

На правах рукописи

ПАЖИН ДМИТРИЙ МИХАЙЛОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ 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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико - математических наук

Черноголовка 2010 г.

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН (ИПТМ РАН).

Научный руководитель: профессор, доктор физико-математических наук Мордкович Виктор Наумович.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Попов Владимир Павлович (ИФП СО РАН),

доктор физико-математических наук Итальянцев Александр Георгиевич (ОАО «НИИ ЭЛПА»).

Ведущая организация: государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный институт электронной техники (технический университет)», г. Москва, Зеленоград.

Защита состоится: «24» ноября 2010 г. в «11» часов «00» мин. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 002.081.01 в Учреждении Российской академии наук Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистных материалов РАН по адресу: 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Институтская д.6, ИПТМ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПТМ РАН.

Автореферат разослан «____» _____ 2010 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских и
кандидатских диссертаций Д 002.081.01,

кандидат химических наук

Л.А. Панченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 быстроедействие и надежность, уменьшение размеров и энергопотребления [1]. 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 $d \leq 0,1$ мкм, $L=100$ мкм, $L/d \geq 10^3$).

В массивных кремниевых интегральных схемах (ИС) с изоляцией элементов p-n 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 [2]. 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 [3], так и существенные различия в конструкции, поскольку система кремниевая подложка – скрытый диэлектрик может использоваться как дополнительная управляющая полевая система [4]. 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 [4] было показано, что на основе такого КНИ МДПДМ транзистора может быть создан оригинальный первичный преобразователь магнитного поля, названный КНИ полевым датчиком Холла (ПДХ), 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.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- исследование особенностей радиационных эффектов в слое кремния КНИ структуры,
- исследование особенностей радиационных эффектов во встроенном диэлектрике КНИ структуры,
- исследование закономерностей влияния стационарной и импульсной радиации на КНИ полевые датчики Холла,
- исследование возможности полевого (затворного) управления радиационными эффектами в КНИ полевым датчике Холла, в том числе за счет использования затворной системы, состоящей из встроенного диэлектрика и кремниевой подложки КНИ 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.

2. 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 радиационно-стойких 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.

3. Предложен метод увеличения радиационной стойкости КНИ двухзатворных элементов путем инъекции 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.

4. 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 вакансии – 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 ” , Київ, 2000.

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

- Всероссийской конференции Датчики и детекторы для АЭС (ДДАЭС – 2002), Пенза, 2002.

- XVII Международной конференции Взаимодействие ионов с поверхностью (ВИП – 2003), Звенигород, 2003.

- 10th International Conference on Extended defects in Semiconductors (EDS-2004), Черногоровка, 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, Черногоровка, 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.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель работы, положения научной новизны и практической полезности, приведены положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

В первой главе обсуждаются литературные данные о КНИ структурах, технологиях их изготовления, преимуществах КНИ микроэлектронных приборов перед их функциональными аналогами на основе массивных монокристаллов кремния. Описываются основные эффекты, происходящие в кремнии и диоксиде кремния при различных видах радиационного воздействия. Проводится анализ особенностей радиационных эффектов в кремнии как части системы диэлектрик-полупроводник из-за наличия в ней упругих напряжений и электрических полей и их трансформации при радиационном воздействии.

Рассматриваются особенности конструкции и переноса тока в МДП элементах со встроенным и индуцированным каналом.

Описываются радиационные эффекты, происходящие в массивных кремниевых МДП элементах, и возможности полевого управления соответствующими эффектами.

Рассматриваются принципы функционирования основного приборного объекта диссертационной работы – КНИ полевого датчика Холла.

На основе проведенного анализа литературы определяются задачи исследований.

Во второй главе обосновывается использование выбранных методик исследований, приводятся основные данные об объектах исследований, а также видах и режимах радиационного воздействия.

В разделе 2.1 описываются объекты исследований, которыми являются КНИ структуры и основанные на их использовании полевые датчики Холла.

КНИ ПДХ по сути дела представляет собой магнитотранзистор со встроенным каналом и полевой управляющей системой типа металл – диэлектрик – полупроводник – диэлектрик – полупроводник – металл. Иными словами в его конструкции, в отличие от традиционного кремниевого МДП транзистора, содержится не одна, а две полевых управляющих МДП системы. Одной из управляющих полевых систем служит структура Al электрод - подзатворный диэлектрик - слой кремния (верхний затвор). Вторая образована встроенным диэлектриком, кремниевой подложкой и нанесенной на ее поверхность пленкой Al (нижний затвор). Отличительной особенностью ПДХ также является наличие двух дополнительных контактов к кремниевому каналу, служащих для измерения величины ЭДС Холла.

Схематически конструкция КНИ ПДХ приведена на рис. 1.

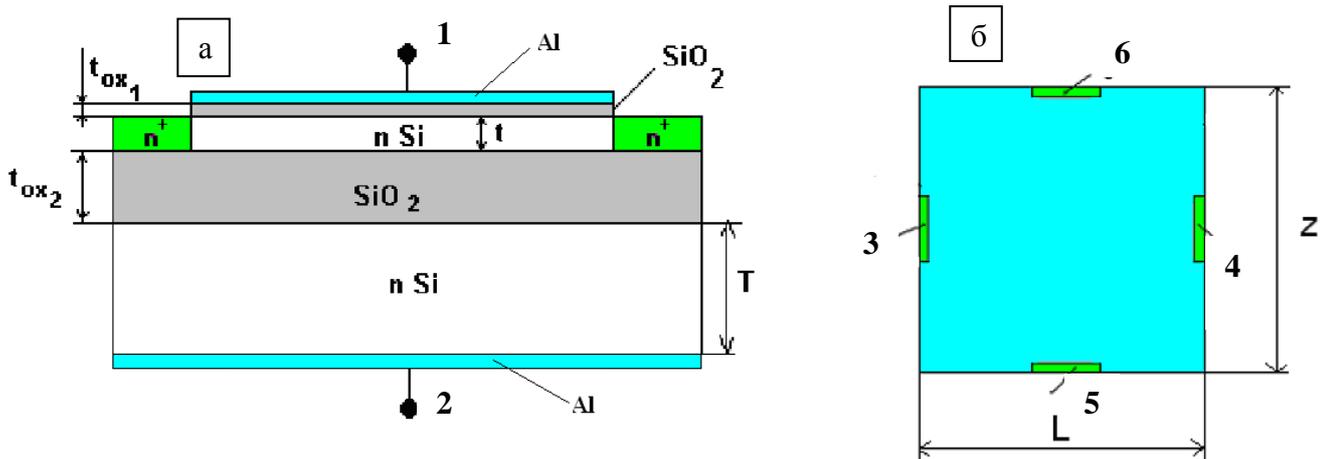


Рис.1. Конструкция КНИ ПДХ: а – поперечное сечение, б - вид сверху. 1,2 – контакты верхнего и нижнего затворов, 3,4 – токочные (омические) контакты, 5,6 - холловские контакты, $t = 0,2$ мкм – толщина рабочего слоя кремния, $t_{ox1} = 0,025$ мкм – толщина верхнего подзатворного диэлектрика, $t_{ox2} = 0,4$ мкм – толщина скрытого диэлектрика КНИ структуры, $T = 380$ мкм – толщина Si подложки, $L = 500$ мкм – длина кремниевого канала, $Z = 500$ мкм – ширина кремниевого канала.

Другим объектом исследований были КНИ структуры, изготовленные методом облучения кремниевых пластин ионами кислорода и высокотемпературного отжига. Характеристики компонентов структуры таковы: толщина слоя кремния $0,22 \dots 0,25$ мкм, скрытого диэлектрика (SiO_2) $0,4$ мкм, кремниевой подложки порядка 380 мкм. Слой кремния и кремниевая подложка характеризовались электронной проводимостью (n – типа), ориентацией (100) и удельным электрическим сопротивлением $10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

В разделе 2.2 описываются условия постановки экспериментов по исследованию структурных свойств и электрических характеристик слоя кремния и встроенного диэлектрика КНИ структуры.

Структурные свойства слоя кремния исследовались методами резерфордского обратного рассеяния ионов гелия, трехкристальной рентгеновской дифрактометрии и электронографии, электропроводность – четырехзондовым контактным методом.

С помощью кривых рентгенодифракционного отражения были построены профили деформации исследуемых образцов. Наличие на профиле деформации области с положительной или отрицательной деформацией говорит о накоплении дефектов междоузельной или вакансионной природы соответственно. Отсутствие осцилляций на кривой дифракционного отражения интерпретируется как полная аморфизация исследуемого образца.

