

Кудрявцев Константин Евгеньевич

**ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
Er-СОДЕРЖАЩИХ ЦЕНТРОВ
С ЛИНЕЙЧАТЫМИ СПЕКТРАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ
В КРЕМНИЕВЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ**

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 - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН)

Научный руководитель: Шмагин Вячеслав Борисович,
кандидат химических наук,
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты: Гусев Олег Борисович,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Физико-технического института
им. А.Ф. Иоффе РАН

Демидов Евгений Сергеевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
электроники твердого тела ННГУ
им. Н.И. Лобачевского

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Казанский физико-технический институт
им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН

Защита состоится 26 декабря 2013 г. в 16 часов на заседании диссертационного
совета Д 002.098.01 при Институте физики микроструктур РАН (607680,
Нижегородская обл., Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ РАН.

Автореферат разослан "25" ноября 2013 г.

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

Гайкович К.П.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Внутрицентровая люминесценция ионов эрбия в кремнии является одним из интенсивно развиваемых подходов к созданию светоизлучающих структур для кремниевой фотоники. Преимущества данного подхода обусловлены температурной стабильностью и малой шириной линии излучения ионов редкоземельных элементов, в том числе, эрбия, внедренных в полупроводниковую матрицу. Преимущественный интерес к эрбию связан с тем, что линия основного перехода ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ в спектре излучения иона Er^{3+} ($\lambda \sim 1.5$ мкм) попадает в полосу максимальной прозрачности кварцевых оптоволоконных линий связи.

Особенности технологии и оптические свойства светоизлучающих структур на основе Si:Er исследовались во множестве работ, опубликованных за последние два десятилетия (см. обзорные работы [1, 2, 3]), большая часть которых посвящена исследованию структур, полученных имплантацией эрбия и некоторых сопутствующих элементов (O, C, F и др.) в кремниевую подложку. Успехи последних лет, однако, связаны с развитием эпитаксиальных методов роста структур Si:Er/Si и, прежде всего, метода сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) [4]. СМЛЭ структуры Si:Er/Si характеризуются высокой интенсивностью люминесценции эрбия и, что более важно, возможностью селективного формирования излучающих центров с заданными свойствами, в том числе, излучающих центров с атомно-узкими линиями люминесценции [5].

Вместе с тем, имеется ряд нерешенных проблем, препятствующих созданию светодиодных, в том числе, лазерных структур на основе Si:Er, эффективно излучающих при комнатной температуре. К числу таких проблем, прежде всего, следует отнести сильное температурное гашение эрбиевой люминесценции. Физические процессы, ответственные за температурное гашение люминесценции ионов эрбия, несмотря на пристальное внимание к ним научного сообщества, исследованы недостаточно. Сложность проблемы усугубляется разнообразием

излучающих центров, формируемых в слоях Si:Er при росте светоизлучающих структур. Излучающим центрам с различной внутренней структурой присущи специфические особенности возбуждения и девозбуждения, исследование которых требует структур Si:Er/Si с преобладанием определенного типа излучающих центров.

Данная работа развивает представления об особенностях возбуждения, температурного гашения и безызлучательной релаксации Er-содержащих излучающих центров с линейчатой структурой спектра люминесценции. Такие центры, в отличие от центров преципитатного типа, характеризуются атомно-узкими линиями люминесценции и более перспективны для возможных практических приложений.

Степень разработанности темы исследований

Большая часть исследований светоизлучающих структур Si:Er/Si выполнена в отношении излучающих центров преципитатного типа с широкой ($\sim 50 \text{ см}^{-1}$) неоднородно уширенной линией излучения. Меньшая степень изученности Er-содержащих центров с линейчатыми спектрами люминесценции (ширина линий излучения $< 1 \text{ см}^{-1}$) связана, по-видимому, со сложностью получения структур Si:Er/Si с заданным типом излучающих центров, обладающих одинаковой микроскопической структурой. В 1999 году в структурах Si:Er/Si, получаемых методом сублимационной МЛЭ, был идентифицирован излучающий центр Er-1 [5] с узкими линиями излучения и было заявлено о получении методом СМЛЭ структур Si:Er/Si с практически полным преобладанием излучающего центра Er-1. Было показано, что спектральная ширина линий люминесценции центра Er-1 при оптической накачке составляет $< 10 \text{ мкЭВ}$ при $T=4,2 \text{ К}$ и является рекордно низкой для Er-содержащих центров в кремнии [6]. Измерения эффекта Зеемана позволили установить тип симметрии излучающих центров [6, 7]. Были проведены оценки концентрации излучающих центров [8] и оптического усиления [9].

