GeI , наблюдаемая в структуре $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ с содержанием германия 28% и толщиной слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$, равной 0,75 мкм. На вставке подробно показана длинноволновая часть спектра, измеренная для образцов $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ с $x \geq 25\%$. Справа приведена энергетическая диаграмма центра Er-GeI (переходы с первого уровня мультиплета ${}^4I_{13/2}$ на уровни мультиплета ${}^4I_{15/2}$), полученная из данных ФЛ.

В четвертом параграфе представлены результаты оценки квантовой эффективности ФЛ исследуемых структур. Показано, что внешняя квантовая эффективность ФЛ структур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ достигает 0,28% при температуре 4,2 К и мощности возбуждающего излучения ~4 мВт. Полученная величина сравнима с внешней квантовой эффективностью ФЛ структур $\text{Si}/\text{Si}:\text{Er}$. Согласно проведенным расчетам, внутренняя квантовая эффективность ФЛ структур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ при тех же условиях измерений может достигать ~15%.

В пятом параграфе обсуждаются результаты исследований температурных зависимостей фотолуминесценции. Рассмотрены вопросы, связанные с температурным гашением ФЛ в структурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$, где основная роль отводится процессам термической деактивации связанных на примеси эрбия экситонов и Оже-девозбуждению ионов Er^{3+} на свободных носителях заряда.

В Главе 4 представлены результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований волноводных свойств гетероструктур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ на длине волны 1,54 мкм. В первом параграфе приведено описание методов расчета и результаты теоретического анализа планарных и гребенчатых волноводов $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$. Показана зависимость модового состава и степени локализации мод в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$ от параметров волноведущего и покровного слоев (содержания Ge в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$, толщины слоев Si и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$). Результаты расчетов приведены для структур с толщиной гетерослоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$ до 1,5 мкм и содержанием германия в нем от 10 до 60%. Показано, что максимальные значения коэффициента оптического ограничения (Γ) в исследуемых волноводных структурах достигаются при значительных толщинах слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$ с высоким содержанием германия в них (рис. 3). Например, значения $\Gamma > 0,8$ могут быть реализованы в волноводных структурах с содержанием германия 10 - 60% при толщинах волноводного слоя, больших 1,2 – 0,4 мкм, соответственно.

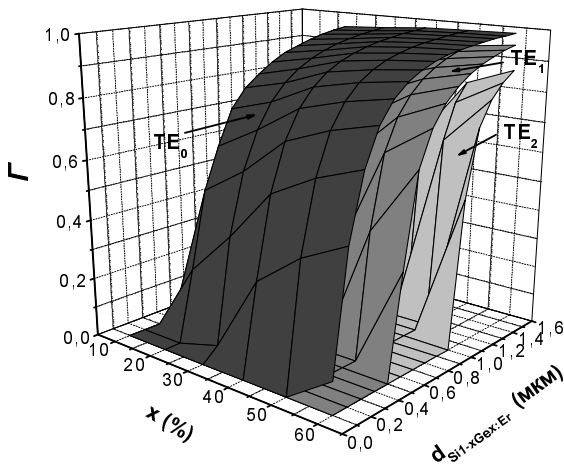


Рис. 3. Зависимость коэффициента оптического ограничения для TE мод в планарных волноводных структурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ от толщины активного слоя $d_{\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}}$ и содержания в нем германия x .

Во втором параграфе данной главы приводятся результаты исследований волноведущих свойств планарных структур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ на длине волны 1,54 мкм, проведенных методом низкокогерентной интерферометрии. Экспериментально продемонстрировано наличие волноводного характера распространения света с длиной волны 1,54 мкм в выращенных гетероэпитаксиальных структурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$.

Глава 5 посвящена исследованию люминесцентных свойств структур Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si при высоких уровнях оптического возбуждения, приводятся результаты исследований кинетики ФЛ структур при $P_{возб} > 0,05$ Вт/см². Определено условие, соответствующее порогу инверсной населенности энергетических уровней иона эрбия, и экспериментально продемонстрирована возможность достижения инверсной населенности состояний редкоземельных ионов Er³⁺ в структурах Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si. В первом параграфе главы показано, что по результатам анализа кинетики ФЛ можно сделать вывод о соотношении концентраций ионов Er³⁺, находящихся в основном и возбужденном состояниях (N^*/N_{Er}). Величина N^*/N_{Er} определяется по соотношению времен нарастания ($\tau_{нараст.}$) и спада ($\tau_{спада}$) сигнала ФЛ: $N^*/N_{Er} = 1 - \tau_{нараст.} / \tau_{спада}$, где условие $N^*/N_{Er} = 0,5$ соответствует пороговому условию инверсии населенностей.

