Пажин, Дмитрий Михайлович. Влияние облучения на свойства КНИ структур и полевых элементов со встроенным каналом на их основе : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 05.27.01 / Пажин Дмитрий Михайлович; [Место защиты: Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистных материалов РАН].- Черноголовка, 2010.- 115 с.: ил. РГБ ОД, 61 10-1/1213

**Учреждение Российской академии наук Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН**

*На правах рукописи*

C:\Users\Pavel\AppData\Local\AppData\Local\Temp\FineReader11.00\media\image1.png

**(**14**.**2.01063726 **"**

**ПАЖИН ДМИТРИЙ МИХАЙЛОВИЧ**

**ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА КНИ СТРУКТУР И ПОЛЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СО ВСТРОЕННЫМ КАНАЛОМ НА ИХ**

**ОСНОВЕ**

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико - математических наук

Научный руководитель д.ф.-м.н., профессор Мордкович Виктор Наумович

і

Черноголовка - 2010

стр

**Введение 4**

**Глава 1 Радиационные эффекты в кремнии и МДП элементах на 10**

**его основе (обзор литературы)**

1. Общие сведения о структурах «кремний - на - изоляторе» и 10 технологии их изготовления
2. [Радиационные эффекты в кремнии 14](#bookmark4)
3. [Радиационные эффекты в диэлектрике (БіОг) 17](#bookmark5)
4. Радиационные эффекты в кремниевых диэлектрик - 18 полупроводник структурах
5. [Радиационные эффекты в кремниевых МДП элементах 25](#bookmark7)
6. Ожидаемые особенности радиационных эффектов в КНИ 30 структуре и МДП элементах на ее основе
7. Несколько слов о КНИ магниточувствительном элементе с 32 управляющей полевой системой МДПДМ типа (КНИ полевом

датчике Холла)

1. [Обоснование выбранного направления исследований **34**](#bookmark11)

[**Глава 2 Методика эксперимента 36**](#bookmark12)

1. [Исследуемые образцы 3 6](#bookmark13)
2. [Исследование электрофизических характеристик компонентов 37 '](#bookmark14)

КНИ структуры

1. Исследование структурных характеристик слоя кремния КНИ 37 структуры
2. Исследование электрических характеристик слоя кремния КНИ 41 структур
3. Исследование характеристик слоя встроенного диэлектрика и 42 границы раздела встроенный диэлектрик - кремний КНИ структур
4. Исследование электрических и магнитных характеристик КНИ 43 полевых датчиков Холла
5. [Радиационное воздействие 47](#bookmark18)
6. [Радиационное воздействие на КНИ структуры 48](#bookmark19)
7. [Радиационные воздействие на КНИ полевой датчик Холла 48](#bookmark20)

[**Глава** 3 **Радиационные эффекты в КНИ структурах** 52](#bookmark22)

1. Радиационные эффекты в слое встроенного диэлектрика КНИ 52 структуры
2. Особенности радиационно-индуцированного изменения 55 структурных свойств слоя кремния КНИ структуры
3. Исследование влияния радиации на изменение электрических 61 характеристик слоя кремния КНИ структуры

[**Выводы к главе** 3 63](#bookmark28)

[**Глава 4 Радиационные эффекты в КНИ полевых датчиках Холла** 65](#bookmark29)

1. Моделирование распределения концентрации носителей заряда в 65

слое кремния КНИ МДПДМ элементов

1. Основные электрические характеристики КНИ ПДХ 73
2. Влияние стационарного ионизирующего облучения на 76 электрические характеристики КНИ ПДХ
3. Исследование влияния схемы включения электродов КНИ ПДХ 77 на изменение характеристик при стационарном ионизирующем гамма-облучении
4. Влияние облучения на характеристики КНИ ПДХ, при 77 облучении в пассивном режиме
5. Влияние облучения на характеристики КНИ ПДХ, находящихся 83 в процессе облучения в активном режиме
6. Исследование возможности управления радиационным 86 поведением характеристик КНИ ПДХ за счет независимого (друг от друга) изменения напряжения на полевых затворах в процессе облучения
7. [Влияние нейтронного облучения на КНИ ПДХ 91](#bookmark37)

[Выводы к главе 4 93](#bookmark38)

Глава 5 Эффекты импульсного ионизирующего облучения в 95

КНИ полевых датчиках Холла

1. Моделирование релаксационных процессов в канале КНИ 96 двухзатворных микроэлектронных элементов со встроенным каналом
2. Экспериментальное изучение релаксационных эффектов в канале 103 КНИ ПДХ при воздействии импульсного ионизирующего облучения

[Выводы к главе 5 106](#bookmark43)

[Основные результаты 107](#bookmark44)

[Заключение 109](#bookmark45)

Список использованной литературы 109

**Актуальность темы**

Известно, что кремний является основным материалом современной твердотельной электроники. По прогнозам российских и зарубежных экспертов в ближайшие 10 — 20 лет он сохранит своё лидирующее положение в микроэлектронике, силовой электронике, солнечной энергетике и таких новых быстроразвивающихся областях, как микромеханика и микросистемотехника. Сказанное не означает, что все характеристики кремниевых приборов полностью удовлетворяют требованиям их возможных потребителей. Необходимость улучшения характеристик привела к появлению технологии «кремний на изоляторе» (КНИ), ставшей на сегодняшний день основной магистралью развития кремниевой микроэлектроники.