Вместе с тем, особенности возбуждения и безызлучательной релаксации центра Er-1 (равно как и других центров иона Er^{3+} с линейчатыми спектрами излучения)

остаются неисследованными несмотря на очевидную важность данной тематики для практических приложений. По-прежнему открытым остается вопрос об эффективности ударного возбуждения центров с линейчатой структурой спектра горячими носителями, разогреваемыми в электрическом поле обратно-смещенного p/n-перехода [10].

Основные цели работы

1. Установление факторов, контролирующих температурное гашение электролюминесценции ионов Er^{3+} в диодных структурах Si:Er/Si с различными типами излучающих центров эрбия при рекомбинационном и ударном механизмах возбуждения ионов Er^{3+} .
2. Исследование особенностей ударного возбуждения и безызлучательной релаксации ионов Er^{3+} в составе излучающих центров типа Er-1 и Er-O1 с линейчатой структурой спектра люминесценции.

Научная новизна

1. Впервые реализована инжекционная накачка излучающих центров типа Er-1 в эпитаксиальных Si:Er/Si диодах. Ширина основной линии электролюминесценции в спектре рабочего перехода ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ иона Er^{3+} составила величину менее 25 мкэВ (0.2 см^{-1}) при $T \sim 30 \text{ К}$, что является рекордно низким значением ширины линии излучения для кремниевых Er-содержащих диодных структур. Сечение возбуждения центра Er-1 при инжекционной накачке составило $\sigma \sim 1.7 \times 10^{-14} \text{ см}^2$ ($T \sim 30 \text{ К}$) и превосходит известные данные для электролюминесценции диодных структур Si:Er/Si.
2. Определено эффективное сечение ударного возбуждения излучающих центров Er-1 и Er-O1 ($\sigma \sim 10^{-16} \text{ см}^2$ при $T = 77 \text{ К}$) горячими электронами, разогреваемыми в электрическом поле обратносмещенного p/n-перехода. Показано, что по эффективности ударного возбуждения центры Er-1 и Er-O1 не уступают центрам с ионами эрбия в SiO_2 -подобных преципитатах. Температурное гашение

электролюминесценции центров Er-1 и Er-O1 обусловлено увеличением скорости безызлучательной релаксации ионов эрбия с ростом температуры.

3. Исследованы факторы, определяющие температурное гашение электролюминесценции ионов эрбия в составе излучающих центров Er-1 и Er-O1 в диапазоне $T > 100$ К. Предложена физическая модель, объясняющая экспериментально обнаруженные особенности безызлучательной релаксации центров Er-1 и Er-O1 по механизму “back-transfer”, включая малую энергию активации (~ 70 мэВ) процесса “back-transfer” и отсутствие резонансного фотоотклика на частоте рабочего перехода иона Er^{3+} .

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученные в работе результаты являются важными как для понимания физических процессов, определяющих излучательные свойства кремниевых структур, легированных эрбием, так и для оценки возможности практической реализации оптоэлектронных приборов на их основе.

Научная значимость полученных в работе результатов состоит в установлении особенностей взаимодействия Er-содержащих центров с линейчатыми спектрами излучения с электронной подсистемой кремния, контролирующих возбуждение и девозбуждение ионов эрбия при токовой накачке.

Практическая значимость полученных результатов состоит в определении условий получения диодных светоизлучающих структур Si:Er/Si с шириной линии излучения менее 25 мкэВ при $T \sim 30$ К и установлении факторов, определяющих температурное гашение электролюминесценции Er-содержащих излучающих центров типа Er-1, Er-O1 с линейчатым спектром излучения.

Методология и методы исследования

В работе использованы апробированные методики исследования. Светоизлучающие свойства структур Si:Er/Si исследовались методами спектроскопии фото- и электролюминесценции, в том числе, фурье-спектроскопии

с высоким спектральным разрешением и спектроскопии люминесценции с временным разрешением. Данные об энергетической структуре примесных состояний в Si:Er получены методами спектроскопии фотопроводимости и адмиттанс-спектроскопии с температурным и частотным сканированием.