Степень дефектности исследуемых образцов в методе резерфордовского обратного рассеяния оценивалась из сопоставления кривых отражения анализирующего пучка ионов He с энергией 2,0 МэВ в ориентированном и неориентированном режимах. В соответствии с общепринятым подходом за отражение анализирующего пучка ионов в ориентированном режиме прежде всего отвечают дефекты междоузельной природы.

С целью оценки дефектности тонкой, толщиной порядка сотых долей мкм, приповерхностной области слоя кремния КНИ структуры использовался метод электронографии «на отражение» в пучке электронов, скользящих вдоль поверхности исследуемого образца.

Величина заряда во встроенном диэлектрике КНИ структуры измерялась высокочастотным методом измерения вольт - фарадной характеристики перехода встроенный диэлектрик – слой кремния КНИ ПДХ при подаче переменного напряжения с частотой 1 МГц на его нижний затвор относительно соединенных вместе электродов питания и Холла.

В разделе 2.3 приводится описание методик исследования электрических и магнитных характеристик КНИ ПДХ.

Наличие в конструкции датчика двух затворов позволяет подавать напряжение на них как совместно, так независимо друг от друга. Подача напряжения только на верхний или только на нижний затвор позволяет реализовать случай, когда электрический ток будет преимущественно протекать либо вблизи границы слой кремния – подзатворный диэлектрик, либо вблизи границы со встроенным диэлектриком. Было показано, что при подаче напряжения на соединенные вместе затворы обеспечивается наибольшая крутизна нарастания тока в канале. Поэтому основной массив экспериментальных данных, посвященных исследованию поведения характеристик КНИ ПДХ, в т.ч. до и после радиационного воздействия, получен при подаче напряжения на соединенные вместе затворы.

При изучении переходной ионизационной реакции в канале элемента, вызванной воздействием импульсного излучения, реализовывалось два режима включения электродов. Первый режим – питание от генератора напряжений, второй – от генератора тока. В первом случае между электродами питания и на электрод верхнего затвора подавалось постоянное напряжение 5В, а во втором – внешним источником питания поддерживался постоянный ток (30 мкА).

В разделе 2.4 описываются условия облучения исследуемых образцов.

Образцы КНИ структур подвергались корпускулярному и фотонному облучению. В качестве корпускулярного было выбрано облучение ионами Ag^+ с энергией 100 кэВ. Это позволило практически полностью исключить прямое попадание внедряемых ионов во встроенный диэлектрик КНИ структуры, а следовательно в эксперименте было максимально минимизировано возможное изменение величин упругого и электрического полей встроенного диэлектрика в процессе облучения. Дозы облучения варьировались в пределах от $1 \cdot 10^{13}$ до $1 \cdot 10^{14}$ ион/см². В качестве фотонного облучения было выбрано гамма-излучение изотопа Co^{60} с энергией 1,6 МэВ, при мощности не более 300 рад/сек, дозой до 1 Мрад.

Образцы КНИ ПДХ были подвергнуты стационарному ионизирующему гамма-излучению Co^{60} с энергией 1,6 МэВ, импульсному лазерному излучению или корпускулярному воздействию (нейтроны).

Стационарное гамма-излучение изотопа Co^{60} проводилось при мощности не более 500 рад/сек, дозой до 10 Мрад. В процессе радиационного воздействия реализовывалось несколько режимов включения электродов КНИ ПДХ:

- напряжение на всех соединенных вместе электродах отсутствовало (автономный режим);
- напряжение подавалось на соединенные вместе электроды верхнего и нижнего затворов (-10 ... 10 В) относительно соединенных вместе электродов питания и Холла (пассивный режим);
- на соединенные вместе электроды верхнего и нижнего затвора подавалось напряжение от -10 до 10 В при напряжении между электродами питания от 1 до 10 В. В случае подачи на затворы напряжения положительной полярности через канал элемента протекает электрический ток (активно-открытый режим). Приложение на затворы напряжения ≤ 0 В обеспечивает отсутствие тока (активно-закрытый режим);
- напряжение на электроды верхнего и нижнего затвора подавалось независимо друг от друга. Часть образцов облучалась при положительном напряжении на электроде нижнего затвора (4,5В) и отсутствии напряжения на электроде верхнего затвора. Другие при подаче напряжения только на верхней затворной МДП системе (4,5 В). Напряжение между электродами питания в том и другом случае было равно 5 В.

В качестве источника импульсного излучения при исследовании переходной ионизационной реакции в канале КНИ ПДХ использовался лазерный имитатор «РАДОН-5М» с длиной волны 1,06 мкм. Воздействующий импульс имел колоколообразную форму с длительностью на полувысоте, равной 22 нс. В этом случае радиационно-индуцируемые изменения характеристик элементов будут происходить только за счет генерации в канале неравновесных носителей заряда. Это связано с тем, что пленки подзатворного и встроенного диэлектриков прозрачны для света с выбранной длиной волны, поэтому лазерный импульс не вызывает прямой ионизации диэлектрических слоев и, соответственно, не вызывает изменения величины их заряда [5].

На ядерном реакторе ИБР-2 (ОИЯИ, г. Дубна) были проведены эксперименты по облучению КНИ ПДХ быстрыми нейтронами. Плотность потока нейтронов лежала в диапазоне от $(5.1 \pm 0.2) 10^{13}$ до $(2,5 \pm 0.2) 10^{14}$ см⁻². Для уменьшения влияния гамма-фона реактора были использованы свинцовые фильтры, что позволило уменьшить дозу сопутствующего гамма-облучения на порядок величины. В процессе облучения нейтронами датчики находились в автономном режиме.

Выбор гамма и нейтронного излучений связан с требованиями по испытаниям на устойчивость изделий микроэлектроники к воздействию радиации, изложенными в ГОСТ РВ 20.39.414.2-97 и ГОСТ РВ 20.57.415-97.

Исследования с использованием лазерного имитатора проводились в соответствии с ГОСТ РВ 20.57.415-97 с учетом положений руководящего документа РД В 319.03.22-97.

Третья глава содержит описание основных результатов исследований особенностей радиационных эффектов во встроенном диэлектрике и в слое кремния КНИ структуры.

Раздел 3.1 посвящен исследованию влияния стационарного ионизирующего гамма-излучения дозой до 1 Мрад на характеристики встроенного диэлектрика КНИ структуры.

Показано, что воздействие гамма-излучения приводит к накоплению положительного радиационно-индуцированного заряда во встроенном диэлектрике, проявляющемуся в сдвиге вольт-фарадной характеристики перехода встроенный диэлектрик – слой кремния КНИ ПДХ влево вдоль оси напряжения на нижнем затворе.

С помощью эксперимента по инъекции электронов из массивной кремниевой подложки в предварительно облученный гамма-квантами Co^{60} КНИ ПДХ

продемонстрировано наличие во встроенном диэлектрическом слое ловушек заряда для электронов. На рис. 2 представлены вольт-фарадные характеристики перехода встроенный диэлектрик – слой кремния КНИ ПДХ в исходном состоянии, после гамма-облучения дозой 50 крад и последующей инжекции электронов. Видно, что после инжекции электронов во встроенный диэлектрик облученного гамма-квантами КНИ ПДХ вольт-фарадная характеристика не только возвращается к первоначальному положению, но и сдвигается относительно исходной кривой вправо вдоль оси напряжения на затворе. Это говорит о наличии во встроенном диэлектрике ловушек заряда для электронов. Очевидно, что положительный радиационно-индуцированный заряд во встроенном диэлектрике может быть нейтрализован путем инжекции электронов из кремниевой подложки. При этом благодаря наличию в конструкции КНИ ПДХ двух независимых полевых управляющих систем инжекция электронов может осуществляться и непосредственно в процессе радиационного воздействия как в импульсном, так и в стационарном режиме. Это вызовет увеличение стойкости элементов при воздействии стационарного ионизирующего излучения.

