

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права  
УДК 621.382.232

**ШЕСТОВСКИЙ**  
**Дмитрий Викторович**

**ДЕФЕКТНО-ПРИМЕСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В СТРУКТУРНЫХ  
ЭЛЕМЕНТАХ С ПОТЕНЦИАЛЬНЫМИ БАРЬЕРАМИ ПРИБОРОВ  
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ ПРИ ВНЕШНИХ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

Минск 2024

Научная работа выполнена в Белорусском государственном университете и  
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

|                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Научные руководители:       | <b>Просолович Владислав Савельевич</b> ,<br>кандидат физико-математических наук, доцент,<br>заведующий научно-исследовательской лабораторией спектроскопии полупроводников Белорусского государственного университета<br><b>Петлицкий Александр Николаевич</b> ,<br>кандидат физико-математических наук, доцент, начальник Государственного центра «Белмикроанализ» Научно-технического центра открытого акционерного общества «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» |
| Официальные<br>оппоненты:   | <b>Кучинский Петр Васильевич</b> ,<br>доктор физико-математических наук, доцент,<br>директор научно-исследовательского учреждения «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ<br><b>Тявловский Константин Леонидович</b> ,<br>кандидат физико-математических наук, доцент,<br>доцент кафедры информационно-измерительной техники и технологии Белорусского национального технического университета                                                              |
| Оппонирующая<br>организация | Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

Защита состоится 14 февраля 2025 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.16 при Белорусском государственном университете по адресу: г. Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407. Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030. Телефон ученого секретаря: 209-57-09; e-mail: [Fedotov@bsu.by](mailto:Fedotov@bsu.by).

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан « 9 » января 2025 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций



А.К. Федотов

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с непрерывным совершенствованием и ростом функциональной сложности элементной базы современной микроэлектроники все более высокие требования предъявляются к эксплуатационным параметрам полупроводниковых приборов, которые определяются электрофизическими характеристиками их функциональных элементов с потенциальными барьерами: р-п-переходы, биполярные и полевые транзисторы, МОП (металл-оксид-полупроводник) структуры. Изучение физических механизмов процессов дефектно-примесного взаимодействия в структурах с потенциальными барьерами в зависимости от содержания в них технологических примесей, а также при внешних энергетических воздействиях является актуальным ввиду постоянно возрастающей необходимости целенаправленного управления процессами переноса носителей заряда.

Перспективным способом модификации структурно-фазовых, электрофизических и оптических свойств функциональных элементов приборов микроэлектроники с потенциальными барьерами является применение внешних энергетических воздействий. К его преимуществам относятся прецизионность дозы облучения, однородность и локальность воздействия, отсутствие предельной концентрации легирования, совместимость с другими процессами технологии производства полупроводниковых приборов, высокая воспроизводимость характеристик создаваемых структур.

Одним из структурных элементов с потенциальными барьерами приборов микроэлектроники на основе кремния, которые активно применяются в аппаратуре космического назначения в качестве навигационных и сенсорных детекторов, в системах определения расстояния с помощью светового луча (LIDAR), являются р-і-п-фотодиоды, изготовленные на основе кремния, выращенного по методу бестигельной зонной плавки. Перспективно также применение данных приборов в качестве детекторов для регистрации высокоэнергетических  $\gamma$ -квантов. Однако в настоящий момент отсутствуют исследования влияния на характеристики указанных приборов процессов взаимодействия технологических дефектов в кремнии, полученном методом бестигельной зонной плавки, и дефектов, индуцированных  $\gamma$ -квантами.

Наличие высокой концентрации генерационно-рекомбинационных центров в активной области биполярных транзисторов оказывает существенное влияние на их основные эксплуатационные параметры, а также приводит к снижению процента выхода годных приборов. В связи с этим актуальной является проблема лабильной воспроизводимости эксплуатационных параметров полупроводниковых приборов, в частности, разработка технологических способов компенсации негативных эффектов, а также неразрушающих методов своевременного межоперационного контроля.

Определяющим фактором, оказывающим влияние на эксплуатационные параметры и надежность силовых МОП-транзисторов на основе кремния, является качество слоев подзатворного  $\text{SiO}_2$  и его границы раздела с  $\text{Si}$ . Наличие дефектов структуры как в подзатворном диэлектрике, так и на его границе раздела с  $\text{Si}$  приводит к образованию зарядовых центров и снижению электрической прочности подзатворных оксидов МОП-транзисторов. Для тонких и ультратонких подзатворных оксидов кремния логических элементов МОП-транзисторов интегральных схем предложены способы снижения концентрации зарядовых центров и увеличения электрической прочности диэлектрика методами нитрирования в атмосфере с добавлением  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}$  либо  $\text{N}_2\text{O}$ . Их основным недостатком является образование большого количества ловушек на границе раздела подзатворного оксида кремния и  $\text{Si}$ , обусловленных включением атомов водорода из атмосферы реактора. К недостаткам можно отнести также технологические сложности получения слоев на основе оксида кремния с заданной концентрацией азота. В отличие от вышеуказанных методов азотирование подзатворного оксида методом ионной имплантации (ИИ) перспективно ввиду возможности локального и прецизионного введения требуемого количества атомов азота.

Таким образом, актуальным является проведение исследований дефектно-примесного взаимодействия в структурных элементах с потенциальными барьерами приборов микроэлектроники на основе кремния при внешних энергетических воздействиях.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Тема диссертационной работы соответствует Перечню приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2021 – 2025 годы «4. Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы:… микро-, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика; радиоэлектронные системы и технологии, приборостроение…» (Указ Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 г. №156).

Диссертационные исследования выполнялись в рамках заданий государственных программ: 1) «Разработка физико-технологических методов управления и контроля характеристиками переходных процессов и модификации дефектно-примесного состава функциональных слоев в базовых элементах субмикронных интегральных микросхем», задание 1.1.12 Государственной программы научных исследований (ГПНИ) «Фотоника, опто- и микроэлектроника», подпрограмма «Микро- и наноэлектроника» на 2016–2018 гг., № ГР 20162103; 2) «Разработка физико-технологических методов создания элементов биполярных и

комплементарных структур металл-окисел-полупроводник, моделирование и управление их статическими и динамическими характеристиками», задание 3.2.01.1 ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника», подпрограмма «Микро- и наноэлектроника» на 2019–2020 гг., № ГР 20190866; 3) «Разработка физико-технологических методов целенаправленной модификации и контроля дефектно-примесного состава дискретных приборов, биполярных и МОП-структур в составе СБИС с целью управления их эксплуатационными характеристиками», задание 3.11.3 ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» на 2021–2025 гг., № ГР 20212662.

Работа выполнялась на кафедре физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета и ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компании холдинга «ИНТЕГРАЛ».

### **Цель, задачи, объект и предмет исследования**

Целью настоящей работы являлось установление закономерностей дефектно-примесного взаимодействия в структурных элементах с потенциальными барьерами приборов микроэлектроники, подвергнутых внешним энергетическим воздействиям.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

- определить особенности механизмов дефектно-примесного взаимодействия технологических примесей и радиационных дефектов, индуцированных  $\gamma$ -квантами и высокоэнергетичными ионами в структурных элементах с потенциальными барьерами приборов микроэлектроники;
- установить влияние комплексов технологических и радиационных дефектов, индуцированных  $\gamma$ -квантами, на электрофизические характеристики р-і-п-фотодиодов на основе кремния;
- определить методы компенсации негативного воздействия технологических (фоновых) примесей на эксплуатационные характеристики структурных элементов с потенциальными барьерами приборов микроэлектроники;
- определить механизмы взаимодействия ионно-имплантированных атомов азота со структурными дефектами в кремнии и дефектами границы раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  в процессе высокотемпературных обработок;
- установить механизмы миграции атомов азота в структурах  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  после ионной имплантации и последующих высокотемпературных обработок;
- установить влияние азотирования подзатворных оксидов кремния методом ИИ на электрофизические характеристики р- и п-канальных ДМОП-транзисторов с вертикальной структурой.

**Объекты исследования** – структурные элементы с потенциальными барьерами приборов микроэлектроники на основе кремния: р-п-переходы, биполяр-

ные и полевые транзисторы, МОП-структуры, подвергнутые внешним энергетическим воздействиям.

**Предмет исследования** – процессы дефектно-примесного взаимодействия в структурных элементах с потенциальными барьерами приборов микроэлектроники при внешних энергетических воздействиях и электрофизические характеристики данных структурных элементов.

### Научная новизна

1. Установлено, что наличие пространственного распределения генерационно-рекомбинационных центров (технологических примесей и/или микродефектов) в  $i$ -области  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов, изготовленных на основе монокристаллического кремния, выращенного по методу бестигельной зонной плавки, приводит к формированию на обратных ветвях темновых вольт-амперных характеристик  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов трех областей с различной зависимостью тока ( $I_R$ ) от обратного напряжения ( $V_R$ ): сублинейной (1 – 10 В), суперлинейной (20 – 35 В) и линейной (более 35 В), которые удовлетворительно описываются выражением  $I_R \sim (V_R)^n$ .