Во втором параграфе описана методика экспериментальных исследований кинетики ФЛ и приведены характеристики структур Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si, выбранных для данного типа исследований, и являющихся наиболее эффективными с точки зрения их люминесцентных свойств.

В третьем параграфе представлены результаты кинетических исследований ФЛ гетероструктур Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si в условиях сильного оптического возбуждения. Исследования кинетики ФЛ были проведены для структур с разным типом оптически активных центров иона Er³⁺. Показана зависимость времен нарастания и спада сигнала ФЛ от уровня оптического возбуждения при импульсном характере возбуждающего излучения (рис. 4а).

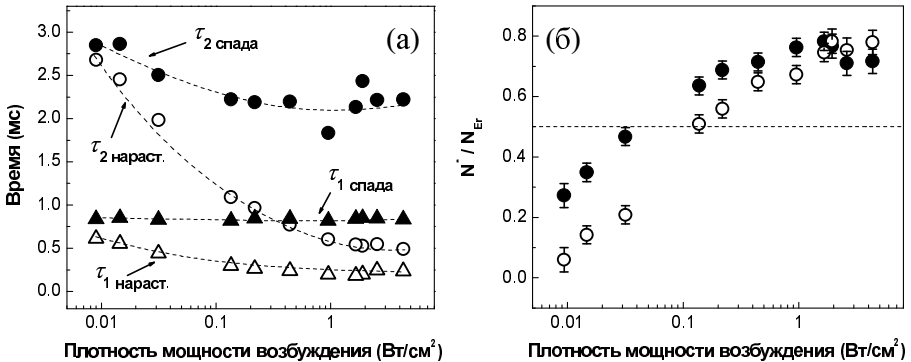


Рис. 4. Зависимости времен нарастания и спада быстрой (τ_1) и медленной (τ_2) компонент сигнала ФЛ структуры Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si на длине волны 1,537 мкм от плотности мощности оптического возбуждения (а). Величина N^*/N_{Er} в зависимости от плотности мощности возбуждающего излучения для структуры Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si (пунктир соответствует значению $N^*/N_{Er} = 0,5$) (б). Параметры структуры Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si: $x = 26\%$, $d_{Si1-xGe_x:Er} = 1$ мкм.

В четвертом параграфе на основе анализа соотношения времен нарастания и спада сигнала эрбиевой ФЛ делается вывод о возможности достижения инверсной населённости энергетических состояний иона Er^{3+} в структурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$. Сравниваются условия наблюдения инверсной населённости для разных типов оптически активных центров иона Er^{3+} . Показано, что при плотности мощности возбуждающего излучения $\sim 2 \text{ Вт}/\text{см}^2$ значение инверсии в исследованных структурах может достигать 4, что соответствует условию, когда 80% всех оптически активных ионов эрбия в $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ находится в возбужденном состоянии (рис. 4б).

В пятом параграфе представлены результаты анализа исследованных зависимостей нарастания и спада сигнала ФЛ, полученных в образцах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ с разными структурными параметрами. Показана зависимость условий экспериментального обнаружения инверсной населённости энергетических уровней иона Er^{3+} от эффективности возбуждения редкоземельной примеси, которая в свою очередь определяется степенью совершенства гетероэпитаксиальных структур.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты работы