КНИ микроэлектронные приборы по сравнению со своими аналогами на основе массивных монокристаллов кремния обладают такими преимуществами, как быстродействие и надежность, уменьшение размеров и энергопотребления [1,2]. Прогресс в улучшении характеристик за счет использования КНИ технологии настолько значителен, что в настоящее время эта технология выбрана рядом ведущих мировых фирм (IBM, AMD, Motorola, Samsung) в качестве генерального направления, обеспечивающего наибольшие преимущества при создании сверхбыстродействующих и ультра больших интегральных схем.

Первоначальный интерес к КНИ технологии был вызван необходимостью повышения устойчивости микроэлектронных приборов к импульсному ионизирующему воздействию, одному из основных поражающих факторов ядерного взрыва. Известно, что влияние подобного излучения на электрические характеристики микроэлектронных приборов в первую очередь связано с генерацией в токопроводящих каналах высокой концентрации избыточных носителей заряда (электронов и дырок). В результате может радикально измениться поведение приборов по крайней мере на период времени, необходимый для релаксации неравновесных носителей, созданных излучением. В массивных кремниевых транзисторах с управляющей полевой системой типа металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) значительная часть радиационно-индуцированных носителей заряда может достичь рабочих областей и затруднить их нормальное функционирование. В КНИ функциональном аналоге слой встроенного диэлектрика является барьером на пути движения избыточных носителей заряда из кремниевой подложки к рабочим областям элемента. Устойчивость к импульсному ионизирующему воздействию КНИ транзистора увеличится примерно во столько раз, во сколько толщина слоя кремния d меньше диффузионной длины L носителей (характерные значения составляют d< 0,1 мкм, L=100 мкм, L/d> 103).

В массивных кремниевых интегральных схемах (ИС) с изоляцией элементов р-п переходами импульсное излучение способно вызвать сквозной ток через изолирующие переходы соседних транзисторов. КНИ технология обеспечивает простую возможность полной диэлектрической изоляции элементов ИС, что исключает протекание сквозного тока между ними.

Для некоторых микроэлектронных приборов предъявляются требования к надежному функционированию в условиях не импульсного, а стационарного (квазистационарного) радиационного воздействия. Это, например, является необходимым для аппаратуры атомных электростанций, космоса и т.п. Ответ на вопрос о целесообразности замены кремния на КНИ структуры для производства устойчивых к воздействию стационарной радиации элементов априори не очевиден. Изменение характеристик массивных кремниевых МДП микроэлектронных элементов при соответствующем радиационном воздействии прежде всего связано с изменением заряда в подзатворном диэлектрике и плотности поверхностных состояний на границе раздела кремний - диэлектрик. Генерация радиационных дефектов в кремниевом канале является эффектом второго порядка. Очевидно, что в случае КНИ МДП элемента, с неизбежностью содержащего в своей конструкции два диэлектрика (подзатворный и встроенный), в первом приближении можно ожидать уменьшения стойкости к стационарному радиационному воздействию.

Известно, что МДП транзисторы, используемые в современных интегральных схемах (включая КНИ ИС), имеют индуцированный инверсионный канал. В последние годы были проведены многочисленные исследования, в которых были определены особенности радиационных эффектов в КНИ ИС на таких транзисторах и разработаны способы повышения их радиационной стойкости [3-7]. Следует иметь в виду, что существует и другой тип КНИ МДП транзисторов, а именно КНИ транзисторы со встроенным каналом, в которых имеются, как очевидные особенности переноса тока по сравнению с индуцированным каналом [8,9] , так и существенные различия в конструкции, поскольку система кремниевая подложка — скрытый диэлектрик может использоваться как дополнительная управляющая полевая система [10]. Таким образом, КНИ полевой транзистор со встроенным каналом, по сути дела, является двухзатворным транзистором с управляющей системой типа металл — диэлектрик - полупроводник - диэлектрик — металл (МДПДМ). В [11,12] было показано, что на основе такого КНИ МДПДМ транзистора может быть создан оригинальный первичный преобразователь магнитного поля, названный КНИ полевым датчиком Холла (ЦДХ), обладающий уникальными магниточувствительностью, диапазоном регистрируемых магнитных полей, областью рабочих температур и пониженным энергопотреблением. КНИ МДПДМ приборы со встроенным каналом представляют несомненный интерес для сенсорной и микросистемной техники. Радиационные эффекты в

КНИ МДПДМ транзисторах со встроенным каналом и КНИ полевых датчиках Холла до настоящей работы систематически не изучались.

Цель работы состояла в исследовании радиационных эффектов в КНИ полевых датчиках Холла, подвергнутых воздействию облучения, и способов повышения их радиационной стойкости.

Стартовым материалом для производства КНИ полевых датчиков Холла служили КНИ структуры, изготовленные методом ионного синтеза. До настоящей работы радиационные эффекты в них также систематически не изучались. В связи с этим достижение цели работы потребовало изучения особенностей радиационных эффектов в различных по своей физической природе компонентах соответствующей структуры.