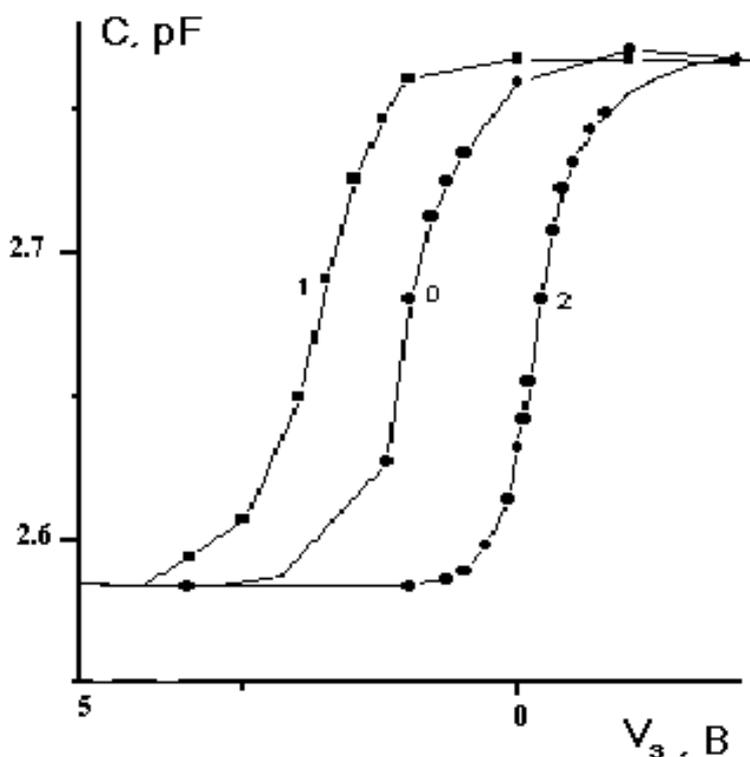


Рис.2. Вольт-фарадные характеристики перехода встроенный диэлектрик – слой кремния КНИ ПДХ в исходном состоянии (кривая 0), после гамма-облучения (кривая 1) и последующей инжекции электронов из подложки КНИ структуры во встроенный диэлектрик (кривая 2).

Раздел 3.2 посвящен исследованию особенностей радиационно-индуцируемого изменения структурных свойств слоя кремния КНИ структуры. С этой целью КНИ структуры и контрольные массивные монокристаллы кремния с аналогичными исходными электрофизическими характеристиками облучались ионами Ag^+ .

В результате проведенных исследований продемонстрировано, что вблизи внешней границы слоя кремния по сравнению с аналогичной областью массивного кристалла кремния, происходит ускорение процесса накопления дефектов вакансионного типа. Это приводит к тому, что потеря монокристалличности приповерхностной области слоя кремния КНИ структуры наступает при дозе облучения $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, в то время как появление на поверхности массивного кристалла кремния сильно нарушенной области наблюдается лишь при дозе облучения $8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

Обнаружено ускорение процесса накопления дефектов междуузельной природы вблизи границы раздела слой кремния – встроенный диэлектрик облученной КНИ структуры. На рис.3 представлены спектры резерфордовского обратного рассеяния слоя кремния и массивного кристалла кремния, облученных ионами Ag^+ , дозой $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (кривые 1 и 2) и дозой $8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (кривые 3 и 4). Видно, что в слое кремния вблизи границы со встроенным диэлектриком (0,22 мкм) количество дефектов, вызывающих отражение анализирующего пучка, превышает таковое для массивного монокристалла кремния. Очевидно, слой встроенного диэлектрика является барьером на пути движения радиационно-индуцированных междуузельных атомов вглубь подложки, что приводит к ускорению процесса накопления дефектов междуузельной природы вблизи границы раздела слой кремния – встроенный диэлектрик. Видно также, что область слоя кремния, содержащая большее количество дефектов междуузельной природы, по мере роста дозы облучения расширяется к поверхности.

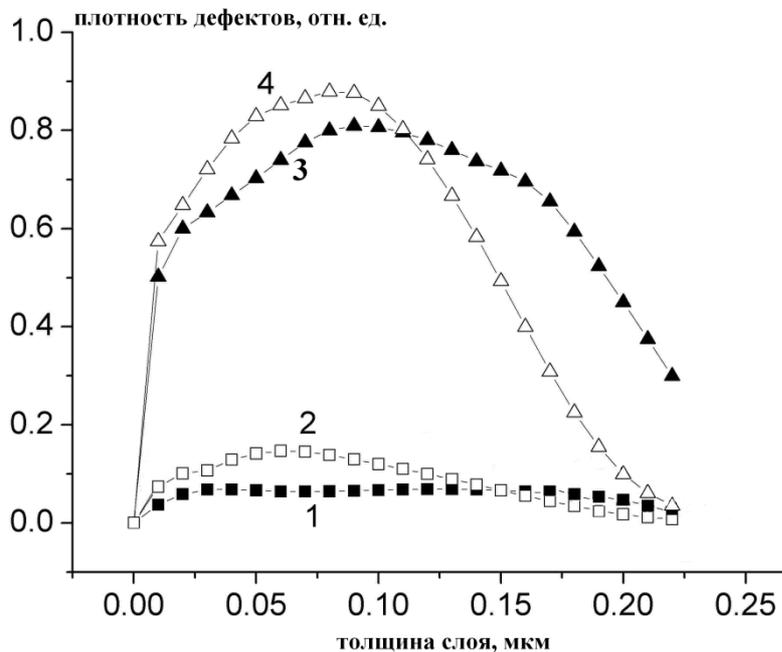


Рис. 3. Спектры резерфордовского обратного рассеяния ионов гелия на слое кремния КНИ структуры (кривые 1 и 3) и контрольном массивном кристалле Si (кривые 3 и 4), облученных ионами Ag^+ , дозой $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (кривые 1 и 2) и дозой $8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (кривые 3 и 4).

Ускорение процессов накопления дефектов междуузельной природы вблизи границы раздела слой кремния – встроенный диэлектрик и потери монокристалличности приповерхностной области могут быть связаны с воздействием упругого и электрического полей встроенного диэлектрика. Слой кремния у границы раздела со встроенным диэлектриком растянут [6]. Релаксация напряжений в этой области возможна путем ее обогащения междуузельными атомами. Очевидно, что радиационно-индуцируемые междуузельные атомы под воздействием упругого поля встроенного диэлектрика будут дрейфовать к нему и образовывать вблизи границы раздела устойчивые междуузельные дефекты. Противоположная ситуация складывается у внешней границы раздела слоя кремния. Его приповерхностная область сжата [6], что определяет преимущественную миграцию радиационно-индуцированных вакансий. В скрытом диэлектрике КНИ структуры в исходном состоянии (до облучения) имеется встроенный положительный заряд, величина которого в условиях эксперимента после облучения не должна существенно измениться. Безусловно, электрическое поле повлияет на пространственное распределение заряженных точечных радиационно-индуцированных дефектов. В частности, свободные вакансии, имеющие в кремнии n – типа проводимости одно- или двукратно отрицательное зарядовое состояние, будут притягиваться к границе раздела слой кремния – встроенный диэлектрик.

Положительно заряженные междоузельные атомы будут стремиться диффундировать к внешней границе слоя кремния КНИ структуры. Таким образом, очевидно, что электрическое и упругое поля встроенного диэлектрика на первичные радиационные дефекты в слое кремния КНИ структуры действует разнонаправлено. Исходя из экспериментальных данных, можно сделать вывод о том, что дефектообразование в слое кремния определяется, прежде всего, влиянием упругого, а не электрического поля встроенного диэлектрика.

Из общих физических соображений очевидно, что наличие встроенного диэлектрика, являющегося барьером для радиационно-индуцированных междоузельных атомов, будет способствовать ускорению процессов аннигиляции вакансий и междоузельных атомов между собой. Это должно привести к увеличению дозы, необходимой для полной аморфизации слоя кремния по сравнению с массивным кристаллом кремния. В тоже время наличие вблизи границы раздела слой кремния – встроенный диэлектрик области, обогащенной дефектами междоузельной природы, будет препятствовать расширению приповерхностной области, обогащенной вакансионными дефектами, вглубь слоя кремния КНИ структуры. Названный механизм также способствует увеличению дозы полной аморфизации слоя кремния по сравнению с аналогичной величиной для массивного монокристалла кремния. Это подтверждается экспериментальными данными, согласно которым доза ионов Ag^+ с энергией 100 кэВ, необходимых для полной аморфизации слоя кремния КНИ структуры, по крайней мере, на 25% превышает таковую величину для массивного кристалла кремния.

Раздел 3.3 посвящен обсуждению результатов исследования влияния стационарного ионизирующего излучения Co^{60} дозой до 1 Мрад на изменение электропроводности слоя кремния КНИ структуры.

На рис. 4 представлены значения электропроводности слоя кремния и массивного кристалла кремния, в качестве которого выступала кремниевая подложка КНИ структуры, после гамма-облучения различными дозами. Видно, что гамма-излучение не повлияло на электропроводность кремниевой подложки, в то время как электропроводность слоя кремния заметно уменьшается уже при небольших дозах и стремится к насыщению с увеличением дозы гамма-лучей.

