

На правах рукописи



СДОБНЯКОВ Виктор Владимирович

**РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ НИТРИДА
КРЕМНИЯ В КРЕМНИИ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ОБЛУЧЕНИИ
ВСТРЕЧНЫМИ ПУЧКАМИ ИОНОВ АЗОТА И АРГОНА**

01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород - 2006 г.

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского»

Научный руководитель

доктор физико-математических наук,
профессор **Демидов Е.С.**

Официальные оппоненты

доктор физико-математических наук,
профессор **Титов Андрей Иванович**
кандидат физико-математических наук,
доцент **Скупов Владимир Дмитриевич**

Ведущая организация

Казанский физико-технический институт им. Е.К.Завойского
КазНЦ РАН.

Защита состоится «20» сентября 2006 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д212.166.01 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им.Н.И.Лобачевского» по адресу: 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп.3 (НИФТИ).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского.

Автореферат разослан «__» _____ 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

А.И.Машин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования методов синтеза диэлектрических слоев в кремнии, полученных с помощью ионной имплантации, с целью получения качественных приповерхностных и, в особенности, захороненных изолирующих слоев. Поиск новых и усовершенствование уже известных способов формирования КНИ-структур активно ведется как в нашей стране, так и за ее пределами [1]. Данная работа вносит вклад в понимание процессов, происходящих в полупроводнике с диэлектрическим слоем при термических отжигах, а также в прояснение природы эффекта дальнего действия (ЭД) при ионном внедрении – одной из наиболее дискутируемых проблем ионной имплантации. Предложенные результаты исследований демонстрируют возможность использования ЭД при ионной имплантации для модификации свойств материалов в целях улучшения диэлектрических характеристик слоев Si_3N_4 .

Нитрид кремния (Si_3N_4) по сравнению с естественным окислом (SiO_2) обладает рядом преимуществ. Коэффициенты термического расширения этого диэлектрика и кремния почти совпадают, что важно для технологии микроструктур с температурными циклами до 1000-1100°C. Малый коэффициент диффузии азота в кремнии предотвращает диффузионное расплывание диэлектрического слоя при отжигах. Граница Si_3N_4 -Si является эффективным барьером для широкого набора актуальных для микроэлектроники примесей. Хотя ширина запрещенной зоны Si_3N_4 в два раза меньше, чем у оксида кремния [2], около 4.5 эВ (почти как у алмаза), она достаточна чтобы собственная электронная проводимость при комнатной температуре была пренебрежимо малой. Диэлектрические слои, полученные ионной имплантацией, интересны возможностью синтеза полупроводниковых структур в едином технологическом цикле с имплантацией легирующих примесей. Особенно привлекательной является возможность формирования актуальных для современной микроэлектроники структур кремний на изоляторе или КНИ-структур [1]. При облучении кремния ионами азота с энергией около 200 кэВ и дозой $\sim 10^{18}$ см⁻² (достаточной для формирования стехиометрического Si_3N_4) можно получить «захороненный» диэлектрический слой, отделяющий тонкий ~ 200 нм слой кремния для создания в нём микроэлектронных схем [1]. Проблема состоит в том, что в процессе отжига таких слоёв при температурах порядка 1000°C происходит их растрескивание из-за кристаллизации [1, 3]. Превращение аморфного нитрида кремния в кристаллический в ионно-синтезированных слоях происходит при пониженных на 200-300°C температурах по сравнению с другими вариантами формирования Si_3N_4 . В результате «портится» структура поверхностного слоя кремния, резко ухудшаются изолирующие свойства слоя Si_3N_4 . Для дальнейшего совершенствования режимов термообработки азотированных слоёв кремния, достижения прогресса в понимании микроскопических процессов представляет интерес привлечение, кроме ранее применявшихся структурных, электрических и оптических измерений, другой экспериментальной техники, в частности, электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), позволяющего получать информацию непосредственно о свойствах дефектной системы.

Ранее нами было обнаружено [4] существенное изменение свойств азотированного слоя при облучении при 500°C обратной стороны пластин кремния толщиной 600 мкм ионами аргона с энергией 40 кэВ и дозах 10^{16} - 10^{17} см⁻². Была предложена модель этого ЭД, согласно которой на азотированный слой воздействуют акустические гиперзвуковые импульсы давления, излучаемые в результате скачкообразной эволюции дислокационной сетки под облученным аргоном слоем кремния или взрыва пузырьков аргона - блистеров в насыщенном аргоном слое кремния. Представляет интерес более подробное изучение интервала доз 10^{16} - 10^{17} см⁻² облучения ионами аргона, изолирующих и структурных свойств азотированных слоёв кремния от температуры имплантации Ar^+ . Для дальнейшего понимания природы ЭД представляет интерес проведение экспериментов с частичной экранировкой образцов кремния при облучении аргоном, воздействием на обратную сторону

пластин кремния вместо аргона ионами других элементов с иным характером модификации поверхности кремния.

Цель работы состоит в поиске способов увеличения температурного интервала стабильности ионно-синтезированного нитрида кремния термическими и другими внешними воздействиями и в проведении ряда экспериментов для дальнейшего прояснения природы эффекта дальнего действия при последовательном облучении кремния встречными пучками ионов азота и аргона.

Первая задача настоящей работы состояла в получении более детальной информации о микроскопических процессах, происходящих в азотированном слое при термических отжигах с применением техники ЭПР-спектроскопии, используя известные парамагнитные центры в системе Si-N в качестве свидетелей перестройки дефектной системы.

Вторая задача состояла в более подробном изучении дальнего действия азотированного слоя кремния облучения ионами аргона в интервале доз 10^{16} - 10^{17} см⁻². Планировалось исследование изолирующих и структурных свойств этого слоя от температуры имплантации Ar⁺, возможности предотвращения кристаллизации нитрида кремния при последующих высокотемпературных отжигах, сопоставление свойств слоев, сформированных при обработке обратной стороны пластин кремния ионами Ar⁺ и отжигом, а также поиск оптимальных с точки зрения качества слоев, условий ионно-лучевого синтеза.

