

На правах рукописи

**ЯКИМЕНКО Андрей Николаевич**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРИИ РАДИАЦИОННЫХ  
ДЕФЕКТОВ В ДИОДНЫХ И МДП СТРУКТУРАХ**

Специальность: 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
**Соболев Николай Алексеевич**

**Официальные оппоненты:** **Мелькер Александр Иосифович**  
доктор физико-математических наук,  
профессор,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»,  
профессор

**Шмидт Наталия Михайловна**  
доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
ведущий научный сотрудник

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится «19» сентября 2012 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.29 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, II корпус, ауд. №265.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан «        » июля 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Ермакова Н.Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Практически во всех областях науки и техники используются приборы твердотельной электроники. Сфера применения твердотельных приборов постоянно расширяется, создаются принципиально новые приборы, инициирующие развитие промышленности в новых направлениях.

Управление свойствами твердотельных приборов обычно осуществляется посредством создания дефектов с необходимыми свойствами. Одним из видов создания таких дефектов является радиационное облучение. Несмотря на то, что облучение может вносить в материал дефекты, которые могут ухудшить некоторые параметры материалов и приборов, интенсивно развивается научное направление – инженерия радиационных дефектов в технологии кремниевых приборов, позволяющее целенаправленно улучшать параметры облучаемых приборов.

Основным материалом современной твердотельной электроники является кремний. В силу уникальных свойств, как самого полупроводника, так и границы раздела Si-SiO<sub>2</sub>, кремний в обозримом будущем будет оставаться основным материалом твердотельной электроники. На сегодняшний день важной практической задачей является создание оптоэлектронных приборов на основе кремниевого материала. В частности, необходимо улучшить параметры выпускаемых фотоприёмных устройств и создать эффективные светоизлучающие приборы на основе кремния.

1. Анализ тенденций развития микроэлектроники указывает на то, что в будущем основную массу производимых микросхем будут составлять цифровые логические интегральные микросхемы, содержащие в качестве базового элемента МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) транзистор. В устройствах обработки цифровых и аналоговых сигналов уже сейчас широко применяются приборы с зарядовой связью (ПЗС), а в качестве твердотельных фотоприемных устройств фоточувствительные ПЗС, работа которых также основана на базе МДП структур. Однако, с повышением степени интеграции микросхем, при создании больших и сверхбольших интегральных микросхем всё большее влияние на работу приборов оказывает поверхность. Это вызвало необходимость более углубленного изучения дефектов около границы полупроводник-диэлектрик и выяснения их вклада в изменение параметров изготавливаемых приборов.

2. Считалось, что создание эффективных светоизлучающих структур на основе кремния невозможно, поскольку он является непрямозонным полупроводником. В [1 - 3] было предложено легировать кремний атомами

редкоземельного элемента эрбия. Основное внимание привлекает переход во внутренней 4f оболочке ионов  $\text{Er}^{3+}$  из первого возбужденного  $^4\text{I}_{13/2}$  в основное состояние  $^4\text{I}_{15/2}$ . Так как внутренняя 4f оболочка экранирована внешними электронами, в этом переходе возникает узкая температурно-независимая линия люминесценции на длине волны  $\sim 1.54$  мкм. Эта линия интересна тем, что, с одной стороны энергия излучаемого фотона меньше ширины запрещенной зоны в кремнии ( $\sim 1.12$  эВ) и такое излучение в кремнии слабо поглощается, с другой стороны, длина волны соответствует "окну прозрачности" оптоволоконных линий передач. Светоизлучающие приборы на основе кремния, легированного эрбием могут использоваться в средствах оптоволоконной связи, а также дают возможность создания светоизлучающего кремниевого прибора, совместимого с технологией изготовления интегральных микросхем. Проблема заключается в том, что степень электрической и оптической активации ионов  $\text{Er}^{3+}$  относительно невелика ( $\sim 10\%$ ), что обуславливает малый квантовый выход светодиодов на основе кремния легированного эрбием (Si:Er). Кроме того, в режиме инжекции p-n перехода наблюдается эффект температурного гашения электролюминесценции. Одним из основных методов введения Er в Si, позволяющих получить светоизлучающие (Si:Er) структуры, в настоящее время является ионная имплантация, однако имплантация Si тяжёлыми ионами приводит к созданию структурных дефектов, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации.

Таким образом, как в случае кремниевых фотоприемных устройств, так и в случае кремниевых светоизлучающих структур, необходимо получение сведений о физических свойствах создаваемых дефектов в материале, для создания с помощью инженерии радиационных дефектов приборов с прогнозируемыми и контролируемыми характеристиками.

**Цель и задачи работы.** Целью настоящей работы являлось развитие физических основ инженерии радиационных дефектов в диодных и МДП структурах, позволяющей изготавливать приборы с улучшенными параметрами.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- 1) Исследовать влияние  $\gamma$ -облучения на электрофизические параметры МДП структур и найти условия, позволяющие улучшить эти параметры;
- 2) Исследовать влияние условий ионной имплантации на электрофизические параметры светоизлучающих диодных структур, для увеличения интенсивности электролюминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  при комнатной температуре.

