

На правах рукописи

Орлова Марина Николаевна

**УПРАВЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИМИ И ДИНАМИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ
СИЛОВЫХ КРЕМНИЕВЫХ ПРИБОРОВ МЕТОДОМ РАДИАЦИОННОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

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

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2007

Работа выполнена в Государственном технологическом университете «Московский институт стали и сплавов» на кафедре «Полупроводниковой электроники и физики полупроводников»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Мурашев Виктор Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Рыжиков Игорь Вениаминович
кандидат технических наук, доцент
Чарыков Николай Андреевич

Ведущая организация: ГУП «ВЭИ им. В.И. Ленина»

Защита диссертации состоится « 01 » ноября 2007 г. в 16 часов 20 мин. на заседании диссертационного совета Д212.132.06 при Государственном технологическом университете «Московский институт стали и сплавов» по адресу: 119049, Москва, Крымский вал, д.3, ауд. К-421.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного технологического университета «Московский институт стали и сплавов».

Автореферат разослан «_____» _____ 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Доктор физико-математических наук, профессор



Гераськин В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Силовая микроэлектроника находит все более широкое практическое применение. В современной российской промышленности существует ряд отраслей, которые составляют серьезную конкуренцию иностранным производителям. Развитие отечественной силовой микроэлектроники необходимо для существования таких стратегически важных направлений, как атомная промышленность, космическая, оборонная, авиационная и многие другие. Изделия силовой микроэлектроники составляют основу практически всех энергосберегающих технологий, отвечая высоким требованиям, таким как минимальные потери мощности, минимальные массо-габаритные характеристики, быстродействие, надежность и низкая стоимость. Силовая микроэлектроника – одно из прогрессивных и быстро развивающихся научно-технических направлений.

В настоящее время в эксплуатации находится большое количество самых разнообразных видов и типов силовых полупроводниковых приборов (СПП). При этом каждый тип СПП характеризуется целым рядом эксплуатационных характеристик, которые зависят от электрофизических параметров. Самыми распространенными среди СПП являются диоды, применяемые в устройствах преобразования электроэнергии, системах питания и управления технологическими процессами. Основой конструкции большинства типов современных СПП диодных структур является монокристалл кремния (Si) в виде плоской пластины.

Силовые кремниевые диоды, изготовленные по стандартной (маршрутной) технологии, не всегда удовлетворяют постоянно возрастающим техническим требованиям. Они обладают недостаточно высоким быстродействием, их выходные параметры зависят от большого количества технологических факторов, чем объясняется большой разброс значений эксплуатационных параметров готовых изделий, что ограничивает надежность и область применения силовых кремниевых диодов. Увеличение быстродействия, снижение динамических потерь мощности является основной задачей силовой микроэлектроники. Одним из методов решения данных проблем является применение радиационного технологического процесса (РТП), а именно электронного облучения. Стандартный метод РТП включает в себя две основные стадии: радиационное воздействие и последующий стабилизирующий отжиг.

Широкое использование в современной микроэлектронике РТП обусловлено высокой эффективностью комплексного управления основными электрофизическими и эксплуатационными параметрами полупроводниковых приборов. При этом удается повысить

быстродействие, исправить параметрический брак и повысить выход годных приборов. Однако применение РТП одновременно с повышением быстродействия часто приводит к увеличению прямого падения напряжения, что повышает статические потери мощности, а следовательно обеспечивает и рост суммарных потерь мощности. Поэтому необходимо изучение особенностей влияния проникающей радиации на электрофизические (статические и динамические) параметры и совершенствование метода РТП, для более эффективного управления основными статическими, динамическими и эксплуатационными параметрами силовых кремниевых приборов не только в процессе изготовления, но и в условиях, когда традиционные технологии практически неприемлемы (например, после завершения технологического цикла изготовления).

Цель диссертационной работы

Разработать условия и режимы проведения операций РТП, исключая последующий стабилизирующий отжиг, и его интеграции в основной технологический процесс изготовления силовых кремниевых приборов с улучшенным комплексом статических и динамических параметров.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие задачи:

- исследовать влияние температуры в процессе облучения «быстрыми» электронами на статические и динамические параметры силовых кремниевых диодов;
- исследовать кинетику накопления и отжига «глубоких» радиационных центров в активных областях силовых кремниевых диодных структур в процессе проведения РТП с применением «быстрых» электронов;
- разработать режимы проведения операций РТП и способы совмещения стабилизирующего отжига с процессом облучения «быстрыми» электронами, для изготовления силовых кремниевых диодных структур с наилучшим сочетанием статических и динамических параметров;
- установить влияние воздействия режимов проведения РТП в широких диапазонах интегральных потоков «быстрых» электронов на статические и динамические параметры силовых кремниевых диодных структур.

Новизна и научная ценность

Установлено влияние температуры в процессе облучения «быстрыми» электронами с энергией 5 МэВ на статические и динамические параметры силовых кремниевых диодов. Определено, что облучение с плотностью потока «быстрых» электронов в диапазоне

$1,7 \cdot 10^{11} - 5,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ приводит к разогреву структур до температур (150 – 650) °С и предложены способы совмещения стабилизирующего отжига с процессом облучения «быстрыми» электронами, что позволило достичь оптимального сочетания статических и динамических параметров силовых кремниевых диодов 2Д237, 2Д2992 и FRED (fast recovery epitaxial diode – эпитаксиально-планарный диод с быстрым восстановлением) по сравнению с приборами, изготовленными по стандартной (маршрутной) технологии.

Показано, что разработанные режимы РТП приводят к снижению основного статического параметра – прямого падения напряжения. Впервые установлено, что уменьшение прямого падения напряжения происходит за счет падения напряжения в активной базе приборов вследствие образования при облучении «глубоких» радиационных центров (А, Е и дивакансии), приводящих к снижению удельного сопротивления базы диодных структур.

