

Ремизов Дмитрий Юрьевич

**УДАРНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ИОНОВ ЭРБИЯ  
В КРЕМНИЕВЫХ СВЕТОДИОДНЫХ СТРУКТУРАХ,  
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СУБЛИМАЦИОННОЙ  
МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ**

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

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород  
2008

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

Научный руководитель: кандидат химических наук,  
Шмагин Вячеслав Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Тетельбаум Давид Исаакович  
Научно-исследовательский физико-  
технический институт  
Нижегородского Государственного  
университета им. Н.И. Лобачевского

доктор физико-математических наук,  
Гусев Олег Борисович  
Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

Ведущая организация: Институт физики твердого тела  
Российской академии наук, Черноголовка

Защита состоится 13 ноября 2008 г. в 14 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 "8" октября 2008 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор



Гайкович К.П.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Кремний является основным материалом современной полупроводниковой электроники, и такое положение сохранится, по-видимому, в течение ближайших десятилетий. Это обусловлено уникальными свойствами и дешевизной кремния и, как следствие, развитой технологией. Вместе с тем, в области оптоэлектронных применений кремний не получил столь широкого распространения и уступает полупроводниковым материалам на основе  $A_3B_5$ .

Трудности интегрирования кремния в оптоэлектронику обусловлены, в основном, двумя факторами: непрямозонностью кремния и интенсивной безызлучательной релаксацией. В качестве подходов, предложенных для преодоления указанных ограничений, следует выделить: формирование в кремнии ансамблей самоформирующихся  $Ge(Si)/Si$  наноструктур (квантовых точек) [1,2], формирование оптически активных преципитатов силицида железа ( $\beta\text{-FeSi}$ ) [3], формирование собственных оптически активных дефектов (дефектная люминесценция) [4,5], легирование кремния редкоземельным элементом эрбием (см. обзор работ в [6]). Последний вариант представляется более привлекательным, поскольку длина волны рабочего перехода  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  в 4f-оболочке иона эрбия ( $\lambda \sim 1,54$  мкм) попадает в полосу минимальных потерь и дисперсии кварцевых волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Важное значение имеют стабильность (по отношению к изменениям температуры и внутрикристаллического окружения ионов эрбия) и малая ширина линии излучения  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ .

При комнатной температуре наиболее эффективен ударный механизм возбуждения ионов эрбия горячими носителями, который реализуется в кремниевых диодных структурах при обратном смещении в режиме электрического пробоя p/n-перехода [7-9]. Преимущества ударного механизма, обусловленные возможностью подавления основных механизмов безызлучательной релаксации ионов эрбия и, как следствие, слабым температурным гашением интенсивности люминесценции, стимулировали заметную активность исследователей в данном направлении. В связи с этим, исследования физических механизмов, определяющих интенсивность электролюминесценции и эффективность ударного возбуждения ионов эрбия, прежде всего, при комнатной температуре представляются весьма актуальными.

Данная диссертационная работа посвящена исследованию факторов и механизмов, ограничивающих интенсивность электролюминесценции ионов эрбия при ударном механизме возбуждения в обратно смещенных кремниевых диодных структурах при комнатной температуре, и поиску

путей, позволяющих преодолеть выявленные ограничения. Экспериментальная часть работы выполнена на кремниевых светодиодных структурах с различными профилями легирования эрбием и примесями V группы Периодической системы, определяющими электрическую активность выращиваемых слоев и распределение электрического поля по ширине области пространственного заряда (ОПЗ) структур. Исследованные в данной работе кремниевые диодные структуры выращены в Научно-исследовательском физико-техническом институте Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского с использованием оригинального метода сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии, развиваемого совместными усилиями НИФТИ ННГУ и ИФМ РАН.

## **Цели работы**

- исследование связи механизма пробоя p/n-перехода с люминесцентными свойствами кремниевых светодиодных структур Si:Er, излучающих при ударном возбуждении ионов эрбия горячими носителями, разогреваемыми в электрическом поле обратно смещенного p/n-перехода;
- исследование влияния характера распределения электрического поля по ширине ОПЗ диодных структур на интенсивность электролюминесценции и эффективность ударного возбуждения ионов эрбия;
- выявление факторов, ограничивающих интенсивность электролюминесценции ионов эрбия в кремниевых диодных структурах с различным характером распределения электрического поля по ширине ОПЗ; разработка и исследование кремниевых светодиодных структур с повышенной интенсивностью люминесценции ионов эрбия при комнатной температуре.

## **Научная новизна**

Научная новизна работы определяется оригинальностью поставленных экспериментов, полученными новыми результатами и заключается в следующем:

1. Исследована связь механизма пробоя p/n-перехода с интенсивностью ЭЛ и эффективностью ударного возбуждения ионов эрбия в кремниевых светодиодных структурах с различными распределениями электрического поля по ширине ОПЗ. Показано, что независимо от характера распределения электрического поля по ширине ОПЗ структуры режим смешанного пробоя p/n-перехода является оптимальным для достижения максимальной интенсивности ЭЛ ионов эрбия при ударном возбуждении ионов эрбия горячими носителями в ОПЗ p/n-перехода. Изучены механизмы, вызывающие уменьшение интенсивности ЭЛ и эффективности

ударного возбуждения ионов эрбия в диодных структурах с туннельным и лавинным механизмами пробоя p/n-перехода.