2. Показано, что при частотах измерений до 100 кГц величина барьерной ёмкости ( $C_b$ ) и толщина области обеднения  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов практически не зависит от температуры и частоты измерений при приложенных обратных смещениях, превышающих контактную разность потенциалов ( $V_{bi}$ ). На частотах более 100 кГц при  $V_R \leq V_{bi}$  наблюдается уменьшение  $C_b$ , обусловленное проявлением возрастающего влияния диффузионной ёмкости.

3. Установлено, что основной причиной возрастания обратного тока и трансформации формы вольт-амперной характеристики  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов в результате облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  является образование генерационно-рекомбинационных центров радиационного происхождения вследствие коагуляции первичных радиационных дефектов (вакансий и/или собственных междоузельных атомов) на технологических остаточных дефектах структуры, сформировавшихся как во время выращивания монокристаллов кремния, так и при последующих высокотемпературных обработках в ходе формирования приборов.

4. Выявлено, что в биполярном  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторе с высоким содержанием технологических примесей (например, по  $Fe$  концентрация  $3,4 \cdot 10^{11}$  ат/см<sup>2</sup>) для увеличения статического коэффициента усиления по току  $h_{21э}$  ( $\beta$ ) до 70 % в области, соответствующей идеальному поведению транзистора, необходима более высокая (в 3-4 раза) концентрация основной легирующей примеси в эмиттере по сравнению с приборами с низким содержанием технологических фоновых примесей (по  $Fe$  менее  $4 \cdot 10^9$  ат/см<sup>2</sup>).

5. Показано, что при низком уровне инжекции (токи коллектора  $I_C < 1 \cdot 10^{-6}$  А) величина  $\beta$  для биполярных транзисторов с высокой концентрацией

технологических (фоновых) примесей (например, по  $Fe$  концентрация составляет  $3,4 \cdot 10^{11}$  ат/см<sup>2</sup>), даже при более высокой концентрации легирующей примеси в эмиттере, меньше в 1,5 – 3 раза, чем соответствующее значение  $\beta$  для приборов с содержанием технологических примесей ниже предела обнаружения, и практически перестает зависеть от температуры.

6. Показано, что при высокотемпературных обработках пластин кремния как в индукционной печи, так и при постимплантационном быстром термическом отжиге происходит преимущественная локализация атомов азота на границе раздела  $SiO_2/Si$ . Разработана одномерная микроскопическая зарядовая модель ускоренной диффузии атомов азота, учитывающая их первоначальное вытеснение из узлов кристаллической решетки по механизму Воткинса и последующий захват несоответствиями границы раздела  $SiO_2/Si$ .

7. Установлено, что атомы азота, введенные методом ионной имплантации или высокотемпературным отжигом, при проведении высокотемпературных обработок, локализуясь на границе раздела  $SiO_2/Si$ , вступают во взаимодействие с расположенными здесь локальными дефектами, в том числе и с преобладающими на границе раздела электрически активными парамагнитными  $P_{b0}$ - и  $E'$ -центрами, и образуют двойные кумулятивные связи  $O=Si=N-$  и тройные связи  $-Si \equiv N$ .

8. Показано, что для р-канальных силовых ДМОП-транзисторов с азотированным методом ионной имплантации подзатворным оксидом кремния дозами  $1 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> с энергией 20 кэВ по сравнению с контрольными образцами наблюдается возрастание средней величины заряда пробоя до 22 % и снижение плотности фиксированного заряда на  $1,7 \cdot 10^{10} - 2,8 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup> для указанного подзатворного диэлектрика. Это обусловлено взаимодействием в процессе отжига атомов азота с оборванными связями, находящимися на границе раздела  $SiO_2/Si$ , и образованием прочных химических связей, препятствующих накоплению заряда на поверхности границы раздела  $SiO_2/Si$ .

9. Установлено, что азотирование подзатворного оксида методом ионной имплантации дозой  $2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> с энергией 40 кэВ с последующей быстрой термообработкой приводит к значительному снижению токов утечки затвора и уровня шума токов утечки затвора ДМОП-транзисторов в результате пассивации атомами азота поверхностных состояний, расположенных в переходном нестехиометрическом слое оксида кремния.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Совокупность экспериментальных результатов о закономерностях взаимодействия технологических примесей, микродефектов и радиационных дефектов в приборных структурах с потенциальными барьерами на основе монокристаллического кремния, а именно:

- наличие на обратных ветвях темновых вольт-амперных характеристик р-і-п-фотодиодов трех характерных областей с различной зависимостью тока от обратного напряжения: сублинейной (1 – 10 В), суперлинейной (20 – 35 В) и линейной (более 35 В), обусловленных пространственным распределением генерационно-рекомбинационных центров (технологических примесей и/или микродефектов) в *i*-области;

- особенности изменений вольт-амперных характеристик р-і-п-фотодиодов после облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ , обусловленные коагуляцией первичных радиационных дефектов на остаточных технологических дефектах;

- метод повышения величины статического коэффициента усиления по току при среднем уровне инжекции (ток коллектора  $1 \cdot 10^{-6} \text{ А} < I_C < 1 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ ) биполярного п-р-п-транзистора, содержащего повышенную концентрацию технологических (фоновых) примесей (по *Fe* более  $4 \cdot 10^9 \text{ ат/см}^2$ ).

2. Установленная закономерность преимущественной локализации атомов азота на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  как при высокотемпературных обработках пластин кремния в индукционной печи в атмосфере азота, так и при быстром термическом отжиге пластин кремния с защитным слоем  $\text{SiO}_2$ , имплантированных ионами азота дозами  $2,5 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  с энергией 40 кэВ, обусловленная взаимодействием атомов азота с дефектами переходного нестехиометрического слоя границы раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , и сопровождающаяся образованием двойных кумулятивных  $\text{O}=\text{Si}=\text{N}-$  и тройных  $-\text{Si} \equiv \text{N}$  связей. Разработанная феноменологическая одномерная микроскопическая зарядовая модель ускоренной диффузии атомов азота, отличающаяся учетом первоначального вытеснения *N* из узлов кристаллической решетки по механизму Воткинса с последующим захватом азота несоответствиями границы раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ .

3. Выявленные экспериментально закономерности изменения электрофизических характеристик силовых р-канальных МОП-транзисторов с подзатворным оксидом кремния, дополнительно азотированным методом ионной имплантации с последующей быстрой термической обработкой, заключающиеся в:

- возрастании средней величины заряда пробоя и снижении плотности фиксированного заряда подзатворного диэлектрика, азотированного методом имплантации  $N^+$  дозами  $1 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  с энергией 20 кэВ с последующей быстрой термообработкой, по сравнению с контрольными образцами, что связано с взаимодействием атомов *N* в процессе отжига с оборванными связями, находящимися на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , и образованием прочных химических связей, препятствующих накоплению заряда на поверхности границы раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ ;

- снижении токов утечки затвора более чем в 2 раза для приборов с подзатворным диэлектриком, азотированным методом имплантации ионов азота дозой

$2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  с энергией 40 кэВ с последующей быстрой термообработкой, по сравнению с контрольными образцами, обусловленным пассивацией поверхностных состояний атомами азота на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ .

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Представленные в диссертации основные результаты и выводы получены автором самостоятельно. В диссертационной работе изложены результаты экспериментальных и теоретических исследований, лично выполненных автором. Научные задачи исследований были сформулированы научными руководителями. Обсуждение и обобщение полученных результатов проводилось совместно с научными руководителями к.ф.-м.н. В. С. Просоловичем и к.ф.-м.н. А. Н. Петлицким. Соавторы д.ф.-м.н. В. Б. Оджаев, д.ф.-м.н. А. Р. Челядинский, член-корреспондент НАН Беларуси д.т.н. В. А. Пилипенко, к.ф.-м.н. В. Ю. Явид, к.ф.-м.н. Д. И. Бринкевич, к.т.н. Я. А. Соловьев, к.т.н. Н. С. Ковальчук, к.ф.-м.н. Ю. Н. Янковский, к.ф.-м.н. М. И. Тарасик, к.ф.-м.н. Н. И. Горбачук, к.ф.-м.н. С. В. Шпаковский, к.ф.-м.н. С. Б. Ластовский, к.ф.-м.н. В. В. Черный, к.ф.-м.н. Ю. М. Покотило, к.ф.-м.н. А. Н. Петух, к.ф.-м.н. И. А. Свито, к.ф.-м.н. Г. Х. Мавланов, к.ф.-м.н. Б. К. Исмаилов, к.ф.-м.н. З. Т. Кенжаев, Е. В. Точилин, А. В. Гиро, В. А. Филипеня, А. К. Панфиленко, Д. В. Жигулин принимали участие в обсуждении результатов и проведении измерений. Материалы совместных публикаций использованы соискателем в объеме авторского вклада.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные результаты исследований, вошедшие в диссертацию, обсуждались на II Международной научной конференции «Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике – 2021» (Ташкент, 2021 г.); IX, X Международных научных конференциях «Материалы и структуры современной электроники» (Минск, 2020, 2022 г.); 12-й, 13-й, 14-й Международных научно-технических конференциях «Приборостроение» (Минск, 2019, 2020, 2021 гг.); II Международной научно-технической конференции «Опто-, микро- и СВЧ-электроника – 2022» (Минск, 2022 г.); 13-й, 14-й, 15-й Международных конференциях «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, 2019, 2021, 2023 гг.); XIV Международной конференции по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе, «Кремний-2022» (Новосибирск, 2022 г.); III международной научной конференции НПМФ-2022 «Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике» (Ташкент, 2022 гг.); X Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела» (Минск, 2023 г.). Результаты диссертационных исследований внедрены в образовательный процесс БГУ

и в производственный процесс контроля изделий электронной техники ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (акт № 2.4/325 от 02.11.2022 и акт б/н от 20.09.2024).