Анализ экспериментальных данных показал, что в интервале интегральных потоков $(2-8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при температуре 450 °С с плотностью потока электронов ($\Phi_e \leq 2,3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) вклад динамической и статической мощностей в значение суммарной мощности минимален.

Практическая ценность работы

Полученные в диссертационной работе результаты использованы в ЗАО НПК «Далекс» и при разработке методического обеспечения радиационных испытаний силовых полупроводниковых приборов в ФГУП «НИИП».

Разработанные режимы РТП позволили исправить параметрический брак и восстановить работоспособность диодов 2Д237 за счет снижения времени восстановления обратного сопротивления в 800 раз.

Установлено, что применение РТП в диапазоне интегральных потоков «быстрых» электронов $\Phi_e = 1 \cdot 10^{15} - 2,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ с энергией 5 МэВ приводит к снижению суммарных потерь мощности на (30 – 50) % за счет снизившихся динамических потерь мощности, что обеспечивает более безопасный тепловой режим и эксплуатационную надежность приборов в различных условиях работы.

Внедрение разработанных режимов проведения радиационного технологического процесса в маршрутную технологию FRED – диодов позволило получить оптимальное сочетание электрофизических параметров:

- снизить прямое падение напряжения на 30 % по сравнению с нормами ТУ и тем самым уменьшить статические потери мощности. Данный эффект является новым для этого класса приборов;
- увеличить напряжение пробоя на 25 %;

- повысить быстродействие диодов за счет уменьшения времени восстановления обратного сопротивления в 10 раз. В предельном случае время восстановления обратного сопротивления диодных структур снижается до субнаносекундного диапазона, сохраняя при этом значения прямого падения напряжения в рамках норм ТУ около 1,5 В.

Использование результатов проведенных исследований по оптимизации режимов операций РТП позволяет достичь наилучшего сочетания комплекса статических и динамических параметров силовых кремниевых приборов, что дает значительный экономический эффект и расширяет эксплуатационные возможности приборов.

Основные положения, выносимые на защиту

Экспериментальные результаты по влиянию облучения «быстрыми» электронами в диапазоне интегральных потоков $\Phi_e = 1 \cdot 10^{15} - 2,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ с энергией 5 МэВ при температуре $T = (150 - 650) \text{ }^\circ\text{C}$ и плотностях потока электронов $\phi = 1,7 \cdot 10^{11} - 5,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на статические и динамические параметры силовых кремниевых диодных структур.

Разработанные режимы проведения операций РТП и способ совмещения стабилизирующего отжига с процессом облучения.

Результаты исследования релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) при операции облучения «быстрыми» электронами, кинетики накопления и отжига «глубоких» радиационных центров.

Апробация работы

Основные результаты работы доложены на:

- третьей Российской школе ученых и молодых специалистов по физике, материаловедению и технологии получения кремниевых приборных структур на его основе «Кремний. Школа – 2005». Москва, МИСиС 2005;
- третьей Международной конференции по физике кристаллов. «Кристаллофизика XXI века». Москва – Черноголовка, 2006;
- четвертой Российской конференции с международным участием по физике, материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния и приборных структур на их основе «Кремний – 2007». Москва, МИСиС 2007.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 132 страницы, содержит 34 рисунка, 25 таблиц и список литературы из 89 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и сформирована цель диссертационной работы, отражены научная новизна и практическая значимость полученных экспериментальных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ литературных данных по влиянию проникающей радиации на силовые полупроводниковые приборы. Приведены сведения о физических процессах, протекающих в кремниевых полупроводниковых структурах под действием проникающей радиации («быстрые» электроны). Проанализированы первичные и вторичные процессы, приводящие к образованию в кристаллической решетке кремния «глубоких» радиационных центров. На базе радиационных процессов в полупроводниках обсуждены физическая природа и свойства основных типов устойчивых радиационных центров в полупроводниковых материалах.

Проникающая радиация имеет две формы: электромагнитное излучение (гамма или рентгеновское) и излучение частиц (протоны, электроны, нейтроны и т.д.). При прохождении через кристаллическую решетку твердого тела «быстрые» частицы теряют свою энергию вследствие ряда первичных процессов, а степень реализации того или иного механизма потери энергии зависит как от природы и энергии частицы, так и от ряда свойств облучаемого материала. Наиболее чувствительным к проникающему излучению полупроводниковым материалом является кремний (Si^{28}_{14}) - химический элемент 4 группы периодической системы элементов. Процессы взаимодействия проникающего излучения с кремнием имеют как ряд специфических особенностей, так и ряд общих закономерностей [1, 2].

В процессе технологического облучения «быстрыми» электронами в области базы диодной структуры образуется ряд «глубоких» радиационных центров (РЦ), способных эффективно захватывать электроны и дырки и осуществлять их рекомбинацию и при этом компенсировать проводимость базовой области. Образование в объеме полупроводниковых материалов РЦ влияет на время восстановления обратного сопротивления t_s , концентрацию основных носителей заряда n , удельное сопротивление ρ и ширину области

пространственного заряда (ОПЗ) в квазинейтральной области базы, а следовательно, на вид прямой и обратной ветвей вольт – амперной характеристики [2—5].

Для определения оптимального режима проведения РТП в силовых кремниевых приборах необходимо подобрать интегральный поток «быстрых» электронов, время операции облучения, плотность потока электронов, при которых происходит максимальное снижение времени восстановления обратного сопротивления t_6 и прямого падения напряжения $U_{пр}$, что должно привести к возрастанию быстродействия, и тем самым, снизить динамические потери мощности и повысить рабочую частоту, а также уменьшению статических потерь мощности. За основной критерий работоспособности силовых кремниевых диодных структур принимается величина суммарной рассеиваемой мощности в статическом и динамическом режимах работы.

Во второй главе дано обоснование выбора объектов исследования. Приведены конструктивно-технологические особенности и основные электрофизические параметры исследуемых силовых кремниевых диодных структур, описаны методики и оборудование для проведения операций РТП, измерения параметров «глубоких» радиационных центров методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РГСУ), режимы проведения РТП в условиях маршрутной технологии изготовления FRED – диодов.