**Научная новизна** полученных в диссертации результатов состоит в следующем:

1. Впервые наблюдался эффект увеличения эффективного генерационного времени жизни  $\tau_{g\text{эфф}}$  и уменьшения скорости поверхностной генерации  $s$  носителей заряда в кремниевых МДП структурах при их облучении  $\gamma$ -квантами от источника  $^{60}\text{Co}$ ;
2. Предложена модель генерации носителей заряда в МДП-структуре через поверхностные состояния с учетом флуктуаций встроенного заряда и туннельно-активационного транспорта носителей, объясняющая аномальный ход зависимостей  $\tau_{g\text{эфф}}$  и  $s$  от дозы облучения;
3. В рамках данной модели получил объяснение значительный разброс  $\tau_{g\text{эфф}}$  и  $s$ , наблюдающийся у МДП структур, изготовленных в едином технологическом цикле на одной пластине;
4. Показано, что с увеличением дозы облучения, а также в МДП структурах с высоким значением плотности поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик-полупроводник транспорт носителей заряда при генерации меняется от туннельно-активационного к прыжковому, при этом значительно возрастает роль латеральной области МДП-структуры при переносе заряда;
5. Впервые, с помощью ионной имплантации ионов Er в монокристаллический кремний, получены светоизлучающие диоды, у которых наблюдался эффект "температурного возгорания" электролюминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$ ;
6. Установлено, что в светоизлучающих диодах, полученных с помощью ионной имплантации ионов Er и O в монокристаллический кремний с ориентацией  $\langle 111 \rangle$ , за эффект "температурного возгорания" электролюминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  отвечают дефекты, образующие энергетические уровни в нижней половине запрещенной зоны кремния;
7. При исследовании диодов с дозами имплантации  $\text{Er} \geq 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  обнаружено, что в некотором температурном диапазоне ёмкость обратно смещённого диода может возрастать с ростом напряжения.

**Практическая ценность** работы заключается в том, что в ней:

1. Разработана технология изготовления, и изготовлены ПЗС с малыми генерационными токами и большими временами хранения заряда при комнатной температуре (способ защищен авторским свидетельством);
2. Выявлены физические механизмы, определяющие времена хранения заряда в ПЗС и их разброс по площади ПЗС матрицы;

3. Разработаны способы повышения однородности распределения времен хранения заряда и темновых токов по площади ПЗС матрицы, не ухудшающие остальных параметров МДП приборов;
4. Разработана технология изготовления и изготовлены светодиодные структуры на основе монокристаллического Si:Er, в которых наблюдается температурное возгорание интенсивности электролюминесценции ионов Er<sup>3+</sup>;
5. Разработана методика ёмкостного исследования диодных структур, при условии, что измеряемая ёмкость не может быть представлена двух элементной схемой замещения, реализованной в промышленных измерителях ёмкости.

#### **Научные положения, выносимые на защиту.**

1. Облучение  $\gamma$ -квантами от источника <sup>60</sup>Co МДП структуры на основе n-Si в режиме обогащения с дозами  $\leq 10^5$  рад позволяет уменьшить скорость поверхностной генерации и увеличить эффективное генерационное время жизни носителей заряда.
2. Уменьшение скорости поверхностной генерации и увеличение эффективного генерационного времени жизни носителей заряда обусловлено подавлением наиболее эффективных центров поверхностной генерации при  $\gamma$ -облучении МДП структуры в режиме обогащения.
3. Имплантация ионов эрбия и кислорода с аморфизирующей дозой в n-Si(111) и последующая твердофазная эпитаксиальная перекристаллизация аморфизованного слоя сопровождаются образованием расположенных в нижней половине запрещенной зоны кремния глубоких уровней с концентрацией, превышающей концентрацию мелких уровней. Перезарядка этих уровней в области объемного заряда p<sup>+</sup>-n перехода в режиме лавинного пробоя ответственна за температурное возгорание интенсивности линии электролюминесценции ионов Er<sup>3+</sup> в некотором температурном диапазоне.
4. Увеличение емкости p-n перехода при увеличении обратного напряжения в некотором температурном диапазоне, наблюдаемое в обратном смещённом p<sup>+</sup>-n переходе, n-база которого сформирована с использованием имплантации ионов эрбия с дозой  $\geq 9 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> в n-Si(111) и последующей твердофазной эпитаксиальной перекристаллизации, обусловлено образованием глубоких уровней в запрещённой зоне кремния с высокой концентрацией.
5. Концентрация носителей заряда в базе p<sup>+</sup>-n перехода с повышенными значениями обратного тока и сопротивления базы может быть определена с помощью измерителя импеданса, используя значения емкости и проводимости, измеренные при обратном смещении перехода, и номограмм, построенных на основе эталонных магазинов емкостей и проводимостей.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на научно-техническом семинаре “Радиационная технология в производстве интегральных схем” (Воронеж, 1988), научно-техническом семинаре “Вопросы метрики полупроводников и диэлектриков” (Киев, 1988), совещании-семинаре “Аморфные полупроводники и диэлектрики на основе кремния в электронике” (Одесса, 1989), XI научно-технической конференции “Новые принципы формирования телевизионных изображений” (Ленинград, 1990), научно-технической конференции “Фундаментальные исследования в технических университетах” (Санкт-Петербург, 1997), VII международном совещании “Радиационная физика твердого тела” (Севастополь, 1997), Всероссийском совещании “Наноструктуры на основе кремния и германия” (Нижний Новгород, 1998), совещании “Нанопотоника” (Нижний Новгород, 1999), совещании “Нанопотоника” (Нижний Новгород, 2000), V Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы “Фундаментальные исследования в технических университетах” (Санкт-Петербург, 2001), международном симпозиуме “Фото- и электролюминесценция редкоземельных элементов в полупроводниках и диэлектриках” (Санкт-Петербург, 2001), IX Международной конференции и VIII Школе молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе “КРЕМНИЙ-2012” (Санкт-Петербург, 2012), а также на научных семинарах ОАО «ЦНИИ «Электрон» (Санкт-Петербург), Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