2. Выполнены первые исследования кинетики ЭЛ диодных структур p<sup>+</sup>/n-Si:Er, полученных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии. В структурах со смешанным механизмом пробоя p/n-перехода, излучающих при комнатной температуре, определены эффективное сечение ударного возбуждения ионов эрбия ( $\sigma \sim 1,4 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ ) и время жизни ионов эрбия в возбужденном состоянии  ${}^4I_{13/2}$  ( $\tau \sim 540 \text{ мкс}$ ), оценена внутренняя квантовая эффективность ( $\geq 10^{-3}$ ).

3. Исследовано влияние характера распределения электрического поля в ОПЗ кремниевых диодных структур на их люминесцентные свойства. Показано (на примере p/n и p-i-n кремниевых диодных структур, легированных эрбием, с треугольным и трапецидальным распределениями поля в ОПЗ соответственно), что распределение электрического поля в ОПЗ определяет соотношение между электронной и дырочной компонентами в токе накачки диодной структуры и через величину их соотношения влияет на интенсивность ЭЛ и эффективность ударного возбуждения ионов эрбия.

4. Предложена концепция светодиодной структуры туннельно-пролетного типа с расширенной ОПЗ и увеличенной мощностью излучения при комнатной температуре, излучающей при ударном возбуждении ионов эрбия. Выполнены электрофизические и люминесцентные исследования кремниевых диодных светоизлучающих структур туннельно-пролетного типа с пролетной областью, легированной эрбием, впервые выращенных методом сублимационной МЛЭ.

## **Научная и практическая значимость работы**

Детально исследовано влияние различных аспектов электрического пробоя p/n-перехода (однородность пробоя, ширина ОПЗ и энергия носителей в режиме пробоя) на интенсивность электролюминесценции и эффективность ударного возбуждения ионов эрбия в диодных структурах на основе Si:Er с различными профилями легирования при комнатной температуре.

Выявлены факторы, ограничивающие интенсивность эрбиевой электролюминесценции и эффективность ударного возбуждения ионов Er<sup>3+</sup>. Сформулированы условия, выполнение которых позволяет оптимизировать распределение электрического поля по ширине ОПЗ и увеличить интенсивность ЭЛ ионов эрбия при комнатной температуре.

Продемонстрированы преимущества диодных структур на основе Si:Er со сложным профилем легирования для достижения высокой

интенсивности эрбиевой ЭЛ при комнатной температуре. Зарегистрированная в экспериментах величина мощности излучения ионов эрбия в диапазоне  $\lambda \sim 1,5$  мкм при комнатной температуре превышает известные по литературным данным значения.

Апробированная в работе совокупность аналитических и исследовательских методик может быть использована при изучении особенностей ударного возбуждения редкоземельных элементов в диодных полупроводниковых структурах на основе кремния или других полупроводниковых материалов.

Полученные в работе экспериментальные данные являются важным звеном в цепочке исследований, ведущих к созданию эффективных источников света на основе кремния, представляющих значительный интерес для современной оптоэлектроники.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. При ударном возбуждении ионов эрбия в кремниевых светодиодных структурах максимальная интенсивность электролюминесценции (ЭЛ) достигается в режиме смешанного пробоя р/n-перехода, при котором эффективность ударного возбуждения ионов  $\text{Er}^{3+}$  и ширина области пространственного заряда (ОПЗ) уже достаточно велики, а шнурование тока накачки минимально и еще не сказывается на эффективности возбуждения ионов эрбия. Светодиодные структуры  $\text{Si:Er/Si}$ , излучающие в режимах туннельного или лавинного пробоя р/n-перехода, характеризуются меньшими интенсивностью ЭЛ и эффективностью возбуждения ионов  $\text{Er}^{3+}$ .
2. Для достижения максимальных эффективности возбуждения и интенсивности ЭЛ ионов эрбия при ударном механизме возбуждения  $\text{Er}^{3+}$  в обратно смещенной диодной структуре необходимо, чтобы в токе накачки диодной структуры преобладала электронная компонента. Соотношение между электронной и дырочной компонентами в токе накачки диодной светоизлучающей структуры определяется распределением электрического поля в ОПЗ структуры.
3. Оптимальным для достижения максимальной интенсивности ЭЛ ионов эрбия является такое распределение электрического поля в ОПЗ структуры, при котором область сильного поля (туннельная генерация и разогрев носителей) прижата к р/n-переходу, а область слабого тянущего поля (ударное возбуждение ионов эрбия) максимально растянута. Такой профиль электрического поля позволяет подавить дырочную компоненту в токе накачки светодиодной структуры и заметно расширить ОПЗ (до 1,0 мкм и более), не переходя в режим лавинного пробоя р/n-перехода, для которого

характерны шнурование тока накачки и вызываемое этим уменьшение интенсивности ЭЛ ионов эрбия.

### **Личный вклад автора**

— равнозначный (совместно с В.Б. Шагиным, В.П. Кузнецовым) в подготовку и проведение исследований люминесцентных свойств светодиодных структур типа  $p^+/n\text{-Si:Er}$ , обработку и интерпретацию результатов [A1, A2, A5, A8, A10 - A15, A19].