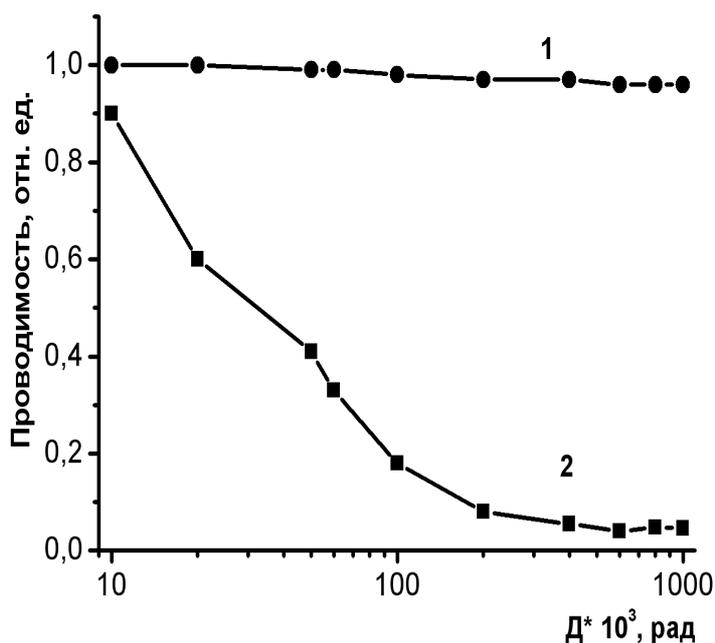


Рис.4. Дозовые зависимости относительных изменений проводимости: 1) кремниевой подложки КНИ структуры; 2) слоя кремния КНИ структуры.

Известно, что значение электропроводности определяется концентрацией носителей и их подвижностью [3]. Установлено [7], что при облучении массивного кристалла кремния любыми видами радиации уменьшение его электропроводности в первую очередь связано с изменением концентрации носителей. Причина заключается в генерации заряженных радиационных дефектов структуры типа вакансии – примесный атом или вакансии – вакансии. В связи с тем, что гамма – излучение не вызывает изменений электропроводности массивной кремниевой подложки, очевидно, что наблюдаемое изменение электропроводности слоя кремния не может быть объяснено генерацией заряженных дефектов структуры, вызывающих изменения электропроводности массивного монокристалла кремния [8]. Это может быть связано с уменьшением пороговой энергии дефектообразования у внешней поверхности слоя кремния [9] и на границе его раздела с диэлектриком [10]. Действительно, как было установлено в эксперименте по воздействию ионного облучения (разделе 3.2), в слое кремния КНИ структуры наблюдается увеличение скорости накопления дефектов вакансионной природы вблизи поверхности и междоузельной на границе раздела слой кремния – встроенный диэлектрик. Насыщение может быть связано с влиянием электрического поля встроенного диэлектрика. В экспериментах по ионному облучению, представленных в предыдущем разделе, было показано, что при облучении ионами воздействие упругого поля встроенного диэлектрика превалирует над влиянием электрического. Данный эксперимент был поставлен таким образом, чтобы в процессе радиационного воздействия силовые поля заметно не изменялись. В случае воздействия гамма-излучения величина положительного заряда встроенного диэлектрика увеличивается с ростом дозы облучения (раздел 3.1), упругое же поле при этом остается практически неизменным. Очевидно, что в области малых доз гамма-излучения воздействие упругого поля превалирует над воздействием электрического, а с ростом дозы влияние электрического поля усиливается. Как следствие, с ростом дозы гамма-излучения усиливается дрейф радиационно-индуцированных отрицательно-заряженных вакансий к границе раздела слой кремния – встроенный диэлектрик и положительно-заряженных междоузельных атомов к внешней границе слоя. В результате происходит аннигиляция радиационно-индуцированных вакансий и междоузельных атомов с существующими там дефектами междоузельного и вакансионного типа соответственно.

В четвертой главе обобщаются результаты теоретического моделирования характеристик КНИ двухзатворных элементов со встроенным каналом и экспериментальных исследований радиационных эффектов в КНИ ПДХ при воздействии стационарного излучения.

Раздел 4.1 посвящен теоретическому моделированию зависимости концентрации носителей заряда поперек кремниевого слоя КНИ МДПДМ элементов от величин напряжений на затворах и заряда во встроенном и подзатворном диэлектриках. Моделирование проводилось с помощью решения уравнения Пуассона в условиях отсутствия тока в слое кремния. Связь концентраций электронов и дырок с потенциалом поперек слоя кремния определяется в общем случае интегралом Ферми, который в невырожденном случае приводит к статистике Больцмана.

В результате проведенного моделирования показано, что изменение величины и знака напряжения на затворах КНИ МДПДМ элемента, а также величины заряда в диэлектриках приводит к перераспределению носителей поперек слоя кремния и сопровождается как изменениями их концентрации в токопроводящих областях, так и изменениями толщины соответствующих токопроводящих областей. В слое кремния можно выделить три области с различным содержанием концентрации носителей: две

области, находящиеся вблизи границ раздела слоя кремния, и одна область вблизи центральной части кремниевого канала.

Установлено, что в КНИ МДПДМ элементе существует возможность изменения концентрации носителей в слое кремния за счет подачи напряжения только на верхний или только на нижний затвор.

Показано, что изменение заряда только во встроенном или только в подзатворном диэлектрике количественно различным образом сказывается на распределении концентрации носителей в слое кремния. Это связано с различием в толщинах подзатворного и встроенного диэлектриков (0,025 и 0,4 мкм соответственно). Следовательно, изменение величины заряда в диэлектриках КНИ ПДХ при воздействии стационарного ионизирующего излучения приведет к изменению величины тока канала и холловского сигнала.

Раздел 4.2 посвящен экспериментальным исследованиям исходных (до воздействия излучения) электрических характеристик КНИ ПДХ при различных режимах подачи напряжения на его электроды. Приводятся вольт-амперные, ток-затворные и холл-затворные характеристики элементов в условиях одновременной подачи равного по величине и знаку напряжения на затворы. Показано, что измеренные зависимости носят типично транзисторный вид. В частности на вольт-амперных зависимостях можно выделить линейный (омический) участок и область насыщения.

Продемонстрировано, что при росте напряжения на затворах происходит увеличение величины тока канала. На холл-затворной характеристике, начиная с величины напряжения на затворах, примерно равного напряжению на электродах питания, в отличие от тока канала ЭДС Холла перестает возрастать и даже начинает несколько убывать. Подобное поведение связано с изменением холловской подвижности носителей в сильных поперечных полях [3].

Определена возможность управления характеристиками исследуемого датчика за счет приложения напряжения только на верхний, или только на нижний затвор. Этот вывод подтверждает результаты теоретического моделирования, результаты которого представлены в разделе 4.1.

Продемонстрировано, что форма вольт-амперных, ток-затворных и холл-затворных характеристик не зависит от того, на какой из затворов подается напряжение.

Раздел 4.3 посвящен экспериментальным исследованиям влияния стационарного ионизирующего гамма-излучения Co^{60} дозой до 10 Мрад на характеристики КНИ полевых датчиков Холла.

В разделе приводятся данные о влиянии гамма-излучения на электрические характеристики элементов, находившихся в процессе облучения в автономном режиме. Показано, что воздействие излучения приводит к монотонному сдвигу ток-затворной и соответствующей ей холловской характеристик влево вдоль затворного смещения. Это может быть объяснено накоплением положительного радиационно-индуцированного заряда в диэлектриках.

Раздел 4.4 посвящен экспериментальному исследованию влияния схемы включения электродов на изменение характеристик КНИ ПДХ при стационарном ионизирующем гамма-облучении.

На рис. 5 представлены ток-затворные характеристики до и после облучения. Видно, что в результате облучения ток-затворные характеристики сдвигаются влево вдоль оси затворного смещения вне зависимости от режима включения. Величины сдвигов различны, что говорит о разном значении накопленного в диэлектриках радиационно-индуцированного заряда. Наибольший сдвиг характеристик наблюдается

в пассивном режиме облучения, наименьший в активно-закрытом. Аналогичное поведение характерно для холл-затворных характеристик. Различия в величине сдвига при облучении в активно-открытом и активно-закрытом режимах связаны как с возможностью захвата электронов, протекающих по каналу, на электронные ловушки заряда [11], находящиеся во встроенном диэлектрике, так и с изменением кинетики накопления положительного заряда во встроенном и подзатворном диэлектриках в зависимости от величины и знака напряжения на затворах в процессе гамма-облучения.