**Публикации.** По результатам диссертации опубликовано: 23 печатные работы, из них 12 в российских и зарубежных реферируемых журналах по списку ВАК, 1 авторское свидетельство СССР на изобретение.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации составляет 140 страниц текста, включая 40 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 105 источников.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы, поставленные задачи, основные научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приводится обзор литературы. В первой части обзора основное внимание обращено на свойства поверхностных состояний на границе диэлектрик-полупроводник в МДП структурах, влияние флуктуаций

приповерхностного заряда на свойства МДП структуры. Во второй части обзора рассмотрены технологические методы создания светоизлучающих структур на основе кремния, легированного редкоземельными элементами (РЗЭ). Приводятся экспериментальные данные об электрофизических, структурных и оптических свойствах слоев кремния, имплантированных примесями РЗЭ. В частности, представлены известные из литературы сведения об электрической активации этих примесей в кремнии, их энергетическом спектре и о возможном составе этих центров. Рассмотрены режимы работы светоизлучающих структур и показано, что с целью уменьшения эффекта температурного гашения электролюминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  наиболее перспективно использовать режим обратного пробоя p-n перехода.

На основе анализа литературных данных формулируются цель и задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** описывается технология изготовления МДП и диодных структур, исследованных в работе, а так же экспериментальные методики исследования их свойств.

Исследовались как МОП (металл-окисел-полупроводник), так и МНОП (металл- нитрид кремния-окисел-полупроводник) МДП структуры. Толщины двуокиси кремния составляли 100 - 1000 Å, нитрида кремния 500 - 1000 Å. Окисел изготавливался как сухим термическим, так и пирогенетическим окислением кремния n-типа КЭФ-4.5 с ориентацией (100). Управляющий электрод (затвор) формировался напылением алюминия как непосредственно на слой диэлектрика, так и на предварительно созданный подслой легированного бором вырожденного поликремния с удельным сопротивлением  $\sim 0.001 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

Светоизлучающие кремниевые диоды изготавливались из кремния n-типа с ориентацией (100) и (111). В кремниевую подложку с помощью ионной имплантации вводились ионы эрбия и кислорода с дозами до  $9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и  $9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  соответственно. Структуры p<sup>+</sup>-n формировались имплантацией ионов бора в лицевую и ионов фосфора в тыльную сторону пластин. После напыления алюминиевых или никелевых контактов формировались мезадиоды с площадью 0.1 - 5.5 мм<sup>2</sup>. Так же проводились необходимые отжиги структур для электрической и оптической активации имплантированных примесей.

При исследовании МДП структур применялись методы вольт-фарадных характеристик (ВФХ, C-V), изотермической релаксации ёмкости (ИРЕ, C-t) и фотоёмкости (ФЕ) в широком диапазоне температур, толщины диэлектриков измерялись методом эллипсометрии.

При исследовании диодных структур, имплантированных ионами эрбия, применялись методы вольт-амперных характеристик (ВАХ), ВФХ, ИРЕ,



термостимулированной ёмкости (TCE), DLTS (нестационарная спектроскопия глубоких уровней, Deep Level Transient Spectroscopy), фотолюминесценции (ФЛ), электролюминесценции (ЭЛ), вторичной ионной масс-спектропии (ВИМС), четырёхзондовый метод и метод сопротивления растекания.