### **Опубликованность результатов диссертации**

По теме диссертации опубликовано 26 печатных работ: 7 статей (общим объемом 5,88 авторских листа) в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень, утвержденный ВАК; 14 публикаций в сборниках докладов Международных научных конференций; 5 тезисов докладов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из содержания, перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников и двух приложений.

Общий объем диссертации составляет 159 страниц, включая 103 страницы основного текста, 60 рисунков на 53 страницах, 2 таблицы на 2 страницах, список использованных источников из 236 наименований на 20 страницах, 2 приложения на 7 страницах.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**Первая глава** содержит аналитический обзор литературы по тематике диссертационной работы.

Рассмотрены вопросы формирования микродефектов в процессе выращивания кремния методом зонной плавки. Приведены результаты исследований влияния радиационных дефектов, индуцированных  $\gamma$ -квантами, на электрофизические параметры диодов на основе кремния, полученных методом зонной плавки. Рассмотрено воздействие атомов технологических примесей на процессы переноса носителей зарядов в приборах на основе р-п-переходов. Показано влияние на вольт-амперные характеристики (ВАХ) МОП-транзисторов дефектов как в подзатворном  $\text{SiO}_2$ , так и на его границе раздела с Si. Приведены результаты исследований влияния азотирования тонких и ультратонких подзатворных оксидов на характеристики МОП-транзисторов. Сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** изложены методики подготовки образцов и методы исследования их свойств, элементного состава, а также электрофизических характеристик.

Р-і-n-фотодиоды изготавливались на пластинах кремния *p*-типа проводи-

мости с удельным сопротивлением  $1000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , выращенного методом бестигельной зонной плавки. Облучение  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  производилось флюенсами до  $2\cdot 10^{15} \text{ квант/см}^2$ .

Биполярные  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторы серий *A* и *B* изготавливались по аналогичным технологическим маршрутам, однако концентрация технологических примесей в приборах серии *A* была ниже предела обнаружения метода рентгенофлуоресцентного анализа с полным внешним отражением (по  $\text{Fe} < 4,0\cdot 10^9 \text{ ат/см}^2$ ), а в приборах серии *B* вся поверхность пластин была покрыта слоем  $\text{Fe}$  со средней концентрацией  $3,4\cdot 10^{11} \text{ ат/см}^2$ , присутствовали также пятна  $\text{Cl}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ .

Азотирование подзатворных оксидов кремния производилось имплантацией  $N^+$  через защитный слой  $\text{SiO}_2$  толщиной  $\sim 23 \text{ нм}$  дозами  $D_{N^+} = 1\cdot 10^{13} - 3\cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  с энергией  $20 - 60 \text{ кэВ}$  в одну половину каждой пластины. Постимплантационная быстрая термообработка (БТО) проводилась при температурах  $900^\circ\text{C}$ ,  $1000^\circ\text{C}$  либо  $1050^\circ\text{C}$  длительностью  $15 \text{ с}$  на воздухе. Для части пластин защитный  $\text{SiO}_2$  удаляли жидкостным травлением. Затем для этой группы пластин формировался подзатворный термический оксид толщиной  $\sim 44 \text{ нм}$ . Для других образцов азотирование подзатворного термического оксида толщиной  $\sim 44 \text{ нм}$  производилось отжигом в атмосфере азота с добавлением малого количества кислорода ( $5\%$ ) при температуре  $1200^\circ\text{C}$  в течение  $2 \text{ ч}$  либо при температуре  $1100^\circ\text{C}$  в течение  $30 \text{ мин}$ .

Профили распределения концентраций примесей по глубине структур диэлектрик-кремний определялись методом времяпролетной масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС) TOF.SIMS 5 (IONTOF, Германия) с чувствительностью не хуже, чем  $5\cdot 10^{15} - 1\cdot 10^{16} \text{ ат/см}^3$ .

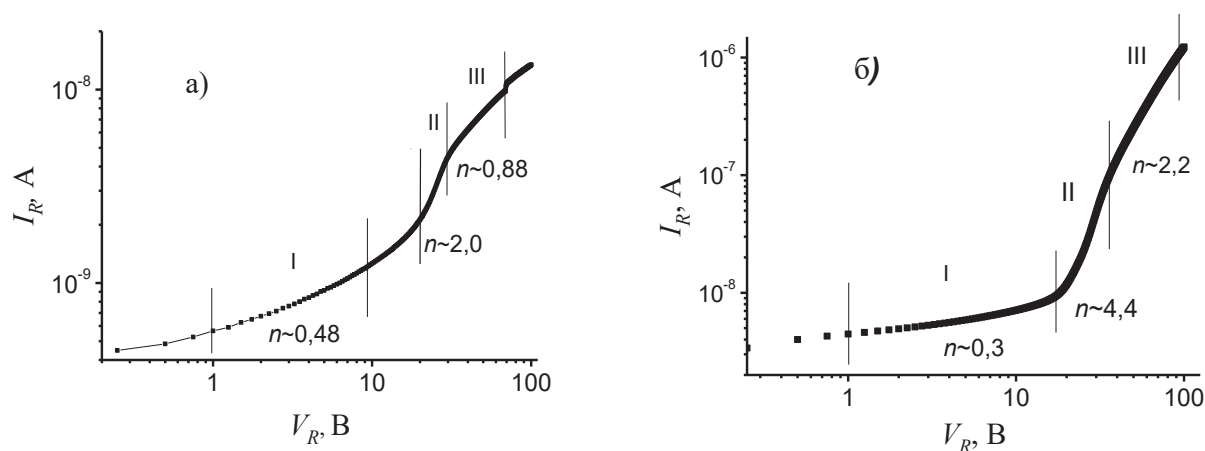
Спектры нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) структур диэлектрик-кремний регистрировались в диапазоне волновых чисел  $400 - 4000 \text{ см}^{-1}$  при комнатной температуре ИК-Фурье спектрофотометром ALPNA (Bruker Optik GmbH) с разрешением  $2 \text{ см}^{-1}$ .

Контроль параметров времязависимого пробоя диэлектрических слоев осуществлялся автоматизированным измерительным комплексом HP4061 A (Hewlett-Packard, США).

**В главе 3** приведены результаты исследований электрофизических характеристик  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов, как исходных, так и облученных  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ , содержащих посттехнологические структурные дефекты.

Показано, что на ВАХ необлученных  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов при обратном смещении можно выделить три области изменения тока в зависимости от приложенного обратного напряжения ( $I_R \sim (V_R)^n$ ): сублинейную ( $1 - 10 \text{ В}$ ), суперлинейную ( $20 - 35 \text{ В}$ ) и линейную (более  $35 \text{ В}$ ), обусловленные различными механизмами

генерационно-рекомбинационных процессов в области обеднения p-n-перехода и неоднородным распределением технологических (фоновых) примесей по объёму кристалла (рисунок 1а).



**Рисунок 1 – ВАХ темновых токов при температуре 20 °С необлученного p-i-n-фотодиода (а) и после облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  флюенсом  $1 \cdot 10^{15}$  квант/см $^2$  (б)**

При напряжениях смещения свыше 8 В ток возрастает по суперлинейному закону, однако размеры области обеднения по-прежнему продолжают расти по сублинейному закону. Это обусловлено высокой концентрацией генерационно-рекомбинационных центров в области обеднения и их неоднородным распределением по объёму Si. Такими дефектами структуры являются микродефекты, образующиеся в процессе выращивания монокристаллов, и технологические примеси, загрязнение которыми происходит в процессе изготовления полупроводниковых приборов.

После облучения  $\gamma$ -квантами флюенсом  $1 \cdot 10^{15}$  квант/см $^2$  обратный ток p-i-n-фотодиодов возрос более, чем на порядок, однако кривые вольт-амперных характеристик по-прежнему можно разделить на три области с различной зависимостью тока от напряжения (рисунок 1б). Неоднородности, обусловленные микродефектами, не изменили своего пространственного расположения. Для области II ( $V_R$  от 20 до 35 В), обратный ток которой связан с остаточными технологическими дефектами, значение  $n$  изменилось от 2 до 4,4. Вероятно, в процессе облучения произошла трансформация остаточных дефектов, на них коагулировали радиационные дефекты. Область III ( $V_R$  от 35 В до 70 В) также претерпела существенные изменения, величина  $n$  возросла от 0,88 до 2,2. В этой области так же, как и в области II, это связано с остаточными дефектами, но в данном случае, как следует из исследований температурных зависимостей обратного тока, это различные типы дефектов.

Установлено, что в биполярных  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторах серии  $B$  с высоким содержанием технологических примесей для увеличения при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  статического коэффициента усиления по току  $\beta$  до 70 % при среднем уровне тока коллектора ( $1 \cdot 10^{-6}\text{ A} < I_C < 1 \cdot 10^{-3}\text{ A}$ ) необходима более высокая концентрация основной легирующей примеси в эмиттере (в 3 – 4 раза) по сравнению с приборами серии  $A$  с низким содержанием технологических примесей.