Научная новизна

1. Впервые показано, что слой встроенного диэлектрика КНИ структуры является барьером для междоузельных атомов, смещенных излучением из узлов кристаллической решетки.
2. Впервые установлено, что кинетика аморфизации слоя кремния КНИ структуры по сравнению с аналогичным процессом в массивном кристалле кремния носит более сложный характер. В частности показано, что нарушение монокристалличности приповерхностной области слоя кремния КНИ структуры наступает при существенно меньших дозах облучения по сравнению с массивными монокристаллами кремния, в то время как доза полной аморфизации слоя кремния КНИ структуры превышает таковую для массивного монокристалла кремния.
3. Впервые установлено, что различия в кинетике образования, пространственном распределении и концентрации радиационных дефектов в слое кремния КНИ структуры и массивном монокристалле кремния связаны с влиянием упругого и электрического полей встроенного диэлектрика.
4. Впервые показано, что основными причинами изменения электропроводности слоя кремния КНИ структуры при облучении гамма- квантами с дозой, не приводящей к изменению электропроводности массивных монокристаллов кремния, является изменение плотности поверхностных состояний на границе раздела слой кремния - встроенный диэлектрик и заряда во встроенном диэлектрике.
5. Разработана и экспериментально подтверждена модель, описывающая изменение основных характеристик КНИ двухзатворных магниточувствительных микроэлектронных элементов под действием импульсного ионизирующего облучения.

Практическая полезность

1. Продемонстрирована возможность полевого управления характеристиками КНИ полевого датчика Холла за счет использования системы встроенный диэлектрик - кремниевая подложка. Это позволяет реализовать новые нетрадиционные для датчиков Холла схемотехнические возможности включения, что обеспечит расширение их динамического

диапазона магниточувствительности, увеличение пороговой магниточувствительности и повышение температурной стабильности характеристик.

1. Предложены схемы включения электродов КНИ полевого датчика Холла, позволяющие увеличить его радиационную устойчивость к воздействию стационарного и импульсного ионизирующего излучения. Это может быть использовано для разработки и изготовления радиационно­стойких микроэлектронных элементов, таких как датчики магнитного .поля, тока, положения, вращения, ускорения и т.п., основанных на использовании КНИ полевого датчика Холла в качестве первичного преобразователя.
2. Предложен метод увеличения радиационной стойкости КНИ двухзатворных элементов путем инжекции электронов из массивной кремниевой подложки во встроенный диэлектрик в процессе облучения. Метод позволит минимизировать изменение характеристик как КНИ первичных чувствительных элементов датчиков различных физических/химических воздействий, так и КНИ интегральных схем различного функционального назначения при воздействии стационарного ионизирующего излучения.
3. Предложена процедура моделирования релаксационных эффектов в токопроводящем канале КНИ двухзатворных микроэлектронных элементов с различным уровнем концентрации носителей и времени жизни. Метод позволяет провести теоретическую оценку предельной рабочей частоты, при которой релаксационные процессы, вызываемые импульсным ионизирующим воздействием, не повлияют на работоспособность соответствующих элементов.

**Положения, выносимые на защиту**

1. Различия в кинетике накопления, пространственном распределении и концентрации устойчивых радиационных дефектов в слое кремния КНИ структуры по сравнению с массивным монокристаллом кремния связаны с влиянием упругого и электрического полей встроенного диэлектрика.
2. В облученных ионами слоях кремния КНИ структуры вблизи границы раздела со слоем встроенного диэлектрика по сравнению с областью равной толщины массивного монокристалла кремния происходит увеличение скорости накопления радиационных дефектов междоузельного типа.
3. В отличие от массивных монокристаллов кремния изменение электропроводности облученных ионами слоев кремния КНИ структуры связано не с генерацией характерных для массивных монокристаллов кремния заряженных радиационных дефектов типа вакансия - примесный атом и дивакансия, а прежде всего с изменением плотности поверхностных состояний на границе раздела слой кремния - встроенный диэлектрик и заряда во встроенном диэлектрике.
4. В КНИ двухзатворных элементах со встроенным каналом существует возможность полевого управления процессами радиационно- индуцируемого изменения электрических характеристик, в т.ч. за счет использования затворной системы, образованной встроенным диэлектриком и кремниевой подложкой КНИ структуры.
5. Время релаксации характеристик КНИ полевых датчиков Холла, подвергнутых импульсному ионизирующему облучению, зависит не только от мощности дозы облучения, но и от схемы электропитания датчика.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на:

* Российской научной конференции «Радиационная стойкость электронных систем - Стойкость - 2000» Лыткарино, 2000.
* Международном симпозиуме NATO Advanced Research Workshop “Progress in Semiconductor -On Insulator Structures and Devices Operating at Extreme Condition ” , Kiyv, 2000.

•Российской научной конференции «Радиационная стойкость электронных систем - Стойкость-2001», Лыткарино, 2001.

•Всероссийской конференции Датчики и детекторы для АЭС ( ДЦАЭС - 2002), Пенза, 2002.