Для достижения высокой концентрации оптически и электрически активных ионов  $\text{Er}^{3+}$  необходимы высокие дозы имплантации ионами. Однако, как показал эксперимент, такие диодные структуры обладают большими токами утечки при обратном смещении. Это не позволяет использовать емкостные методики со стандартными двухэлементными измерительными схемами замещения, так как схема замещения представляет из себя не менее трёх элементов. Для решения данной проблемы нами была разработана оригинальная методика, основанная на предварительном построении для конкретного измерительного прибора системы номограмм с помощью измерения образцовых мер ёмкости и проводимости.

**В третьей** главе представлены результаты исследования влияния  $\gamma$ -облучения на генерационно-рекомбинационные свойства МДП структур.

Исследованы зависимости эффективных генерационных времен жизни  $\tau_{\text{гэфф}}$  и скоростей поверхностной генерации  $s$  носителей заряда в МДП структурах от доз  $\gamma$ -облучения ( $^{60}\text{Co}$ ) в интервале  $10^3$ — $10^7$  рад. Время жизни  $\tau_{\text{гэфф}}$  зависит от скоростей генерации носителей заряда в области пространственного заряда (ОПЗ) МДП структуры и на границе раздела окисел кремния-кремний в приэлектродной области полупроводника. Скорость  $s$  определяется генерацией на границе  $\text{SiO}_2$ — $\text{Si}$  под управляющим электродом. Установлены зависимости между генерационным временем жизни и скоростью поверхностной генерации, с одной стороны, и плотностью поверхностных состояний и концентрацией глубоких уровней в объёме полупроводника при воздействии  $\gamma$ -облучения, с другой. Встроенный заряд и плотность поверхностных состояний  $D_{ss}$  определялись из измерений высокочастотных ВФХ до и после облучения. Времена  $\tau_{\text{гэфф}}$  и скорости  $s$  определялись по методу Цербста.

При исследовании влияния дозы  $\gamma$ -облучения на электрофизические параметры обнаружены следующие закономерности (рис. 1).

1. При дозах облучения  $D \leq 10^5$  рад с ростом  $D$  генерационное время жизни  $\tau_{\text{гэфф}}$  увеличивается, а скорость поверхностной генерации  $s$  падает при практически постоянной плотности поверхностных состояний  $D_{ss}$ .
2. При дозах облучения свыше  $10^6$  рад с ростом  $D$  время генерации падает, а скорость поверхностной генерации растёт, и увеличивается плотность поверхностных состояний

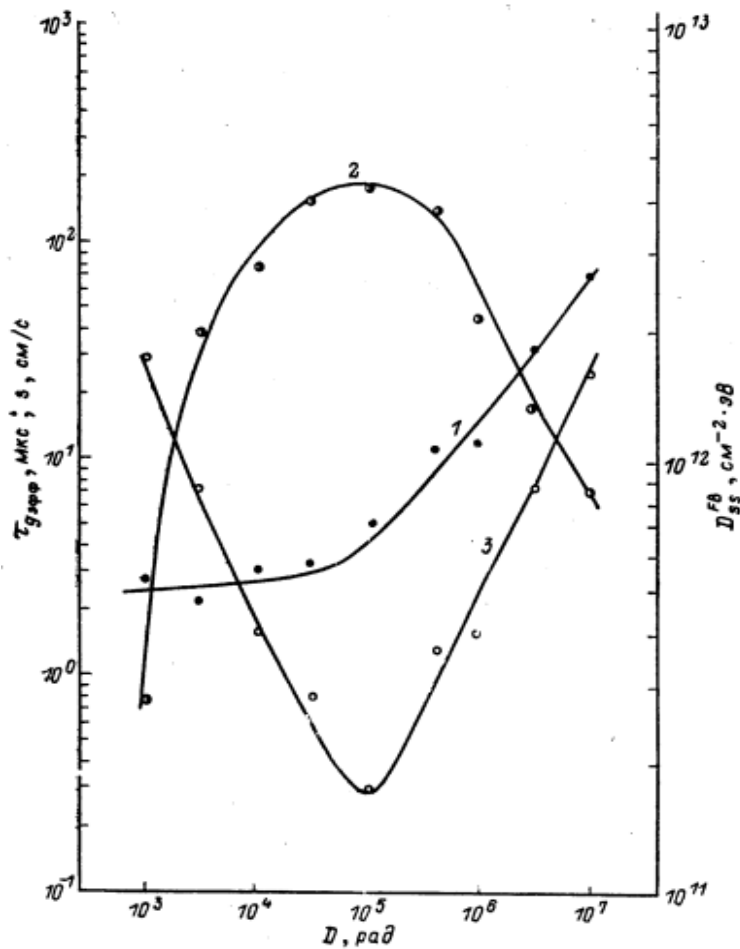


Рис. 1. Зависимость плотности поверхностных состояний  $D_{ss}$  (1), эффективного генерационного времени жизни  $\tau_{gff}$  (2) и скорости поверхностной генерации  $s$  (3) носителей заряда от дозы  $\gamma$ -облучения ( $^{60}\text{Co}$ ).