Данное обстоятельство обуславливает и более сильную температурную зависимость  $\beta$  в приборах серии  $B$  вследствие значительного вклада в его величину температурного изменения ширины запрещенной зоны в сильнолегированном кремнии (области эмиттера).

Экспериментально обнаружено, что при низких токах инжекции ( $I_C < 1 \cdot 10^{-6}\text{ A}$ ) статический коэффициент усиления по току для биполярных  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторов серии  $B$  становится меньше (в 1,5 – 3 раза) соответствующих значений для приборов серии  $A$  и практически перестает зависеть от температуры. Это вызвано существенным вкладом рекомбинационно-генерационного тока в приборах серии  $B$  по сравнению с полезным диффузионным током неосновных носителей в базе вследствие наличия высокой концентрации технологических (фоновых) примесей.

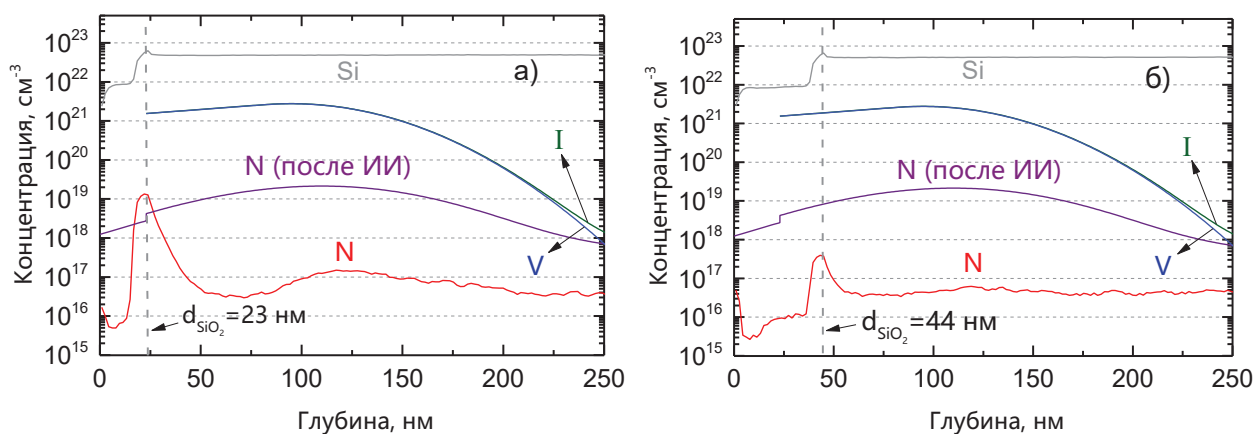
**В главе 4** приведены результаты исследований примесного состава и оптических свойств структур  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  после проведения имплантации ионов азота и термообработок. Предложена модель ускоренной диффузии атомов азота с последующей их локализацией на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ .

Исследования методом ВИМС профилей распределения концентрации атомов азота в пластинах кремния с  $\text{SiO}_2$ , имплантированных  $N^+$  дозой  $2,5 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$  энергией 40 кэВ с последующей БТО (рисунок 2), показали наличие максимума распределения атомов азота с высокой концентрацией на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . Аналогичный эффект наблюдался и для пластин кремния с  $\text{SiO}_2$  после высокотемпературного отжига в атмосфере  $N_2$  с добавлением малого количества кислорода (рисунок 3).

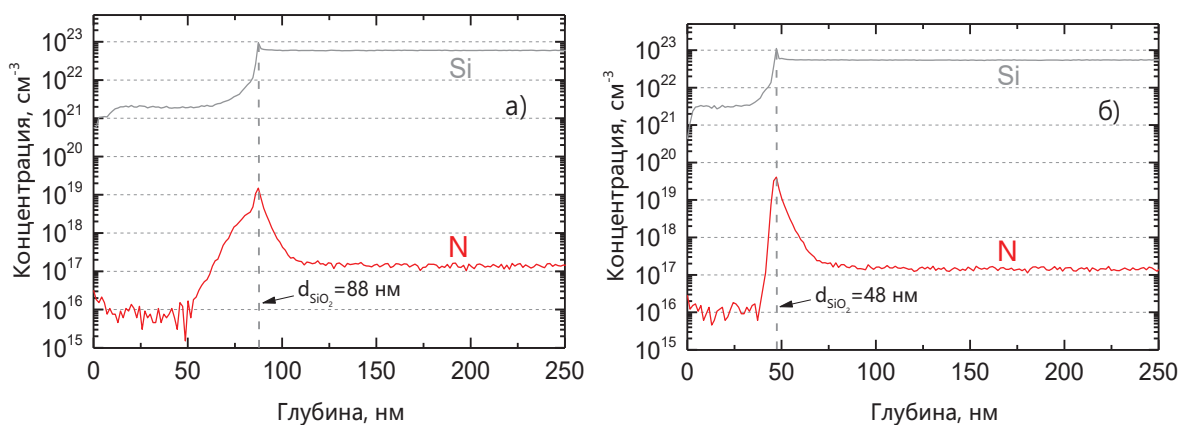
При отжиге образцов с оксидом кремния толщиной  $\sim 44\text{ нм}$  в атмосфере азота с малым количеством кислорода вместе с движением границы раздела в объём кремния происходит смещение максимума распределения атомов азота и их преимущественная локализация на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  (рисунок 3).

Исследованиями спектров НПВО оксидов кремния, азотированных либо методом ИИ с последующей БТО, либо отжигом в атмосфере азота с добавлением малого количества кислорода, обнаружена полоса поглощения с двумя максимумами при  $\sim 2320\text{ см}^{-1}$  и  $2360\text{ см}^{-1}$  ( $\sim 0,28\text{ эВ}$ ), не характерная для монокристаллического кремния и его оксида. Данной спектральной области соответ-

ствуют полосы поглощения, обусловленные колебаниями двойных кумулятивных либо тройных связей. Это позволило связать обнаруженную полосу с образованием азотсодержащих связей в слое  $\text{SiO}_2$  типа  $\text{O}=\text{Si}=\text{N}-$  и  $-\text{Si}=\text{N}$ .

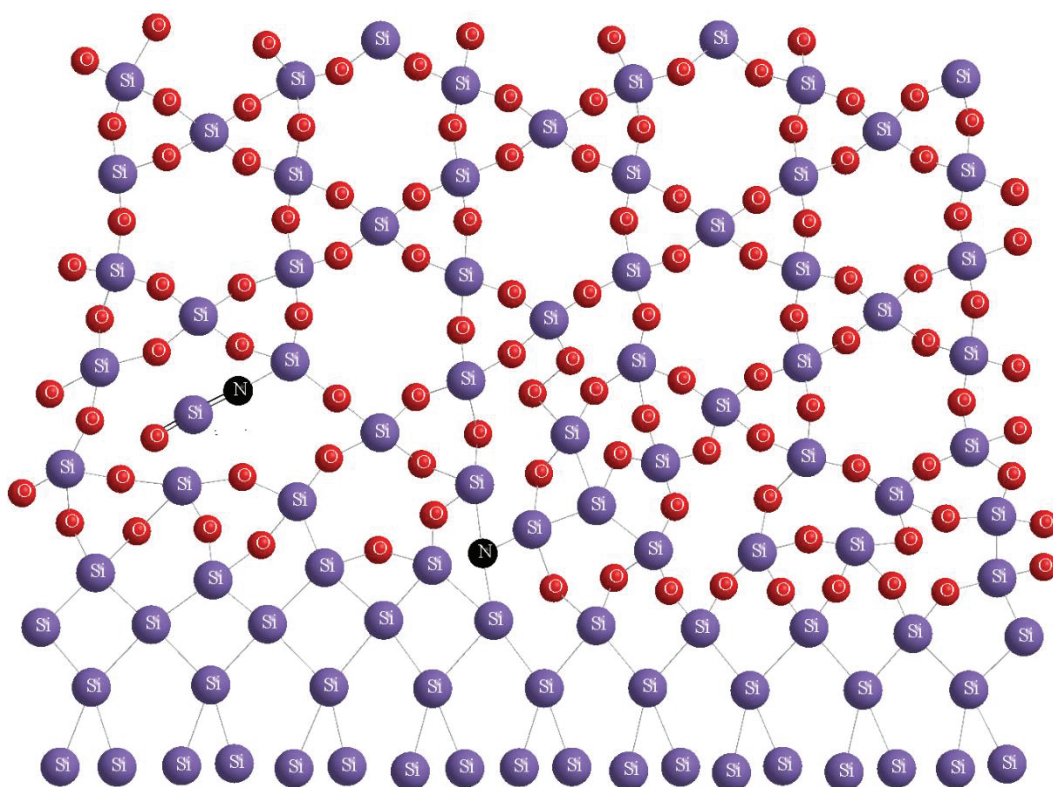
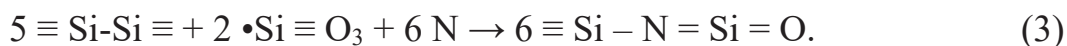
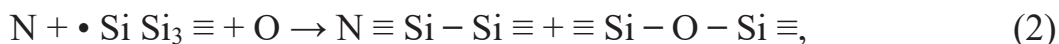
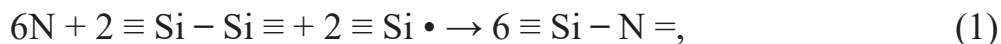