* XVII Международной конференции Взаимодействие ионов с поверхностью (ВИП — 2003), Звенигород, 2003.
* 10th International Conference on Extended defects in Semiconductors (EDS- 2004), Черноголовка, 2004.
* NATO Adv. Res. Workshop on Science and Technology of Semiconductor- On-Insulator Structures and Devices Operating in a Harsh Environment, Kiev, 2005.
* Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology,

S. Petersburg, 2007.

* Международная конференция и Школа по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе, Черноголовка, 2008.
* European Electromagnetics (EUROEM -2008), Switzerland, 2008.
* European Magnetic Sensors and Actuators Conference (EMSA-08), France, 2008.
* ISTC Workshop "Perspective materials, devices and structures for space applications", Yerevan, Armenia, 2009.
* Научных семинарах в Учреждении Российской академии наук Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН.

**Публикации**

По материалам диссертации опубликована 21 печатная работа.

**Личный вклад соискателя** заключался в участии:

* в постановке цели и задач исследований и определении необходимых методик изучения объектов исследований,
* в экспериментальном изучении особенностей влияния различных видов излучения на изменение характеристик объектов исследований,
* в обработке полученных экспериментальных данных,
* в проведении теоретических расчетов зависимости концентрации носителей в канале КНИ двухзатворных элементов от величины напряжения на затворах и заряда во встроенном и по подзатворном диэлектриках,
* в проведении теоретического и экспериментального исследования влияния импульсного ионизирующего воздействия на характеристики КНИ двухзатворных микроэлектронных элементов со встроенным каналом,
* в обсуждении полученных результатов.

**Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав и основных результатов, изложена на 115 страницах, включая 56 рисунков и списка использованной литературы из 100 наименований.

**Основные результаты**

Цель настоящей диссертационной работы состояла в исследовании радиационных эффектов в КНИ ПДХ и поиске способов повышения их радиационной стойкости.

Для выполнения поставленной цели проведено исследование влияния радиации на структурные и электрофизические характеристики слоев кремния и встроенного диэлектрика КНИ структур.

В рамках выполнения работы было также исследовано влияние гамма- облучения и нейтронной бомбардировки на основные электрические характеристики КНИ ПДХ в зависимости от режимов включения их электродов в процессе облучения и теоретически и экспериментально исследованы релаксационные эффекты в канале КНИ ПДХ при импульсном ионизирующем облучении.

**Основные результаты работы сводятся к следующему:**

1. **Впервые установлено, что слой встроенного диэлектрика КНИ структуры является барьером для междоузельных атомов, возникающих в слое кремния при облучении.**
2. **Впервые обнаружено, что нарушение монокристалличности приповерхностной области слоя кремния КНИ структуры из-за накопления дефектов вакансионной природы наступает при заметно**

**меньших дозах облучения ионами, чем нарушение монокристалличности приповерхностной области той же толщины в массивных монокристаллах кремния.**

1. **При имплантации ионов Аг+ с энергией 100 кэВ доза полной аморфизации слоя кремния КНИ структуры как минимум на 25% превышает таковую для массивного монокристалла кремния.**
2. **Особенности кинетики образования, пространственного распределения и концентрации устойчивых радиационно- индуцированных дефектов решетки в слое кремния КНИ структуры обусловлены влиянием упругого и электрического силовых полей встроенного диэлектрика.**
3. **Установлено, что воздействие гамма-излучения дозой до 1 Мрад приводит к изменениям проводимости слоя кремния КНИ структур, но не вызывает изменений проводимости массивных монокристаллов кремния.**
4. **Впервые теоретически и экспериментально продемонстрировано, что система встроенный диэлектрик - кремниевая подложка может быть использована для управления основными характеристиками двухзатворных КНИ микроэлектронных элементов со встроенным каналом.**
5. **Предложен способ включения электродов КНИ полевых датчиков Холла, при котором наблюдается увеличение его стойкости к воздействию стационарного ионизирующего гамма-излучения.**
6. **Впервые предложен способ увеличения стойкости двухзатворных КНИ элементов к стационарному ионизирующему воздействию путем инжекции электронов из кремниевой подложки в слой скрытого диэлектрика в процессе радиационного воздействия.**
7. **Впервые показано, что нейтронное облучение с плотностью потока, вызывающим катастрофическое изменение электрических характеристик массивных кристаллов кремния, не приводит к значительным изменениям характеристик КНИ ПДХ. Наблюдаемые небольшие изменения связаны с влиянием сопутствующего нейтронному облучению гамма-фона.**
8. **Впервые теоретически оценены и экспериментально определены характерные значения времени релаксации тока канала и ЭДС Холла КНИ ПДХ при воздействии импульса ионизирующего излучения. Это позволяет оценить предельную рабочую частоту функционирования, при которой релаксационные процессы, вызываемые импульсным ионизирующим воздействием, не влияют на работоспособность соответствующих приборов.**
9. **Показано, что радиационная устойчивость КНИ ПДХ при воздействии импульсного ионизирующего излучения в режиме генератора тока превышает таковую для режима генератора напряжений.**

**Заключение**

Данная диссертационная работа была выполнена в лаборатории радиационно-стимулированных процессов Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов (ИПТМ) РАН.

Автор искренне благодарен научному руководителю работы, заведующему лаборатории ИПТМ РАН проф., д.ф.-м.н. Мордковичу В. Н. за полезные обсуждения, высказанные замечания и оказанную помощь при выполнении работы.

Автор признателен сотрудникам ИПТМ РАН к.ф.-м.н. Мокрушину А.Д., к.ф.-м.н. Омельяновской Н.М., ст. инженеру Леонову А.В. за плодотворное сотрудничество, помощь и поддержку, оказанные при выполнении работы.