Развита модель, объясняющая данные зависимости и основанная на том, что доминирующий вклад в генерацию носителей заряда вносят поверхностные состояния и флуктуации встроенного заряда в диэлектрике. Процесс генерации носителей заряда происходит в два этапа: активация электрона из валентной зоны на уровень поверхностного состояния и последующее туннелирование в разрешённую зону. Генерационный ток определяется редкими областями, в которых флуктуации встроенного заряда создают наиболее сильные электрические поля, уменьшающие ширину туннельного барьера (проколы). Увеличение времени жизни при облучении обусловлено подавлением проколов при экранировании областей сильного поля неравновесными носителями заряда. Последнее достигается в процессе  $\gamma$ -облучения созданием неравновесных носителей заряда. При этом, в первую очередь, исчезают наиболее “прозрачные” проколы, поскольку носители заряда более эффективно затягиваются в области с более высоким значением электрического поля. Это приводит к более однородному распределению генерационно-рекомбинационных центров по площади отдельных структур и в разных структурах из одной технологической партии. В результате значительно улучшаются параметры ПЗС.

**В четвёртой главе** приведены результаты исследования светодиодных структур, легированных ионами эрбия и кислорода.

Растущий интерес к исследованиям полупроводников, легированных РЗЭ, обусловлен перспективами их использования в устройствах оптоэлектроники. Наиболее изученной системой является легированный эрбием монокристаллический кремний, в котором наблюдается излучение на длине волны  $\sim 1.54$  мкм, не зависящей от температуры. Это излучение обусловлено

внутрицентровыми переходами иона  $\text{Er}^{3+}$  из первого возбужденного состояния  $^4I_{13/2}$  иона  $\text{Er}^{3+}$  в основное состояние  $^4I_{15/2}$ . Люминесценция ионов  $\text{Er}$  в  $\text{Si}$  может возбуждаться как оптически, так и электрически. В последнем случае обычно используются p-n переходы, смещенные в прямом или обратном направлении.

Было установлено, что при возбуждении ионов эрбия, как путем освещения светом с энергией фотонов больше ширины запрещенной зоны кремния, так и в режиме инжекции p-n перехода при увеличении температуры образца от азотной до комнатной наблюдается сильное температурное гашение интенсивности люминесценции ионов  $\text{Er}$  (на 2 - 3 порядка величины). В работах [2, 3] было обнаружено, что в режимах туннельного или лавинного пробоя p-n переходов, изготовленных с помощью имплантационной технологии, удается практически избежать температурного гашения интенсивности электролюминесценции (интенсивность уменьшалась не более, чем в два раза). В обеих работах использовались подложки кремния с ориентацией поверхности (100), традиционной для приборов микроэлектроники. В настоящей работе нами впервые были изготовлены и исследованы работающие в режиме пробоя

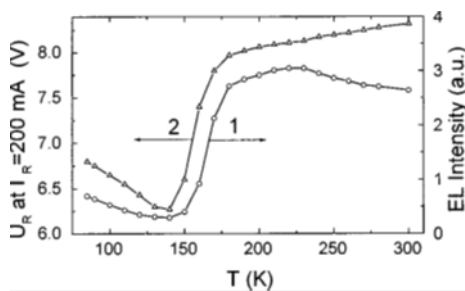


Рис. 2. Температурные зависимости интенсивности ЭЛ при  $\lambda = 1.538$  мкм (кривая 1) и падения напряжения на p-n структуре  $U_R$  (кривая 2) при плотности обратного тока  $3.7 \text{ A/cm}^2$ .

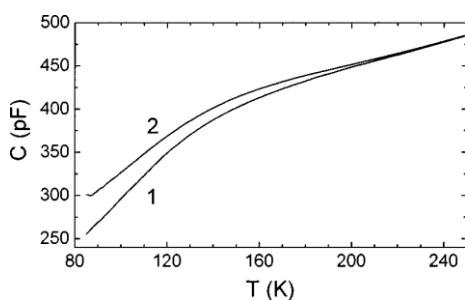


Рис. 3. ТСЕ. Кривая 1 – охлаждение образца от 300 до 85 К при  $U_R = 1 \text{ В}$ . Кривая 2 – нагрев образца от 85 до 300 К после его переключения от  $I_R = 100 \text{ мА}$  до  $U_R = 1 \text{ В}$ .

r-n перехода лавинные  $\text{Si}:(\text{Er},\text{O})$  светодиоды с ориентацией поверхности (111). В них был обнаружен эффект температурного возгорания интенсивности электролюминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  в режиме пробоя p-n переходов в (111)  $\text{Si}:(\text{Er},\text{O})$  светодиодах (рис. 2). Возбуждение электролюминесценции происходит по ударному механизму горячими носителями заряда. Было высказано предположение, что эффект связан с изменением эффективной концентрации ионизованных уровней в ОПЗ. Чтобы проверить эту гипотезу мы провели измерения емкостной спектроскопии.