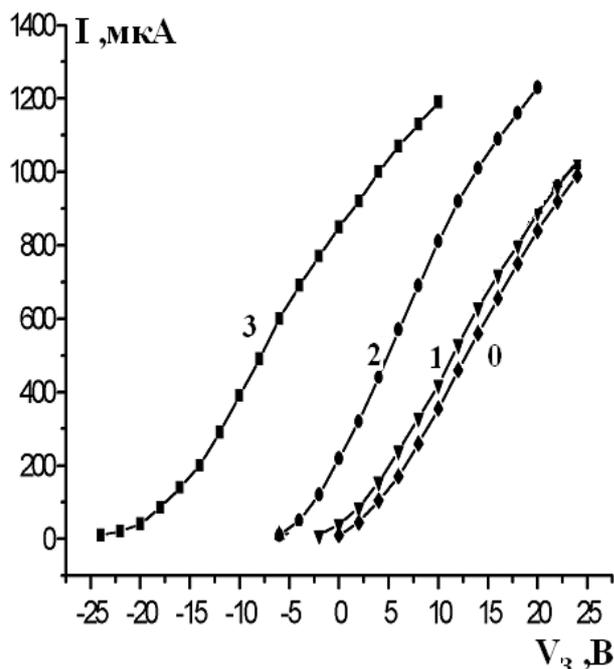


Рис.5. Ток-затворные характеристики КНИ ПДХ в исходном (кривая 0) и после облучения гамма-квантами дозой 50 крад в различных режимах: 1) активно-закрытый, $V_3^{обл}=0$, $V_n^{обл}=9В$; 2) активно-открытый, $V_3^{обл}=V_n^{обл}=9В$; 3) пассивный, $V_3^{обл}=9В$, $V_n^{обл}=0$.

Исследовано поведение тока канала и ЭДС Холла КНИ ПДХ, облученных при различных напряжениях на затворе в пассивном режиме. Показано, что рост величины положительного напряжения на затворах элемента, подаваемого в процессе радиационного воздействия, приводит к увеличению радиационно-индуцируемого изменения тока канала и ЭДС Холла. Очевидно, что положительное напряжение на затворах способствует уменьшению аннигиляции в диэлектриках радиационно-индуцируемых электронов и дырок и усилению дрейфа неравновесных дырок из объема окисла к границе SiO_2/Si . Это автоматически приводит к более значительному изменению характеристик КНИ ПДХ в результате облучения.

В отличие от зависимости величины тока канала от дозы гамма-облучения соответствующая ей холловская характеристика носит экстремальный характер, причем с увеличением величины положительного напряжения на затворах, подаваемого в процессе облучения, положение максимума холл-затворной кривой сдвигается в сторону меньших доз облучения. На рис.6 представлены дозовые зависимости холловского сигнала, снятые в определенной рабочей точке (при напряжении между электродами питания $V_n=10В$ и напряжении на затворах $V_3=0В$). В процессе облучения КНИ ПДХ находились в пассивном режиме при напряжении на затворах элемента 0, 3 или 9 В.

Экстремальное поведение холловских кривых объясняется следующим. Первоначальный рост ЭДС Холла обусловлен накоплением положительного заряда в окислах КНИ ПДХ, уменьшение после прохождения максимума связано с уменьшением подвижности носителей заряда из-за их рассеяния на поверхностных состояниях у межфазных границ.

В пределах линейного (омического) участка вольт-амперной характеристики имеет место очевидное соотношение [3]:

$$E_x / E_y = \mu_x B,$$

где μ_x – холловская подвижность электронов, E_x – напряженность поперечного (холловского) электрического поля, E_y – напряженность продольного (питающего) электрического поля, B – напряженность действующего на ПДХ магнитного поля.

Для E_x и E_y в линейной области можно записать:

$$E_x = V_n / L, \quad E_y = V_x / Z,$$

где L и Z – длина и ширина кремниевого канала КНИ ПДХ соответственно, V_n , V_x – напряжения между электродами питания и холловскими электродами.

Следовательно,

$$\mu_x = V_n Z / (V_x L B).$$

Полученные с помощью этого выражения дозовые зависимости холловской подвижности электронов в канале КНИ ПДХ приведены на рис.7. Видно, что облучение в пассивном режиме вызывает плавное понижение подвижности, более ярко выраженное при повышенных напряжениях на затворах.

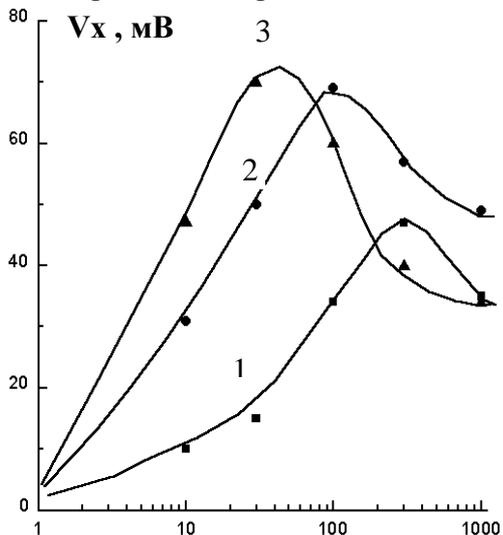


Рис.6. Дозовые зависимости величины холловского сигнала в определенной рабочей точке КНИ ПДХ, облученных в пассивном режиме: 1) $V_3^{obl} = 0V$; 2) $V_3^{obl} = 3V$; 3) $V_3^{obl} = 9V$.

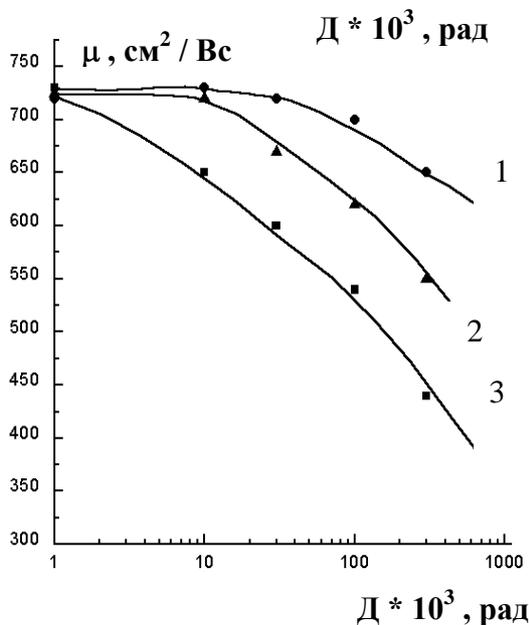


Рис.7. Дозовые зависимости изменения подвижности электронов при различных поперечных смещениях КНИ ПДХ в процессе облучения в пассивном режиме: 1) $V_3^{obl} = 0$; 2) $V_3^{obl} = 3V$; 3) $V_3^{obl} = 9V$.

Раздел 4.5 посвящен исследованию возможности управления радиационно-индуцируемым изменением характеристик КНИ ПДХ за счет приложения в процессе облучения смещения на его затворы независимо друг от друга.

В результате проведенных исследований продемонстрировано, что для управления радиационными эффектами в КНИ ПДХ может использоваться как полевая система слой кремния – подзатворный диэлектрик, так и МДП система, образованная встроенным диэлектриком и кремниевой подложкой. С точки зрения минимизации радиационно-индуцируемых изменений режим облучения, при котором в процессе облучения подается напряжение смещения только на нижний затвор, является более предпочтительным по сравнению с подачей управляющего напряжения только на верхний. Это связано с различной природой и толщиной встроенного и подзатворного диэлектриков.

В разделе 4.6 приводятся результаты эксперимента по исследованию влияния быстрых нейтронов на характеристики КНИ ПДХ.

Продемонстрировано, что облучение быстрыми нейтронами с максимальной использованной плотностью потока $2.5 \cdot 10^{14}$ н/см² приводит к незначительному увеличению величины ЭДС Холла. Это связано с влиянием не нейтронного излучения, а сопутствующего ему гамма-фона. Известно, что радиационные дефекты, возникающие в n-кремнии при нейтронном облучении и влияющие на его проводимость, являются акцепторами, вызывающими увеличение удельного сопротивления. При использованном нами плотности потока нейтронов удельное сопротивление слоя кремния n-типа проводимости должно было бы возрасти на несколько порядков величины [12] и столь же сильно должны уменьшиться ток и ЭДС Холла. Однако, как установлено, ничего похожего не происходит. Следовательно, при прочих равных условиях скорость генерации заряженных радиационных дефектов в слое кремния КНИ структуры на порядок величины меньше, чем в массивных кристаллах кремния. Эти результаты также подтверждают сделанный в главе 3 вывод о том, что скорость накопления радиационных дефектов в слое кремния гораздо меньше, чем в массивных монокристаллах. Очевидно, обнаруженная неспособность смещенных облучением междоузельных атомов преодолеть слой скрытого диэлектрика (раздел 3.2.) резко интенсифицирует их рекомбинацию с вакансиями, что подавляет образование заряженных дефектов.

В пятой главе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований, посвященных анализу влияния импульсного ионизирующего излучения на характеристики КНИ ПДХ.