— равнозначный (совместно с В.Б. Шагиным) в подготовку и проведение экспериментов по исследованию кинетики ЭЛ светодиодных структур типа  $p^+/n\text{-Si:Er}$ , обработку и интерпретацию результатов, [A3, A5, A6, A10 - A12, A23].

— основной в проведение исследований кремниевых светодиодных структур типа  $p\text{-i-n}$  с  $i$ -областью, легированной эрбием, и трапецидальным профилем электрического поля в ОПЗ структуры [A4, A7, A8, A16, A17, A19, A20].

— равнозначный (совместно с В.Б. Шагиным, В.П. Кузнецовым) в подготовку и проведение исследований люминесцентных свойств светодиодных структур туннельно-пролетного типа с пролетной областью, легированной эрбием, обработку и интерпретацию результатов [A9, A18, A21, A22, A24 - A28].

### **Апробация результатов работы**

Результаты диссертационной работы опубликованы в 12 статьях в реферируемых научных журналах и сборниках, и докладывались на 16 всероссийских и международных конференциях и совещаниях: 22-ой международной конференции по дефектам в полупроводниках (22st International Conference on Defects in Semiconductors, Орхус, Дания, 2003г.); всероссийских совещаниях “Нанофотоника” (Н. Новгород 2003г., 2004г.); 6-ой Российской конференции по физике полупроводников (Санкт-Петербург, 2003г.); Международном совещании “Кремний-2004” (Иркутск, 2004г.); 5-ой международной конференции по фотонике, приборам и системам (5<sup>th</sup> International Conference on Photonics, Devices and Systems “PHOTONICS PRAGUE 2005”, Прага, Чехия, 2005г.); всероссийских симпозиумах “Нанозфизика и нанозлектроника” (Н. Новгород 2005г., 2006г., 2007г., 2008г.); 7-ой Российской конференции по физике полупроводников (Звенигород, 2005г.); 8-ой Российской конференции по физике полупроводников (Екатеринбург, 2007); 16-ой Уральской международной зимней школе по физике полупроводников (Екатеринбург, 2006г.); 28-ой международной конференции по физике полупроводников (28th

International Conference on the Physics of Semiconductors, Вена, Австрия, 2006г.). Результаты работы были представлены на школах и сессиях молодых ученых, обсуждались на семинарах ИФМ РАН.

## Публикации

По теме диссертации опубликованы 28 печатные работы, в том числе, 12 статей в научных журналах и 16 публикаций в сборниках тезисов докладов и трудов конференций, симпозиумов и совещаний.

## Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения. Объём диссертации составляет 160 страниц, включая 41 рисунок и 2 таблицы. Список цитированной литературы включает 113 наименований, список работ автора по теме диссертации - 28 наименований.

## Основное 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.

**Глава 1** представляет собой обзор литературы. В этой главе обсуждается состояние проблемы, которой посвящена диссертация. В первом параграфе приведены данные об энергетической структуре уровней редкоземельного иона  $\text{Er}^{3+}$  в матрице кремния, описано влияние кристаллического поля на структуру энергетических уровней и, соответственно, на структуру спектра излучения иона эрбия. Описаны наиболее интересные, с точки зрения практического использования, оптически активные центры (ОАЦ), формируемые при внедрении эрбия в матрицу монокристаллического кремния. В заключении первого параграфа рассмотрены основные методы, используемые для получения светоизлучающих структур на основе  $\text{Si:Er}$ .

Во втором параграфе выполнен обзор работ, посвященных механизмам возбуждения и девозбуждения ионов эрбия, внедренных в кремниевую матрицу. Описаны механизмы рекомбинационного и ударного возбуждения ионов  $\text{Er}^{3+}$ , выделены их сильные и слабые стороны. Проанализированы основные процессы безызлучательной релаксации ионов  $\text{Er}^{3+}$  – оже-девозбуждение свободными носителями и процесс обратной передачи энергии в кремниевую матрицу («back transfer»), рассмотрены факторы, определяющие интенсивность этих процессов. Показано, что при комнатной температуре более эффективен ударный механизм возбуждения ионов  $\text{Er}^{3+}$  в диодных структурах, излучающих при обратном смещении в

режиме пробоя p/n-перехода, при котором удается в значительной степени подавить безызлучательную релаксацию возбужденных ионов эрбия.

В третьем параграфе анализируются известные по литературным данным результаты исследований диодных структур Si:Er/Si, реализующих ударный механизм возбуждения ионов  $Er^{3+}$ . Выделены наиболее значительные достижения в данной области, полученные различными исследовательскими группами. Анализируются особенности температурного гашения ЭЛ ионов  $Er^{3+}$ , приведены данные по эффективности возбуждения ЭЛ ионов эрбия в диодных структурах с лавинным и туннельным механизмами пробоя p/n-перехода, рассмотрены влияние ориентации подложки, условий роста и послеростового отжига структур на их люминесцентные свойства. Рассмотрены физические явления, свойственные лишь ударному механизму возбуждения ионов  $Er^{3+}$ : эффект “темновой” области, явление “возгорания” эрбиевой ЭЛ при увеличении температуры.

В четвертом параграфе литературного обзора анализируются факторы, ограничивающие интенсивность ЭЛ ионов эрбия при ударном возбуждении, рассмотрены возможности увеличения интенсивности эрбиевой ЭЛ при комнатной температуре. В заключении параграфа сформулированы задачи диссертационного исследования.