Третья задача связана с прояснением природы ЭД. Представляло интерес изучение морфологии и состояния поверхности кремния при различных дозах и температурах облучения Ar⁺, облучение Ne⁺ и Si⁺ вместо Ar⁺, а также проверка наличия латерального эффекта. Выбор Ne⁺ и Si⁺ обусловлен тем, что ионы Ne⁺ имеют при той же энергии больший пробег, также появляется дислокационная сетка, образуются блистеры, но более крупные, чем в случае с Ar⁺, которые, согласно литературным данным и нашим предварительным экспериментам, не взрываются при используемых параметрах ионно-лучевого синтеза. В случае кремния дислокационная сетка из-за сильных напряжений образуется, но блистеров нет.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

1. Обнаружена корреляция между структурными, оптическими, электрофизическими и ЭПР свойствами ионно-синтезированных слоев нитрида кремния от температуры отжига ($T_{отж}$). Показано, что при $T_{отж} \leq 700^\circ\text{C}$ взаимодействие азота с кремнием происходит через образование парамагнитных достехиометрических комплексов, компенсирующих проводимость. Свыше $T_{отж} \cong 700^\circ\text{C}$ избыточный кремний выделяется во вторую фазу, начинается кристаллизация нитрида кремния, что приводит к растрескиванию слоев и росту их проводимости через дополнительные каналы протекания тока.
2. Показано, что если внедрение аргона в пластину кремния, предварительно облученную с обратной стороны ионами азота, производить с дозой $\Phi_{Ar} \geq 10^{17}$ см⁻² и температурой $T_{Ar} = 500^\circ\text{C}$, то происходит стимулирование взаимодействия азота и кремния. При этом разрушаются центры кристаллизации сформированного нитрида кремния. Ионно-синтезированные слои Si₃N₄ сохраняются в аморфном состоянии. По крайней мере, до температуры отжига 1100°C не происходит связанного с кристаллизацией растрескивания слоев и ухудшения их изолирующих свойств.
3. Установлено, что изменение свойств азотированного слоя при облучении обратной стороны пластины кремния ионами Ar⁺ происходит в узком интервале доз Ar⁺ (8-10) 10^{16} см⁻².
4. Показано, что предполагавшийся ранее вклад в эффект дальнего действия скачкообразной эволюции сетки дислокаций, формирующейся в кремнии под слоем торможения ионов аргона, не является существенным. Это подтверждается тем, что последовательное облучение встречными по отношению к пучку ионов азота ионами неона или кремния, в

отличие от ионов аргона, не приводит к заметным изменениям свойств азотированного слоя кремния.

5. Установлено, что дальноедействующее влияние облучения Ar^+ на азотированный слой кремния происходит под воздействием акустических импульсов, возникающих в результате взрыва блистеров аргона.

Практическая значимость

1. Показана возможность получения устойчивых до $1100^\circ C$ ионно-синтезированных слоев нитрида кремния с помощью радиационно-стимулированного формирования нитрида кремния в кремнии при последовательном облучении встречными пучками ионов азота и аргона.

2. Предложенный метод с применением эффекта дального действия позволяет продвинуться в решении проблемы кристаллизации и растрескивания нитридных слоев при высокотемпературной обработке и его использовании для создания структур "кремний на изоляторе".

3. При ионном облучении твердых тел в условиях, когда образуются блистеры (достаточно большие дозы облучения, ионы элементов со слабыми химическими связями с атомами мишени) следует учитывать влияние такого облучения на формирования других фаз в полупроводниках и металлах. Предпосылкой к этому является высокая прозрачность твердых тел к распространению гиперзвуковых акустических волн.

Основные положения, выносимые на защиту

1. С ростом температуры отжига ($T_{отж}$) слоев кремния, облученных ионами азота, существует корреляция между структурными, оптическими, электрофизическими и ЭПР свойствами этих слоев. До $T_{отж} \cong 700^\circ C$ взаимодействие азота с кремнием происходит через образование парамагнитных стехиометрических комплексов, компенсирующих проводимость. Выше $T_{отж} \cong 700^\circ C$ избыточный кремний выделяется во вторую фазу, начинается кристаллизация нитрида кремния, что приводит к растрескиванию слоев и росту их проводимости через дополнительные каналы протекания тока.

2. При последовательном облучении кремниевой пластины встречными пучками ионов азота и аргона, когда внедрение аргона происходит с $E_{Ar}=40\text{кэВ}$, $\Phi_{Ar} \geq 10^{17}\text{см}^{-2}$, $T_{Ar}=500^\circ C$, облучение аргоном стимулирует реакцию взаимодействия кремния с азотом, разрушаются центры кристаллизации сформированного нитрида кремния. В результате ионно-синтезированные слои Si_3N_4 сохраняются в аморфном состоянии, не происходит связанное с кристаллизацией растрескивание слоев и ухудшение их изолирующих свойств, по крайней мере, при отжиге до температуры $1100^\circ C$.

3. Последовательное облучение встречными по отношению к пучку ионов азота ионами неона или кремния, в отличие от ионов аргона, не приводит к заметным изменениям свойств азотированного слоя кремния. Это означает, что предполагавшийся ранее вклад в эффект дального действия скачкообразной эволюции сетки дислокаций, формирующейся в области торможения ионов аргона, не является существенным.

4. Изменение свойств азотированного слоя кремния происходит в результате последующего, встречного по отношению к имплантации азота, облучения ионами аргона в узком интервале доз $(8-10) \cdot 10^{16}\text{см}^{-2}$ ($E_{Ar}=40\text{кэВ}$, $T_{Ar}=500^\circ C$). Главной причиной дальноедействующего влияния облучения Ar^+ являются акустические импульсы, возникающие в результате взрыва блистеров аргона, чему способствует аморфно-кристаллическое состояние подвергнутой указанной обработкой аргоном поверхности кремния. Этот механизм является дополнительным к ранее предложенному П. В. Павловым, Д. И. Тетельбаумом и др. механизму усиления акустических волн через дефектную систему кристалла.