Раздел 5.1 посвящен моделированию релаксационных эффектов в канале КНИ двухзатворных микроэлектронных элементов со встроенным каналом при воздействии импульсного ионизирующего излучения. В основе моделирования лежит решение уравнений непрерывности для электронов и дырок и уравнения Пуассона:

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= (1/q)\Delta J_n + G_n - V_n; \\ J_n &= q(\mu_n n E + D_n \Delta n); \\ \frac{dp}{dt} &= -(1/q)\Delta J_p + G_p - V_p; \\ J_p &= q(\mu_p p E + D_p \Delta p); \\ J &= J_p + J_n + J_{cm}; \\ \Delta^2 \varphi &= \Delta E = (q/\epsilon_n \epsilon_0)(p + N_d - n - N_a), \end{aligned}$$

где q – заряд электрона; n , p – концентрации электронов и дырок; φ – электростатический потенциал; E – напряженность электрического поля; D_n , D_p –

коэффициенты диффузии электронов и дырок; μ_n, μ_p – подвижности электронов и дырок; ϵ_n – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; G_n, G_p – скорости генерации электронов и дырок; V_n, V_p – скорости рекомбинации электронов и дырок; J – плотность полного тока; J_n, J_p – плотности токов электронов и дырок; $J_{cm} = -\epsilon\epsilon_0(d/dt)\Delta\phi$ – плотность тока смещения; N_d, N_a – концентрации ионизированных донорной и акцепторной примесей.

Скорость генерации электронов и дырок G_n и G_p определяются в соответствии с выражением:

$$G(t) = g_0 P_\gamma(t),$$

где g_0 – эффективность ионизации, составляющая $4,3 \cdot 10^{13}$ пар/(см³·рад) для кремния; P_γ – мощности поглощенной дозы ионизирующего излучения.

Интегральная скорость рекомбинации носителей рассчитывается с учетом механизма Шокли-Рида-Холла и Оже-рекомбинации и описывается зависимостью:

$$V = (pn - n_i^2)(1/(\tau_p(n + n_i) + \tau_n(p + n_i)) + C_n n + C_p p),$$

где n_i – собственная концентрация носителей заряда; τ_n, τ_p – время жизни носителей в модели Шокли-Рида; C_n, C_p – коэффициенты Оже-рекомбинации.

Граничные условия, необходимые для решения уравнений непрерывности для электронов и дырок и уравнения Пуассона, следующие:

- на свободной поверхности полупроводниковой структуры нормальные составляющие электронного и дырочного тока определяются процессами генерации-рекомбинации,

- нормальная составляющая электрического поля (при отсутствии у поверхности внешних источников поля) равна $E_n = -d\phi/dt = 0$,

- в области контакта кремния с диэлектриком значение поля определяется из условия: $\epsilon_n \epsilon_0 E_{np} - \epsilon_d \epsilon_0 E_{nd} = -Q_{пов}$, $E_{tp} = E_{td}$, где E_{tp}, E_{td} – тангенциальные составляющие векторов напряженности электрического поля в полупроводнике и диэлектрике; E_{np}, E_{nd} – нормальные составляющие векторов напряженности электрического поля в полупроводнике и диэлектрике; $Q_{пов}$ – плотность заряда на единицу поверхности на границе раздела диэлектрик-полупроводник; ϵ_d – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

ЭДС Холла равна:

$$V_x = R_x \cdot J_x \cdot Z \cdot B,$$

где R_x – коэффициент Холла; Z – ширина канала; B – напряженность магнитного поля.

Моделирование проводилось для работы элементов от источника напряжений. В результате продемонстрировано, что действие импульса ионизирующего излучения приводит к изменению проводимости канала и проявляется в форме временного увеличения тока и изменения ЭДС на Холловских контактах.

На рис. 8 приведены характерные расчетные временные зависимости тока канала при различных значениях максимальной мощности поглощенной дозы ионизирующего излучения. В этих расчетах значение электрических параметров канала были выбраны близкими к реальному КНИ ПДХ (концентрация электронов $5 \cdot 10^{14}$ см⁻³, время жизни электронов 1 мкс, дырок – 0,3 мкс). Видно, что форма импульса тока в области малых времен релаксации практически повторяет форму импульса ионизирующего излучения

и в дальнейшем характеризуется медленным спадом длительностью до нескольких десятков мкс, зависящим от мощности дозы ионизирующего излучения. Это может быть объяснено тем, что основная часть радиационно-индуцированных носителей заряда исчезает в течение небольшого промежутка времени после воздействия излучения за счет рекомбинации носителей заряда между собой. При этом, незначительная часть радиационно-индуцированных носителей заряда, прежде всего электронов, имеет возможность избежать рекомбинации. Концентрация соответствующих неравновесных носителей заряда с течением времени убывает медленно за счет их рекомбинации на дефектных центрах.

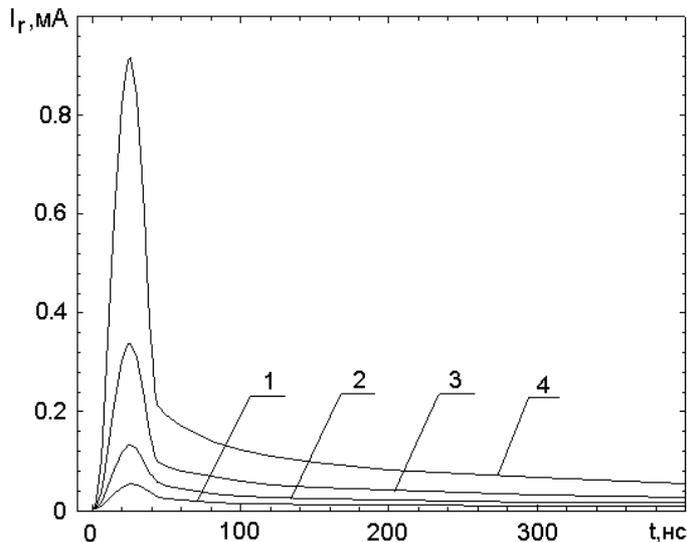


Рис. 8. Временные зависимости тока через канал двухзатворных КНИ микроэлектронных элементов со встроенным каналом при различных значениях максимальной мощности поглощенной дозы ионизирующего излучения: 1) $3 \cdot 10^{10}$, 2) 10^{11} , 3) $3 \cdot 10^{11}$ и 4) 10^{12} рад/с.

Показано, что отклик ЭДС Холла имеет немонотонный характер. Во время и сразу после воздействия импульса проводимость канала имеет биполярный характер, концентрации электронов и дырок велики и близки между собой, холловская чувствительность практически падает до нуля, так как $n \approx p$ и $\mu_n \approx \mu_p$. В этом случае коэффициент Холла записывается как $R_H = r/q(p - b^2n)/(p + bn)^2$, где r – коэффициент рассеяния, определяемый доминирующим механизмом рассеяния (при рассеянии на ионизированных примесях равен 1,93); $b = \mu_n/\mu_p$ – отношение подвижностей электронов и дырок. По мере снижения концентрации неравновесных носителей проводимость становится монополярной (электронной), и холловская чувствительность не только восстанавливается, но в течение небольшого промежутка времени превышает ее стационарное значение. Это связано с тем фактом, что достаточно большой промежуток времени ток превышает свое равновесное значение и дальнейшая релаксационная кривая ЭДС Холла повторяет релаксационное поведение тока. При $n \gg p$ коэффициент Холла записывается как $R_H = r/q \mu_n n$.

Определено, что время восстановления холловской чувствительности моделируемых элементов в пределах 10% от стационарного значения зависит от мощности импульса излучения и составляет не более 20 мкс при максимальной принятой в расчете мощности 10^{12} рад/с. При этом время, в течение которого элемент полностью неработоспособен ($K_H \approx 0$), составляет около 3 мкс. На рис. 9 представлена временная зависимость холловской чувствительности КНИ микроэлектронного элемента со встроенным каналом при воздействии импульса ионизирующего излучения с мощностью 10^{12} рад/с.

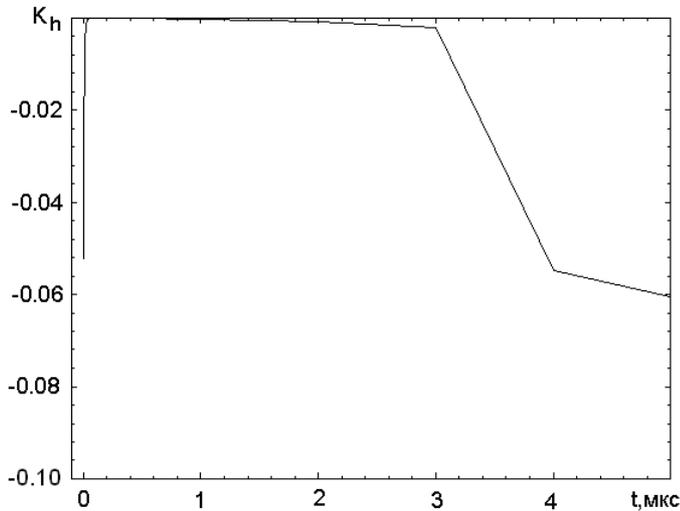


Рис.9. Расчетная временная зависимость ЭДС Холла двухзатворного КНИ микроэлектронного элемента со встроенным каналом при воздействии импульса ионизирующего излучения с максимальной мощностью 10^{12} рад/с.