**Глава 2** посвящена описанию экспериментальных методик, которые использовались при выполнении настоящей работы. Здесь же приведены схемы основных экспериментов и технические характеристики основных приборов, использованных в работе.

В первом параграфе даны описания методик, использованных при выполнении электрофизических измерений, таких как измерения вольтамперных (ВАХ) и вольтфарадных (ВФХ) характеристик. Во втором параграфе описаны методики исследования люминесцентных свойств структур: регистрация спектров электролюминесценции (ЭЛ), измерения зависимости интенсивности ЭЛ от тока накачки, кинетические измерения, измерения мощности излучения.

В следующих трех главах представлены оригинальные результаты.

**Глава 3** посвящена исследованию влияния механизма пробоя p/n-перехода на интенсивность ЭЛ и эффективность ударного возбуждения ионов  $Er^{3+}$  горячими электронами в обратно смещенных диодных структурах. Исследования были выполнены на примере диодных светоизлучающих структур типа p<sup>+</sup>/n-Si:Er с треугольным профилем электрического поля в ОПЗ, выращенных методом сублимационной МЛЭ.

В первом параграфе описаны особенности эксперимента по выращиванию диодных структур методом СМЛЭ, позволившие получить серию диодов типа p<sup>+</sup>/n-Si:Er, в которой механизм пробоя при переходе от

одного диода к другому плавно меняется в направлении от туннельного к лавинному. Достигалось это путем изменения степени легирования слоя n-Si:Er сурьмой, остальные параметры диодов поддерживались постоянными.

Во втором параграфе исследуется влияние механизма пробоя на ЭЛ свойства диодных структур: вид спектра ЭЛ, интенсивность ЭЛ ионов эрбия, соотношение между интенсивностями эрбиевой и «горячей» ЭЛ, эффективность ударного возбуждения ионов  $\text{Er}^{3+}$ . Показано, что максимальные интенсивность ЭЛ и эффективность ударного возбуждения ионов  $\text{Er}^{3+}$  достигаются в режиме смешанного пробоя p/n-перехода. Описаны и проанализированы причины, приводящие к снижению интенсивности и эффективности возбуждения ЭЛ ионов эрбия, в структурах с явно выраженным туннельным или лавинным механизмами пробоя.

В третьем параграфе данной главы представлены результаты исследования кинетики нарастания ЭЛ ионов  $\text{Er}^{3+}$  в диодных структурах  $\text{p}^+/\text{n-Si:Er}$ , выращенных методом СМЛЭ и излучающих в режиме смешанного пробоя p/n-перехода при  $T = 300$  К. Из данных кинетики определены сечение ударного возбуждения ( $\sigma \sim 1,4 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ ) и время жизни ( $\tau \sim 540$  мкс) ионов  $\text{Er}^{3+}$  в возбужденном состоянии при комнатной температуре, оценена внутренняя квантовая эффективность ( $\eta_{\text{int}} \geq 1 \cdot 10^{-3}$ ). Показано, что по перечисленным параметрам исследованные структуры превосходят диодные структуры, излучающие в режиме туннельного пробоя p/n-перехода и соответствуют имплантационным диодным структурам аналогичного типа, излучающим в режиме лавинного пробоя p/n-перехода.

**Глава 4** посвящена исследованию влияния характера распределения электрического поля в ОПЗ кремниевых диодных структур на их люминесцентные свойства. Проведено сопоставление ЭЛ свойств диодных структур с различным распределением электрического поля в ОПЗ (диодные структуры  $\text{p}^+/\text{n-Si:Er}$  с треугольными распределениями поля в ОПЗ и диодные структуры типа  $\text{p}^+/\text{n-Si:Er}/\text{n}^+$  с трапецеидальным профилем поля). Сформулированы представления о том, каким должно быть распределение поля в ОПЗ диодной структуры для достижения максимальных эффективности возбуждения и интенсивности эрбиевой ЭЛ при ударном возбуждении ионов  $\text{Er}^{3+}$ .

В первом параграфе исследуются люминесцентные свойства диодных p-i-n структур с i-областью, легированной эрбием – диодных структур типа  $\text{p}^+/\text{Si}/\text{n-Si:Er}/\text{n}^+/\text{Si}$ . Показано, что механизм пробоя диодных структур данного типа определяется толщиной i-области. Мы наблюдаем

туннельный механизм пробоя при толщине  $i$ -области менее 50 нм и плавную трансформацию механизма пробоя в сторону смешанного и далее лавинного механизмов пробоя при увеличении толщины  $i$ -области. Исследована связь между механизмом пробоя  $p$ - $i$ - $n$  структуры и интенсивностью ЭЛ ионов эрбия при комнатной температуре. Показано, что максимальная интенсивность ЭЛ ионов эрбия достигается (так же как и в случае диодной структуры  $p^+/n$ -Si:Er) в режиме смешанного пробоя  $p$ - $i$ - $n$  структуры. Сделан вывод об общем характере установленной связи между механизмом пробоя и ЭЛ свойствами диодных светоизлучающих структур, реализующих ударный механизм возбуждения. Определена ширина „темновой“ области  $d_{dark} \sim 12 - 15$  нм, в пределах которой носители, разогреваемые в поле обратно смещенной  $p$ - $i$ - $n$  структуры, набирают энергию  $E \sim 0,8$  эВ, необходимую для ударного возбуждения иона  $Er^{3+}$  в состояние  ${}^4I_{13/2}$ .