Основные положения, выносимые на защиту

По эффективности ударного возбуждения горячими носителями заряда центры Er-1 и Er-O1 не уступают центрам с ионами эрбия в SiO₂-подобных преципитатах. Температурное гашение эрбиевой электролюминесценции при ударном возбуждении центров Er-1 и Er-O1 обусловлено увеличением скорости безызлучательной релаксации ионов эрбия с ростом температуры.

Температурное гашение фото- и электролюминесценции ионов эрбия в СМЛЭ структурах Si:Er/Si при T<50-60 К и рекомбинационном механизме возбуждения определяется безызлучательной оже-релаксацией ионов Er³⁺ с участием равновесных носителей заряда, концентрация которых контролируется дефектно-примесными комплексами с энергией ионизации ~20-40 мэВ, формируемыми при эпитаксиальном росте слоев Si:Er.

Температурное гашение электролюминесценции ионов эрбия в диодных СМЛЭ структурах с излучающими центрами Er-O1 и Er-1 в диапазоне T>80-100 К при рекомбинационном механизме возбуждения определяется снижением эффективности возбуждения и увеличением скорости безызлучательной релаксации ионов эрбия по механизму “back-transfer” с энергией активации E_A~70мэВ.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Основные научные положения работы сформулированы на основании результатов, полученных с использованием апробированных экспериментальных методик. Получаемые экспериментальные данные и их интерпретация проверены с помощью дополняющих друг друга экспериментальных методик, сопоставлением

с представленными в литературе данными и сравнением с результатами теоретического анализа. Результаты диссертации опубликованы в работах [A1-A20] и докладывались на международной конференции Европейского материаловедческого сообщества E-MRS (Страсбург 2008), 25-й Международной конференции по дефектам в полупроводниках (Санкт-Петербург 2009), IX и XI Российских конференциях по физике полупроводников (Новосибирск/Томск 2009, Санкт-Петербург 2013), 3-й конференции «Устройства и материалы для примесной электролюминесценции» (Impurity Based Electroluminescence Devices and Materials, Барселона 2009), V и VII Международных конференциях “Кремний” (Черноголовка 2008, Нижний Новгород 2010), XI-XVII Международных симпозиумах "Нанозифика и нанозлектроника" (Нижний Новгород 2007-2013), а также на внутренних семинарах Института физики микроструктур РАН. Все вышеперечисленное в совокупности свидетельствует о достоверности полученных результатов и сделанных на их основании выводов.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, в том числе 6 статей в реферируемых научных журналах и 14 публикаций 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 115 страниц, включая 60 рисунков и 4 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 76 наименований.

Содержание работы

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

Глава 1 представляет собой обзор литературы по теме диссертации. В первом параграфе рассмотрены излучательные свойства ионов Er^{3+} в диэлектрических и полупроводниковых матрицах и выделены преимущества светоизлучающих структур на основе Si:Er по сравнению с другими подходами к решению проблем кремниевой фотоники. Во втором параграфе обсуждаются механизмы возбуждения и девозбуждения ионов эрбия в кремнии, факторы, определяющие температурное гашение эрбиевой фото- и электролюминесценции в структурах на основе Si:Er .

Глава 2 посвящена исследованию электролюминесцентных свойств диодных структур Si:Er/Si с различными типами Er -содержащих излучающих центров.

В параграфе 2.1 описаны использованные в данной работе методики регистрации спектров фото- и электролюминесценции (в том числе с высоким спектральным разрешением) и методика измерения кинетики люминесценции.

В параграфе 2.2 приведены результаты спектральных исследований электролюминесценции диодных структур Si:Er/Si , различающихся условиями роста и послеростового отжига. Показано, что закономерности селективного формирования Er -содержащих излучающих центров в процессе СМЛЭ, выявленные в предшествующих исследованиях однородных слоев Si:Er , сохраняются при формировании диодных структур Si:Er/Si . При температуре эпитаксии $T_{\text{gr}} \sim 500\text{--}600^\circ\text{C}$ в спектрах электролюминесценции диодных структур Si:Er/Si преобладают излучающие центры преципитатного типа с характерной широкой ($\Delta k \sim 30\text{--}50 \text{ см}^{-1}$) линией люминесценции, обусловленной неоднородным уширением. При температуре эпитаксии $T_{\text{gr}} \sim 400\text{--}450^\circ\text{C}$ преобладающим типом излучающих центров являются Er -содержащие центры с атомно-узкими ($\Delta k < 1 \text{ см}^{-1}$) линиями люминесценции, такие как Er-O1 и Er-1 .