Очевидно, что с помощью описанной выше процедуры моделирования можно оценить предельную рабочую частоту функционирования элементов с управляющей полевой системой типа металл – диэлектрик – полупроводник – диэлектрик – металл при которой релаксационные процессы, вызываемые импульсным ионизирующим воздействием, не повлияют на работоспособность подобных приборов.

Раздел 5.2 посвящен результатам экспериментальных исследований релаксационных эффектов в канале КНИ ПДХ, вызываемых лазерным импульсным излучением с длиной волны 1,06 мкм мощностью $3 \cdot 10^9$ или 10^{10} рад/с.

На рис. 10 представлена временная зависимость тока канала КНИ ПДХ, включенного в режим работы от источника постоянного напряжения питания, равного 5 В, при воздействии импульса ионизирующего излучения с уровнем 10^{10} рад/с. Видно, что время восстановления тока составляет порядка 2 мкс. В случае воздействия импульса ионизирующего излучения при мощности $3 \cdot 10^9$ рад/с время восстановления составляет порядка 1,5 мкс.

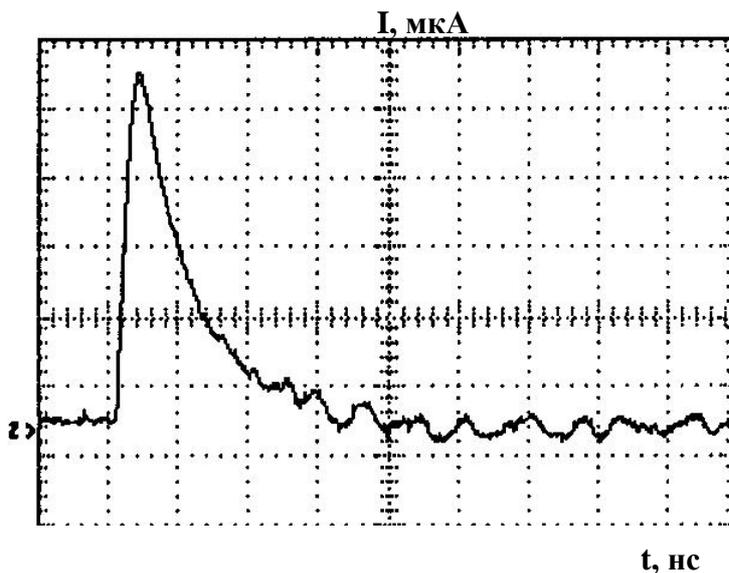


Рис. 10. Временная зависимость тока через канал КНИ ПДХ, включенного в режим работы от источника постоянного напряжения питания (5 В), при воздействии ионизирующего излучения с мощностью 10^{10} рад/с. Одно деление по оси X равно 100 нс.

На рис. 11 представлена временная зависимость ЭДС Холла КНИ ПДХ, включенного в режим работы от источника постоянного напряжения питания (5 В),

при воздействии импульса ионизирующего излучения с уровнем 10^{10} рад/с. Видно, что время релаксации ЭДС Холла КНИ ПДХ составляет около 3 мкс.

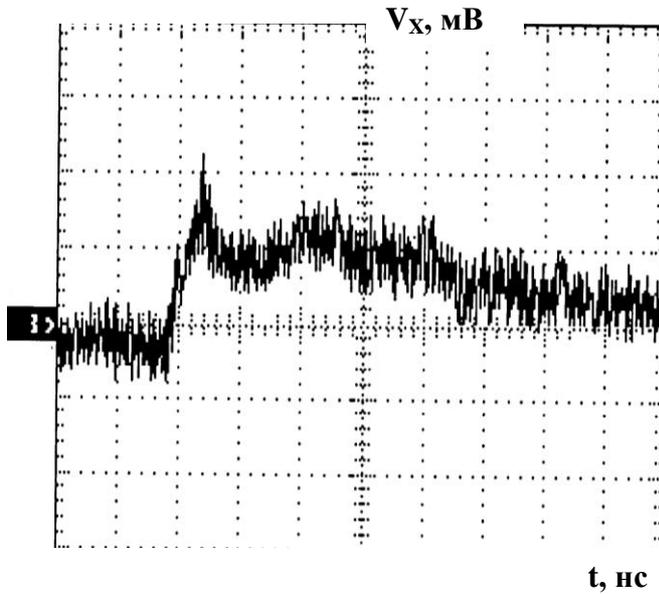


Рис. 11. Временная зависимость ЭДС Холла КНИ ПДХ, включенного в режим работы от источника постоянного напряжения питания (5В), при воздействии ионизирующего излучения с мощностью 10^{10} рад/с. Одно деление по оси X равно 100 нс.

Очевидно, что представленные выше экспериментальные результаты удовлетворительно согласуются с результатами проведенного в предыдущем разделе численного моделирования.

С целью поиска наиболее оптимального режима включения при импульсном ионизирующем воздействии была исследована реакция на электродах Холла КНИ ПДХ, включенного в режим питания от генератора тока (постоянная величина тока, протекающего по каналу, равна 30 мкА).

На рис. 12 представлена временная зависимость ЭДС Холла КНИ ПДХ, включенного в режим работы от источника тока, при воздействии импульса лазерного излучения с уровнем 10^{10} рад/с. Видно, что время восстановления ЭДС Холла составляет примерно 1,5 мкс, что существенно меньше такой величины при включении в режим генератора напряжений. Следовательно, включение в режим генератора тока, по сравнению с включением в традиционный для датчиков Холла режим генератора напряжений, позволяет уменьшить время релаксации его характеристик.

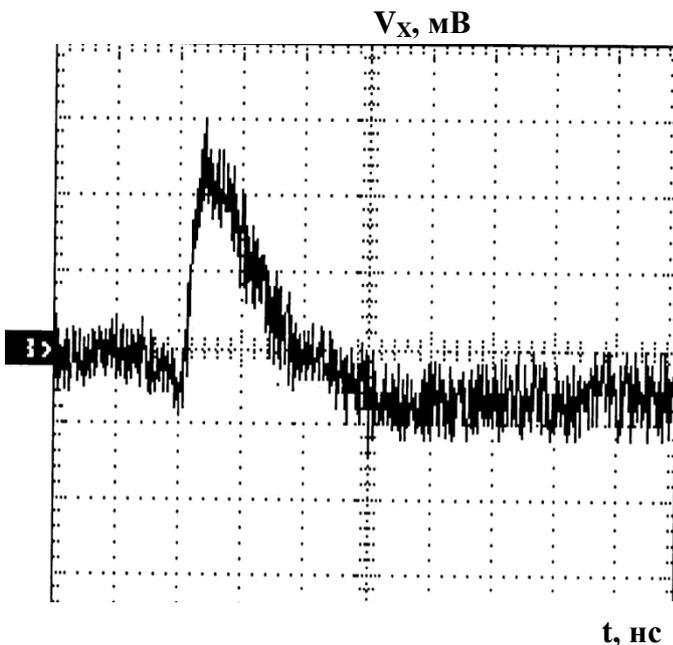


Рис.13. Временная зависимость ЭДС Холла КНИ ПДХ, включенного в режим работы от источника тока, при воздействии ионизирующего излучения с уровнем 10^{10} рад/с. Одно деление по оси X составляет 100 нс.

Основные выводы.

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.

3. При имплантации ионов Ag^+ с энергией 100 кэВ доза полной аморфизации слоя кремния КНИ структуры как минимум на 25% превышает таковую для массивного монокристалла кремния.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Предложен способ включения электродов КНИ полевых датчиков Холла, при котором наблюдается увеличение его стойкости к воздействию стационарного ионизирующего гамма-излучения.

8. Впервые предложен способ увеличения стойкости двухзатворных КНИ элементов к стационарному ионизирующему воздействию путем инъекции электронов из кремниевой подложки в слой скрытого диэлектрика в процессе радиационного воздействия.

9. 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.

10. 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.

11. Показано, что радиационная устойчивость КНИ ПДХ при воздействии импульсного ионизирующего излучения в режиме генератора тока превышает таковую для режима генератора напряжений.