Второй параграф посвящен обсуждению факторов, определяющих различия в интенсивности ЭЛ ионов эрбия в диодных структурах типов  $p^+$ -Si/ $n$ -Si:Er и  $p^+$ -Si/ $n$ -Si:Er/ $n^+$ -Si. Показано, что установленные различия обусловлены различиями в характере распределения электрического поля по ширине ОПЗ структур. Распределение поля по ширине ОПЗ в режиме пробоя диодной структуры определяет соотношение между электронной и дырочной компонентами в токе накачки структуры и, в силу различной эффективности ударного возбуждения ионов эрбия горячими электронами и дырками, влияет на интенсивность ЭЛ ионов эрбия. Показано, что треугольное распределение электрического поля в ОПЗ (диодные структуры типа  $p^+/n$ -Si:Er) более эффективно для достижения максимальной интенсивности ЭЛ ионов эрбия по сравнению с трапецеидальным распределением поля (диодные структуры типа  $p$ - $i$ - $n$ ). В заключении параграфа сформулированы представления о том, каким должно быть распределение поля в ОПЗ диодной структуры для достижения максимальной эффективности возбуждения и интенсивности эрбиевой ЭЛ при ударном возбуждении ионов  $Er^{3+}$ .

**Глава 5** содержит результаты экспериментальных исследований электрофизических и электролюминесцентных свойств диодных туннельно-пролетных структур типа  $p^+/n^+/n$ -Si:Er с пролетной областью, легированной эрбием, впервые выращенных методом сублимационной МЛЭ.

В первом параграфе представлены результаты исследования влияния параметров туннельно-пролетной структуры на механизм пробоя и интенсивность ЭЛ ионов  $Er^{3+}$ . Показано, что электрофизические и электролюминесцентные свойства туннельно-пролетных структур во

многим определяются уровнем легирования и толщиной тонкого высоколегированного слоя  $n^+$ -Si. Показано, что уменьшение толщины слоя  $n^+$ -Si ведет к увеличению напряженности электрического поля в активной области структуры – слое n-Si:Er – в режиме пробоя. Последнее вызывает, в свою очередь, слабую трансформацию механизма пробоя в направлении туннельный  $\rightarrow$  смешанный, увеличение интенсивности ЭЛ и эффективности ударного возбуждения ионов эрбия.

Во втором параграфе проведено сопоставление диодных структур туннельно-пролетного типа с более распространенными диодными структурами типа  $p^+/n$ -Si:Er. Показано, что при одном и том же значении эффективности возбуждения туннельно-пролетные структуры показывают на порядок большую интенсивность ЭЛ по сравнению со структурами типа  $p^+/n$ -Si:Er. В то же время, в целом исследованные в данной работе туннельно-пролетные структуры уступают структурам типа  $p^+$ -Si/n-Si:Er по максимально достигнутой эффективности возбуждения, что мы связываем с недостаточной величиной напряженности электрического поля в слое n-Si:Er в режиме пробоя структуры. В заключении второго параграфа приведены результаты измерения внешней квантовой эффективности туннельно-пролетных структур и мощности, излучаемой туннельно-пролетными структурами в диапазоне  $\lambda \sim 1,54$  мкм при комнатной температуре.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в ходе выполнения работы.

## **Основные результаты работы**

1. Исследована связь механизма пробоя  $p/n$ -перехода с интенсивностью электролюминесценции ионов эрбия при ударном возбуждении ионов эрбия горячими носителями в обратно смещенных кремниевых светодиодных структурах  $p^+/n$ -Si:Er. Показано, что максимальная интенсивность электролюминесценции ионов эрбия достигается при смешанном механизме пробоя  $p/n$ -перехода, оптимально сочетающем высокую эффективность ударного возбуждения ионов эрбия ( $\sigma \sim 1 \cdot 10^{-19}$  см<sup>2</sup>с) и широкую область пространственного заряда ( $W \sim 150$ - $200$  нм) при минимальном шнуровании тока накачки. Изучены механизмы, вызывающие уменьшение интенсивности электролюминесценции ионов эрбия в диодных структурах с туннельным и лавинным механизмами пробоя  $p/n$ -перехода.

2. Исследованы ЭЛ свойства кремниевых светодиодных структур типа  $p-i-n$  с  $i$ -областью, легированной эрбием, излучающих при ударном возбуждении ионов эрбия в режиме электрического пробоя  $p-i-n$  структуры.

Показано, что механизм пробоя в исследованном классе структур определяется толщиной  $i$ -слоя. Максимальная интенсивность электролюминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  при комнатной температуре достигается при смешанном механизме пробоя и толщине  $i$ -области  $\sim 150$ - $200$  нм. Определена ширина “темновой” области ( $d_{\text{dark}} \sim 12$ - $15$  нм), примыкающей к границе  $p/n$ -перехода, в пределах которой электроны набирают энергию ( $\geq 0,8$  эВ), необходимую для ударного возбуждения ионов эрбия в состоянии  $^4I_{13/2}$ .