Конструкция силовых полупроводниковых приборов должна обеспечивать их высокую эксплуатационную надежность, необходимый срок службы, минимальную массу и габаритные размеры, простое и надежное соединение с охладителем и др.

В качестве объектов исследования были использованы силовые кремниевые диодные структуры, марки КЭФ с эпитаксиально-планарной структурой $p^+ - p^- - n^- - n^{++}$ типа 2Д237, имеющие параметрический брак, и 2Д2992, изготовленные согласно технологии: на исходную пластину кремния n^{++} -типа наращивали эпитаксиальный n^- -слой, в котором затем создали двойной диффузионный $p^+ - p^-$ -эмиттер. Вертикальный разрез диодных структур представлен на рисунке 1.

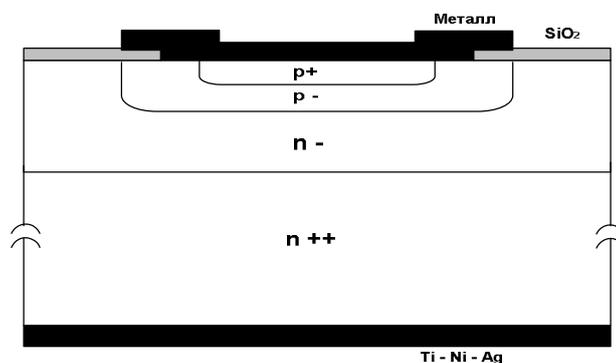


Рисунок 1 – Вертикальный разрез диодной структуры

Силовые кремниевые эпитаксиально-планарные диоды с быстрым восстановлением FRED – диоды, изготовлены диффузией бора в подложку кремния марки КЭФ. По периметру кристалла расположены «охранные кольца» для обеспечения требуемого уровня пробивного напряжения коллектор-эмиттер. Вертикальный разрез структуры FRED – диода представлен на рисунке 2.

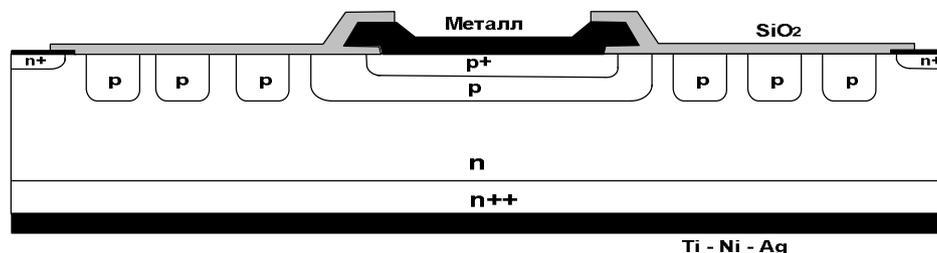


Рисунок 2 – Вертикальный разрез FRED диода

Операция радиационной обработки исследуемых диодных структур проводилась на линейном ускорителе электронов ЭЛУ – 6 в диапазоне интегральных потоков «быстрых» электронов $\Phi_e = 1 \cdot 10^{15} — 2,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ с энергией 5 МэВ и плотностях потока электронов $1,7 \cdot 10^{11} — 5,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что приводило к радиационному разогреву образцов $T = (150 — 650) \text{ }^\circ\text{C}$. Температура при облучении является важным фактором, влияющим на электрофизические характеристики полупроводниковых приборов, и зависит от плотности интегрального пучка электронов и времени проведения операции облучения. Температуру образцов в процессе облучения измеряли с помощью термопары ХК (хромель-коппель). На пластинах предпочтительнее при высоких температурах облучать приборные структуры до скрайбирования их на дискретные кристаллы и сборки.

Время операции облучения интегральным потоком «быстрых» электронов рассчитывали по соотношению

$$t = \frac{\Phi_e}{\varphi} = \frac{\Phi_e S}{(6,25 \cdot 10^{12} I_e)}, \quad (1)$$

где t — время операции облучения, с; Φ_e — интегральный поток «быстрых» электронов, см^{-2} ; φ — плотность потока электронов, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; S — облучаемая площадь, см^2 ; I_e — средний ток пучка электронов, мкА.

До облучения и после каждого этапа облучения измеряли следующие электрофизические параметры: время восстановления обратного сопротивления t_{σ} , прямое падение напряжения U_{np} , напряжение пробоя $U_{проб}$, барьерную емкость C_{σ} при различных значениях прямого и обратного смещения.

Для измерения статических параметров на всех стадиях проведения РТП использовали измеритель характеристик полупроводниковых приборов Л2-56. Прибор Л2-56 предназначен для визуального наблюдения статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) полупроводниковых приборов. Для измерения барьерной емкости на всех этапах проведения РТП использовался прибор ИЕ-95, который предназначен для измерения емкости полупроводниковых приборных структур с *p-n* переходом и для измерения вольт-фарядных характеристик (ВФХ). Оценку изменения динамических свойств проводили на приборе для измерения времени восстановления обратного сопротивления. Измерение параметров «глубоких» радиационных центров проводили с помощью измерителя релаксации емкости ИР-95, предназначенного для измерения параметров радиационных центров и других дефектов с глубокими уровнями методом РСГУ. Показано что, выбор объектов исследования и методика эксперимента является приемлемой для исследования и разработки новых режимов РТП при высокой температуре.

В третьей главе приведены экспериментальные результаты исследования статических и динамических параметров выбранных силовых кремниевых диодных структур 2Д237, 2Д2992 и FRED – диодов при облучении «быстрыми» электронами.

На основе исследования релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) было установлено, что при операции облучения «быстрыми» электронами в базовую область силовых диодных структур вводятся «глубокие» радиационные центры, имеющие следующие энергетические уровни: $E_c - 0,19$ эВ, $E_c - 0,21$ эВ (А-центр); $E_c - 0,25$ эВ, $E_c - 0,34$ эВ (Е-центр); $E_c - 0,38$ эВ, $E_c - 0,42$ эВ (Дивакансии).