**Рисунок 2 – Профили распределения концентрации атомов азота (N) в системе  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  образцов, имплантированных ионами  $\text{N}^+$  ( $D_{\text{N}^+} = 2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ,  $E = 40 \text{ кэВ}$ ) с последующей БТО: а – образец без удаления защитного оксида после ионной имплантации, б – образец, на котором после ионной имплантации азота и БТО удален защитный  $\text{SiO}_2$  и выращен подзатворный оксид. Профили распределения концентрации междоузлий (I), вакансий (V) и атомов азота (N после ИИ) получены путем моделирования ИИ в систему  $\text{SiO}_2/\text{Si}$**



**Рисунок 3 – Профили распределения концентрации атомов азота (N) в системе  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  для образцов с азотированием оксида кремния высокотемпературным отжигом в атмосфере  $\text{N}_2$  с добавлением малого количества кислорода при  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  в течении 2 ч (а) либо при  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$  в течении 30 мин (б)**

Таким образом, атомы  $N$  при проведении высокотемпературных обработок, достигая границы раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , вступают во взаимодействие с  $\text{P}_{\text{b}0^-}$  (1), (2) и  $\text{E}'$ -центрами (3) с образованием прочных ковалентных связей с атомами  $\text{Si}$  (рисунок 4):



**Рисунок 4 - Химические связи атомов азота с атомами кремния на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$**

Согласно литературным данным, коэффициент диффузии атомов азота в кремнии при температуре  $1000^\circ\text{C}$  составляет  $\sim 1,7 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{с}$ , однако из полученных результатов следует, что в нашем случае коэффициент диффузии атомов  $N$  при указанной температуре  $\sim 4 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{с}$ . На основании экспериментальных данных разработана одномерная микроскопическая зарядовая модель ускоренной диффузии атомов азота, учитывающая их взаимодействие с собственными атомами внедрения  $\text{Si}$  по механизму Воткинса и последующий захват  $N$  несоответствиями границы раздела. Модель учитывает также влияние на коэффициент

диффузии азота внутреннего электрического потенциала, создаваемого в результате ионизации дефектов и легирующих примесей, что приводит к появлению дополнительных дрейфовых составляющих.

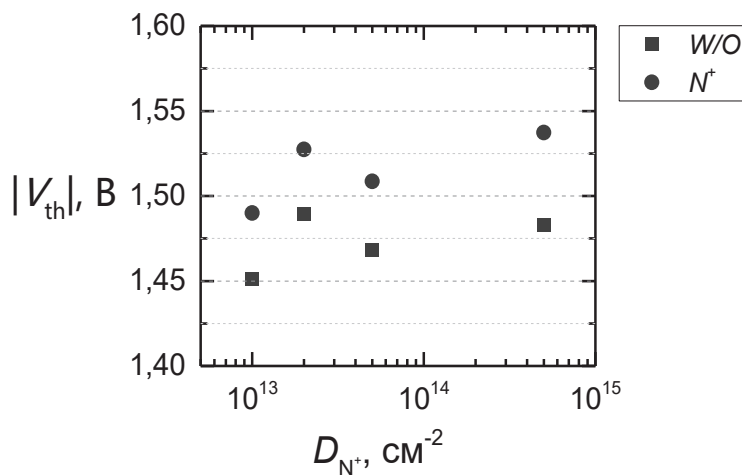
**В главе 5** приведены результаты исследований влияния азотирования подзатворного оксида методом ИИ на электрофизические характеристики силовых МОП-транзисторов с вертикальной структурой.

Показано, что для р-канальных МОП-транзисторов, по сравнению с контрольными образцами, происходит увеличение средней величины заряда пробоя ( $\langle Q_{BD} \rangle$ ) до 22 % и снижение величины плотности фиксированного заряда на  $2,8 \cdot 10^{10} - 1,7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  подзатворных диэлектриков, азотированных методом имплантации  $N^+$  дозами  $1 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  с энергией 20 кэВ. Максимальный эффект наблюдался для дозы азота  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  с энергией 20 кэВ: значение  $\langle Q_{BD} \rangle$  возросло на 15 % по сравнению с контрольными образцами, удельный заряд пробоя  $0,853 \text{ Кл/см}^2$  выдерживало  $\sim 60$  % приборов, для контрольных образцов данный заряд пробоя выдерживало не более 20 % приборов. При удельном заряде пробоя не более  $0,3 \text{ мКл/см}^2$  для контрольных образцов пробивалось около 10 % приборов, в то время как для приборов, созданных с дополнительной операцией легирования ионами азота, ни один прибор не был пробит. Данный эффект обусловлен взаимодействием атомов азота в процессе отжига с оборванными связями, находящимися на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , и образованием прочных химических связей, препятствующих накоплению заряда на поверхности указанной границы.

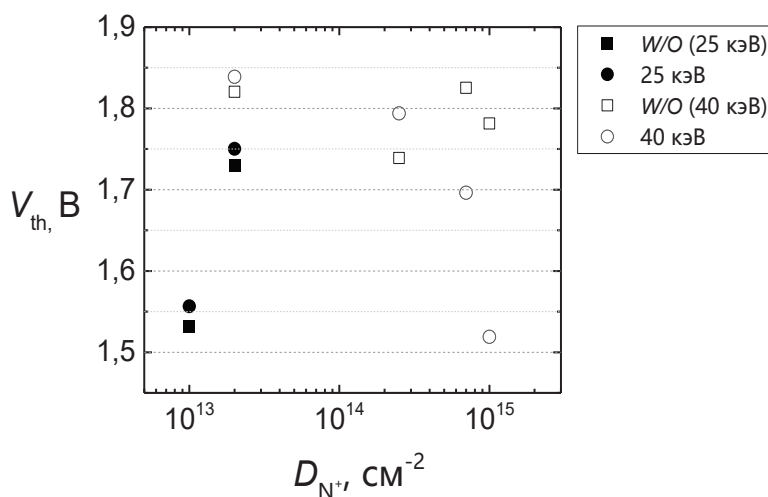
Исследования ВАХ токов утечки затвора силовых р-канальных МОП-транзисторов показали, что азотирование ИИ дозой  $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  с энергией 40 кэВ приводит не только к снижению средних значений токов утечки затвора (более чем в 2 раза), но и к уменьшению уровня шума токов утечки затвора. Изменения средних значений токов утечки затвора для приборов, полученных с применением энергии имплантации  $N^+$  20 кэВ не превышают 25 % относительно контрольных образцов. Полученные результаты обусловлены локализацией большего количества атомов азота (для образцов с ИИ  $N^+$  энергией 40 кэВ) в области переходного нестехиометрического слоя границы раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  и, как следствие, более эффективной пассивацией поверхностных состояний.

Исследования формы ВАХ показали, что основной вклад в ток утечки затвора вносит туннелирование носителей заряда через ловушки. Показано, что шумовые колебания токов утечки затвора для всех приборов обусловлены обменом носителями зарядов в кремнии с медленными поверхностными состояниями на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . Снижение уровня шума указывает на пассивацию атомами азота значительной части медленных поверхностных состояний, большинство из которых представляют собой электрически активные  $E'$ -центры.

Установлено увеличение абсолютной величины порогового напряжения МОП-транзисторов, полученных с дополнительной имплантацией  $N^+$  дозами  $1 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  (рисунки 5 и 6), что обусловлено снижением коэффициента сегрегации легирующей примеси фосфора (для р-канальных МОП-транзисторов) либо бора (для н-канальных МОП-транзисторов) на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  в результате создания слоя с высокой концентрацией атомов азота.



**Рисунок 5 – Зависимость абсолютной величины порогового напряжения ( $|V_{th}|$ ) р-канальных МОП-транзисторов от дозы имплантированного азота ( $D_{N^+}$ ) для образцов, изготовленных с применением ИИ азота ( $N^+$ ), и соответствующих им контрольных образцов ( $W/O$ )**



**Рисунок 6 – Зависимость порогового напряжения н-канальных МОП-транзисторов от дозы имплантированного азота ( $D_{N^+}$ ) для образцов, изготовленных с применением ИИ азота энергиями 25 кэВ и 40 кэВ, и соответствующих им контрольных образцов ( $W/O$ )**

Исследования подпороговых ВАХ МОП-транзисторов в триодном режиме показали, что характеристики смещены вправо вдоль оси напряжений для приборов, полученных с дополнительной имплантацией  $N^+$  дозами  $1 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Снижение токов сток-исток также обусловлено ростом концентрации легирующей примеси в канале МОП-транзисторов вследствие снижения её коэффициента сегрегации в  $\text{SiO}_2$  при формировании подзатворного оксида. При локализации атомов азота на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  слой с повышенной концентрацией  $N$  является барьером для сегрегации легирующей примеси в оксид.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Экспериментально обнаружено наличие на вольт-амперных характеристиках р-і-п-фотодиодов на основе кремния, полученного методом бестигельной зонной плавки, трех областей изменения тока в зависимости от приложенного обратного смещения: I – сублинейная (1–10 В), II – суперлинейная (20–35 В) и III – линейная (более 35 В), обусловленных пространственным распределением генерационно-рекомбинационных центров в  $i$ -области (базы), которые удовлетворительно описываются выражением  $I_R \sim (V_R)^n$ . Наличие II-ой и III-ей областей определяется термической генерацией носителей заряда с глубоких уровней неоднородно распределенных технологических (фоновых) примесей и/или микродефектов по объему кристалла. Показано, что после облучения  $\gamma$ -квантами форма вольт-амперных характеристик качественно не изменяется: сохраняется наличие трех областей с различными зависимостями тока от приложенного обратного смещения, которые удовлетворительно описываются тем же выражением  $I_R \sim (V_R)^n$ . Возрастание показателя  $n$  от 2 до 4,4 в области II обусловлено коагуляцией радиационных дефектов на остаточных технологических дефектах, сопровождающейся образованием нового типа генерационных центров [6-А; 7-А; 13-А; 15-А; 16-А; 18-А; 19-А; 23-А].