3. Исследован механизм влияния распределения электрического поля в ОПЗ кремниевых светодиодных структур, излучающих при ударном возбуждении ионов эрбия, на их люминесцентные свойства. Показано (на примере  $p/n$  и  $p-i-n$  кремниевых диодных структур, легированных эрбием, с треугольным и трапецидальным распределениями поля в ОПЗ, соответственно), что распределение электрического поля в ОПЗ определяет соотношение между электронной и дырочной компонентами в токе накачки диодной структуры и через величину этого соотношения влияет на интенсивность ЭЛ и эффективность ударного возбуждения ионов эрбия. Показано, что треугольное распределение электрического поля в ОПЗ (диодные структуры типа  $p^+/n\text{-Si:Er}$ ) более эффективно для достижения максимальной интенсивности ЭЛ ионов эрбия по сравнению с трапецидальным распределением поля (диодные структуры типа  $p-i-n$ ).

4. Предложены кремниевые светодиодные структуры туннельно-пролетного типа с пролетной областью, легированной эрбием. Исследованы электрофизические и люминесцентные свойства туннельно-пролетных структур  $p^+/n^+/n\text{-Si:Er}$ , выращенных впервые методом сублимационной МЛЭ на подложках  $p\text{-Si:B}$  с ориентацией (100) и удельным сопротивлением  $\rho \sim 10$ - $12$  Ом см. Показано, что при той же эффективности возбуждения туннельно-пролетные структуры до порядка величины превосходят по интенсивности ЭЛ диодные структуры типа  $p^+/n\text{-Si:Er}$ . Преимущества туннельно-пролетных структур обусловлены более сложным распределением электрического поля в ОПЗ структуры: область сильного поля (туннельная генерация и разогрев носителей) прижата к границе  $p/n$ -перехода, область слабого тянущего поля (возбуждение ионов эрбия) максимально растянута. Такой профиль электрического поля обуславливает преобладание электронной компоненты в токе накачки диодной структуры и позволяет заметно расширить ОПЗ структуры (до  $0,5$  –  $1,0$  мкм и более), не переходя в режим лавинного пробоя  $p/n$ -перехода, для которого характерны шнурование тока накачки и вызываемое этим уменьшение интенсивности ЭЛ ионов эрбия.

5. Для туннельно-пролетной структуры с поверхностью, не оптимизированной для вывода излучения, внешняя квантовая эффективность и мощность, излучаемая в диапазоне  $\lambda \sim 1,54$  мкм, при комнатной температуре составили:  $\eta_{\text{ext}} \sim 1,5 \cdot 10^{-5}$  при токе накачки  $I \sim 0,2$  А и  $P \approx 4,7$  мкВт при токе накачки  $I \sim 0,5$  А ( $j \sim 20$  А/см<sup>2</sup>). Значение мощности излучения, зарегистрированное в экспериментах с туннельно-пролетными структурами в диапазоне  $\lambda \sim 1,54$  мкм при комнатной температуре, превышает известные по литературным данным для светоизлучающих структур на основе монокристаллического кремния, легированного эрбием.

## Список цитированной литературы

- [1] Brunner, K. Si/Ge nanostructure / K. Brunner // Rep. Prog. Phys. – 2002. – V.65. – P.27-72.
- [2] Paul, D.J. Si/SiGe heterostructures: from material and physics to devices and circuits / D.J. Paul // Semicond. Sci. Technol. – 2004. –V. 19. P.R75-R108.
- [3] Schuller, S Optical and structural properties of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> precipitate layers in silicon / S. Schuller [et al.] // J. Appl. Phys. – 2003. - V.94. - P.207–211.
- [4] Kveder, V. Room-temperature silicon light-emitting diodes based on dislocation luminescence / V. Kveder [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2004. - V.84. - P. 2106-2108.
- [5] Steinman, E.A. Dislocation structure and photoluminescence of partially relaxed SiGe layers on Si(001) substrates / E.A. Steinman [et al.] // Semicond. Sci. Technol. – 1999. –V. 14. P.582-586.
- [6] Kenyon, A.J. Erbium in silicon / A. J. Kenyon // Semicond. Sci. Technol. - 2005. - V. 20. - R. 65-84.
- [7] Franzo, G. Room-temperature electroluminescence from Er-doped crystalline Si / G. Franzo [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 1994. - V 64, iss. 17. - P. 2235-2237.
- [8] Stimmer, J. Electroluminescence of erbium-oxygen-doped silicon diodes grown by molecular beam epitaxy / J. Stimmer [et al.] // Appl. Phys. Lett. - 1996. - V. 68. - P. 3290-3292.
- [9] Sobolev, N. A. Avalanche breakdown-related electroluminescence in single crystal Si:Er:O / N. A. Sobolev [et al.] // Appl. Phys. Lett. - 1997. - V. 71. - P. 1930-1932.

## Основные публикации автора по теме диссертации

- [A1] Shmagin, V. B. Effect of the breakdown nature on Er-related electroluminescence intensity and excitation efficiency in Si:Er light emitting diodes grown with sublimation MBE technique / V. B. Shmagin, V. P. Kuznetsov, D. Yu. Remizov, Z. F. Krasil'nik, L. V. Krasil'nikova, D. I. Kryzhkov // Materials Science and Engineering B. - 2003. - V. 105. - P. 70-73.
- [A2] Шмагин, В. Б. Влияние характера пробоя р-п перехода на интенсивность и эффективность возбуждения электролюминесценции ионов Er<sup>3+</sup> в эпитаксиальных слоях Si:Er, полученных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии / В. Б. Шмагин, Д. Ю. Ремизов, З. Ф. Красильник, В. П. Кузнецов, В. Н. Шабанов, Л. В. Красильникова, Д. И. Крыжков, М. Н. Дроздов // ФТТ. – 2004. - Т. 46, вып. 1. - С. 110-113.