Автор выражает свою благодарность Михайлову Г.Б. (НПП ИТАР) и Громову Д.В. (ОАО «ЭНПО СПЭЛС») за возможность провести теоретический расчет радиационных эффектов в канале КНИ МДПДМ элементов со встроенным каналом с помощью программ теоретического моделирования КНИ-С10 и DIODE-2D соответственно.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Shahidi G. G. SOI technology for Ghz era” // IBM Journal of Research and development. - 2002. - Vol. 46, № 2/3. - P. 121-132.
2. Cristoloveanu S. Electrical Characterization Techniques for Silicon On Insulator Materials and Devices // Physical and Technical Problems of SOI Structures and Devices. - Dordrect-Boston-London: Kluwer Acad. Publ. - 1995. - Ser. 3. -V. 4.-P. 109-132.
3. Colinge J. P. Gate-All-Around technology for harsh environment applications” // Progress in SOI Structures and Devices Operating at Extreme Conditions. - Dordrect-Boston-London: Kluwer Acad. Publ. - 2000. - Ser. 2. - V. 58. -P. 167-188.
4. Claeys C., Simoen E., Litovchenko V. et all. Influence of y-radiation on short channel SOI MOSFETs with thin S1O2 films // Progress in SOI Structures and Devices Operating at Extreme Conditions. - Dordrect-Boston-London: Kluwer Acad. Publ. - 2000. - Ser. 2. - V. 58. - P. 211-220.
5. Мустафаев Г.А., Маустафаев А.Г. Радиационная стойкость КНИ МОП- транзисторов к накопленной дозе ионизирующего излучения // Нано- и микросистемная техника. — 2007. — № 12. — С. 47—49.
6. Кузнецов Е.В., Рыбачек Е.Н. Метод увеличения радиационной стойкости п-МОП КНИ транзистора к накопленной дозе ионизирующего излучения [Электронный ресурс] // Отдел интегральных микросхем НПК «Технологический центр МИЭТ»: [сайт]. URL: <http://www.asic.ru/publ.html> (дата обращения: 17.02.2010).
7. Попов В.П., Французов А.А., Наумова О.В., и др. Создание и исследование свойств радиационно стойких 100 нм КНИ КМОП транзисторов

[Электронный ресурс] //Институт физики полупроводников СО РАН: [сайт]. URL: <http://www.isp.nsc.ru/newface/index.php?ACTION=Tesult> view&id main

—15&id sub =79&id sub sub=187 (дата обращения: 25.05.2010).

1. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств: учеб. для радиотехнических спец. вузов. М.: Высшая школа. 1990. 432 с.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн.2. Пер. с англ.

* 2-е перераб. и доп. изд. — М.: Мир, 1984. — 456 с.

Ю.Красников Г.Я.; Михайлов В.А.; Мордкович В.Н и др. Полевой транзистор типа металл-диэлектрик-полупроводник // Патент России №2130668. 1999.

1. Акимов А.Г. Барабаненков М.Ю. и др. Управляемый резистор с функциями полевого транзистора и полевого датчика Холла // Приборы и техника эксперимента. - 1988. - № 5. — С. 123-126.
2. Мордкович В.Н., Приходько П.С. Полевой датчик Холла на основе структур кремний на изоляторе // Автоматизация и современные технологии. — 1998. -№ 5. - С. 15-20.
3. Hanes М. Н., Argawal А. К., O'Keeffe Т. W. et all. MICROX-an all-silicon technology for monolithic microwave integrated circuits // IEEE Electron Devices Letters. - 1993. - Vol. 14. - P. 219-221.
4. Auberton-Herve A. J., Aspur B., Pelloie J. L. Low Dose SIMOX for ULSI Applications // Physical and Technical Problems of SOI Structures and Devices. Dordrect-Boston-London: Kluwer Acad. publ. - 1995. - Ser.3. — Vol.4. — P. 3-14.

15.1sumi, K., Doken М., Ariyoshi H. C.M.O.S. devices fabricated on buried Si02 layers formed by oxygen implantation into silicon // Electronics Letters. - 1978. — Vol. 14.-P. 593-594.

1. Русак Т.Ф., Енишерлова-Вельяшева К. JI., Концевой Ю.А. Способ изготовления структур кремний-на-изоляторе // Патент России № 2173914. **2001.**
2. Bruel М. Silicon on insulator material technology // Electronics Letters. - 1995. - Vol. 31, № 14.-P. 1201-1202.
3. Вавилов B.C., Кекелидзе Н.П., Смирнов JI.C. Действие излучений на полупроводники: учеб. руководство. М.: Наука-Физматлит, 1988. 191 с.
4. Клингер М.И., Лущик Ч.Б., Машовец Т.В. и др. Создание дефектов в твердых телах при распаде электронных возбуждений // Успехи физических наук.

* 1985. - Т. 147, № 3. - С. 523-558.