Личный вклад автора

Основные эксперименты были спланированы автором совместно с В. В. Карзановым и научным руководителем. Самостоятельно выполнялись: подготовка образцов, исследование просвечивающей электронной микроскопией (ПЭМ), измерение вольтамперных (ВАХ) и емкостных характеристик, эллипсометрия, а также анализ результатов.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 15–ти конференциях и семинарах: V-VII Всероссийских семинарах "Физические и физико-химические основы ионной имплантации" (Нижний Новгород, 11-13 октября 2000 г., 15-17 октября 2002 г. и 26-29 октября 2004 г.), "XIX Научных чтениях имени академика Н.В.Белова", (Нижний Новгород, 14-15 декабря 2000 г.), Пятой и шестой сессиях молодых ученых (Нижний Новгород, 24-28 апреля 2000, 22-27 апреля 2001 г.), Второй Всероссийской молодежной научной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (С.-Петербург, 4–8 декабря 2000г.), IV Всероссийской научной конференции студентов – радиофизиков (С.-Петербург, 5-7 декабря 2000г.) - *отмечен дипломом II степени*, II Российской конференции по материаловедению и физико – химическим основам технологии получения легированных кристаллов кремния («Кремний-2000») (Москва, 9-11 февраля 2000г.), Всероссийской молодежной научной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (С.-Петербург, 30 ноября – 3 декабря 1999г.), III Всероссийской научной конференции студентов – радиофизиков. (С.-Петербург, 30 ноября – 2 декабря 1999г.), Всероссийской конференции «Структура и свойства твердых тел», посвященной 40–летию физического факультета ННГУ им. Н.И.Лобачевского (Нижний Новгород, 27–28 сентября 1999г.).

Диссертационная работа выполнялась при поддержке следующих грантов и целевых программ:

Федеральной целевой программы "Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997-2000 гг.", Учебно-научный центр "Физика и химия твердого тела" (проект № 0541), тема НИЧ ННГУ Н-231;

Гранта Минобразования РФ Конкурсного центра по исследованиям в области ядерной физики и физики пучков ионизирующих излучений, тема НИЧ ННГУ НГ-172, 1998-2000 гг. (грант №97–12–9.2–4);

Программы Минобразования РФ "Научные исследования высшей школы в области производственных технологий", раздел "Радиационные технологии создания и исследования объектов в машиностроении и приборостроении", тема НИЧ ННГУ Н–223, 2000 г. (проект №01.12.01.15).

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 122 наименования. Объем диссертации составляет 127 страниц машинописного текста, включая 63 рисунка и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** приводится обоснование выбора темы диссертационной работы и ее актуальность. Сформулированы цель работы, научная новизна и практическая значимость, приведены основные методы исследований и основные положения, выносимые на защиту, описаны структура и объем диссертации. Содержатся сведения об апробации работы.

Глава 1 логически состоит из двух частей. В ней приводится аналитический обзор литературы.

В первой части главы представлены данные по проблеме синтеза изолирующих слоев нитрида кремния. Рассматриваются основные достоинства, определяющие перспективность применения, а также способы получения данных слоев. Основное внимание уделяется синтезу с помощью ионной имплантации аморфных слоев Si_3N_4 . Сформулированы основные трудности получения аморфных слоев Si_3N_4 , пригодных к использованию в современной микроэлектронике, связанные в первую очередь с легкостью кристаллизации нитрида кремния при постимплантационном отжиге. Обобщаются литературные данные исследований, проведенных с помощью ИК-спектроскопии и электрических измерений. Представлены данные о парамагнитных дефектах в нитриде кремния.

Вторая часть первой главы посвящена эффекту дальнего действия (ЭД) при ионной имплантации. В ней рассматриваются основные экспериментальные закономерности проявления этого эффекта, обобщаются его зависимости от режимов ионного облучения: энергии, дозы, температуры, плотности ионного тока. Приводятся работы, в которых обсуждается природа ЭД. Отмечается, что пока не создано общепринятой модели, описывающей этот эффект. Имеются данные, свидетельствующие о том, что ЭД может применяться для модификации свойств материалов.

В заключение главы обосновывается и формулируется направление исследований и основная цель настоящей работы.

Глава 2 посвящена исследованию влияния термических отжигов на свойства ионно-синтезированных слоев Si_xN_y .

Целью исследований, представленных во второй главе, является более детальное изучение физических и физико-химических процессов, происходящих при отжиге ионно-синтезированных в кремнии нитридных слоев, определение оптимального температурного режима постимплантационной обработки с точки зрения изолирующих и структурных свойств нитрида кремния, а также состояние границы раздела с кремнием. Одной из задач этой серии экспериментов являлось получение данных для сопоставления их в третьей главе с результатами влияния облучения ионами аргона обратной стороны пластины кремния, содержащей на лицевой стороне азотированный слой.

В экспериментах использовались пластины кремния промышленных марок БКЭ–100, БКД–2000 и КЭМ–0,005 с ориентацией (111) толщиной 0.3–0.6 мм. Все образцы подвергались стандартной химико-механической обработке.

Для создания скрытых слоев ионы азота имплантировались в кремний с энергиями пучка $E_N=150$ кэВ; при формировании поверхностных слоев Si_xN_y внедрялся как молекулярный азот с $E_N=80-100$ кэВ, $\Phi_N=2,5 \cdot 10^{17}$ см⁻², так и атомарный с $E_N=40-50$ кэВ, $\Phi_N=5 \cdot 10^{17}$ см⁻². Проявление молекулярного эффекта замечено не было, т.е. электрические и структурные свойства гетероструктур $\text{Si}_x\text{N}_y\text{-Si}$ при облучении молекулярным и атомарным азотом в пределах погрешности совпадали. Плотность ионного тока составляла $j_N=5 \cdot 10^{13}$ см⁻²с⁻¹, температура мишени при внедрении была 20 или 400°С. Нагрев образцов осуществлялся через графитовую подложку с помощью кварцевых ламп накаливания. Затем проводился постимплантационный отжиг при температурах от 400°С до 1200°С в атмосфере осушенного азота. Используемый в экспериментах временной интервал отжигов находился в пределах 30-120 мин. В большинстве случаев он составлял 30 минут. Это делалось для того, чтобы предотвратить растрескивание и разрушение тонких мембран Si_xN_y , подготовленных для электронной микроскопии, при $T_{\text{отж}} \geq 900^\circ\text{C}$ в случае большей продолжительности термических отжигов.

Свойства слоев Si_xN_y изучались с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), ИК-спектроскопии, измерения вольтамперных (ВАХ) и емкостных характеристик при поперечном транспорте тока, а также эллипсометрических измерений.

Изучение электропроводности ионно-синтезированных слоев Si_xN_y и сопоставление

этих результатов с данными ЭПР от температуры отжига показало замечательную корреляцию между немонотонными зависимостями электросопротивления и числом парамагнитных центров этих слоёв (рис.1, 2).