Экспериментально установлено, что в процессе облучения происходит отжиг Е-центров в интервале температур (200 – 350) °С. Энергия активации этого процесса зависит от типа донорной примеси, входящей в состав центра, так как при введении примесей, ковалентный радиус которых отличается от ковалентного радиуса кремния, происходит микродеформация решетки. Температура отжига Е-центров существенно сдвигается в сторону более высоких температур при увеличении концентрации доноров, что связано с изменением зарядового состояния центров. В интервале температур (400 – 500) °С отжигаются А-центры с энергией активации 1,4 эВ. Температура полного отжига А-центров растет с увеличением потока облучения. Дивакансии отжигаются (диссоциируют) в интервале температур (450 – 600) °С с энергией активации 1,25 эВ, при этом отжиг идет в две стадии: примерно 40 % РЦ отжигается при температуре 450 °С, а остальные 60 % – при 600 °С.

С ростом интегрального потока электронов наблюдается значительное возрастание скорости образования E-центров с участием основной легирующей примеси (фосфора) и снижение скорости образования центров $E_c - 0,42$ эВ с участием остаточной примеси (кислорода), также появляются новые «глубокие» РЦ, имеющие энергетические уровни: $E_c - 0,50$ эВ, $E_c - 0,53$ эВ и $E_c - 0,54$ эВ, увеличивающие концентрацию основных носителей заряда в n -области. На рисунках 3 – 5 показаны спектры РСГУ исходных и облученных «быстрыми» электронами исследуемых образцов.

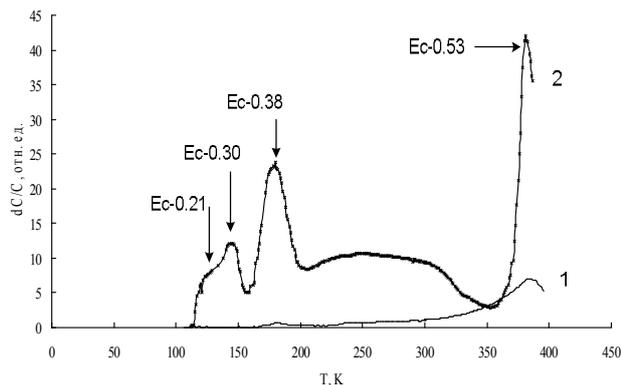


Рисунок 3 – Спектры РСГУ исходного (1) и облученного «быстрыми» электронами (2) с $\Phi_e=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ диода 2Д237

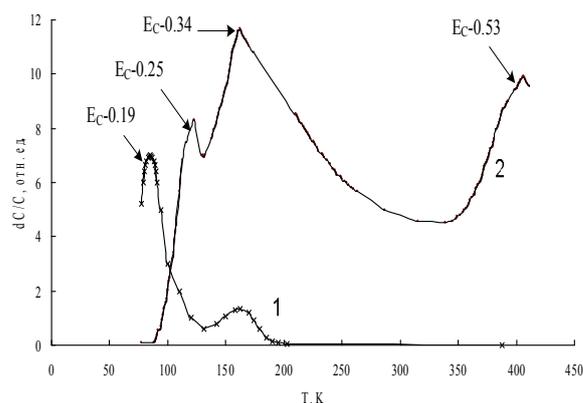


Рисунок 4 – Спектры РСГУ исходного (1) и облученного «быстрыми» электронами (2) с $\Phi_e=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ диода 2Д2992

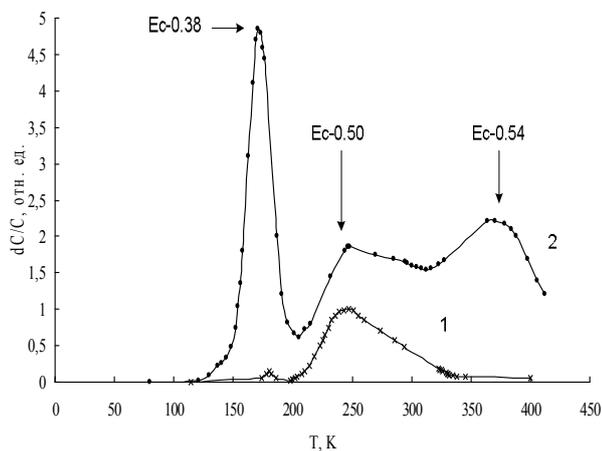


Рисунок 5 – Спектры РСГУ исходного (1) и облученного «быстрыми» электронами (2) с $\Phi_e=2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ FRED – диода

На рисунках 6, 7 приведены результаты основных электрофизических параметров диодных структур 2Д237 и 2Д2992 после облучения интегральным потоком «быстрых» электронов с плотностью потока электронов в диапазоне $1,7 \cdot 10^{11} - 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, такая плотность потока приводит к разогреву пластин со структурами до температур (300–450) °С,

интегральный поток «быстрых» электронов набирался с шагом от $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ до $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

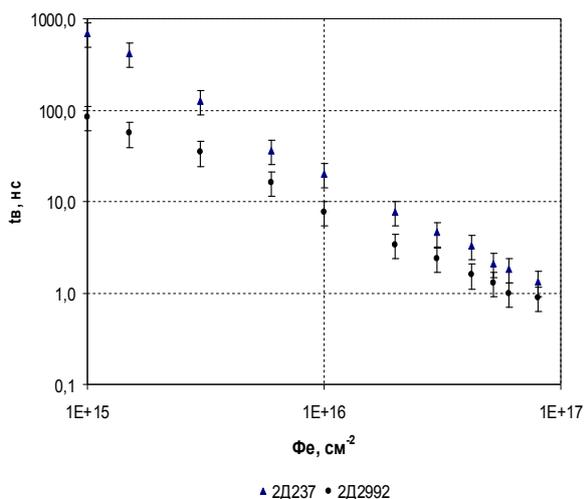


Рисунок 6 – Зависимость времени восстановления обратного сопротивления t_e диодов 2Д237 и 2Д2992 от интегрального потока «быстрых» электронов Φ_e