- [A3] Ремизов, Д. Ю. Эффективное сечение возбуждения и время жизни ионов  $\text{Er}^{3+}$  в светодиодах на основе  $\text{Si:Er}$ , полученных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии / Ремизов Д. Ю., В. Б. Шмагин, А. В. Антонов, В. П. Кузнецов, З. Ф. Красильник // ФТТ. – 2005. - Т. 47, вып. 1. - С. 95-98.
- [A4] Шмагин, В. Б. Электролюминесценция ионов  $\text{Er}^{3+}$  в режиме пробоя диодной структуры  $p^+-\text{Si}/n\text{-Si:Er}/n^+-\text{Si}$  / В. Б. Шмагин, Д. Ю. Ремизов, С. В. Оболенский, Д. И. Крыжков, М. Н. Дроздов, З. Ф. Красильник // ФТТ. – 2005. - Т. 47, вып. 1. - С. 120-123.
- [A5] 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, 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.
- [A6] Obolensky, S.V. A simple approach to the simulation of impact excitation of erbium in silicon light-emitting diodes / S. V. Obolensky, V. B. Shmagin, V. A. Kozlov, K. E. Kudryavtsev, D. Yu. Remizov, Z. F. Krasilnik // Semicond. Sci. Technol. - 2006. - V. 21. - P. 1459-1463.
- [A7] Shmagin, V.B. Effect of space charge region width on Er-related luminescence in reverse biased Si:Er-based light emitting diodes / V.B. Shmagin, S.V. Obolensky, D.Yu. Remizov, V.P. Kuznetsov, Z.F. Krasilnik // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2006. – V. 12. – P. 1556-1560.
- [A8] Кузнецов, В. П. Электролюминесценция на длине волны 1.54 мкм в структурах  $\text{Si:Er/Si}$ , выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии / В. П. Кузнецов, Д. Ю. Ремизов, В. Н. Шабанов, Р. А. Рубцова, М. В. Степихова, Д. И. Крыжков, А. Н. Шушунов, О. В. Белова, З. Ф. Красильник, Г. А. Максимов. // ФТП. - 2006. - Т. 40, вып. 7. - С. 868-875.
- [A9] Кузнецов, В. П. Электролюминесценция ионов эрбия в кремниевых диодных структурах  $p^{++}/n^+/n\text{-Si:Er}/n^{++}$  / В. П. Кузнецов, Д. Ю. Ремизов, В. Б. Шмагин, К. Е. Кудрявцев, В. Н. Шабанов, С. В. Оболенский, О. В. Белова, М. В. Кузнецов, А. В. Корнаухов, Б. А. Андреев, З. Ф. Красильник // ФТП. - 2007. - Т. 41, вып. 11. - С. 1329-1332.
- [A10] 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.

[A11] 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, Miroslav Miler, Dagmar Senderakova, Proc. of SPIE. – 2006. – V. 6180. - P. 61800L1-61800L8.

[A12] Shmagin, V.B. Si:Er-based light emitting diodes grown with sublimation MBE technique for optoelectronic applications / V.B. Shmagin, D.Yu. Remizov, V.P. Kuznetsov, V.N. Shabanov, Z.F. Krasilnik. // Proceedings of SPIE, vol. 6180, 6180-08 (2006).

[A13] Shmagin, V. The influence of breakdown conditions on  $\text{Er}^{3+}$  electroluminescence in Si:Er grown with sublimation MBE technique / V. Shmagin, V. Kuznetsov, D. Remizov, B. Andreev, Z. Krasil'nik // 22st International Conference on Defects in Semiconductors, Arhus, Denmark, 28 July - 1 August 2003, Book of Abstracts II (Poster), PA92.

[A14] Шмагин, В.Б. Влияние характера пробоя р-п перехода на интенсивность и эффективность возбуждения электролюминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  в эпитаксиальных слоях Si:Er, полученных методом сублимационной МЛЭ / В. Б. Шмагин, Д. Ю. Ремизов, З. Ф. Красильник, Л. В. Красильникова, Д. И. Крыжков, М. Н. Дроздов, В. П. Кузнецов, В. Н. Шабанов. // Нанوفотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 17–20 марта 2003. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2003. – С. 107–110.

[A15] Шмагин, В. Б. Влияние механизма пробоя р-п перехода на излучательные свойства диодных электролюминесцентных структур Si:Er/Si, полученных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии. // VI Российская конференция по физике полупроводников / В. Б. Шмагин, Д. Ю. Ремизов, З. Ф. Красильник, В. П. Кузнецов, В. Н. Шабанов // Санкт-Петербург. 27-31 октября 2003г. - С.93-94.

[A16] Шмагин, В. Б. Электролюминесценция ионов  $\text{Er}^{3+}$  в режиме пробоя диодной структуры  $\text{p}^+/\text{n-Si:Er}/\text{n}^+$  / В. Б. Шмагин, Д. Ю. Ремизов, М. Н. Дроздов, Д. И. Крыжков, З. Ф. Красильник, С. В. Оболенский // Нанوفотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 2–6 мая 2004. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2004. – С. 97–99.