При температурах отжига $T_{отж} \leq 700^\circ\text{C}$ наблюдалось увеличение ИК-поглощения связями Si-N (рис.3). Причем полоса поглощения является широкой, что соответствует аморфному нитриду кремния и тому, что поглощение осуществляется различными связями азота и кремния. Часть этих комплексов имеет нескомпенсированный спиновый магнитный момент, являются парамагнитными. Сопоставление этого факта с результатами ЭПР указывает на то, что взаимодействие азота с кремнием происходит через образование парамагнитных достехиометрических комплексов, число которых при температурах $T_{отж} \leq 700^\circ\text{C}$ увеличивается. Данные комплексы являются компенсирующими центрами в глубине щели подвижности [5]. Они снижают проводимость в образце, что наряду с увеличением количества диэлектрической фазы Si_xN_y , оказывает влияние на рост среднего удельного сопротивления азотированного слоя.

При температурах отжига свыше $T_{отж} \approx 700^\circ\text{C}$ и достехиометрических дозах внедрения азота начинается кристаллизация нитрида кремния (рис.4), образование дендритных включений (рис.5), избыточный кремний выделяется во вторую фазу (рис.6). Это приводит к росту проводимости слоев нитрида кремния через дополнительные кремниевые каналы протекания тока, а при температурах отжига $\sim 1000^\circ\text{C}$ - к растрескиванию и разрушению слоев. Это подтверждают микродифракционные картины, представленные на рис.7. Взаимодействие азота с кремнием при температурах более $T_{отж} \approx 700^\circ\text{C}$ идет через образование комплексов с растущим средним количеством атомов азота с увеличением температуры отжига, что приводит к снижению количества парамагнитных дефектов при температурах свыше $T_{отж} \approx 700^\circ\text{C}$.

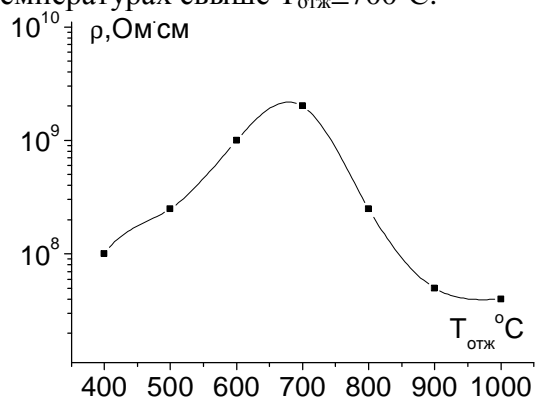


Рис.1. Зависимость величины среднего удельного сопротивления слоя Si_xN_y ($E_N=40$ кэВ, $\Phi_N=10^{17}$ см^{-2} , $T_N=400^\circ\text{C}$) от температуры постимплантационного отжига

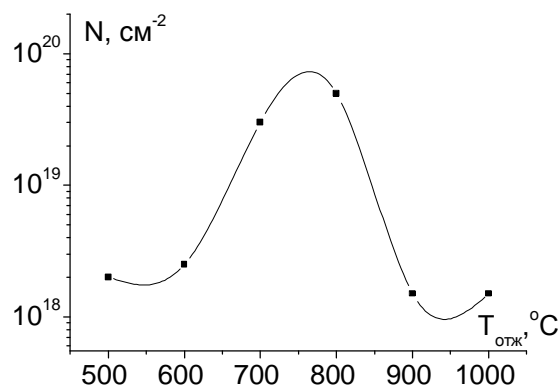


Рис.2. Зависимость количества парамагнитных дефектов от температуры отжига для образцов, содержащих ионно-синтезированный слой нитрида кремния ($E_N=40$ кэВ, $\Phi_N=10^{17}$ см^{-2} , $T_N=400^\circ\text{C}$)

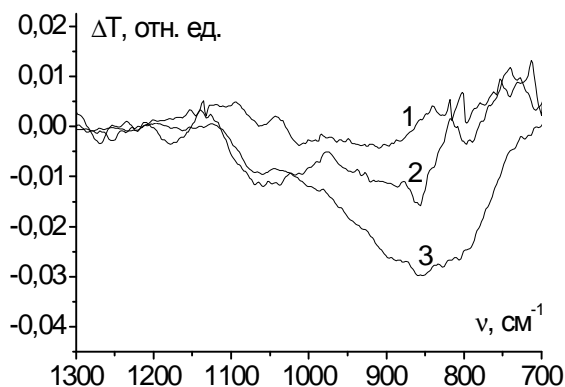


Рис. 3. Разница в ИК-спектрах пропускания образцов кремния до и после 2-х часового отжига
 1- $E_N=150$ кэВ, $\Phi_N=5 \cdot 10^{17}$ см^{-2} , $T_N=400^\circ\text{C}$, $T_{отж}=500^\circ\text{C}$
 2- $E_N=150$ кэВ, $\Phi_N=5 \cdot 10^{17}$ см^{-2} , $T_N=400^\circ\text{C}$, $T_{отж}=600^\circ\text{C}$
 3- $E_N=150$ кэВ, $\Phi_N=5 \cdot 10^{17}$ см^{-2} , $T_N=400^\circ\text{C}$, $T_{отж}=700^\circ\text{C}$

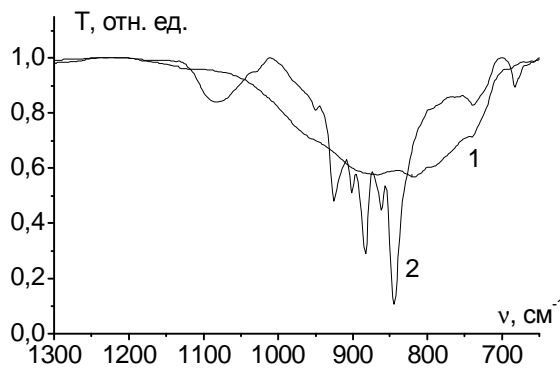


Рис. 4. ИК-спектры пропускания кремния после имплантации N^+ , $E_N=150$ кэВ, $\Phi_N=5 \cdot 10^{17}$ см^{-2} , $T_N=400^\circ\text{C}$ до (1) и после (2) отжига при $T_{отж}=1100^\circ\text{C}$ в течение 2 часов