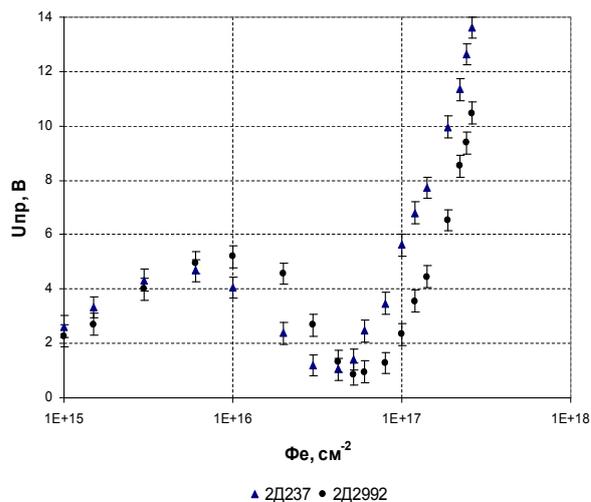


Рисунок 7 – Зависимости прямого падения напряжения $U_{пр}$ диодов 2Д237 и 2Д2992 от интегрального потока «быстрых» электронов Φ_e

Анализ экспериментальных данных показывает, что оптимальный режим проведения РТП, при котором происходит улучшение основных электрофизических параметров диодов 2Д237 и 2Д2992, следующий: температура (300 – 400) °С; диапазон интегральных потоков «быстрых» электронов $(2\text{—}8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$; плотность потока электронов не больше $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; время облучения (15 – 20) мин.

На рисунках 8, 9 приведены зависимости основных электрофизических параметров FRED – диодов от интегрального потока «быстрых» электров.

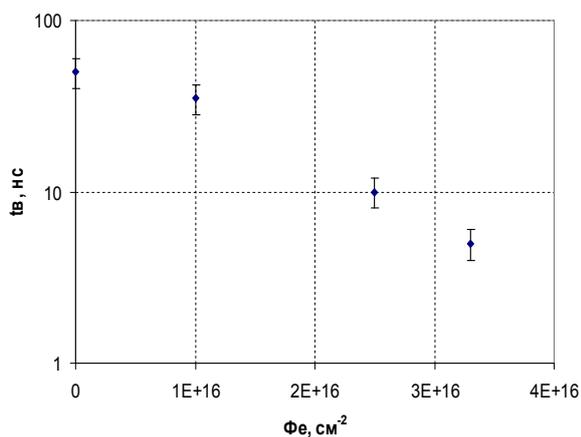


Рисунок 8 – Зависимость времени восстановления обратного сопротивления $t_{в}$ FRED – диодов от интегрального потока «быстрых» электронов Φ_e

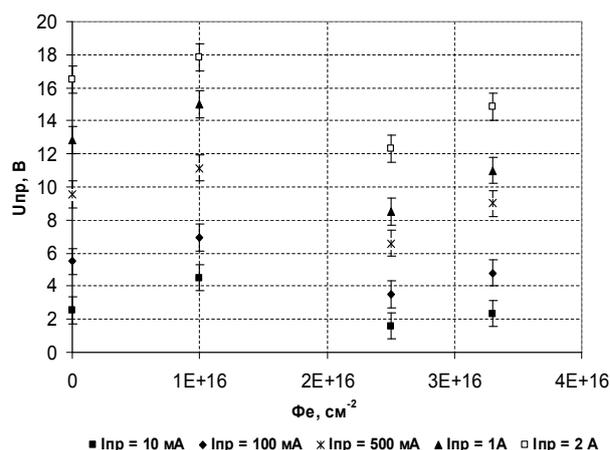


Рисунок 9 – Зависимость прямого падения напряжения $U_{пр}$ FRED – диодов от интегрального потока «быстрых» электронов Φ_e

В таблице 1 представлены режимы проведения РТП и основные электрофизические параметры FRED – диодов, полученные в результате облучения.

Таблица 1 – Режимы проведения РТП и электрофизические параметры FRED – диодов

Интегральный поток электронов, см^{-2}	Плотность потока пучка электронов, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Время операции облучения, мин	Время восстановления обратного сопротивления, нс	Прямое падение напряжения при постоянном прямом токе, В				
					10 мА	100 мА	500 мА	1 А	2 А
До облучения	–	–	–	50	2,6	5,5	9,6	12,9	16,5
$1,0 \cdot 10^{16}$	$1,0 \cdot 10^{13}$	300	15	35	4,5	6,9	11,1	15,0	17,8
$2,5 \cdot 10^{16}$	$2,3 \cdot 10^{13}$	450	16	10	1,6	3,5	6,6	8,5	12,3
$3,3 \cdot 10^{16}$	$5,5 \cdot 10^{13}$	650	10	5	2,4	4,8	9,0	11,0	14,9

Анализ таблицы 1 показывает, что оптимальный режим проведения РТП, при котором происходит улучшение основных электрофизических параметров FRED – диодов, следующий: температура в процессе облучения 450°C ; интегральный поток «быстрых» электронов $2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$; плотность поток электронов ($\Phi_e \leq 2,3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$); время облучения 16 мин.

Наиболее чувствительным параметром к воздействию проникающей радиации, как и предполагалось, оказалось время восстановления обратного сопротивления, характеризующее динамические свойства (быстродействие) диодов. Этот параметр начинает уменьшаться уже при малом интегральном потоке «быстрых» электронов. Зависимость $t_{в}$ от интегрального потока имеет монотонный характер. При этом повышается быстродействие

структур 2Д237 в 800 раз, 2Д2992 в 100 раз, а у FRED – диодов быстродействие увеличилось в 10 раз по сравнению с исходными структурами. Таким образом, проведение РТП снижает t_6 , тем самым – увеличивает быстродействие и позволяет уменьшить динамические потери мощности.