1. Исследованы люминесцентные свойства гетероэпитаксиальных структур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$, выращенных методом сублимационной МЛЭ кремния и эрбия из поликристаллических источников в атмосфере германа при $T = 500^\circ\text{C}$. Интенсивность сигнала эрбиевой фотолюминесценции в структурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ растёт с толщиной активного гетерослоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$. Степень релаксации гетерослоя незначительно влияет на интенсивность сигнала ФЛ редкоземельной примеси.
2. Проведена оценка квантовой эффективности фотолюминесценции исследованных структур. Показано, что внешняя квантовая эффективность ФЛ гетероструктур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ достигает 0,28% при $T = 4,2 \text{ К}$ и мощности возбуждающего излучения $\sim 4 \text{ мВт}$. Полученная величина сравнима с внешней квантовой эффективностью ФЛ структур $\text{Si}/\text{Si}:\text{Er}$. Внутренняя квантовая эффективность ФЛ структур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ при $T = 4,2 \text{ К}$ и мощности возбуждающего излучения $\sim 4 \text{ мВт}$ достигает величины $\sim 15\%$.
3. В слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$ обнаружен и идентифицирован оптически активный центр иона Er^{3+} , центр Er-Ge1 , представленный 7 линиями в спектрах ФЛ с максимумами, соответствующими волновым числам $6508,1 \text{ см}^{-1}$, $6481,6 \text{ см}^{-1}$, $6468,1 \text{ см}^{-1}$, $6443,5 \text{ см}^{-1}$, $6423,8 \text{ см}^{-1}$, 6333 см^{-1} , 6303 см^{-1} . Формирование данного центра происходит при содержании германия в слоях более 25%.
4. Проведен теоретический анализ волноведущих свойств планарных структур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$. Показано, что приемлемые значения коэффициента оптического ограничения в данных волноводах достигаются при значительных толщинах слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$ с высоким содержанием германия в них. Так, например, значения Γ ,

больше 0,8 для ТЕ мод реализуются в волноводных структурах с содержанием германия 10 - 60% при толщинах волноводного слоя, превышающих 1,2 – 0,4 мкм, соответственно. Одномодовый режим в рассмотренных структурах для ТЕ мод реализуется при толщине волноводного слоя меньше 1,93 мкм, при содержании германия $x = 10\%$, для структур с содержанием германия 60% соответствующая толщина активного слоя составляет 0,57 мкм. Влияние толщины покровного слоя кремния на локализацию мод в волноводном слое существенным образом сказывается в структурах с малым содержанием германия ($x \sim 10\%$).

5. Методом низкокогерентной интерферометрии показан волноводный характер распространения света с длиной волны 1,54 мкм в гетероэпитаксиальных структурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$.

6. Исследована кинетика фотолуминесценции структур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ при высоких уровнях оптического возбуждения. Показано, что при импульсном характере возбуждающего излучения времена нарастания и спада сигнала ФЛ зависят от уровня накачки. На основании соотношения этих времен делается вывод о возможности достижения инверсной населённости энергетических состояний иона Er^{3+} в структурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$. При плотности мощности возбуждающего излучения $\sim 2 \text{ Вт/см}^2$ около 80% оптически активных ионов эрбия в структуре находится в возбужденном состоянии, что соответствует значению инверсии, равному 4.

Список цитированной литературы

- [1] Coffa, S. Silicon-Based Optoelectronics / S. Coffa, L. Tsybeskov // MRS Bulletin. - 1998. - V. 23, № 4. - P. 16-19.
- [2] Humlicek, J. Properties of Strained and Relaxed Silicon Germanium // ed. by E. Kasper, INSPEC, the Institution of Electrical Engineers, London, U.K. – 1995. - P. 121-131.
- [3] Neufeld, E. Luminescence from erbium- and oxygen-doped SiGe grown by molecular beam epitaxy / E. Neufeld, A. Sticht, K. Brunner, G. Abstreiter, H. Bay, Ch. Buchal, H. Holzbrecher // Thin Solid Films. - 1998. - V. 321, iss. 1-2. - P. 219-222.
- [4] Ishiyama, T. Enhancing effect of tensile strain on photoluminescence of Er in Si on a SiGe layer / T. Ishiyama, M. Yoshida, Y. Yamashita, Y. Kamiura, T. Date, T. Hasegawa, K. Inoue, K. Okuno // Physica B. - 2003. - V. 340-342. - P. 818-822.
- [5] Ishiyama, T. Enhancement of photoluminescence at 1.54 μm from Er in strained Si and SiGe / T. Ishiyama, S. Yoneyama, Y. Yamashita, Y. Kamiura, T. Date, T. Hasegawa, K. Inoue, K. Okuno // Physica B. - 2006. - V. 376-377. - P. 122-125.
- [6] Ni, Wei-Xin. Light emitting SiGe/i-Si/Si:Er:O tunneling diodes prepared by molecular beam epitaxy / Wei-Xin Ni, Chun-Xia Du, Fabrice Duteil, Galia Pozina, Goran V. Hansson // Thin Solid Films. - 2000. - V. 369, iss. 1-2. - P. 414-418.