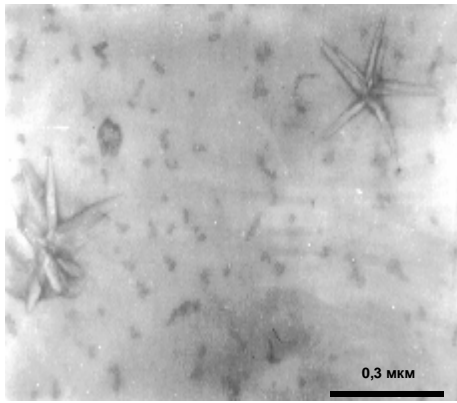


Рис.5. Дендридные выделения Si_3N_4 в образце, облученном молекулярным азотом с $E_{\text{N}_2}=100\text{кэВ}$, $\Phi_{\text{N}_2}=2,5 \cdot 10^{17}\text{см}^{-2}$, $T_{\text{N}_2}=400^\circ\text{C}$ и отожженном при $T_{\text{отж}}=800^\circ\text{C}$ в течение 120 минут

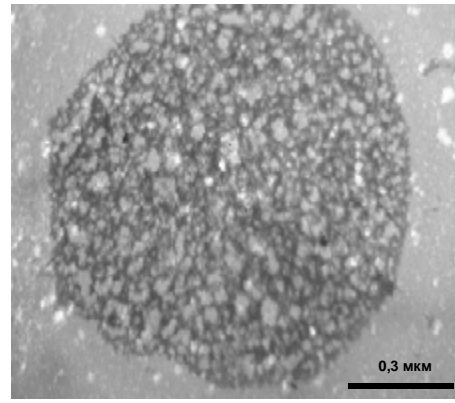
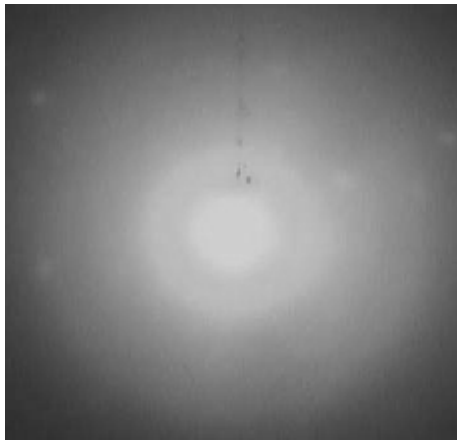
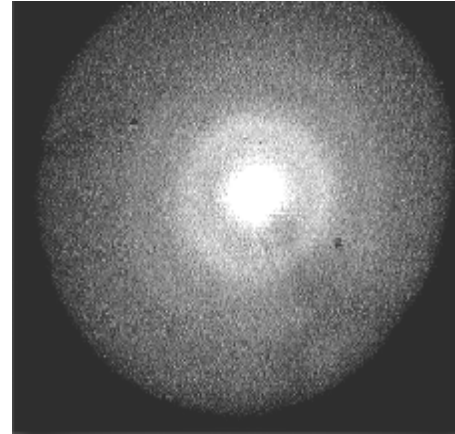


Рис.6. Поликристаллические выделения кремния (темные пятна) и нитрида кремния (светлые пятна) в образце, облученном ионами молекулярного азота ($E_{\text{N}_2}=80\text{кэВ}$, $\Phi_{\text{N}_2}=2,5 \cdot 10^{17}\text{см}^{-2}$, $T_{\text{N}_2}=400^\circ\text{C}$) и отожженного при $T_{\text{отж}}=1000^\circ\text{C}$ в течение 120 минут



(а)



(б)

Рис.7. Микродифракционные картины образцов кремния, облученных ионами азота ($E_{\text{N}}=40\text{кэВ}$, $\Phi_{\text{N}}=10^{17}\text{см}^{-2}$, $T_{\text{N}}=400^\circ\text{C}$) и отожженные (а) - $T_{\text{отж}}=700^\circ\text{C}$ в течение 120 минут, слой аморфный; (б) - $T_{\text{отж}}=1100^\circ\text{C}$ в течение 30 минут, начало кристаллизации нитридного слоя

С целью выяснения типов дефектов, дающих вклад в ЭПР-спектры, проводился их анализ, представленный на рис. 8, 9 и таб. 1, 2, который показал, что сразу после имплантации азота присутствуют С8 и VV-центры.

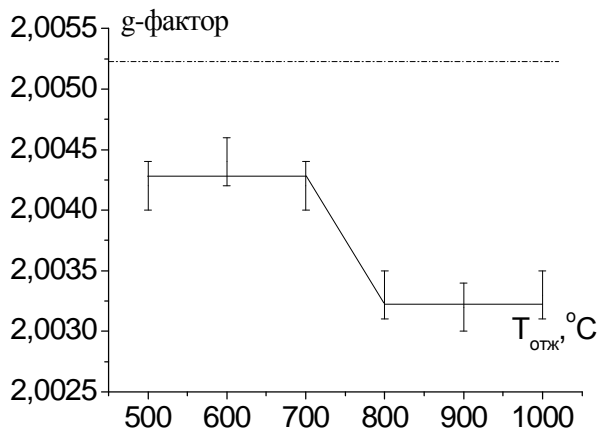


Рис. 8. Зависимость g-фактора образца кремния, облученного ионами азота ($E_{\text{N}}=40\text{кэВ}$, $\Phi_{\text{N}}=10^{17}\text{см}^{-2}$, $T_{\text{N}}=400^\circ\text{C}$) от температуры отжига. Штрих-пунктиром показано значение g-фактора для образца, сразу после внедрения азота

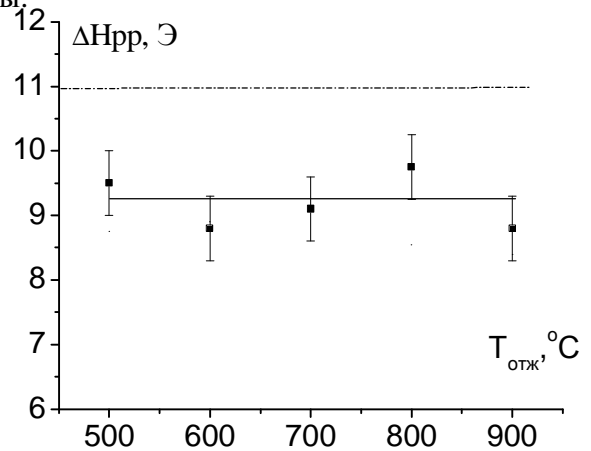


Рис. 9. Зависимости ширины линии ЭПР от температуры отжига для образцов кремния, облученных ионами азота ($E_{\text{N}}=40\text{кэВ}$, $\Phi_{\text{N}}=10^{17}\text{см}^{-2}$, $T_{\text{N}}=400^\circ\text{C}$). Штрих-пунктиром показано значение ΔH_{pp} для образца, сразу после внедрения азота