Наблюдаемая зависимость $t_6(\Phi_e)$ объясняется линейной связью времени восстановления с временем жизни неосновных носителей заряда в базовой области диодов, которое, в свою очередь, обратно пропорционально концентрации «глубоких» РЦ, образующихся в базовой области диода при облучении «быстрыми» электронами [3, 7].

Экспериментально установлено, что облучение «быстрыми» электронами с повышенной интенсивностью ($\varphi \leq 2,3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) приводит к разогреву в процессе облучения пластин со структурами до 450°C и отжиг не стабильных РЦ происходит непосредственно в процессе облучения за счет нагрева образцов под действием пучка электронов. В результате происходит совмещение стабилизирующего отжига с процессом облучения. При таких режимах, в интервале интегральных потоков «быстрых» электронов $(2—8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ установлено, снижение основного статического параметра – прямого падения напряжения. Показано, что повышение температуры облучения замедляет темп возрастания прямого падения напряжения при приведении РТП. Снижение $U_{пр}$ обусловлено образованием «глубоких» РЦ донорного характера, приводящих к увеличению концентрации носителей заряда в базовой области. При интегральном потоке электронов выше $2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ стабильность свойств нарушается, снижение $U_{пр}$ прекращается, а затем происходит его увеличение. Значительный рост $U_{пр}$ при облучении, возможно, обусловлен малой концентрацией фосфора в базовой n -области исследуемых структур и компенсирующим действием РЦ (уже при относительно не больших потоках «быстрых» электронов $\Phi_e \leq 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$), приводящем к росту удельного электросопротивления базовой n -области.

Таким образом, установлено влияние температуры, времени облучения и плотности интегрального потока «быстрых» электронов на статические и динамические параметры силовых диодных структур при проведении РТП.

Глава четыре содержит расчеты основных электрофизических параметров силовых диодных структур после проведения операций РТП с целью определения режимов для получения приборов с наилучшими эксплуатационными характеристиками.

Важнейшей характеристикой кремниевой диодной p — n -структуры является ВАХ. Вид ВАХ в первую очередь определяется электрофизическими параметрами и геометрическими размерами базовой области. При радиационной (обработке независимо от вида проникающего излучения) в кремниевых диодных структурах основное изменение

электрофизических параметров отражается на прямой ветви ВАХ, где изменяется основной статический параметр – прямое падение напряжения U_{np} [6].

Полное падение напряжения на диоде при некоторой постоянной плотности тока равно

$$U_{np} = U_{p-n} + U_{\delta} + U_{\kappa}, \quad (2)$$

где U_{p-n} — падение напряжения на p – n -переходе, В; U_{δ} — падение напряжения на базе диода, В; U_{κ} — падение напряжения на приконтактных областях, В.

Входящие в уравнение (2) слагаемые определяются следующим образом. Напряжение на p – n -переходе равно

$$U_{p-n} = \frac{mkT}{q} \cdot \ln \frac{\tau}{\tau_0}, \quad (3)$$

где k — постоянная Больцмана, эВ·К⁻¹; T — температура, К; τ_0 , τ — время жизни неосновных носителей заряда до и после облучения «быстрыми» электронами соответственно, с.

Так как время жизни неосновных носителей заряда τ при облучении монотонно убывает, то напряжение U_{p-n} , согласно выражению (3), должно уменьшаться.

Изменение U_{δ} при высоком уровне инжекции ($x \gg 1$) определяется как

$$U_{\delta} = \frac{4kT}{q} \frac{b \operatorname{ch} \left(\frac{W_{\delta}}{L} \right)}{(b+1)^2 \sqrt{1+B}} \operatorname{arth} \frac{\sqrt{1+B} \operatorname{th} \left(\frac{W_{\delta}}{2L} \right)}{B + \operatorname{th} \left(\frac{W_{\delta}}{2L} \right)} + \frac{kT}{q} \frac{b-1}{b+1} \ln \left[\frac{\operatorname{sh} \left(\frac{W_{\delta}}{L} \right)}{B} + 1 \right], \quad (4)$$

где $b = \mu_n / \mu_p$; μ_n , μ_p — подвижность электронов и дырок, см²·В⁻¹·с⁻¹; W_{δ} — ширина базы, мкм; L — диффузионная длина, мкм; $B = \frac{1}{x} \cdot \frac{b}{b+1}$; x — уровень инжекции.

При низком уровне инжекции ($x \ll 1$) выражение (4) можно представить в виде

$$U_{\delta} = j_{np} W_{\delta} \rho. \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что в диодах U_{δ} при облучении определяется изменением удельного сопротивления ρ , это приводит к увеличению падения напряжения на базе, дающего основной вклад в полное прямое падение напряжения на диодной структуре.

Обратная ветвь ВАХ диодов характеризуется напряжением пробоя. Аналитическое выражение для изменения $U_{\text{проб}}$ при воздействии излучения на p - n переход в базе n - Si имеет вид

$$U_{\text{проб}} = 86 \cdot \rho_{\delta}^{0,64} \cdot \exp(0,64 \cdot K_{\rho} \cdot \Phi_e), \quad (6)$$

где ρ_{δ} – удельное сопротивление базы диода, Ом·см; K_{ρ} – коэффициент радиационного изменения удельного сопротивления.

Физический смысл коэффициента K_{ρ} определяется выражением

$$K_{\rho} = \frac{1}{n_0} \frac{\Delta n}{\Phi}, \quad (7)$$

где n_0 – концентрация носителей заряда в зоне проводимости до облучения, см⁻³;

$\frac{\Delta n}{\Phi}$ – скорость изменения концентрации основных носителей заряда при облучении, см⁻¹.

Экспериментально доказано, что облучение «быстрыми» электронами приводит к росту удельного сопротивления в базе и уменьшает градиент концентрации примеси в p - n переходе, что приводит к определенному росту напряжения пробоя $U_{\text{проб}}$.