В параграфе 2.3 представлены результаты исследования инжекционной электролюминесценции диодных структур с излучающими центрами Er-1. Показано, что ширина основной линии электролюминесценции в спектре рабочего перехода ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ иона Er^{3+} составила для диодной структуры с излучающими центрами типа Er-1 величину менее 25 мкэВ ($0,2 \text{ см}^{-1}$) при $T \sim 30 \text{ К}$, что является рекордно низким значением ширины линии излучения для кремниевых Er-содержащих диодных структур. Сечение возбуждения при инжекционной накачке центра Er-1 составило $\sigma \sim 1,7 \times 10^{-14} \text{ см}^2$ ($T \sim 30 \text{ К}$), что также превосходит опубликованные данные для электролюминесценции диодных структур Si:Er/Si.

Заключительный параграф главы, 2.4, содержит результаты исследования ударного возбуждения излучающих центров Er-1 и Er-O1 горячими электронами в режиме обратного смещения p/n-перехода. Установлено сильное влияние механизма пробоя p/n-перехода на интенсивность люминесценции излучающих центров Er-1 и Er-O1, что соответствует результатам предшествующих исследований излучающих центров преципитатного типа. В структурах Si:Er/Si, в которых реализован смешанный пробой p/n-перехода, сечение ударного возбуждения центров Er-1 и Er-O1 составило $\sigma \sim 10^{-16} \text{ см}^2$ при $T = 77 \text{ К}$. Показано, что при ударном возбуждении излучающих центров Er-1 и Er-O1 наблюдается сильное температурное гашение эрбиевой люминесценции, не характерное для центров преципитатного типа. Исследование температурной зависимости интенсивности “горячей люминесценции”, обусловленной внутризонными переходами горячих носителей, позволяет утверждать, что эффективность ударного возбуждения ионов Er^{3+} горячими носителями заряда слабо меняется с ростом температуры, и наблюдаемое температурное гашение электролюминесценции центров Er-1 и Er-O1 обусловлено процессами безызлучательной релаксации ионов Er^{3+} .

Глава 3 посвящена исследованию безызлучательной оже-релаксации, контролирующей температурное гашение эрбиевой люминесценции в области низких температур ($T < 80\text{-}100 \text{ К}$).

Параграф 3.1 содержит описание методики адмиттанс-спектроскопии, применяемой в данной работе для исследования электрически активных примесных состояний с малой энергией ионизации.

В параграфе 3.2 представлены результаты исследования кинетики люминесценции и определены энергии активации оже-девозбуждения для образцов с различными типами излучающих центров. Исследовались образцы, выращенные при температуре эпитаксии $T_{gr} \sim 600^\circ\text{C}$, для которых характерны излучающие центры преципитатного типа, и образцы, выращенные при $T_{gr} \sim 400^\circ\text{C}$, преобладающим типом излучающих центров в которых были центры Er-O1.

В параграфе 3.3 методом адмиттанс-спектроскопии исследовались мелкие примесные состояния, определяющие процессы оже-девозбуждения эрбия равновесными носителями заряда. Рассмотрены особенности применения метода адмиттанс-спектроскопии, обусловленные малой энергией ионизации исследуемых примесей. Приведены результаты измерений адмиттанс-спектров и определены энергии активации мелких примесей в образцах с различными излучающими центрами.

Заключительный параграф главы, 3.4, посвящен сопоставлению данных, полученных из измерений кинетики и адмиттанса. Показано, что расхождение наблюдаемых в кинетике люминесценции и адмиттанс-спектрах энергий активации связано с тем, что соответствующие измерения проведены в различных температурных интервалах. Сопоставление данных кинетики и адмиттанс-спектроскопии с результатами расчетов позволило уточнить энергии ионизации и оценить степень компенсации примесей в исследованных образцах. Для образца, выращенного при $T_{gr} \sim 600^\circ\text{C}$: $E_i \sim 38$ мэВ, $N_D \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $K \sim 10\%$. Для образца, выращенного при $T_{gr} \sim 400^\circ\text{C}$: $E_i \sim 20$ мэВ, $N_D \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $K \sim 1\%$. Концентрация компенсирующих примесей в обоих образцах составляет $N_A \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и обусловлена, по видимому, фоновым легированием из ростовых источников.