2. На основе анализа эксплуатационных характеристик биполярных п-р-п-транзисторов с высокой концентрацией технологических (загрязняющих, фоновых) примесей (например, по  $Fe$  концентрация  $3,4 \cdot 10^{11} \text{ ат/см}^2$ ) установлено, что для увеличения статического коэффициента усиления по току  $\beta$  до 70 % при среднем уровне инжекции (ток коллектора  $1 \cdot 10^{-6} \text{ А} < I_c < 1 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ ) и температуре 20 °С, с целью компенсации негативного влияния технологических (фоновых) примесей, необходима более высокая концентрация основной легирующей примеси в эмиттере (3-4 раза) по сравнению с приборами с низким содержанием тех-

нологических (фоновых) примесей (по  $Fe$  менее  $4 \cdot 10^9$  ат/см<sup>2</sup>). Это приводит к более сильной температурной зависимости  $\beta$  вследствие значительного вклада в его величину температурного изменения ширины запрещенной зоны кремния в сильнолегированном слое эмиттера [2-А; 10-А; 12-А].

3. Методом масс-спектрометрии вторичных ионов экспериментально показано, что при проведении быстрой термообработки при температуре 1000 °С длительностью 15 с пластин кремния с защитным слоем SiO<sub>2</sub> толщиной 23 нм, имплантированных ионами азота дозами  $2,5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> и  $1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> с энергией 40 кэВ, происходит преимущественная локализация атомов азота  $N$  на границе раздела SiO<sub>2</sub>/Si. Аналогичная закономерность выявлена также при проведении отжига кремниевых пластин с SiO<sub>2</sub> толщиной 44 нм в индукционной печи как при температуре 1200 °С в течение 2 ч, так и при температуре 1100 °С в течение 30 мин в атмосфере N<sub>2</sub> с добавлением малого количества кислорода (5 %). Наличие несоответствий структур SiO<sub>2</sub> и Si позволяет атомам азота встраиваться в оборванные связи структурных дефектов переходного слоя границы раздела SiO<sub>2</sub>/Si. На основании полученных экспериментальных результатов разработана одномерная микроскопическая зарядовая модель ускоренной диффузии атомов азота, отличающаяся учетом первоначального вытеснения  $N$  из узлов кристаллической решетки по механизму Воткинса и последующим их захватом несоответствиями границы раздела SiO<sub>2</sub>/Si [3-А; 4-А; 5-А; 20-А; 26-А].

4. В спектрах нарушенного полного внутреннего отражения оксидов кремния с толщинами 23 и 44 нм, азотированных имплантацией  $N^+$  (дозами  $2,5 \cdot 10^{14}$  –  $1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> с энергией 40 кэВ) с последующим быстрым термическим отжигом при температурах 1000 °С или 1050 °С длительностью 15 с на воздухе впервые обнаружена полоса поглощения с двумя максимумами 2320 см<sup>-1</sup> и 2360 см<sup>-1</sup> (~ 0,28 эВ). Аналогичная полоса наблюдалась для оксидов кремния толщиной 44 нм, азотированных при высокотемпературном отжиге в индукционной печи (1200 °С в течение 2 ч или 1100 °С в течение 30 мин) в атмосфере N<sub>2</sub> с добавлением малого количества кислорода (5 %). Установлено, что она обусловлена образованием двойных кумулятивных связей O=Si=N– и тройных связей –Si≡N при взаимодействии атомов азота с дефектами переходного нестехиометрического слоя границы раздела SiO<sub>2</sub>/Si, в том числе и с преобладающими на границе раздела электрически активными парамагнитными P<sub>b0</sub>- и E'-центрами, что приводит к компенсации ненасыщенных связей дефектов, ответственных за быстрые и медленные поверхностные состояния, и формированию прочных ковалентных связей с атомами азота [3-А; 24-А].

5. При исследовании электрофизических характеристик силовых р-канальных МОП-транзисторов экспериментально установлено возрастание средней величины заряда пробоя ( $\langle Q_{BD} \rangle$ ) на 15 % – 22 %, а также снижение плотности фик-

сированного заряда на  $1,7 \cdot 10^{10} - 2,8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  подзатворного диэлектрика, азотированного методом имплантации  $N^+$  дозами  $1 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  с энергией 20 кэВ с последующей быстрой термообработкой, по сравнению с контрольными образцами (без ионной имплантации азота). При азотировании диэлектрика ионной имплантацией дозой  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  значение  $\langle Q_{\text{ВД}} \rangle$  возрастает на 15 %, а удельный заряд пробоя  $0,853 \text{ Кл/см}^2$  выдерживают около 60 % приборов. Для контрольных образцов (без азотирования) указанный заряд пробоя выдерживают не более 20 % приборов. Показано, что полученный эффект обусловлен взаимодействием атомов азота в процессе отжига с оборванными связями, находящимися на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , и образованием прочных химических связей, препятствующих накоплению заряда на поверхности границы раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  [1-А].

6. Показано, что азотирование подзатворных диэлектриков силовых р-канальных МОП-транзисторов методом ионной имплантации дозой  $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  с энергией 40 кэВ с последующей быстрой термообработкой позволяет снизить средние значения токов утечки затвора более чем в 2 раза. Для приборов с имплантацией ионов азота энергией 20 кэВ снижение токов утечки затвора не превышает 25 %. Это обусловлено тем, что при имплантации  $N^+$  с энергией 40 кэВ максимум распределения концентрации атомов азота расположен ближе к области переходного нестехиометрического слоя границы раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , чем при энергии имплантации 20 кэВ, что сопровождается более эффективной пассивацией поверхностных состояний. Проведенный анализ вольт-амперных характеристик показал, что основным механизмом формирования токов утечки затвора является туннелирование носителей зарядов через ловушки в подзатворном диэлектрике и на его границе раздела с кремнием [1-А; 9-А].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Полученные результаты являются новыми и могут быть использованы на предприятиях электронной промышленности Республики Беларусь, а также стран СНГ при изготовлении интегральных схем, фотоприемников, датчиков высокоэнергетических частиц, биполярных и силовых МОП-транзисторов. Результаты исследований внедрены в учебный процесс физического факультета БГУ (акт № 2.4/325 от 02.11.2022, курс лекций «Физика полупроводниковых приборов: неравновесные процессы»), а также в процесс контроля изделий электронной техники ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (акт б/н от 20.09.2024 внедрения результатов исследования диссертационной работы).

## Список публикаций соискателя ученой степени

### Статьи в научных изданиях, включенных в перечень, утвержденный ВАК, и в иностранных научных изданиях

1-А. Влияние ионной имплантации азота на электрофизические свойства подзатворного диэлектрика силовых МОП-транзисторов / В. Б. Оджаев, А. К. Панфиленко, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Н. С. Ковальчук, Я. А. Соловьев, В. А. Филипеня, Д. В. Шестовский // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2020. – № 3. – С. 55–64.

2-А. Влияние технологических примесей на температурную зависимость коэффициента усиления биполярного n-p-n транзистора / В. Б. Оджаев, А. Н. Петлицкий, В. А. Пилипенко, В. С. Просолович, В. А. Филипеня, Д. В. Шестовский, В. Ю. Явид, Ю. Н. Янковский // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных навук. – 2021. – Т. 57, № 2. – С. 232–241.

3-А. Спектры нарушенного полного внутреннего отражения азотированных структур SiO<sub>2</sub>/Si / В. Б. Оджаев, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Н. С. Ковальчук, Я. А. Соловьев, Д. В. Жигулин, Д. В. Шестовский, Ю. Н. Янковский, Д. И. Бринкевич // Журнал прикладной спектроскопии. – 2022. – Т. 89, № 4. – С. 498–504.

4-А. Локализация атомов азота в структурах Si-SiO<sub>2</sub> / В. Б. Оджаев, В. С. Просолович, А. Н. Петлицкий, Н. С. Ковальчук, Я. А. Соловьев, Д. В. Жигулин, Д. В. Шестовский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. – 2022. – Т. 38, № 5.

5-А. Электрофизические характеристики силовых МОП-транзисторов, дополнительно имплантированных ионами азота. / В. Б. Оджаев, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Н. С. Ковальчук, Я. А. Соловьев, Д. В. Шестовский, В. Ю. Явид, Ю. Н. Янковский // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2022. – № 3. – С. 81–92.