Для выбора оптимальных режимов проведения РТП с целью получения наилучшего сочетания комплекса электрофизических параметров исследуемых силовых диодных структур, был проведен анализ суммарной рассеиваемой мощности при работе диодов в импульсно-частотном режиме. Выделяемая (рассеиваемая) на диоде суммарная мощность $P_{\text{сум}}$ определяется в виде двух составляющих: статической мощности P_c , выделяемой за счет прямого падения напряжения на диоде в открытом состоянии и динамической мощности P_d , выделяемой за счет переходных процессов при переключении из открытого состояния в закрытое (определяется временем восстановления обратного сопротивления)

Статические потери мощности P_c характеризуются изменениями, происходящими на прямой ветви ВАХ, и определяются по формуле

$$P_c = I_{np} \cdot U_0 + r_{дин} \cdot I_{np}^2, \quad (8)$$

где U_0 – пороговое напряжение диода, В; $r_{дин}$ – динамическое сопротивление линейного участка прямой ветви ВАХ, Ом.

Динамические потери мощности P_{δ} определяются длительностью переходных процессов, которые пропорциональны эффективному времени жизни неосновных носителей заряда в базе диода, и определяются по формуле

$$P_{\delta} = 0.5 \cdot I_{np}^{имп} \cdot U_{обр} \cdot t_{в} \cdot f, \quad (9)$$

где $I_{np}^{имп}$ – прямой импульсный ток, А; $U_{обр}$ – обратное напряжение, В; f – частота коммутации диода, Гц.

Используя экспериментально полученные зависимости $t_{\delta}(\Phi_e)$, $U_{np}(\Phi_e)$ был проведен расчет суммарных потерь рассеиваемой мощности для диодных структур 2Д237, 2Д2992 при $f = 10$ МГц и FRED – диодов при разных значениях частоты коммутации. Зависимость суммарных потерь рассеиваемой мощности от интегрального потока облучения представлена на рисунках 10, 11.

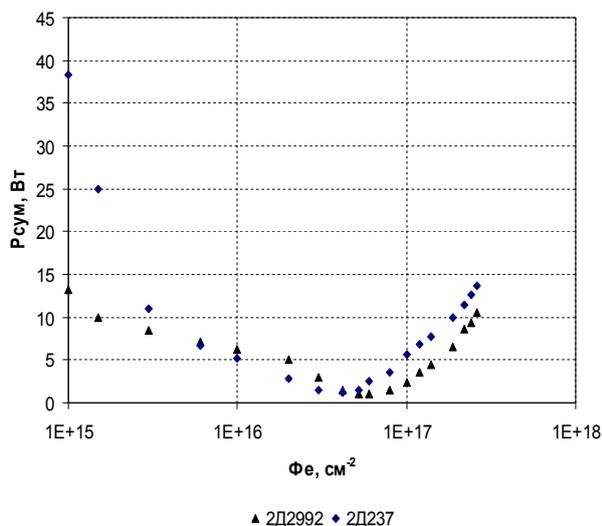


Рисунок 10 – Зависимость суммарных потерь мощности диодов 2Д237 и 2Д2992 от интегрального потока «быстрых» электронов Φ_e

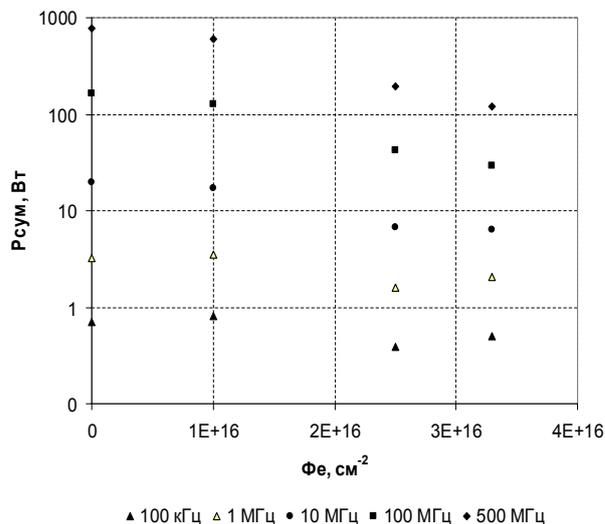


Рисунок 11 – Зависимость суммарных потерь мощности FRED – диодов от интегрального потока «быстрых» электронов Φ_e

Поскольку в процессе облучения уменьшается время восстановления обратного сопротивления за счет уменьшения время жизни носителей в базе диода, то величина P_{δ} также снижается на всем промежутке интегральных потоков.

На основании экспериментальных данных установлено, что при не больших потоках облучения ($\Phi_e \leq 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) основной вклад в суммарные потери мощности вносит динамическая составляющая, снижение которой опережает рост статической мощности. В интервале потоков $(2\text{—}8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при температуре 450°C с плотностью потока электронов не больше $2,3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ вклад динамической и статической мощностей в значение