Глава 4 содержит результаты исследования безызлучательной релаксации ионов эрбия в эпитаксиальных структурах Si:Er/Si по механизму обратной передачи

энергии возбуждения (“back-transfer”), контролирующей температурное гашение эрбиевой люминесценции в области высоких ($T > 100-150$ К) температур.

В параграфе 4.1 рассмотрены особенности исследования кинетики люминесценции ионов эрбия в диодных структурах. Показано, что, в отличие от однородно легированных слоев Si:Er, диодные структуры позволяют разделить вклады излучающих центров, локализованных в области пространственного заряда (ОПЗ) и области электрической нейтральности (ОЭН) диодной структуры, и подверженных различным механизмам безызлучательной релаксации.

В параграфе 4.2 на основании исследования спектров фототока Si:Er/Si диодов приведены доказательства существования “back-transfer” релаксации эрбия в СМЛЭ структурах с излучающими центрами преципитатного типа. Исследована температурная зависимость фототока, обусловленного безызлучательной релаксацией ионов Er^{3+} по механизму “back-transfer”, сопровождающейся генерацией свободных носителей заряда. Энергия активации “back-transfer” релаксации составила величину $E_A \sim 140$ мэВ, что соответствует приводимым в литературе данным. Впервые наблюдалось насыщение “эрбиевого” фототока в области высоких температур, что позволило оценить концентрацию эрбиевых центров, подверженных “back-transfer” релаксации ($N_0 \sim 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$). По порядку величины оценка N_0 соответствует концентрации оптически активных ионов эрбия при рекомбинационном механизме возбуждения слоев Si:Er. Последнее позволяет нам утверждать, что ионы эрбия, возбуждаемые по экситонному (рекомбинационному) механизму, обязательно подвержены “back transfer” релаксации.

Параграф 4.3 посвящен исследованию “back-transfer” релаксации ионов Er^{3+} в СМЛЭ структурах Si:Er/Si с излучающими центрами Er-1 и Er-O1. Показано, что “back-transfer” релаксация ионов Er^{3+} в составе излучающих центров Er-1 и Er-O1 характеризуется меньшей энергией активации (~ 70 мэВ для центра Er-O1) и не сопровождается генерацией свободных носителей заряда. Предложена модель, объясняющая экспериментально обнаруженные особенности девозбуждения ионов Er^{3+} в составе центров Er-1 и Er-O1. Сделан вывод, что реализация того или иного

варианта “back-transfer” релаксации ионов Er^{3+} в СМЛЭ структурах Si:Er/Si определяется как микроскопической структурой излучающих центров, так и структурой примесно-дефектных состояний в запрещенной зоне кремния.

Параграф 4.4 посвящен исследованию энергетической структуры примесно-дефектных состояний, формируемых в запрещенной зоне кремния при эпитаксиальном росте структур Si:Er/Si . Приведены результаты исследования спектров фототока эпитаксиальных Si:Er/Si диодов в области энергий ниже края поглощения кремния. Показано, что поглощение света с энергией кванта, меньшей ширины запрещенной зоны кремния, определяется примесно-дефектными комплексами, возникающими в процессе роста эпитаксиального слоя и формирующими квазинепрерывный спектр состояний в запрещенной зоне кремния. Установлено, что плотность состояний в примесной зоне растет с увеличением температуры осаждения слоя Si:Er и не связана с типом излучающих центров, формируемых в процессе осаждения слоя.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты работы

1. В кремниевых диодных структурах, легированных эрбием, впервые реализована электролюминесценция излучательного центра Er-1 с шириной линии излучения рабочего перехода ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ иона Er^{3+} менее 25 мкэВ (0.2 см^{-1}) при $T \sim 30 \text{ К}$, что является рекордно низким значением ширины линии электролюминесценции эрбия. Эффективность токовой накачки исследуемых структур также превосходит опубликованные данные для электролюминесценции диодов Si:Er/Si . Сечение возбуждения при инжекционной накачке центра Er-1 составило $\sigma \sim 1.7 \times 10^{-14} \text{ см}^2$ ($T \sim 30 \text{ К}$).