Таблица 1. Параметры парамагнитных дефектов (литературные данные)

Наименование дефекта	ΔH_{pp} , Э	g-фактор
К-центры	8,0	2,003
N-центры	8,9	2,0057
Двухкоординированный кремний	9,6	2,005

Таблица 2. Обнаруженные парамагнитные центры при различных воздействиях

Воздействие	Парамагн. Центры
Si + N ⁺	C8 и VV
Si +отжиг T<700°C	C8
Si +отжиг T>700°C	K
Si+ N ⁺ +Ar ⁺	K

Отжиг при температурах до 700°C приводил к аннигиляции наименее термостабильных VV-центров, а при температурах выше 700°C появились и вносили вклад в ЭПР спектр только К-центры.

Эта серия экспериментов показывает, что применение технологического приема «имплантация-отжиг» для получения ионно-синтезированных слоев нитрида кремния с хорошими диэлектрическими свойствами малоэффективно из-за кристаллизации и растрескивания азотированного слоя кремния при температурах до 1000°C, которые используются в современных технологиях производства полупроводниковых структур.

Глава 3 посвящена изучению радиационно-стимулированного формирования нитрида кремния в кремнии при последовательном облучении встречными пучками ионов азота и аргона.

В данной серии экспериментов образцы подготавливались аналогично тому, как это было описано в предыдущей главе. Отличие состояло в том, что после имплантации ионов азота в плоскопараллельную пластину кремния для стимулирования синтеза фазы Si₃N₄, производилось дополнительное облучение с обратной стороны пластины ионами аргона с энергией E_{Ar}=50 кэВ и плотностью потока ионов j_{Ar}=5·10¹³ см⁻²с⁻¹. Температура образцов при имплантации ионов аргона менялась в пределах от 20 до 500°C. Нагрев образцов осуществлялся через графитовую подложку с помощью кварцевых ламп накаливания. Доза облучения ионами аргона варьировалась от 10¹⁵ до 5·10¹⁷ см⁻², рис. 10.

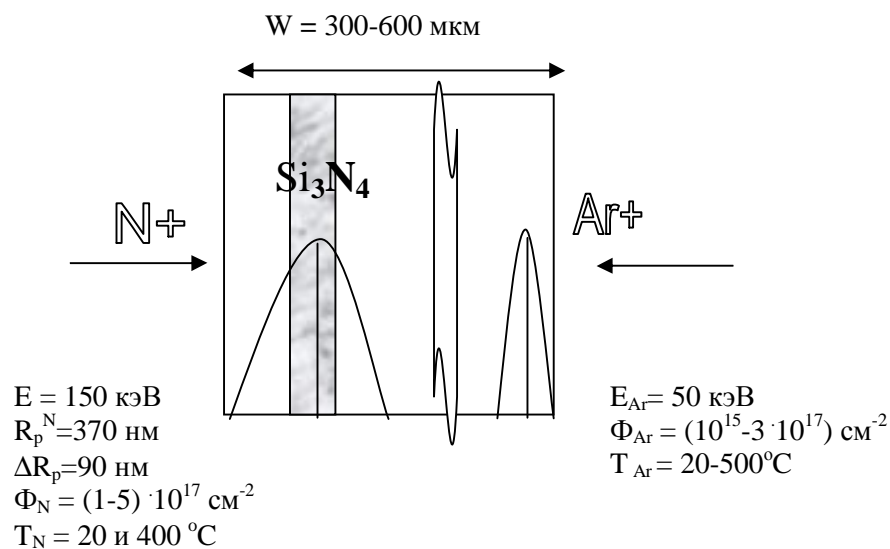


Рис.10. Схема двойного ионного облучения кремния азотом и аргоном

Свойства слоев Si_xN_y, полученных описанным выше способом, изучались теми же методами, что и во второй главе. Кроме того, толщина и показатель преломления слоев Si_xN_y определялись на эллипсометре ЛЭФ-3М-1. Морфология поверхности облученных образцов исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (AFM) на сканирующем зондовом

микроскопе TopoMetrix TMX-2100 Accurex в контактном режиме. Для AFM-измерений использовался кантилевер из нитрида кремния с зондом пирамидальной формы. Приведенные ниже AFM-изображения имеют размеры 10x10 мкм с разрешением от 300 до 500 точек на линию сканирования. Применялся эффект подсветки слева.

В результате проведенных исследований показано, что облучение ионами аргона улучшает изолирующие (рис.11) и структурные свойства слоев Si_xN_y при дозе 10^{17} см^{-2} ($E_{\text{Ar}}=50 \text{ кэВ}$, $T_{\text{Ar}}=500^\circ\text{C}$) и более, причем изменения происходят в узком $8\cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ интервале доз аргона. Видно, что для стимулирующего действия облучение Ar^+ должно производиться при температуре около 500°C (рис.12).

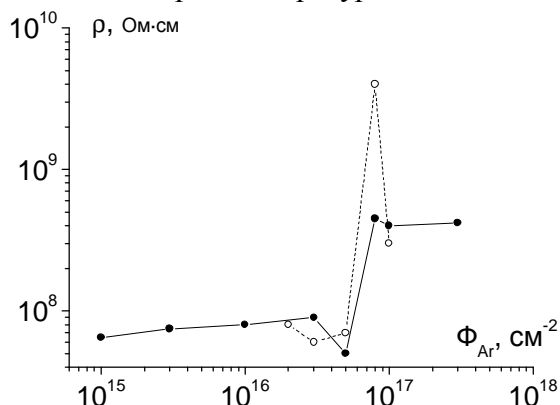


Рис.11. Зависимость изменения среднего удельного сопротивления слоя кремния с внедренным азотом ($E_{\text{N}}=40 \text{ кэВ}$, $\Phi_{\text{N}}=10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_{\text{N}}=400^\circ\text{C}$) от дозы облучения аргоном ($E_{\text{Ar}}=40 \text{ кэВ}$, $T_{\text{Ar}}=500^\circ\text{C}$)