суммарной мощности минимален. При больших потоках «быстрых» электронов ($\Phi_e \geq 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) увеличение P_c опережает снижение P_o , тем самым определяет общий характер наблюдаемых при облучении изменений суммарной рассеиваемой мощности $P_{\text{сум}}$. Таким образом, РТП позволяет снизить суммарные потери мощности и тем самым расширить диапазон рабочих частот.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ экспериментальных результатов по влиянию операций РТП на динамические и статические параметры силовых кремниевых диодных структур позволил осуществить выбор оптимальных режимов облучения, исключая последующий стабилизирующий отжиг. Использование операций облучения «быстрыми» электронами с интегральным потоком $(2 - 8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, плотностью потока до $2,3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, временем облучения 15 мин позволяет:
 - повысить быстродействие диодов 2Д237 в 800 раз, 2Д2992 в 100 раз, 10 раз FRED – диодов;
 - уменьшить суммарные потери мощности на (30 – 50) %, за счет снизившихся статических и динамических потерь мощности на (30 – 40) % и тем самым расширить диапазон рабочих частот на (20 – 30) %.
2. Применение операций РТП в разработанных режимах ($\Phi_e = (2 - 8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $\varphi = (1,7 - 2) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $t = (10 - 17)$ мин, $T = (300 - 450)^\circ\text{C}$) приводит к снижению основного статического параметра – прямого падения напряжения на (30 – 50) % по сравнению с нормами ТУ за счет падения напряжения в активной базе приборов вследствие образования при облучении «глубоких» радиационных центров $E_c - 0,42$ эВ, $E_c - 0,50$ эВ, $E_c - 0,53$ эВ, $E_c - 0,54$ эВ, приводящих к снижению удельного сопротивления базы диодных структур.
3. На основании экспериментальных данных установлено, что в интервале потоков $(2 - 8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при температуре облучения 450°C с плотностью потока электронов не больше $2,3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ вклад динамической и статической мощностей в значение суммарной мощности минимален.
4. На основе исследования спектров РСГУ показано, что при проведении операции облучения «быстрыми» электронами в диапазоне интегральных потоков $\Phi_e = 1 \cdot 10^{15} - 2,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ с энергией 5 МэВ в базовую область силовых диодных структур вводятся «глубокие» РЦ, имеющие следующие энергетические уровни: $E_c - 0,19$ эВ, $E_c - 0,21$ эВ (А-центр); $E_c - 0,25$ эВ, $E_c - 0,34$ эВ (Е-центр); $E_c - 0,38$ эВ, $E_c - 0,42$ эВ (Дивакансии), а

также появляются новые «глубокие» РЦ, имеющие энергетические уровни: $E_c - 0,50$ эВ, $E_c - 0,53$ эВ и $E_c - 0,54$ эВ и увеличивающие концентрацию основных носителей заряда в базовой области диода.

5. Теоретические и экспериментальные исследования кинетики накопления и отжига «глубоких» радиационных центров в активных областях силовых кремниевых диодных структур в процессе проведения РТП с плотностью потока «быстрых» электронов в диапазоне $1,7 \cdot 10^{11} - 5,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ позволили установить, что отжиг E-центров происходит в интервале температур (200 – 350) °С. Температура отжига E-центров существенно сдвигается в сторону более высоких температур при увеличении концентрации доноров, что связано с изменением зарядового состояния центров. В интервале температур (400 – 500) °С отжигаются А-центры. Температура полного отжига А-центров растет с увеличением потока облучения. Дивакансии отжигаются (диссоциируют) в интервале температур (450 – 600) °С. При этом отжиг идет в две стадии: примерно 40 % РЦ отжигается при температуре 450 °С, а остальные 60 % — при 600 °С.

Список литературы

1. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. / Под ред. Е.А. Ладыгина. — М.: Советское радио, 1980.
2. Вавилов В.С., Кив А.Е., Ниязова О.Р. Механизмы образования и миграция дефектов в полупроводниках. — М.: Наука, 1981.
3. Лукьянина В.В. / Уровни вакансий и межузельных атомов в запрещенной зоне кремния // Физика и техника полупроводников.-2003.-Т.37.-№4.
4. Радиационная стойкость широкозонных полупроводников / Лебедев А.А., Козловский В.В., Строкан Н.Б., Давыдов Д.В., Иванов А.М., Стрельчук А.М., Якимова Р. // Физика и техника полупроводников.-2002.-Т.36.-№11.
5. Основы радиационной технологии микроэлектроники. Первичные процессы образования радиационных центров в полупроводниковых кристаллах. Ч. 1. / Е.А. Ладыгин, А.В. Паничкин, Н.Н. Горюнов и др. — М.: МИСиС, 1994.
6. Ладыгин Е.А., Коновалов М.П., Орлова М.Н., Ручкин М.В., Лагов П.Б., Сурма А.М. Повышение быстродействия и радиационной стойкости силовых кремниевых диодов с применением радиационного технологического процесса // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2006. Вып. 1—2. С. 29—37.

7. Основы радиационной технологии микроэлектроники. Механизмы образования и физическая природа радиационных центров в полупроводниковых структурах. Ч. 2. / Е.А. Ладыгин, А.В. Паничкин, Н.Н. Горюнов и др. — М.: МИСиС, 1994.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Ладыгин Е.А., Лагов П.Б., Орлова М.Н., Калачев А.Н. Влияние облучения быстрыми электронами на электрофизические параметры кремниевых эпитаксиально-планарных диодных структур // Тезисы докладов третьей Российской школе ученых и молодых специалистов по физике, материаловедению и технологии получения кремниевых приборных структур на его основе. «Кремний. Школа – 2005». Москва – МИСиС, 2005. С. 187.
2. Ладыгин Е.А., Коновалов М.П., Орлова М.Н., Ручкин М.В., Лагов П.Б., Сурма А.М. Повышение быстродействия и радиационной стойкости силовых кремниевых диодов с применением радиационного технологического процесса // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2006. Вып. 1–2. С. 29–37.
3. Коновалов М.П., Ладыгин Е.А., Лагов П.Б., Орлова М.Н., Ручкин М.В., Сурма А.М. Энергетическое положение и концентрация глубоких радиационных центров в базовой области силовых кремниевых р-п структур при облучении и отжиге // Тезисы докладов Третьей Международной конференции по физике кристаллов. «Кристаллофизика XXI века». Москва – МИСиС, 2006. С. 337– 338.
4. Ладыгин Е.А., Орлова М.Н., Волков Д.Л. Основные типы радиационных центров и их влияние на электрофизические параметры кремниевых диодных структур при обработке быстрыми электронами // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. №2. 2007. С. 22–27.
5. Орлова М.Н., Волков Д.Л. Разработка и исследование высокотемпературного радиационного технологического процесса для создания силовых кремниевых структур (приборов) с улучшенными электрофизическими параметрами // Тезисы докладов Четвертой Российской конференции с международным участием по физике, материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния и приборных структур на их основе «Кремний – 2007». Москва, МИСиС 2007.