1. Вавилов B.C., Челядинский А.Р. Ионная имплантация в монокристаллы кремния: эффективность метода и радиационные нарушения // Успехи физических наук. - 1995. - Т. 165, № 3. — С. 347-358.
2. Вавилов B.C. Действие излучений на полупроводники. М.: Физматгиз, 1963. 264 с.
3. Вавилов B.C., Киселев В.Ф., Мукашев Б.Н. Дефекты в кремнии и на его поверхности. М.: Наука, 1990. 216 с.
4. Смирнов Л.С. Физические процессы в облученных полупроводниках. Новосибирск: Наука, 1977. 256 с.
5. Кузнецов Н.В., Соловьев Г.Г. Радиационная стойкость кремния. М.: Энергоиздат, 1989. 96 с.
6. Винецкий B.JL, Холодарь Г.А. Радиационная физика полупроводников. Киев: Наукова думка, 1979. 332 с.
7. Вавилов B.C., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М.: Атомиздат, 1969. 310 с.
8. Морозов Н.П., Тетельбаум Д.И. Закономерности накопления дефектов при облучении полупроводников легкими ионами // Физика и техника полупроводников. - 1980. — Т. 14. — В. 5. — С. 934—938.
9. Конозенко И.Д., Семенюк А.К., Хиврич В.И. Радиационные дефекты в кремнии. Киев: Наукова думка, 1974. 200 с.
10. Емцев В.В., Машовец Т.В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М.: Радио и связь, 1981. 248 с.

ЗО.Окисление, диффузия, эпитаксия /Под ред. Бургера Р., Доиована Р. М.: Мир, 1969. 361 с.

3 Lionizing Radiation Effects in MOS Devices & Circuits. /Ed. By Ma T.P. and Dressendorfer P.V., New York: John Wiley and Sons, 1989. 760 p.

1. Lacoe R. CMOS scaling, design principles and hardening-by-design methodologies // IEEE NSREC. Short Course. Radiation effects in advanced commercial techologies: how design scaling has affected the selection of specebome electronics. - Monteray, California, 2003. - P. II-l—11-142.
2. Ausman G.A., McLean F.B. Electron-Hole Pair Creation Energy in SiC>2 // Appl. Phys. Lett. -1975. - Vol. 26, № 4. - P. 173-175.
3. Benedetto J.M., Boesch H.E. The relationship between 60Co and 10 keV X-ray damage in MOS devices // IEEE Trans. Nucl. Sci. -1986. - NS-33. - P. 1318— 1323.
4. Huges R.C. Charge-Carrier Transport in Transport Phenomena in Amorphous Si02: Direct Measurement of the Drift Mobility and Lifetime // Phys. Rev. Lett. - 1973. - Vol. 30, № 26. - P. 1333-1336.
5. Мордкович B.H. Влияние облучения на электрические свойства структуры диэлектрик-полупроводник //Электр. Техника. Сер.2. Полупроводниковые приборы. - 1987. - Вып. 6. - С. 45—56.

37.Snow Е. Н., Grove A. S., Fitzgerald P. S. Effects of Ionizing Radiation on Oxidized Silicon Surfaces and Planar Devices // Proc. IEEE. — 1967. - Vol. 55, №7.-P. 1168-1185.

1. Влияние ионизирующего излучения на параметры изделий электронной техники. Методические разработки. / Мустафаев Г.А., Тешев Р.Ш.- Нальчик, Каб.- Балк. ун-т, 2004. — 32 с.
2. Гуртов В.А. Влияние ионизирующего излучения на свойства МДП приборов // Обзоры по электронной технике. Сер.2. Полупроводниковые приборы. -М.: ЦНТИ "Электроника", 1978. - Вып. 14.-С.1-31.
3. Герасименко Н. Н., Мордкович В. Н. Радиационные эффекты в полупроводниковых системах // Киев: Препринт КИЯИ-76-25., 1976. -С. 41-48.
4. Литовченко В.Г. Шаховстов В. И: Материалы конференции / Международная конференция по радиационной физике полупроводников и родственных материалов. - Тбилиси: изд-во Тбил. ун-та., 1980. - С. 262 - 271.
5. Morosov N. P., Telelbaum D. I. Radiation Defect Formation at Ion Implantationof Semiconductors in the Presence of Force Fields // Phys. Stat. Sol. (a). - 1979. - Vol. 51. - P. 629-640.
6. Гаврилюк В. К., Макара В. А., Новиков Н. Н. и др. Напряжения в системе Si-Si02 // Электронная техника. Сер.2. Полупроводниковые приборы. - 1977. - Вып. 5. - С. 63-68.

44.Основы технологии кремниевых интегральных схем. Окисление, диффузия, эпитаксия // Пер. с англ. под ред. Бургера Р., Донована Р. М.: Мир, 1969. 451 с.