2. Определено эффективное сечение ударного возбуждения излучающих центров Er-1 и Er-O1 ($\sigma \sim 10^{-16} \text{ см}^2$ при $T = 77 \text{ К}$) горячими электронами, разогреваемыми в электрическом поле обратно-смещенного p/n-перехода. По эффективности ударного возбуждения центры Er-1 и Er-O1 не уступают центрам с ионами эрбия в SiO_2 -

подобных преципитатах. Показано, что температурное гашение электролюминесценции центров Er-1 и Er-O1 в кремниевых диодных структурах, обусловлено не падением эффективности ударного возбуждения с ростом температуры, а увеличением скорости безызлучательной релаксации ионов эрбия.

3. Показано, что безызлучательная релаксация ионов Er^{3+} в составе центров Er-1 и Er-O1 в диапазоне низких температур ($T < 50\text{-}60\text{ K}$) определяется ионизацией электрически активных примесно-дефектных комплексов с энергией ионизации $E_i \sim 15\text{-}20\text{ мэВ}$, существенно меньшей, по сравнению с энергией ионизации примесно-дефектных комплексов ($E_i \sim 35\text{-}40\text{ мэВ}$), определяющих безызлучательную оже-релаксацию ионов эрбия в SiO_2 -подобных преципитатах. Сопоставление данных люминесцентных и емкостных измерений позволяет сделать вывод о значительной (на уровне 10-30%) компенсации основной примеси в слоях Si:Er с ионами эрбия в SiO_2 -подобных преципитатах.

4. Исследованы факторы, определяющие температурное гашение электролюминесценции ионов эрбия в эпитаксиальных структурах Si:Er/Si с различными типами излучающих центров в диапазоне температур $T > 100\text{ K}$. В структурах с излучающими центрами преципитатного типа впервые наблюдалось насыщение резонансного фотоотклика на частоте рабочего перехода иона Er^{3+} с ростом температуры, что позволило непосредственно из данных эксперимента оценить концентрацию ионов эрбия, подверженных безызлучательной релаксации по механизму “back-transfer”. Совпадение полученной оценки с оценкой концентрации оптически активных ионов эрбия позволяет утверждать, что ионы эрбия, возбуждаемые по экситонному механизму, обязательно подвержены “back transfer” релаксации.

5. Установлено, что в диодных СМЛЭ структурах Si:Er/Si с преобладанием центров Er-O1 и Er-1 “back-transfer” релаксация, определяющая температурное гашение электролюминесценции ионов Er^{3+} в диапазоне температур $T > 100\text{ K}$, характеризуется существенно меньшей энергией активации ($\sim 70\text{ мэВ}$), по сравнению с центрами преципитатного типа ($\sim 140\text{ мэВ}$). Предложена физическая

модель, объясняющая экспериментально обнаруженные особенности девозбуждения ионов Er^{3+} в составе центров $Er-I$ и $Er-O1$, включая малую энергию активации процесса “back-transfer” и отсутствие резонансного фотоотклика на частоте рабочего перехода иона Er^{3+} .

Список цитируемой литературы

- [1] Polman, A. *Erbium implanted thin film photonic materials* / A. Polman // J. Appl. Phys. – 1997. – v. 82, iss. 1. – p.1-39.
- [2] Kenyon, A.J. *Erbium in silicon. Topical review* / A.J. Kenyon. Semicond. Sci. Technol. – 2005. – v. 20. – p. R65–R84.
- [3] Vinh, N.Q. *Photonic properties of Er-doped crystalline silicon* / N.Q. Vinh, N.N. Ha, T. Gregorkiewicz // Proc. of the IEEE. – 2009. – v. 97. – p. 1269.
- [4] Кузнецов, В.П. *Метод сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии структур на основе кремния* / В.П. Кузнецов, З.Ф. Красильник // ФТП. – 2010. – т. 44, вып. 3. – с. 413-417.
- [5] Андреев, А.Ю. *Оптически активные слои кремния, легированного эрбием в процессе сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии* / А.Ю. Андреев, Б.А. Андреев, М.Н. Дроздов, В.П. Кузнецов, З.Ф. Красильник, Ю.А. Карпов, Р.А. Рубцова, М.В. Степихова, Е.А. Ускова, В.Б. Шмагин, H. Ellmer, L. Palmetshofer, K. Piplits, H. Hutter // ФТП. – 1999. – т. 33, вып. 2. – с. 156-160.
- [6] Vinh, N.Q. *Observation of Zeeman effect in photoluminescence of Er^{3+} ion embedded in crystalline silicon* / N.Q. Vinh, H. Przybylinska, Z.F. Krasil'nik, B.A. Andreev, T. Gregorkiewicz // Physica B. – 2001. – v. 308. – p. 340-343.
- [7] Vinh, N.Q. *Optical properties of a single type of optically active center in Si/Si:Er nanostructures* / N.Q. Vinh, H. Przybylinska, Z.F. Krasil'nik, T. Gregorkiewicz // Phys. Rev. B. – 2004. – v. 70. – p. 115332.
- [8] Vinh, N.Q. *Concentration of Er^{3+} ions contributing to 1.5- μ m emission in Si/Si:Er nanolayers* / N.Q. Vinh, S. Minissale, H. Vrielinck, T. Gregorkiewicz // Phys. Rev. B. – 2007. – v. 76. – p. 085339.
- [9] Ha, N.N. *Optical gain of the 1.54 μ m emission in MBE-grown Si:Er nanolayers* / N.N. Ha, K. Dohnalova, T. Gregorkiewicz, J. Valenta // Phys. Rev. B. – 2010. – v. 81. – p. 195206.
- [10] Jantsch, W. *Different Er centres in Si and their use for electroluminescent devices* / W. Jantsch, S. Lanzertorfer, L. Palmetshofer, M. Stepikhova, H. Preier // J. Lumin. – 1999. –v. 80. – p. 9-17.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