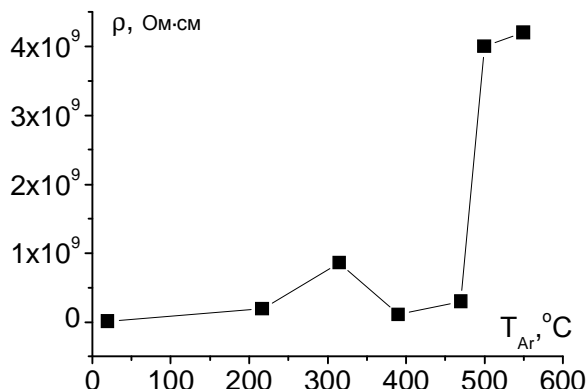


Рис.12. Зависимость среднего удельного сопротивления слоя Si_xN_x ($E_{\text{N}}=40 \text{ кэВ}$, $\Phi_{\text{N}}=10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_{\text{N}}=400^\circ\text{C}$) от температуры имплантации аргона ($E_{\text{Ar}}=40 \text{ кэВ}$, $\Phi_{\text{Ar}}=10^{17} \text{ см}^{-2}$) в обратную сторону пластины кремния

Сопоставление влияния отжига на свойства гетероструктур $\text{Si}_x\text{N}_y\text{-Si}$, облученных ионами аргона при $T_{\text{Ar}}=20$ и 500°C , показало, что в случае облучения при комнатной температуре свойства ионно-синтезированного слоя Si_xN_y с температурой отжига меняются аналогично таковым у образцов, не облученных ионами аргона (рис.1). Зависимость удельного сопротивления от температуры постимплантационного отжига имеет колоколообразный вид (рис.13), кристаллизация начинается с температур $\sim 800^\circ\text{C}$ (рис.14а,б).

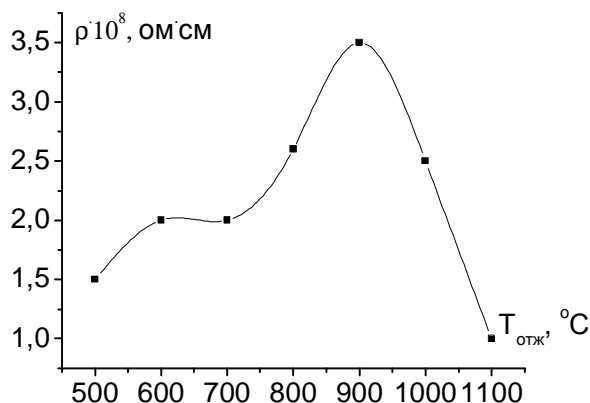


Рис. 13. Зависимость среднего удельного сопротивления слоя Si_xN_y ($\Phi_{\text{N}}=10^{17} \text{ см}^{-2}$, $E_{\text{N}}=40 \text{ кэВ}$, $T_{\text{N}}=400^\circ\text{C}$) от температуры постимплантационного отжига для образца кремния, облученного ионами аргона при $E_{\text{Ar}}=40 \text{ кэВ}$, $\Phi_{\text{Ar}}=10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_{\text{Ar}}=20^\circ\text{C}$

Свойства образцов, облученных ионами аргона при $T_{\text{Ar}}=500^\circ\text{C}$ и отожженных при $T_{\text{отж}}=500\text{-}1100^\circ\text{C}$, сильно отличались от облученных аргоном при комнатной температуре. Зависимость величины среднего удельного сопротивления от температуры отжига имеет вид, представленный на рис.15. При $T_{\text{отж}}=500^\circ\text{C}$ величина среднего удельного сопротивления слоя Si_xN_y максимальна и близка к таковой для образца, облученного только ионами азота и

отожженного при $T_{отж}=700^{\circ}\text{C}$. Это даёт основание предположить, что имплантация аргона при $T_{имп}=500^{\circ}\text{C}$ приводит к тому, что практически весь азот, не прореагировавший с кремнием в процессе имплантации, вступает в реакцию с кремнием, а последующий стационарный отжиг приводит к снижению величины среднего удельного сопротивления из-за выделения кремния во вторую фазу и отжига электрически активных дефектов (К- и N-центров, двухкоординированного азота). Об этом свидетельствует и высокочастотное крыло 900-1050 см^{-1} на ИК-спектре пропускания даже более интенсивное, чем при отжиге 700°C (рис.16).

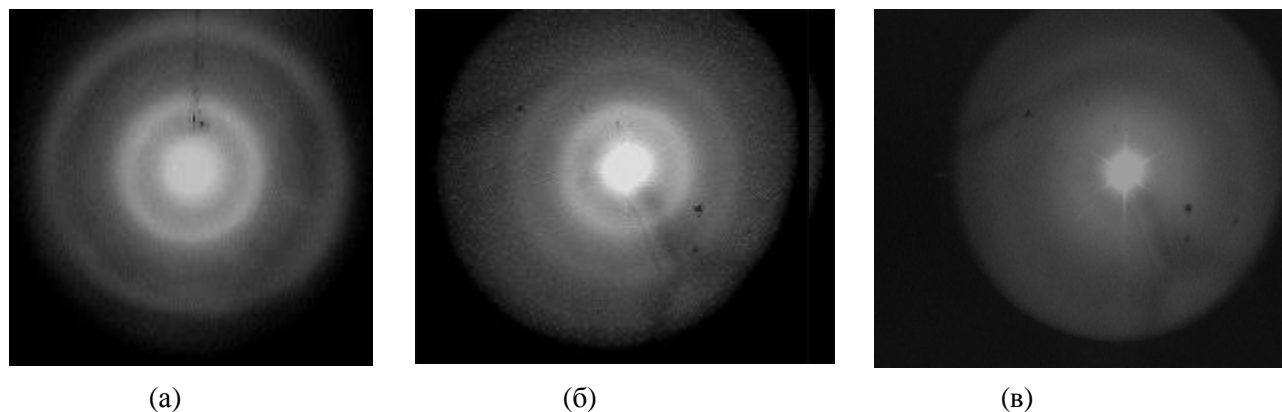


Рис.14. Микродифракции слоев Si_xN_y ($E_N=40$ кэВ, $\Phi_N=10^{17}$ см^{-2} , $T_N=400^{\circ}\text{C}$) (а) - отожженный при $T_{отж}=900^{\circ}\text{C}$ (без облучения ионами аргона), (б) - облученный ионами аргона с $E_{Ar}=40$ кэВ, $\Phi_{Ar}=10^{17}$ см^{-2} , $T_{Ar}=20^{\circ}\text{C}$ и отожженный при $T_{отж}=1100^{\circ}\text{C}$, (в) - после облучения ионами аргона с $E_{Ar}=40$ кэВ, $\Phi_{Ar}=10^{17}$ см^{-2} , $T_{Ar}=500^{\circ}\text{C}$ и отжига при $T_{отж}=1100^{\circ}\text{C}$. Время отжига - 30 мин