[7] Du, Chun-Xia. Efficient 1.54 μm light emission from Si/SiGe/Si:Er:O transistors prepared by differential MBE / Chun-Xia Du, Fabrice Duteil, Goran V. Hansson, Wei-Xin Ni // *Materials Science and Engineering B*. - 2001. - V. 81, iss. 1-3. - P. 105-108.

Список публикаций автора по теме диссертации

[A1] Krasilnik, Z.F. SMBE grown uniformly and selectively doped Si:Er structures for LEDs and lasers / Z.F. Krasilnik, V.Ya. Aleshkin, B.A. Andreev, O.B. 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 // in “Towards the First Silicon Laser” Eds. L. Pavesi, S. Gaponenko, L. Dal Negro. NATO Science Series. Kluwer Academic Publishers. - 2003. - P. 445-454.

[A2] Красильникова, Л.В. Анализ коэффициента усиления и исследование люминесцентных свойств гетероструктур Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si, полученных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в газовой фазе / Л.В. Красильникова, М.В. Степихова, Ю.Н. Дроздов, М.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков, С.П. Светлов, О.Б. Гусев // *ФТТ*. – 2005. - Т. 47, вып. 1. - С. 90-94.

[A3] Степихова, М.В. Инверсная населенность уровней энергии ионов эрбия при передаче возбуждения от полупроводниковой матрицы в структурах на основе кремния/германия / М.В. Степихова, Д.М. Жигунов, В.Г. Шенгуров, В.Ю. Тимошенко, Л.В. Красильникова, В.Ю. Чалков, С.П. Светлов, О.А. Шалыгина, П.К. Кашкаров, З.Ф. Красильник // *Письма в ЖЭТФ*. – 2005. - Т. 81, вып. 10. - С. 614-617.

[A4] Krasilnik, Z.F. 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 // in “Rare-Earth Doping for Optoelectronic Applications”, Eds. T. Gregorkiewicz, Y. Fujiwara, M. Lipson, J.M. Zavada, *Mat. Res. Soc. Proc.* - 2005. - V. 866. - P. 13-24.

[A5] Stepikhova, M.V. Observation of the population inversion of erbium ion states in Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si structures under optical excitation / M.V. Stepikhova, L.V. Krasil'nikova, Z.F. Krasil'nik, V.G. Shengurov, V.Yu. Chalkov, D.M. Zhigunov, O.A. Shalygina, V.Yu. Timoshenko // *Journal of Optical Materials*. – 2006. – V. 28, iss. 6-7. - P. 893-896.

[A6] Krasilnik, Z.F. Single- and multilayer Si:Er structures for LED and laser applications grown with sublimation MBE technique / Z.F. Krasilnik, B.A. Andreev, T. Gregorkiewicz, L.V. Krasil'nikova, V.P. Kuznetsov, H. Przybylinska, D.Yu. Remizov, V.B. Shmagin, V.G. Shengurov, M.V. Stepikhova, V.Yu. Timoshenko, D.M. Zhigunov // in “Photonics, Devices, and Systems III”, Eds. Pavel Tomanek, Miroslav Hrabovsky, Mi-

roslav Miler, Dagmar Senderakova, Proc. of SPIE. – 2006. – V. 6180. - P. 61800L1-61800L8.

[A7] Stepikhova, M. Si/SiGe:Er/Si Structures for Laser Realization: Theoretical Analysis and Luminescent Studies / M. Stepikhova, L. Krasil'nikova, Z. Krasil'nik, V. Shengurov, V. Chalkov, S. Svetlov, D. Zhigunov, V. Timoshenko, O. Shalygina, P. Kashkarov // Journal of Crystal Growth. – 2006. – V. 288, iss. 1. - P. 65-69.

[A8] Krasilnik, Z.F. Erbium doped silicon single- and multilayer structures for LED and laser applications / Z.F. Krasilnik, B.A. Andreev, T. Gregorkievicz, 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, № 3. - P. 574-583.