[A1] Kudryavtsev, K.E. *Features of erbium nonradiative deexcitation and electroluminescence temperature quenching in sublimation MBE grown Si:Er/Si diode structures* / K.E. Kudryavtsev, V.P. Kuznetsov, D.V. Shengurov, V.B. Shmagin, Z.F. Krasilnik // *Physica E*. – 2009. – v. 41, iss. 6. – p. 899.

[A2] Kudryavtsev, K.E. *Extremely sharp electroluminescence from Er-doped silicon* / K.E. Kudryavtsev, V.B. Shmagin, D.V. Shengurov, Z.F. Krasilnik // *Semiconductor Science & Technology*. – 2009. – v. 24. – p. 065009.

[A3] Kudryavtsev, K.E. *High-resolution spectroscopy and time-resolved study of electroluminescence of Er-1 center in silicon* / K.E. Kudryavtsev, V.B. Shmagin, D.V. Shengurov, Z.F. Krasilnik // *Physica B*. – 2009. – v. 404, iss. 23-24. – p. 4593.

[A4] Кузнецов, В.П. *Зависимость концентрации ионизованных доноров от температуры эпитаксии для слоев Si:Er/Si, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии* / В.П. Кузнецов, В.Б. Шмагин, М.Н. Дроздов, М.О. Марычев, К.Е. Кудрявцев, М.В. Кузнецов, Б.А. Андреев, А.В. Корнаухов, З.Ф. Красильник // *Физика и техника полупроводников*. – 2011. – т. 45, №1. – с. 132.

[A5] Kudryavtsev, K.E. *Auger de-excitation of different Er centers in Si:Er layers grown with sublimation molecular beam epitaxy* / K.E. Kudryavtsev, V.B. Shmagin, D.V. Shengurov, Z.F. Krasilnik // *Semiconductor Science & Technology*. – 2012. – v. 27. – p. 105028.

[A6] Антонов, А.В. *Особенности примесной фотопроводимости в эпитаксиальных диодах Si:Er/Si* / А.В. Антонов, К.Е. Кудрявцев, Д.В. Шенгуров, В.Б. Шмагин, З.Ф. Красильник // *Физика и техника полупроводников*. – 2013. – т. 47, №11. – с. 1513.

[A7] Кудрявцев К.Е. *Особенности температурного гашение электролюминесценции Si:Er/Si диодных структур с разными типами оптически активных центров* / К.Е. Кудрявцев, В.Б. Шмагин, Д.В. Шенгуров, З.Ф. Красильник // Труды XII международного симпозиума “Нанопизика и Нанозлектроника”: Нижний Новгород, 2008. – т. 2. – с. 491.

[A8] Kudryavtsev, K.E. *Features of erbium electroluminescence temperature quenching in sublimation MBE grown Si:Er/Si diode structures with different types of optically active centers* / K.E. Kudryavtsev, V.B. Shmagin, D.V. Shengurov, Z.F. Krasilnik // *Abstracts of the E-MRS Spring Meeting 2008: Strasbourg, France, 2008*. – p. 5.