6-А. Влияние структурных дефектов на электрофизические параметры р-і-п-фотодиодов / Н. С. Ковальчук, С. Б. Ластовский, В. Б. Оджаев, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Д. В. Шестовский, В. Ю. Явид, Ю. Н. Янковский // Микроэлектроника. – 2023. – Т. 52, № 4. – С. 307–314.

7-А. Электрофизические параметры р-і-п-фотодиодов, облученных γ-квантами <sup>60</sup>Со / Н. С. Ковальчук, С. Б. Ластовский, В. Б. Оджаев, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Д. В. Шестовский, В. Ю. Явид, Ю. Н. Янковский // Микроэлектроника. – 2023. – Т. 52, № 6. – С. 481–488.

## Статьи в сборниках материалов научных конференций

8-А. Радиационная стойкость кремниевых детекторов излучения / Ю. М. Покотило, А. Н. Петух, А. В. Гиро, И. А. Свито, С. Б. Ластовский, Д. В. Шестовский // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 13 Междунар. конф., Минск, Республика Беларусь, 30 сент.–3 окт. 2019 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Углов (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 166–168.

9-А. Влияние ионной имплантации азота на эксплуатационные параметры силовых МОП-транзисторов / В. Б. Оджаев, А. К. Панфиленко, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Н.С. Ковальчук, Я. А. Соловьев, В. А. Филипеня, А. Р. Челядинский, В. В. Черный, Д. В. Шестовский, С. В. Шпаковский // Приборостроение-2019 : материалы 12-й Международной научно-технической конференции, Минск, Республика Беларусь, 13–15 ноября 2019 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 345–346.

10-А. Влияние ширины запрещенной зоны на температурную зависимость коэффициента усиления биполярного  $n$ - $p$ - $n$  транзистора / В. Б. Оджаев, А. Н. Петлицкий, В. А. Пилипенко, В. С. Просолович, В. А. Филипеня, Д. В. Шестовский, В. Ю. Явид, Ю. Н. Янковский // Материалы и структуры современной электроники : материалы IX Междунар. науч. конф., Минск, 14–16 октября 2020 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол. : В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 97–102.

11-А. Влияние ионной имплантации азота на электрофизические параметры силовых МОП-транзисторов / В. Б. Оджаев, А. К. Панфиленко, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Н. С. Ковальчук, Я. А. Соловьев, В. А. Филипеня, Д. В. Шестовский // Материалы и структуры современной электроники : материалы IX Междунар. науч. конф., Минск, 14–16 октября 2020 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол. : В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С.193–197.

12-А. Анализ температурной зависимости коэффициента усиления биполярного  $n$ - $p$ - $n$  транзистора / В. Б. Оджаев, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, В. А. Филипеня, Д. В. Шестовский, В. В. Черный, В. Ю. Явид, Ю. Н. Янковский // Приборостроение-2020 : материалы 13-й Международной научно-технической конференции, Минск, 18–20 ноября 2020 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С.323–324.

13-А. Влияние  $\gamma$ -облучения на вольт-амперные характеристики  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов / Н. И. Горбачук, С. Б. Ластовский, В. Б. Оджаев, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Н. С. Ковальчук, В. А. Филипеня, В. В. Черный, Д. В. Шестовский, Ю. Н. Янковский // Приборостроение-2020 : материалы 13-й Международной научно-технической конференции, Минск, 18–20 ноября 2020 г. / Белорус. нац.

техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 325–326.

14-А. Влияние ионной имплантации азота на величину токов сток-исток силовых МОП-транзисторов / В. Б. Оджаев, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Н. С. Ковальчук, Я. А. Соловьев, В. А. Филипеня, Д. В. Шестовский, Ю. Н. Янковский // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 14-й Международ. конф., посвящ. 100-летию Белорус. гос. ун-та, Минск, 21-24 сентября 2021 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В. В. Углов (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 196–200.

15-А. Особенности генерационно-рекомбинационных процессов в области обеднения р-і-п-фотодиодов / В. Б. Оджаев, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Н. С. Ковальчук, В. А. Филипеня, В. В. Черный, Д. В. Шестовский, В. Ю. Явид, Ю. Н. Янковский // Приборостроение-2021 : материалы 14-й Международной научно-технической конференции, Минск, 17–19 ноября 2021 года / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 318–319.

16-А. Электрофизические параметры р-і-п-фотодиодов / В. Б. Оджаев, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, В. А. Филипеня, Д. В. Шестовский, В. Ю. Явид, Ю. Н. Янковский, Г. Х. Мавланов, Б. К. Исмаилов, З. Т. Кенжаев // Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике – 2021 : материалы II Междунар. науч. конф., Ташкент, 19–20 ноября 2021 г. / ТГТУ ; редкол.: С. М. Турабджанов (председатель) [и др.]. – Ташкент, 2021. – С. 24–29.

17-А. Локализация технологических примесей в азотированной методом ионной имплантации системе Si/SiO<sub>2</sub> / В. Б. Оджаев, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Н. С. Ковальчук, Я. А. Соловьев, Д. В. Жигулин, Д. В. Шестовский // ОПТО-, МИКРО- И СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА – 2022 : материалы II Междунар. науч.-тех. конф., Минск, 21-23 сентября 2022 г. / НАН РБ ; редкол.: Н. С. Казак (председатель) [и др.]. – Минск, 2022. – С. 318–319.

18-А. Влияние  $\gamma$ -облучения на электрофизические параметры р-і-п-фотодиодов / В. Б. Оджаев, Н. И. Горбачук, С. Б. Ластовский, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Н. С. Ковальчук, М. И. Тарасик, Д. В. Шестовский, В. Ю. Явид, Ю. Н. Янковский // Материалы и структуры современной электроники : сб. науч. тр. X Междунар. науч. конф., Минск, 12–14 октября 2022 г. / БГУ ; редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2022. – С. 274–279.

19-А. Особенности изменения электрофизических параметров р-і-п-фотодиодов при облучении  $\gamma$ -квантами <sup>60</sup>Со / В. Б. Оджаев, С. Б. Ластовский, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Д. В. Шестовский, В. Ю. Явид, Ю. Н. Янковский, Б. К. Исмаилов, З. Т. Кенжаев // Наноструктурные полупроводниковые матери-

алы в фотоэнергетике : сборник докладов III международной научной конференции НПМФ-2022, Ташкент, 24–25 ноября 2022 г. / Ташкентский государственный технический университет ; редкол.: С. М. Турабджанов (председатель) [и др.]. – Ташкент, 2022 г. – С. 24–30.

20-А. Миграция атомов азота в структурах Si-SiO<sub>2</sub> при высокотемпературных обработках / С. Б. Ластовский, В. Б. Оджаев, Н. С. Ковальчук, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Д. В. Шестовский, Ю. Н. Янковский // Актуальные проблемы физики твердого тела : сборник докладов X Международной научной конференции, Минск, Республика Беларусь, 22–26 мая 2023 г. / ГО «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению». – Минск, 2023. – С. 55–58.

21-А. Особенности изменения барьерной ёмкости p-i-n-фотодиодов при облучении  $\gamma$ -квантами <sup>60</sup>Со / С. Б. Ластовский, В. Б. Оджаев, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Е. В. Точилин, Д. В. Шестовский, В. Ю. Явид, Ю. Н. Янковский // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 15-й Междунар. конф. (ВИТТ-2023), Минск, Беларусь, 26–29 сентября 2023 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Углов (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2023. – С. 174–176.

### **Тезисы докладов в сборниках материалов научных конференций**

22-А. Влияние азотирования подзатворного диэлектрика методом ионной имплантации на пороговое напряжение силовых МОП-транзисторов / В. Б. Оджаев, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Н. С. Ковальчук, Я. А. Соловьев, В. А. Филипеня, Д. В. Шестовский, Ю. Н. Янковский // ОПТО-, МИКРО- И СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА – 2022 : сборник тезисов II Междунар. науч.-тех. конф., Минск, 21–23 сентября 2022 г. / НАН РБ ; редкол. : Н. С. Казак (пред.) [и др.]. – Минск, 2022. – С. 318–319.

23-А. Электрофизические характеристики p-i-n-фотодиодов, облученных  $\gamma$ -квантами <sup>60</sup>Со / В. Б. Оджаев, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Н. С. Ковальчук, В. А. Филипеня, С. Б. Ластовский, Д. В. Шестовский, В. Ю. Явид, Ю. Н. Янковский // Тезисы докладов XIV Международной конференции и XIII Школы молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе, Новосибирск, 26–30 сентября 2022 г. / М. : Издательство «Перо», 2022. – С. 106.

24-А. Оптические свойства структур SiO<sub>2</sub>/Si, имплантированных азотом / В. С. Просолович, В. Б. Оджаев, А. Н. Петлицкий, Н. С. Ковальчук, Я. А. Соловьев, Д. В. Жигулин, Д. В. Шестовский, Ю. Н. Янковский, Д. И. Бринкевич //

Физические и физико-химические основы ионной имплантации : тезисы докладов VIII Всероссийской конференции и школы молодых ученых и специалистов, Казань, 11–14 ноября 2022 г. / Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского. – Н. Новгород, 2022. – С.61.