Основные результаты по теме диссертации отражены в публикациях:

1. Mokrushin A.D., Omeljanovskaja N.M., Leonov A.V., Mordkovich V.N., Pazhin D.M. Radiation effects in SOI magnetic sensitive elements under different radiation conditions: Conference abstracts. / NATO Advanced Research Workshop "Progress in

- semiconductor –on-insulator structures and devices operating at extreme conditions”.
– Kiyv, 2000. – P. 44–45.
2. Мокрушин А.Д., Омеляновская Н.М., Леонов А.В., Мордкович В.Н., Пажин Д.М. Радиационные эффекты в МОП элементах на основе объемного кремния и КНИ структуры: Научно-технический сборник тезисов докладов Российской научной конференции / Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2001”. – Лыткарино, 2001. – С. 121–122.
 3. Мокрушин А.Д., Омеляновская Н.М., Леонов А.В., Мордкович В.Н., Пажин Д.М. Радиационные эффекты в КНИ – магниточувствительных элементах при различных условиях облучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2001. – Вып. 1-2. – С. 77–81.
 4. Мокрушин А.Д., Омеляновская Н.М., Леонов А.В., Мордкович В.Н., Пажин Д.М. Радиационные эффекты в МОП-элементах на основе объемного кремния и КНИ-структуры // Вопросы атомной науки и техники. Серия Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2002. – Вып. 1-2. – С. 67-71.
 5. Мордкович В.Н., Бараночников М.Л., Леонов А.В., Мокрушин А.Д., Омеляновская Н.М., Пажин Д.М. Полевой датчик Холла на основе структур «кремний на изоляторе» // Микросистемная техника. – 2002. – № 10. – С. 8–12.
 6. Mokrushin A.D., Omeljanovskaja N.M., Leonov .A.V., Mordkovich V.N., Pazhin D.M. Radiation effects in SOI magnetic sensitive elements under different radiation conditions //Progress in semiconductor –on-insulator structures and devices operating at extreme conditions; Edited by F. Balestra, A. Nazarov and V.S. Lysenko. – Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 2002. – Vol. 58. – P. 221–227.
 7. Мордкович В.Н., Бараночников М.Л., Леонов А.В., Мокрушин А.Д., Омеляновская Н.М., Пажин Д.М. Полевой датчик холла – новый тип преобразователя магнитного поля // Датчики и системы. – 2003. № 7. – С. 33–38.
 8. Мордкович В.Н., Бараночников М.Л., Леонов А.В., Мокрушин А.Д., Омеляновская Н.М., Пажин Д.М. Новый магнито-чувствительный элемент – полевой датчик Холла // Инженер, технолог, рабочий. – 2004. – № 4. – С. 22 – 24.
 9. Мордкович В.Н., Бараночников М.Л., Леонов А.В., Мокрушин А.Д., Омеляновская Н.М., Пажин Д.М. Полевой датчик Холла – новый перспективный магниточувствительный элемент // Наука – производству. – 2004. – № 3. – С. 7-11.
 10. Щербачев К.Д., Бублик В.Т., Мордкович В.Н., Пажин Д.М. Изменение структуры кремния после имплантации ионов Ag // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2004. № 4. - С. 71-74.
 11. Mordkovich V.N., Pazhin D.M., Shchrbachev K.D., Bublik V.T., Kuripjatnik A.V., Pokhil G.P., Phridman V.B.. Peculiarities of radiation defects formation in Si layer of «silicon-on-insulator» structures: Thesis of the conference / 10th International Conference on Extended defects in Semiconductors (EDS-2004). – Chernogolovka, 2004. – P. 22–24.
 12. Бараночников М.Л., Леонов А.В., Мальцев П.П., Мокрушин А.Д., Мордкович В.Н., Омеляновская Н.М., Пажин Д.М. Полевой датчик Холла на основе структур "Кремний-На-Изоляторе": Сб. ст. //Мир электроники. под редакцией Мальцева П.П. – М.: Техносфера, 2005. – С. 436–444.

13. Mordkovich V.N., Pazgin D.M.. Peculiarities of radiation defects formation in Si of SOI structures: Conference abstracts / NATO Advanced Research Workshop "Science and Technology of Semiconductor-On-Insulator Structures and Devices Operating in a Harsh Environment". – Kyiv, 2005. – P. 60–61.
14. Shcherbachev K. D., Bublik V. T., Mordkovich V. N. and Pazhin D. M. The influence of photoexcitation in situ on a generation of defect structure during ion implantation into Si substrates // *J. of Physics D: Appl. Phys.* – 2005. – № 38 (10A). – P. A126–A131.
15. Щербачев К.Д., Бублик В.Т., Мордкович В.Н., Пажин Д.М. Особенности радиационно-индуцированного изменения структурных свойств кремния, находящегося под воздействием упругого и электрического полей // *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* – 2006. – № 2. – С. 64–68.
16. Мордкович В.Н., Пажин Д.М. Новый магниточувствительный элемент для приборов измерения магнитного поля: Сб. труд. / Ежегодник Российского Национального комитета по защите от неионизирующих излучений. – М.: Алана, 2006. – С. 150–153.
17. Baranochnikov M.L., Leonov A.V., Mokrushin A.D., Mordkovich V.N., Omelianovskaya N.M., Pazhin D.M., Goncharov V.P., Filatov M.M. Controllable highly sensitive silicon Hall element with improved reliability under extreme conditions: Thesis of International Symposium / 7-th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. – Saint-Petersburg, 2007. – P. 241–242.
18. Bublik V.T., Mordkovich V.N., Pazhin D.M., Alves E., Barradas N.P., Shcherbachev K. D. Radiation induced structural transformations in a silicon layer of SOI // *Phys.Stat.Sol. (a).* – 2007. – Vol. 204, № 8. – P. 2645–2650.
19. Мокрушин А.Д., Омеляновская Н.М., Пажин Д.М., Гончаров В.П. Радиационные эффекты в двухзатворных полевых датчиках Холла на основе КНИ структуры: Сборник тезисов / V Международная конференция и IV Школа молодых ученых по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе (Кремний-2008). – Черногоровка, 2008. – С. 254–256.
20. Мордкович В.Н., Пажин Д.М. Сенсоры на основе структур "кремний на изоляторе": Сборник тезисов / V Международная конференция и IV Школа молодых ученых по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе (Кремний-2008). – Черногоровка, 2008. – С. 241–242.
21. Бараночников М.Л., Леонов А.В., Мокрушин А.Д., Мордкович В.Н., Омеляновская Н.М., Пажин Д.М. Особенности характеристик КНИ полевых датчиков Холла с двухзатворной управляющей системой типа металл-диэлектрик-полупроводник-диэлектрик-металл // *Нано- и микросистемная техника.* – 2008. – № 12. – С. 45–49.

Список использованной литературы

1. Cristoloveanu S. Electrical Characterization Techniques for Silicon On Insulator Materials and Devices // *Physical and Technical Problems of SOI Structures and Devices.* – Dordrecht–Boston–London: Kluwer Acad. Publ., 1995. – Ser. 3. – Vol. 4. – P. 109–132.
2. Colinge J.P. Gate-All-Around technology for harsh environment applications // *Progress in SOI Structures and Devices Operating at Extreme Conditions.*

- Dordrecht–Boston–London: Kluwer Acad. Publ., 2000. – Ser. 2. – Vol. 58. – P. 167–188.
3. 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.
 4. Акимов А.Г. Барабаненков М.Ю. Мордкович В.Н. Управляемый резистор с функциями полевого транзистора и полевого датчика Холла // Приборы и техника эксперимента. – 1988. – № 5. – С. 123–128.
 5. 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.
 6. Lee J., Nam M-H., Oh J-H., Yang J-W., Lee W-C., Kim H-k., Oh M-R., Koh Y-H. 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.
 7. Вавилов В. С., Ухин Н. А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М. : Атомиздат, 1969. 196 с.
 8. Смирнов Л.С. Физические процессы в облученных полупроводниках. Нвсб. : Наука, 1977. – 256 с.
 9. Герасименко Н.Н., Двуреченский А.В., Панов В.И., Смирнов Л.С. О пороговой энергии образования радиационных дефектов в полупроводниках // Физика и техника полупроводников. – 1971. – Т. 5. – Вып. 8. – С. 1644–1646.
 10. Герасименко Н.Н., Мордкович В.Н. Радиационные эффекты в системе полупроводник – диэлектрик // Поверхность. Физика. Химия. Механика. – 1987. – № 6. С. 5–19.
 11. Гергель В.А., Тимофеев М.В., Зеленый А.П. О температурной и полевой зависимости эффективной поверхностной подвижности в МДП структурах // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32, № 6. – С. 748–752.
 12. Горячев В.Г., Коротаяева 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.