[A9] Кудрявцев, К.Е. *Предельно узкие линии электролюминесценции в Si:Er/Si диодных структурах* / К.Е. Кудрявцев, В.Б. Шмагин, Д.В. Шенгуров, З.Ф. Красильник // Сборник тезисов V Международной конференции “Кремний-2008”: Черногловка, 2008. – с. 101.

[A10] Kudryavtsev, K.E. *High-resolution spectroscopy and time-resolved study of electroluminescence of Er-1 center in silicon* / К.Е. Кудрявцев, В.В. Шмагин, Д.В. Шенгуров, З.Ф. Красильник // Abstracts of 25th International Conference on Defects in Semiconductors: St.-Petersburg, Russia, 2009. – p. 197.

[A11] Кудрявцев, К.Е. *Оптически активный центр Er-1 в диодных СМЛЭ структурах Si:Er/Si* / К.Е. Кудрявцев, В.В. Шмагин, Д.В. Шенгуров, З.Ф. Красильник // Сборник тезисов IX Российской конференции по физике полупроводников: Новосибирск-Томск, 2009. – с. 232.

[A12] Андреев, Б.А. *Особенности кинетики ЭЛ иона Er в структурах Si:Er с активным слоем, позиционированным в ОПЗ* / Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник, Д.И. Крыжков, К.Е. Кудрявцев, В.П. Кузнецов // Сборник тезисов IX Российской конференции по физике полупроводников: Новосибирск-Томск, 2009. – с. 229.

[A13] Andreev, B.A. *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, 2009. – Abstract #14.

[A14] Андреев, Б.А. *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.В. Шмагин, А.Н. Яблонский // Сборник тезисов VII Международной конференции “Кремний-2010”: Нижний Новгород, 2010. – с. 252.

[A15] Антонов, А.В. *Электролюминесценция центра Er-1 в диодных структурах Si:Er/Si при ударном механизме возбуждения* / А.В. Антонов, К.Е. Кудрявцев, Д.В. Шенгуров, В.В. Шмагин, З.Ф. Красильник // Сборник тезисов VII Международной конференции “Кремний-2010”: Нижний Новгород, 2010. – с. 144.

[A16] Кудрявцев, К.Е. *Электролюминесценция центра Er-1 в диодных структурах Si:Er/Si при ударном механизме возбуждения* / К.Е. Кудрявцев, В.В. Шмагин, Д.В. Шенгуров, З.Ф. Красильник // Труды XIV международного симпозиума “Нанофизика и Наноэлектроника”: Нижний Новгород, 2010. – т. 2. – с. 454.

[A17] Андреев, Б.А. *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, Ngo Ngoc Ha // Труды XIV международного симпозиума “Нанофизика и Наноэлектроника”: Нижний Новгород, 2010. – т. 1. – с. 273.

[A18] Кудрявцев, К.Е. *Оже-девозбуждение ионов эрбия в кремниевых диодных структурах, выращенных методом сублимационной МЛЭ* / К.Е. Кудрявцев, В.В. Шмагин, Д.В. Шенгуров, В.П. Кузнецов, З.Ф. Красильник // Труды XV международного симпозиума “Нанофизика и Наноэлектроника”: Нижний Новгород, 2011. – т. 2. – с. 498.

[A19] Андреев, Б.А. *Диодные светоизлучающие структуры Si:Er/SOI* / Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник, Д.И. Крыжков, К.Е. Кудрявцев, Д.А. Пряхин, Д.В. Шенгуров, В.Б. Шмагин, А.Н. Яблонский. Труды XVI международного симпозиума “Нанопфизика и Нанозлектроника”: Нижний Новгород, 2012. – т. 1. – с. 293.

[A20] Антонов, А.В. *Примесная фотопроводимость эпитаксиальных слоев Si:Er/Si* / А.В. Антонов, К.Е. Кудрявцев, Д.В. Шенгуров, В.Б. Шмагин, З.Ф. Красильник // Сборник тезисов XI Российской конференции по физике полупроводников: Санкт-Петербург. – 2013. – с. 356.

Кудрявцев Константин Евгеньевич

**ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
Ег-СОДЕРЖАЩИХ ЦЕНТРОВ
С ЛИНЕЙЧАТЫМИ СПЕКТРАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ
В КРЕМНИЕВЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ**

Автореферат

Подписана к печати 14.11.2013 г. Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН
603950, Нижний Новгород, ГСП-105