[A17] Шмагин, В.Б. Электролюминесцентные диодные структуры на основе Si:Er, выращенные методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии / В. Б. Шмагин, Д. Ю. Ремизов, З. Ф. Красильник,

В. П. Кузнецов, С. В. Оболенский, В. Н. Шабанов // Международное совещание “Кремний-2004”. Иркутск. 5-9 июля 2004г.

[A18] Оболенский, С.В. Численное моделирование ударного возбуждения ионов эрбия горячими носителями в режиме электрического пробоя диодной светоизлучающей структуры Si:Er/Si / С.В. Оболенский, В.Б. Шмагин, В.П. Кузнецов, В.Н. Шабанов, В.А. Козлов, Д.Ю. Ремизов, З.Ф. Красильник // Нанопизика и наноэлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 25–29 марта 2005. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2005. – С. 407–408.

[A19] Шмагин, В. Б. Диодные светоизлучающие структуры на основе Si:Er, излучающие при обратном смещении в режиме пробоя р-п перехода / В. Б. Шмагин, Д.Ю. Ремизов, В.П. Кузнецов, В.Н.Шабанов, З.Ф. Красильник. // VII Российская конференция по физике полупроводников: Тезисы докладов, Звенигород, Россия, 18–23 сентября 2005. – М.: ФИАН, 2005. – С. 322.

[A20] Оболенский, С.В. Численное моделирование ударного возбуждения ионов эрбия горячими электронами в режиме электрического пробоя диодной светоизлучающей структуры Si:Er/Si / С.В. Оболенский, В.Б. Шмагин, В.П. Кузнецов, В.Н. Шабанов, В.А. Козлов, Д.Ю. Ремизов, З.Ф. Красильник. // VII Российская конференция по физике полупроводников: Тезисы докладов, Звенигород, Россия, 18-23 сентября 2005. – М.: ФИАН, 2005. – С. 323.

[A21] Ремизов, Д.Ю. Светоизлучающие диодные туннельно-пролетные структуры на основе Si:Er / Д.Ю. Ремизов, З.Ф. Красильник, В.П. Кузнецов, В.Б. Шмагин // Школа-семинар «Наноматериалы и нанотехнологии. КоМУ-2005». Ижевск. 5 - 8 декабря 2005 г, с. 49.

[A22] Ремизов, Д.Ю. Светоизлучающие диодные туннельно-пролетные структуры на основе Si:Er / Д.Ю. Ремизов, З.Ф. Красильник, В.П. Кузнецов, В.Б. Шмагин // “XVI Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников”. Екатеринбург-Кыштым. 27 февраля – 4 марта 2006г., с.162.

[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 // Нанопизика и наноэлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 13–17 марта 2006. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. – С. 55.

[A24] Ремизов, Д.Ю. О возможности расширения области пространственного заряда в диодной структуре Si:Er/Si, излучающей в режиме пробоя р/п-перехода / Д.Ю. Ремизов, З.Ф. Красильник,

В.П. Кузнецов, С.В. Оболенский, В.Б. Шмагин. // Нанofизика и наноэлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 13–17 марта 2006. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. – С. 348-349.

[A25] Shmagin, V. B. Si:Er-based light emitting diodes with extended space charge region / V.B. Shmagin, D.Yu. Remizov, V.P. Kuznetsov, S.V. Obolensky, and Z.F. Krasil'nik // 28th International Conference on the Physics of Semiconductors, Vienna, Austria, July 24-28, 2006, WeA2q.6.

[A26] Ремизов, Д.Ю. Эффективность возбуждения ионов  $\text{Er}^{3+}$  в диодных туннельно-пролетных структурах на основе Si:Er / Д.Ю. Ремизов, В.Б. Шмагин, В.П. Кузнецов, З.Ф. Красильник // Нанofизика и наноэлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 10–14 марта 2007. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2007. – С. 422-423.

[A27] Ремизов, Д.Ю. Диодные туннельно-пролетные структуры на основе Si:Er, полученные методом сублимационной МЛЭ / Д.Ю. Ремизов, В.Б. Шмагин, В.П. Кузнецов, З.Ф. Красильник. // VIII Российская конференция по физике полупроводников. Екатеринбург. 2007. - С.417.

[A28] Шмагин, В.Б. Диодные туннельно-пролетные структуры на основе Si:Er/Si, излучающие в диапазоне  $\lambda \sim 1.54$  мкм при комнатной температуре / В.Б. Шмагин, Д.Ю. Ремизов, В.П. Кузнецов, С.В. Оболенский, В. А. Козлов, З.Ф. Красильник // Нанofизика и наноэлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 10-14 марта 2008. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2007. – С. 135-138.

РЕМИЗОВ Дмитрий Юрьевич

**УДАРНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ИОНОВ ЭРБИЯ В КРЕМНИЕВЫХ СВЕТОДИОДНЫХ  
СТРУКТУРАХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СУБЛИМАЦИОННОЙ  
МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ**

Автореферат

Подписано к печати 25.09.2008 г. Тираж 100 экз.  
Отпечатано в Институте физики микроструктур РАН  
603950, Нижний Новгород, ГСП-105