1. Литовченко В. Г., Горбань А. П. Основы физики микроэлектронных систем металл - диэлектрик - полупроводник. Киев: Наукова Думка, 1978. 316 с.
2. EerNisse Е. P. Stress in thermal Si02 during growth // Appl. Phys. Lett. - 1979. - Vol. 35, № 8. - P. 8-11.
3. Jaccodine R. J., Shlegel W. A. Measurement of Strains at Si-Si02 Interface // Journal of Appl. Phys. - 1966. - Vol. 37, № 6. - P. 2429-2435.
4. Dobson P. S. The effect of oxidation on anomalous diffusion in silicon // Philosophical Magazine. - 1971. - Vol. 24. - P. 567—576.
5. Вологдин Э. H., Жукова Г. А., Мордкович В. H. Облучение кремния, покрытого окисной пленкой, заряженными частицами низких энергий // Физика и техника полупроводников. - 1972. - Т. 6. - Вып. 7. - С. 1306— 1309.
6. Вологдин Э. Н., Жукова Г. А., Мордкович В. Н. Радиационные повреждения в приповерхностных слоях кремния // Физика и техника полупроводников. —1973. - Т. 7. - Вып. 4. - С. 835-836.
7. Лысенко В. С., Назаров А. Н. Радиационные дефекты в приповерхностном слое окисленного кремния, имплантированного ионами различных химических примесей// Поверхность. Физика. Химия. Механика. — 1982. -№ 5.-С. 81-88.
8. Girii V. A., Kondrachuk А. V., Komyushin et all. The effect of irradiation on the carrier mobility in inversion layers of MOS structures // Phys. Stat. Sol. (a). -1974. -Vol. 22.-P. 357-362.
9. Вавилов В. С., Ухин Н. А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М.: Атомиздат, 1969. 196 с.
10. Герасименко Н.Н., Двуреченский А.В., Смирнов Л.С. Исследование дефектообразования в облученном ионами кремнии методом ЭПР //Физика и техника полупроводников. -1971. - Т.5. - Вып. 9. - С.1700- 1703.
11. Гаштольд В.Н., Герасименко Н.Н. Двуреченский А.В. и др. Профили дефектов при имплантации ионов в кремний // Физика и техника полупроводников. - 1975. - Т. 9, № 5. - С. 835-839.
12. Герасименко Н. Н., Кибалина Н. П., Стась В. Ф. Высокоомный приповерхностный слой в кремнии, облученном электронами //Физика и техника полупроводников. -1977. - Т.11. -Вып.6. — С. 1216-1218.
13. Горячев В. Г., Кузнецов Ю. А., Маренина JI. Н. и др. Радиационные эффекты в полупроводниковых системах // Киев: Препринт КИЯИ-65-25., 1976. -С. 42-48.
14. Wang К. L., Lee J. Н., Corbett J. W. Defect distribution near the surface of electron-irradiated silicon // Appl. Phys. Lett. - 1978. - Vol. 33. — P. 547—549.
15. Герасименко H.H., Двуреченский A.B., Смирнов JI.C. О парамагнитных центрах, образующихся при облучении кремния ионами // Физика и техника полупроводников. - 1972. — Т. 6. — Вып. 6. — С. 1111—1113.
16. Жукова Г. А., Мордкович В.Н. Особенности образования радиационных дефектов у поверхности кремния, покрытой пленкой диэлектрика: Материалы конференции / Международная конференция по радиационной физике полупроводников и родственных материалов.

* Тбилиси: Изд-во Тбил. ун-та. 1980. — С. 829-833.

1. Мордкович В. Н. Влияние радиации на электрические свойства структур Si02-Si // Электронная техника. Сер 2. Полупроводниковые приборы. - 1974. - Вып.8. - С. 63-68.
2. Girii V. A., Kondrachuk А. V., Komyushin S. I., Litovchenko V. G. et all. Effect of impurities on the radiation sensitivity of the Si-Si02 interface in MIS structures // Phys. Stat. Sol. (a). - 1976. - Vol. 34. - P. K35-K38.
3. Барышников Д. А., Жукова Г. А., Мордкович В. П. и др. Механические напряжения в облученной системе Si02- Si // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. — 1982. - Вып. 1. - С. 84-89.
4. Marguardt С. L., Sigel G. Н. Radiation-Induced Defect Centers in Thermally Grown Oxide Films // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1975. - Vol. 22, №6.-P. 2234-2239.
5. Gerasimenko N. N., Tseitlin G. M. Vasilev S. V. Formation of B2-centres during ion irradiation of SiOx layers // Phys. Stat. Sol. (a). - 1980. - Vol. 62. -P. K169-K174.
6. Милевский JI. С., Гарнык В. С. Разделение первичных радиационных дефектов под действием электрического поля в арсениде галлия // Физика и техника полупроводников. - 1979. - Т. 13. - Вып. 12. — С. 2401-2403.
7. Vinetskii V. L., Chaika G. Е., Shevchenko Е. S. Charge and potential distribution in dielectric layers of MOS structures under ionization // Phys. Stat. Sol. (a). -1974. - Vol. 26. - P. 743-752.
8. Brailovskii Yu., Matveeva L. A., Semenova et all. Radiation-stimulated relaxation of internal stresses in heteroepitaxial systems // Phys. Stat. Sol. (a). - Vol.66.

* P.K59-K62.

1. Вавилов B.C., Горин М., Данилин Н.С. и др. Радиационные методы в твердотельной электронике. М.: Радио и связь, 1990. 184 с.

70.Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко Радиационные эффекты в некоторых классах полупроводниковых приборов: учеб. Пособие. М.: Московский

государственный институт электроники и математики (технический университет), 2001. 70 с .

71.Beadle W.E., Tsai J.C.C., Plummer R.D. Quick reference manual for silicon integrated circuit technology. New York: John Wiley and Sons Inc., 1985. -458 p. 72.Starkov V.V., Hemment P.L.F., Vyatkin A.F. Amorphisation and solid phase epitaxial regrowth of the silicon overlayer in SIMOX structures // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. - 1991. - Vol. 55, Issues 1-4. P. 701—704.