На рис. 3 приведены данные ТСЕ образца с рабочей площадью  $0.6 \text{ мм}^2$ . Кривая 1 представляет зависимость емкости p-n перехода при уменьшении температуры от 300 до 85 К при обратном смещении  $U_R = 1 \text{ В}$ . Кривая 2 показывает изменение емкости при линейном увеличении температуры (скорость нагрева равнялась  $2.5 \text{ К/мин.}$ ) от 85 до 300 К после переключения p-n структуры при 85 К от обратного тока  $I_R = 100 \text{ мА}$

(режим пробоя) до  $U_R = 1$  В. Чтобы оценить концентрацию центров захвата дырок, ответственных за изменение эффективной концентрации ионизованных центров в слое пространственного заряда, мы провели измерения

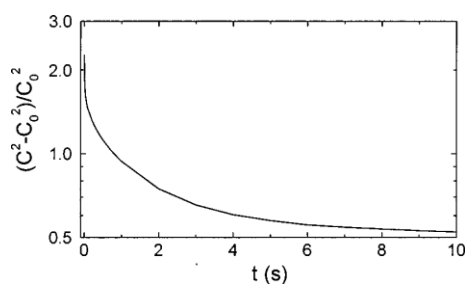


Рис. 4. ИРЕ при переключении p-n перехода при 85 К от  $I_R = 100$  мА до  $U_R = 1$  В.  
 $C_0$  – значение ёмкости при  $t \rightarrow \infty$ .

изотермической релаксации емкости после переключения p-n перехода при 85 К от  $I_R = 100$  мА до  $U_R = 1$  В (рис. 4). Эффективная концентрация ловушек, заполненных дырками через 200 мкс после того, как было приложено обратное напряжение  $U_R = 1$  В, была в 2.3 раза выше, чем концентрация ионизованных центров в слое пространственного заряда перед тем, как диод был переключен в режим пробоя.

Неэкспоненциальный характер спада емкости может быть связан с существованием нескольких уровней с разными энергиями ионизации или полосой ловушек в нижней половине запрещенной зоны кремния.

Существование высокой концентрации дырочных ловушек объясняет необычные температурные зависимости падения напряжения на p-n структуре и интенсивности ЭЛ при фиксированном значении обратного тока, приведенные на рис. 2. Когда температура достаточно высока ( $T > 225$  К), ловушки свободны от дырок, и наблюдается увеличение интенсивности ЭЛ с понижением температуры при лавинном пробое. При меньших температурах ( $T < 140$  К), когда ловушки заполнены дырками, эффективная концентрация ионизованных центров в слое пространственного заряда становится достаточно большой, чтобы вызвать туннельный пробой. В этом случае интенсивность ЭЛ определяется обычной температурной зависимостью интенсивности эрбиевой ЭЛ при туннельном пробое. Уменьшение интенсивности ЭЛ ионов  $Er^{3+}$  при понижении температуры от 225 до 140 К (рис. 2) может быть связано с уменьшением ширины слоя пространственного заряда и соответствующим уменьшением концентрации Er-содержащих центров, которые могут быть возбуждены, а также с изменениями пространственного и энергетического распределений горячих носителей, определяющих эффективность возбуждения ЭЛ и концентрации возбуждаемых Er-содержащих центров.

В настоящей работе обнаружено и исследовано еще одно необычное свойство (111) Si(Er,O) диодов, а именно - наличие при определенных температурах, зависящих от дозы имплантации ионов эрбия и кислорода, роста емкости на ВФХ обратных смещенных p-n переходов в допробойной области с ростом приложенного напряжения. Рост емкости связан с наличием в n-слое p-n перехода высокой плотности глубоких уровней в запрещенной зоне Si.

Экспериментальные результаты указывают на то, что параметры дефектов, ответственных за появление уровней, зависят от дозы имплантации эрбия и кислорода.

**В заключении** приводятся основные результаты работы:

1. Обнаружен эффект улучшения параметров кремниевых МДП структур при их облучении в режиме обогащения  $\gamma$ -квантами от источника  $^{60}\text{Co}$  с дозами  $\leq 10^5$  рад. Развита модель, объясняющая увеличение генерационного времени жизни и уменьшение скорости поверхностной генерации при таком облучении;
2. Разработан технологический процесс улучшения параметров МДП структур с низкими генерационными временами жизни и высокими скоростями поверхностной генерации. В данном процессе не только улучшаются генерационно-рекомбинационные характеристики МДП структур, но и повышается однородность этих характеристик, как по площади каждой пластины кремния, так и между пластинами в технологической партии;
3. Обнаружен эффект температурного возгорания интенсивности ЭЛ ионов  $\text{Er}^{3+}$  в диодах, изготовленных на n-Si с (111) ориентацией поверхности методом твёрдофазной эпитаксии. Установлено, что эффект обусловлен перезарядкой образовавшихся глубоких уровней в нижней половине запрещённой зоны кремния;
4. Разработан технологический процесс изготовления светодиодов, в которых в режиме лавинного пробоя отсутствует температурное гашение интенсивности ЭЛ ионов  $\text{Er}^{3+}$ , а интенсивность ЭЛ при комнатной температуре выше, чем при температуре жидкого азота;
5. Разработана методика определения ёмкости обратно смещённого диода с большими токами утечки и сопротивления базы, что позволяет применить ёмкостные методики на подобных образцах, используя промышленные измерители импеданса, работающие по двухэлементной схеме замещения.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ РАБОТЫ**