[A9] Светлов, С.П. Гетероструктуры Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si(100), выращенные методом сублимации кремния в среде германа / С.П. Светлов, В.Ю. Чалков, В.Г. Шенгуров, В.Н. Шабанов, С.А. Денисов, З.Ф. Красильник, Л.В. Красильникова, М.В. Степихова, Д.В. Шенгуров, Ю.Н. Дроздов // Изв. РАН: Сер. физическая. – 2007. - Т. 71, № 1. - С. 118-120.

[A10] Krasilnik, Z.F. 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": Book of abstracts, Trento, Italy, September 21-26, 2002. - Trento, ASIS, 2002. - P. 46.

[A11] Krasil'nikova, L. 3D growth and luminescent properties of SiGe nanostructures produced by the method of sublimation MBE in gas atmosphere / L. Krasil'nikova, M. Stepikhova, Yu. Drozdov, V. Shengurov, S. Svetlov, V. Chalkov, D. Pavlov, P. Shilyaev and Z. Krasil'nik // XXXII International School on the Physics of Semiconducting Compounds "Jaszowiec 2003": Book of abstracts, Jaszowiec, Poland, May 30 - June 6, 2003. - Warsaw, Polish Academy of Sciences, Institute of physics, 2003. - P. 146.

[A12] Красильникова, Л.В. Анализ коэффициента усиления и исследование люминесцентных свойств гетероструктур Si/Si_{1-x}Ge_x:Er, полученных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в газовой фазе / Л.В. Красильникова, М.В. Степихова, Ю.Н. Дроздов, М.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, В.Г. Шенгуров, С.П. Светлов, В.Ю. Чалков // Нанофотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 2–6 мая 2004. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2004. – С. 271–274.

[A13] Krasil'nikova, L. Gain analysis and luminescent studies of Si/Si_{1-x}Ge_x:Er heterostructures produced by the method of sublimation MBE in gas atmosphere / L. Kra-

sil'nikova, M. Stepikhova, Yu. Drozdov, V. Shmagin, Z. Krasil'nik, V. Shengurov, S. Svetlov, V. Chalkov // E-MRS Spring Meeting: Scientific programme, Strasbourg, France, May 24 - 28, 2004. – Strasbourg, 2004. – A1-PII.40.

[A14] Krasil'nikova, L.V. Luminescent properties of Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si heterostructures produced by the method of sublimation MBE in gas atmosphere / L.V. Krasil'nikova, M.V. Stepikhova, Yu.N. Drozdov, Z.F. Krasil'nik, V.G. Shengurov, S.P. Svetlov, V.Yu. Chalkov // XII-th Feofilov symposium on spectroscopy of crystals activated by rare-earth and transitional metal ions: Abstracts and program, Ekaterinburg, Russia, September 22-25, 2004. – Ekaterinburg, Ural state technical university-UPI, 2004. – P. 101.

[A15] Чалков, В.Ю. Выращивание светоизлучающих структур Si_{1-x}Ge_x/Si методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде германа / В.Ю. Чалков, В.Г. Шенгуров, С.П. Светлов, З.Ф. Красильник, Л.В. Красильникова, М.В. Степихова // XI Национальная конференция по росту кристаллов "НКРК-2004": Сб. трудов, Москва, Россия, 13-17 декабря, 2004. – М.: ИК РАН, 2004. – С. 390.

[A16] Stepikhova, M.V. Observation of the Population Inversion of Erbium Ion States in Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si Structures Under Optical Excitation / M.V. Stepikhova, L.V. Krasil'nikova, Z.F. Krasil'nik, V.G. Shengurov, V Yu. Chalkov, D.M. Zhigunov, O.A. Shalygina, V.Yu. Timoshenko // E-MRS Spring Meeting: Scientific programme, Strasbourg, France, May 31 - June 3, 2005. – Strasbourg, 2005. – C/PII.24.

[A17] Krasilnik, Z.F. Single- and multilayer Si:Er structures for LED and laser applications grown with sublimation MBE technique / Z.F. Krasilnik, B.A. Andreev, T. Gregorkievicz, L.V. Krasil'nikova, V.P. Kuznetsov, H. Przybylinska, D.Yu. Remizov, V.B. Shmagin, V.G. Shengurov, M.V. Stepikhova, V.Yu. Timoshenko, D.M. Zhigunov // The 5th International Conference on Photonics, Devices and Systems "PHOTONICS PRAGUE 2005": Book of abstracts, Prague, Czech Republic, June 8 - 11, 2005. – Prague, SPIE, 2005. – P. 69-70.