1. Boesch H.E. Jr., Taylor T.L., Hite L.R. et all. Time-dependence hole and electron trapping effects in SIMOX buried oxide // IEEE Trans. Nucl. Sci. - 1990. -Vol. 37.-P. 1982-1989.
2. Николаев Д.В., Антонова И.В., Наумова O.B'. и др. Накопление заряда в диэлектрике и состояния на границах структур кремний-на-изоляторе при облучении электронами и у-квантами // Физика и техника полупроводников.

* 2003. - Т.37. - Вып. 4. - С. 443-449.

1. Hall Е.Н. On the new action of magnetism on a permanent electric current // Phil. Mag.-1880.-Vol. 10.-P. 301-328.

76.Ioannou D.E. Hot carrier reliability of SOI structures // Physical and Technical Problems of SOI Structures, and Devices. — Dordrect-Boston-London: Kluwer Acad. Publ. - 1995. - Ser. 3. - Vol. 4. - P.199-210.

1. Бублик В.Т., Щербачев К.Д., Комарницкая Е.А. и др. Формирование ансамбля радиационных точечных дефектов в тонких слоях GaAs, легированных ионами Si+, после имплантации и активирующего отжига // Кристаллография. - 1999. - т. 44. - № 6. - С. 1106-1112.
2. Dane A.D., Veldhuis A., D.K.G. de Boer et all. Application of genetic algorithms for characterization of thin layered materials by glancing incidence X-ray reflectometry//Physica B. -1998. - Vol. 253. - P. 254-268.
3. Wormington М., Panaccione C., Matney K.M. Characterization of structures from X-ray scattering data using genetic algorithms // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.

* 1999. - Vol. 357. - P. 2827-2848.

1. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. New York: Addison-Wesley, Reading, 1989. 437 p.
2. Haig, B., and R. S. Popovic, “How to Liberate Integrated Sensors from Encapsulation Stress // Sensors and Actuators. - 1990. - Vol. A21-A23.

* P. 908-910.

1. Бараночников M.JI. Микромагнитоэлектроника: В 2 -x т. Т.2. / М.: ДМК Пресс, 2002. - 691 с.
2. Буренков А.Ф., Комаров Ф.Ф., Кумахов М.А., Темкин М.М. Таблицы пространственного распределения ионно-имплантированных примесей. Минск: Изд-во. БГУ, 1980. 352 с.
3. Вавилов B.C., Кив А.Е., Ниязова 0:Р. Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках. М.: Наука, 1981. 368 с.
4. Habing D.H. Use of Laser to Simulate Radiation-Induced Transients in Semiconductor and Circuits // IEEE Trans. - 1965. - Vol. NS-15, № 5. -P. 91-100.

86.1zumi K., Dokin М., Ariyoshi H. C.M.O.S. devices fabricated on buried Si02 layers formed by oxygen implantation into silicon // Electronics Letters. — 1978. -Vol. 14,№ 18.-P. 593-594.

87.Lee Jong-Wook, Nam Myung-Hee, Oh Jeong-Hee et all. Effects of buried oxide stress on thin-film silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor field-effect transistor // Appl. Phys. Let. — 1998. — Vol.72, №.6. - P. 677-679.

88;Герасименко H.H., Двуреченский A.B., Панов В.И., Смирнов, JI.C. О пороговой энергии образования радиационных дефектов в полупроводниках // Физика и техника полупроводников. — 1971. — Т. 5. -Вып. 8. -С. 1644—1646.

1. Герасименко Н.Н., Мордкович В.Н: Радиационные эффекты в системе полупроводник — диэлектрик // Поверхность. Физика. Химия. Механика. -1987.-№6.-С. 5-19.
2. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
3. Горячев В.Г., Коротаева Н.К., Мордкович В.Н. Природа дефектов, образующихся в кремнии при облучении, нейтронами- // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. — 1978. — Вып. 3. — С. 49—57.

92.Чумаков А.И. Действие космической- радиации\* на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. 320 с.

93.Stassinopolis Е. et al. Solar flare proton evaluation at geostationary orbit for engineering applications // IEEE Trans. On Nucl. Sci. — 1996. — Vol. 43, № 2. -P. 369-382.

1. Программа DIODE—2D. Руководство пользователя. М.: ЭНПО СПЭЛС, 1996. 38 с.
2. Бубенников А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. М.: Высшая школа, 1989. 320 с.
3. Агаханян Т.М., Аствацатурьян Е.Р., Скоробогатов П.К. Электронные средства предварительной обработки информации: сб. научных трудов / Под ред. Агаханяна Т.М. - М.: Энергоатомиздат, 1990. 107 с.
4. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники. М.: Советское радио, 1971.376 с.
5. Бараночников M.JI. Микромагнитоэлектроника: В 2 -х т.: Т. 1 / М.: ДМК Пресс, 2001. 544 с.
6. Савельев И:В; Курс общей физики: В 5 кн.: Кн. 2 / Электричество и магнетизм: Учебное пособие для втузов. М.: Астрель/АСТ, 2005. 336 с.
7. R.S. Popovich Hall Effect Devices / Second Edition: — Bristol: IOP'Publishing

Ltd, 2004.419 р.