1. Безлюдный С.В. Влияние  $\gamma$ -облучения на генерацию носителей заряда в МДП структурах на основе кремния [Текст] / Безлюдный С.В., Колесников Н.В., Санин К.В., Суриков И.Н., Хансеваров Р.Ю., **Якименко А.Н.** // Физика и техника полупроводников. - 1989 т.23. - в.10. - с.1888-1890.
2. Безлюдный С.В. Механизм генерации заряда в МДП структуре [Текст] / Безлюдный С.В., Карпов В.Г., Колесников Н.В., **Якименко А.Н.** // Физика и техника полупроводников. - 1989. - т.23. - в.11. - с.2013-2018.

3. Безлюдный С.В. Генерация носителей заряда через поверхностные состояния на границе диэлектрик-полупроводник [Текст] / Безлюдный С.В., Карпов В.Г., Колесников Н.В., **Якименко А.Н.** // Тезисы докладов совещания-семинара “Аморфные полупроводники и диэлектрики на основе кремния в электронике”. - Одесса, 5-9 июня 1989. - с.23.
4. Безлюдный С.В. Авторское свидетельство СССР на изобретение № 1554669 по заявке № 4301043 от 20 июля 1987 г., зарегистрировано 1 декабря 1989 г.. Способ изготовления приборов с переносом заряда на основе МНОП структур [Текст] / Безлюдный С.В., Колесников Н.В., Патракеев С.П., Санин К.В., Суриков И.Н., Хансеваров Р.Ю., **Якименко А.Н.**
5. **Якименко А.Н.** Механизм генерации заряда в МДП структурах [Текст] / **Якименко А.Н.** // Физика и техника полупроводников. –1991. - т.25. - в.11. - с.958-961.
6. Колесников Н.В. Исследование концентрации локальных уровней и поверхностных состояний в  $\gamma$ -облученных МДП структурах [Текст] / Колесников Н.В., Мальханов С.Е., **Якименко А.Н.** // Физика и техника полупроводников. –1996. - т.30. - в.9. -с.1691-1694
7. Мальханов С.Е. Соотношение концентрации поверхностных состояний и радиационных дефектов в гамма-облученных МДП структурах [Текст] / Мальханов С.Е., **Якименко А.Н.** // Материалы научно-технической конференции “Фундаментальные исследования в технических университетах”. - Санкт-Петербург, 16-17 июня 1997 г. - с.237-238.
8. Емельянов А.М. Влияние  $\gamma$ -облучения на фотолюминесценцию кремния в структурах Si-SiO<sub>2</sub> [Текст] / Емельянов А.М., **Якименко А.Н.** // Материалы VII межнационального совещания “Радиационная физика твердого тела”. - Севастополь, 30 июня - 5 июля 1997 г. - с.56.
9. Emel'yanov A.M. Anomalous temperature dependence of erbium-related electroluminescence in reverse biased silicon p-n junction [Text] / Emel'yanov A.M., Sobolev N.A., **Yakimenko A.N.** // Applied Physics Letters. –1998. - V. 72. -No. 10. - p.1223-1225.
10. Соболев Н.А. Светоизлучающие диодные структуры на основе монокристаллического Si:Er:O, работающие при комнатной температуре [Текст] / Соболев Н.А., Николаев Ю.А., Емельянов А.М., Штельмах К.Ф., **Якименко А.Н.**, Тришенков М.А., Хакуашев П.Е., Маковийчук М.И., Паршин Е.О. // Материалы Всероссийского совещания “Наноструктуры на основе кремния и германия”. - Н.Новгород, 10-13 марта 1998 г. - с.89-92.
11. Соболев Н.А. Светоизлучающие диодные структуры на основе монокристаллического кремния, легированного эрбием и кислородом, работающие при комнатной температуре [Текст] / Соболев Н.А., Николаев