[A18] Stepikhova, M. Si/SiGe:Er/Si Structures for Laser Realization: Theoretical Analysis and Luminescent Studies / M. Stepikhova, L. Krasil'nikova, Z. Krasil'nik, V. Shengurov, V. Chalkov, S. Svetlov, D. Zhigunov, V. Timoshenko, O. Shalygina, P. Kashkarov // The 3rd Int. Conference on Materials for Advanced Technologies ICMAT-2005 & 9th Int. Conference on Advanced Materials ICAM-2005: Book of abstracts, Singapore, Singapore, July 3-8, 2005. – Singapore, 2005. – P. 23.

[A19] Красильникова, Л.В. Волноводные структуры Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si для создания лазера на Si:Er : теоретический анализ / Л.В.Красильникова, М.В. Степихова, А.А. Дубинов, З.Ф. Красильник // Нанопизика и наноэлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 25–29 марта 2005. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2005. – С. 437–438.

- [A20] Красильникова, Л.В. Волноводные структуры Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si для создания лазера на кремнии: теоретический анализ и люминесцентные свойства / Л.В. Красильникова, М.В. Степихова, А.А. Дубинов, З.Ф. Красильник, В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков, Д.М. Жигунов, В.Ю. Тимошенко // VII Российская конференция по физике полупроводников: Тезисы докладов, Звенигород, Россия, 18–23 сентября 2005. – М.: ФИАН, 2005. – С. 104.
- [A21] Красильникова, Л.В. Люминесцентные свойства легированных эрбием структур на основе кремния в условиях сильного оптического возбуждения / Л.В. Красильникова, Д.М. Жигунов, О.А. Шалыгина, В.Ю. Тимошенко, М.В. Степихова, В.Г. Шенгуров, З.Ф. Красильник // Нанозфизика и нанозлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 13–17 марта 2006. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. – С. 332–333.
- [A22] Светлов, С.П. Гетероструктуры Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si(100), выращенные методом сублимации кремния в среде германа / С.П. Светлов, В.Ю. Чалков, В.Г. Шенгуров, В.Н. Шабанов, С.А. Денисов, З.Ф. Красильник, Л.В. Красильникова, М.В. Степихова, Д.В. Шенгуров, Ю.Н. Дроздов // Нанозфизика и нанозлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 13–17 марта 2006. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. – С. 301–302.
- [A23] Андреев, Б.А. 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 // Нанозфизика и нанозлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 13–17 марта 2006. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. – С. 55.
- [A24] Izeddin, I. Optical properties of Er doped SiGe / I. Izeddin, B.A. Andreev, L.V. Krasilnikova, V.G. Shengurov and T. Gregorkiewicz // E-MRS Spring Meeting: Scientific programme, Nice, France, May 29 - June 2, 2006. – Nice, 2006. – T12.06.
- [A25] Спиваков, А.Г. Люминесцентные и электрофизические свойства диодных гетероструктур Si/SiGe:Er/Si / А.Г. Спиваков, Л.В. Красильникова, М.В. Степихова, З.Ф. Красильник, В.Ю. Чалков, В.Г. Шенгуров // Нанозфизика и нанозлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 10–14 марта 2007. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2007. – С. 430–431.
- [A26] Stepikhova, M. Waveguiding and luminescent properties of Si/Si_{1-x}Ge_x:Er/Si structures produced by the sublimation MBE technique / M. Stepikhova, A. Spivakov, L. Krasilnikova, V. Ivanov, Z. Krasilnik, V. Shengurov // E-MRS Spring Meeting: Scientific programme, Strasbourg, France, May 28 - June 1, 2007. – Strasbourg, 2007. – C-11 3.

Красильникова Людмила Владимировна

**ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУР Si/SiGe,
ЛЕГИРОВАННЫХ ПРИМЕСЬЮ ЭРБИЯ**

Автореферат

Подписано к печати 13.09.2007 г. Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН
603950, Нижний Новгород, ГСП-105