25-А. Локализация неконтролируемых примесей в азотированной методом ионной имплантации системе Si/SiO<sub>2</sub> / В. Б. Оджаев, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Н. С. Ковальчук, Я. А. Соловьев, Д. В. Жигулин, Д. В. Шестовский // Физические и физико-химические основы ионной имплантации : тезисы докладов VIII Всероссийской конференции и школы молодых ученых и специалистов, Казань, 11–14 ноября 2022 г. / Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского. – Н. Новгород, 2022. – С.62.

26-А. Миграция атомов азота в структурах Si-SiO<sub>2</sub> при высокотемпературных обработках / С. Б. Ластовский, В. Б. Оджаев, Н. С. Ковальчук, А. Н. Петлицкий, В. С. Просолович, Д. В. Шестовский и Ю. Н. Янковский // Актуальные проблемы физики твердого тела : сборник тезисов X Международной научной конференции, Минск, Республика Беларусь, 22–26 мая 2023 г. / ГО «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению» ; редкол.: В. М. Федосюк (пред.) [и др.]. – Минск : издатель А. Н. Вараксин, 2023. – С. 374.

## РЭЗЮМЭ

Шастоўскі Дзмітрый Віктаравіч

### Дэфектна-прымеснае ўзаемадзеянне ў структурных элементах з патэнцыйнымі бар'ерамі прыбораў мікраэлектронікі на аснове крэмнію пры знешніх энергетычных уздзеяннях

**Ключавыя словы:** р-і-п-фотадыёды, узаемадзеянне тэхналагічных і радыяцыйных дэфектаў, п-р-п-біпалярныя транзістары, лакалізацыя атамаў азоту, МАП-транзістары, зарад прабою.

**Мэта працы:** устанаўленне заканамернасцей дэфектна-прымеснага ўзаемадзеяння ў структурных элементах з патэнцыйнымі бар'ерамі прыбораў мікраэлектронікі, падвергнутых знешнім энергетычным уздзеяннем.

**Метады даследавання:** вымярэнні вольт-амперных і вольт-фарадных характарыстык, часпралётная мас-спектраметрыя другасных іёнаў, ІЧ-спектраскапія парушанага поўнага ўнутранага адлюстравання, кантроль параметраў часзалежнага прабою дыэлектрычных пластоў.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** устаноўлена, што асноўнай прычынай трансфармацыі формы вольт-ампернай характарыстыкі р-і-п-фотадыёдаў пасля апрамянення  $\gamma$ -квантамі з'яўляюцца працэсы каагуляцыі першасных радыяцыйных дэфектаў на рэшткавых тэхналагічных дэфектах у Si. Паказана, што ў біпалярным п-р-п-транзістары з высокім утрыманнем тэхналагічных прымесей для павелічэння каэфіцыента ўзмацнення па току пры сярэднім узроўні інжекцыі неабходна больш высокая канцэнтрацыя легіруючай прымесі ў эмітары. Выяўлена, што пры высокатэмпературных апрацоўках пласцін Si атамы азоту, лакалізуючыся на мяжы падзелу  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , ўзаемадзейнічаюць з лакальнымі дэфектамі, утвараючы сувязі  $\text{O}=\text{Si}=\text{N}-$  і  $-\text{Si}\equiv\text{N}$ . Распрацавана феноменалагічная мадэль паскоранай дыфузіі атамаў азоту. Устаноўлена, што азатаванне падзатворнага дыэлектрыка сілавых МАП-транзістараў іённай імплантацыяй дозамі  $1 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  з энергіяй 20 кэВ прыводзіць да ўзрастання сярэдняй велічыні зарада прабою і зніжэнню шчыльнасці фіксаванага зарада дыэлектрыка, пры іённай імплантацыі дозай  $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  з энергіяй 40 кэВ назіраецца зніжэнне сярэдніх значэнняў токаў ўцечкі затвора. Дадзеныя эфекты абумоўлены пасівацыяй атамамі азоту павярхоўных станаў на мяжы падзелу  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ .

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** вынікі даследавання могуць быць скарыстаны пры праектаванні і вырабе інтэгральных схем, фотапрымальнікаў, датчыкаў высокаэнергетычных часціц, біпалярных і сілавых МАП-транзістараў, а таксама ў навучальным працэсе.

**Вобласць ужывання:** фізіка паўправаднікоў, электронная прамысловасць.

## РЕЗЮМЕ

Шестовский Дмитрий Викторович

### **Дефектно-примесное взаимодействие в структурных элементах с потенциальными барьерами приборов микроэлектроники на основе кремния при внешних энергетических воздействиях**

**Ключевые слова:** p-i-n-фотодиоды, взаимодействие технологических и радиационных дефектов, n-p-n-биполярные транзисторы, локализация атомов азота, МОП-транзисторы, заряд пробоя.

**Цель работы:** установление закономерностей дефектно-примесного взаимодействия в структурных элементах с потенциальными барьерами приборов микроэлектроники, подвергнутых внешним энергетическим воздействиям.

**Методы исследования:** измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик, времяпролетная масс-спектрометрия вторичных ионов, ИК-спектроскопия нарушенного полного внутреннего отражения, контроль параметров времязависимого пробоя диэлектрических слоев.

**Полученные результаты и их новизна:** установлено, что основной причиной трансформации формы вольт-амперной характеристики p-i-n-фотодиодов после облучения  $\gamma$ -квантами являются процессы коагуляции первичных радиационных дефектов на остаточных технологических дефектах в Si. Показано, что в биполярном n-p-n-транзисторе с высоким содержанием технологических примесей для увеличения коэффициента усиления по току при среднем уровне инжекции необходима более высокая концентрация легирующей примеси в эмиттере. Выявлено, что при высокотемпературных обработках пластин Si атомы азота, локализуясь на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , взаимодействуют с локальными дефектами, образуя связи  $\text{O}=\text{Si}=\text{N}-$  и  $-\text{Si}\equiv\text{N}$ . Разработана феноменологическая модель ускоренной диффузии атомов азота. Установлено, что азотирование подзатворного диэлектрика силовых МОП-транзисторов ионной имплантацией дозами  $1 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  с энергией 20 кэВ приводит к возрастанию средней величины заряда пробоя и снижению плотности фиксированного заряда диэлектрика, при ионной имплантации дозой  $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  с энергией 40 кэВ наблюдается снижение средних значений токов утечки затвора. Данные эффекты обусловлены пассивацией атомами азота поверхностных состояний на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ .

**Рекомендации по использованию:** результаты исследования могут быть использованы при проектировании и изготовлении интегральных схем, фотоприемников, датчиков высокоэнергетических частиц, биполярных и силовых МОП-транзисторов, а также в учебном процессе.

**Область применения:** физика полупроводников, электронная промышленность.

## SUMMARY

Shastouski Dzmitry Viktaravich

### **Defect-impurity interaction in structural elements with potential barriers of silicon-based microelectronics devices under external energy influences**

**Keywords:** p-i-n-photodiodes, interaction of technological and radiation defects, n-p-n-bipolar transistors, localization of nitrogen atoms, MOS-transistors, charge to breakdown.

**The purpose of this work:** the establishment of patterns of defect-impurity interaction in structural elements with potential barriers of microelectronic devices, subjected to external energy influences.

**Research methods:** measurements of current-voltage and capacitance-voltage characteristics, secondary ion time-of-flight mass spectrometry, IR-spectroscopy attenuated total internal reflection, control of time to breakdown parameters of dielectric layers.

**The obtained results and their novelty:** it has been established that the main reason for the transformation of the shape of the current-voltage characteristic of p-i-n-photodiodes after irradiation with  $\gamma$ -quanta is the processes of coagulation of primary radiation defects on residual technological defects in Si. It has been shown that in a bipolar n-p-n transistor with a high content of technological impurities, a higher concentration of dopant in the emitter is required to increase the current gain at an average injection level. It was revealed that during high-temperature processing of silicon wafers, nitrogen atoms localizing mainly at the  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  interface interact with local defects, forming  $\text{O}=\text{Si}=\text{N}-$  and  $-\text{Si}\equiv\text{N}$  bonds. It has been established that nitriding of the gate dielectric of power MOS-transistors by ion implantation with doses of  $1 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  with an energy of 20 keV leads to an increase in the average value of the charge to breakdown and a decrease in the density of the fixed charge of dielectric, for ion implantation dose of  $2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  with an energy of 40 keV, a decrease in the average values of gate leakage currents is observed. These effects are due to passivation of surface states at the  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  interface by nitrogen atoms.

**Recommendations for the application:** the results of the research can be used in the design and manufacture of integrated circuits, photodetectors, high-energy particle sensors, bipolar transistors, power MOS-transistors, as well as in the educational process.

**Application area:** semiconductor physics, electronics industry.



Подписано в печать 30.12.2024. Формат 60×84  $\frac{1}{16}$ . Бумага офсетная.  
Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,75.  
Тираж 70 экз. Заказ 293.

Отпечатано с оригинала-макета заказчика  
в республиканском унитарном предприятии  
«Издательский центр Белорусского государственного университета».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 2/63 от 19.03.2014.  
Ул. Красноармейская, 6, 220030, Минск.