- Ю.А., Емельянов А.М., Штельмах К.Ф., **Якименко А.Н.**, Тришенков М.А., Хакуашев П.Е., Маковийчук М.И., Паршин Е.О. // Известия Академии наук. Серия физическая. – 1999. - т. 63. - № 2. - с. 388-391.
- 12.Соболев Н.А. Светоизлучающие структуры монокристаллического кремния, легированного редкоземельными элементами: структурные, электрические и оптические свойства [Текст] / Соболев Н.А., Емельянов А.М., Р.Н.Кютт, Николаев Ю.А., Шек Е.И., Александров О.В., Захарьин А.О., Вдовин В.Н., Маковийчук М.И., Паршин Е.О., **Якименко А.Н.** // Материалы совещания “Нанофотоника”. - Н.Новгород, 15-18 марта 1999 г. - с.71-76.
- 13.Соболев Н.А. Возбуждение эрбиевой электролюминесценции горячими носителями при пробое р-п перехода и свойства Si:Er светоизлучающих структур [Текст] / Соболев Н.А., Емельянов А.М., Николаев Ю.А., Вдовин В.Н., **Якименко А.Н.** // Материалы совещания “Нанофотоника”. - Н.Новгород, 15-18 марта 1999 г. - с.191-195.
- 14.Соболев Н.А. Светоизлучающие структуры монокристаллического кремния, легированного эрбием, гольмием и иттербием: структурные, электрические и оптические свойства [Текст] / Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Р.Н. Кютт, Ю.А. Николаев, О.В. Александров, А.О. Захарьин, В.И. Вдовин, М.И. Маковийчук, Е.О. Паршин, **А.Н. Якименко** // Известия Академии Наук. Серия Физическая. – 2000. - Т.64. -N2. - с.258-263.
- 15.Соболев Н.А. Электролюминесценция ионов эрбия при пробое р-п перехода и свойства светоизлучающих структур Si:Er:O[Текст] / Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев, В.И. Вдовин, **А.Н. Якименко** // Известия Академии Наук . Серия Физическая. – 2000. - Т.64.-N2. - с.348-352.
- 16.Соболев Н.А. Кинетика электролюминесценции ионов эрбия в туннельных светодиодах на основе (111) Si[Текст] / Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, **А.Н. Якименко** // Материалы Совещания “Нанофотоника”. - Нижний Новгород, 20-23 марта 2000 г. - с.177-180.
- 17.Sobolev N.A. Infrared photoluminescence from holmium ions in single-crystal silicon and holmium oxide [Text] / N.A. Sobolev, A.M. Emel`yanov, Yu.N. Filin, V.T. Melekh, Yu.A. Nikolaev, **A.N. Yakimenko**// Semicond. Sci. Technol. – 2000. - v.15 - p.511-513.
- 18.Соболев Н.А. Кинетика электролюминесценции ионов эрбия в туннельных светодиодах на основе монокристаллического кремния с (111) ориентацией поверхности [Текст] / Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, **А.Н. Якименко** // Известия Академии Наук. сер. Физическая. –2001. - Т.65, N2. - с.286-289.
- 19.Соболев Н.А. Вольт-фарадные характеристики р-п структур на основе (111) Si, легированного эрбием и кислородом [Текст] / Н.А. Соболев, А.М.

- Емельянов, **А.Н. Якименко** // Физика и техника полупроводников. – 2001. - Т.35. -№3. - с.330-334.
- 20.Емельянов А.М. Влияние плотности поверхностных состояний на фотолюминесценцию Si в структурах Si-SiO<sub>2</sub> [Текст] / А.М. Емельянов, **А.Н. Якименко** // Материалы VВсероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы “Фундаментальные исследования в технических университетах”. - Санкт-Петербург, 8-9 июня 2001 г. - с.119.
- 21.Емельянов А.М. Вольт-фарадные характеристики светоизлучающих диодных структур на основе кремния, легированного редкоземельными элементами [Текст] / А.М. Емельянов, **А.Н. Якименко**// Сборник трудов международного симпозиума "Фото- и электролюминесценция редкоземельных элементов в полупроводниках и диэлектриках". - Санкт-Петербург, 23-24 октября 2001 г. -с.43.
- 22.Емельянов А.М. Емкостные измерения диодных структур при больших обратных токах с учетом сопротивления подложки [Текст] / А.М. Емельянов, **А.Н. Якименко**// Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2001. - N4(26). - с.111-115.
- 23.**Якименко А.Н.** Исследование глубоких уровней в кремнии, легированном эрбием [Текст] / **Якименко А.Н.**, Соболев Н.А., Шек Е.И. // Тезисы докладов IX Международной конференции и VIII Школы молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе “КРЕМНИЙ-2012”. - Санкт-Петербург, 10-13 июля 2012 г. – с.183.

## ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- [1] F. Y. G. Rena, J. Michela, Q. Sun-Paduanoa, B. Zhenga, H. Kitagawaa, D.C. Jacobsona, J.M. PoateaandL. C. Kimerlinga. Ic Compatible Processing of Si:Er for optoelectronics. MRS Symp. Proceedings, Vol.30, p. 87-96 (1993).
- [2] G. Franzo, F. Priolo, S. Coffa, A. Polman, A. Carnera Room-temperature electroluminescence from Er-doped crystalline Si // Appl. Phys. Lett. Vol.64, p.2235 (1994).
- [3] N.A.Sobolev, A.M.Emel'yanov, K.F.Shtel'makh Avalanche breakdown-related electroluminescence in single crystal Si:Er:0 //Appl. Phys. Lett. Vol.71, p.1930 (1997).