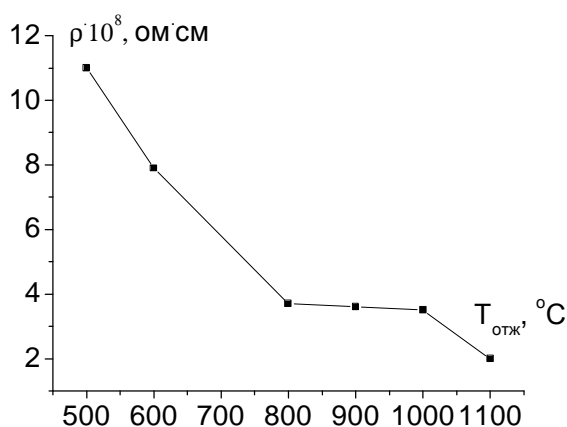


Рис. 15. Зависимость среднего удельного сопротивления нитридного слоя ($E_N=40$ кэВ, $\Phi_N=10^{17}$ см^{-2} , $T_N=400^{\circ}\text{C}$) от температуры постимплантационного отжига для образца, облученного ионами Ar^+ ($E_{Ar}=40$ кэВ, $\Phi_{Ar}=10^{17}$ см^{-2} , $T_{Ar}=500^{\circ}\text{C}$)

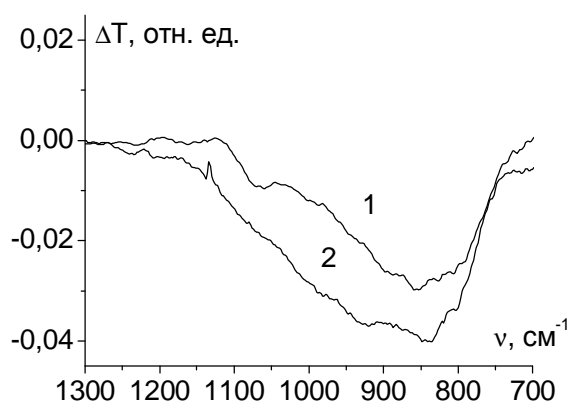


Рис.16. Разница в ИК-спектрах пропускания образцов кремния, облученных ионами азота с $E_N=150$ кэВ, $\Phi_N=5 \cdot 10^{17}$ см^{-2} , $T_N=400^{\circ}\text{C}$ и после: отжига при $T_N=700^{\circ}\text{C}$ (кривая 1); облучения Ar^+ с $E_{Ar}=40$ кэВ, $\Phi_{Ar}=3 \cdot 10^{17}$ см^{-2} , $T_{Ar}=500^{\circ}\text{C}$ (кривая 2)

Микродифракционная картина для образца, облученного Ar^+ при дозе $\Phi_{Ar} \geq 10^{17}$ см^{-2} и температуре $T_{Ar}=500^{\circ}\text{C}$ и отожженного даже при $T_{отж}=1100^{\circ}\text{C}$, имеет характерный для аморфных материалов вид диффузного гало (рис.14) в отличие от микродифракций образцов, не облученных Ar^+ или облученных аргоном при $T_{Ar}=20^{\circ}\text{C}$ и отожженных при такой же температуре начала кристаллизации.

Таким образом, при последовательном облучении кремниевой пластины встречными пучками ионов азота и аргона, когда внедрение аргона происходит при дозе $\Phi_{Ar} \geq 10^{17}$ см^{-2} и температуре $T_{Ar}=500^{\circ}\text{C}$ ($E_{Ar}=40$ кэВ), облучение аргоном стимулирует реакцию взаимодействия кремния с азотом, разрушаются центры кристаллизации сформированного

нитрида кремния. В результате, ионно-синтезированные слои Si_3N_4 сохраняются в аморфном состоянии, не происходит связанного с кристаллизацией растрескивания слоёв и ухудшения их изолирующих свойств, по крайней мере, при отжиге до 1100°C .

В четвертой главе анализируется изменение состояния поверхности кремния при различных дозах и температурах облучения ионами аргона, обсуждается механизм дальнего действия при имплантации ионов инертных газов и кремния.

Установлено, что по мере увеличения дозы облучения аргоном до $\Phi_{\text{Ar}} < 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при $T_{\text{Ar}} = 500^\circ\text{C}$, $E_{\text{Ar}} = 40 \text{ кэВ}$, на поверхности кремния образуются и растут блистеры (рис. 17-19). Образование кратеров, свидетельствующих о взрыве блистеров, наблюдалось только при $\Phi_{\text{Ar}} > 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и $T_{\text{Ar}} = 500^\circ\text{C}$ (рис. 20, 21). Изучение изменения состояния поверхности кремния с малым шагом по дозе и температуре позволяет утверждать, что взрыв блистеров происходит одновременно. Электронограммы поверхности образца свидетельствуют о том, что при $T_{\text{Ar}} < 500^\circ\text{C}$ облученная аргоном поверхность кремния является аморфной (рис. 22.а), а при $T_{\text{Ar}} = 500^\circ\text{C}$ кремний между блистерами, в том числе и на поверхности, становится кристаллическим, аморфной остается только оболочка блистера (рис. 22б). По виду кратеров определено также и то, что в случае аморфной поверхности ($T_{\text{Ar}} < 400^\circ\text{C}$), наблюдалось плавное истечение аргона сквозь отверстие в крышке блистера (рис. 20). Вскрывшиеся блистеры встречались редко. Связано это, видимо, с увеличением давления внутри блистера с ростом температуры имплантации.

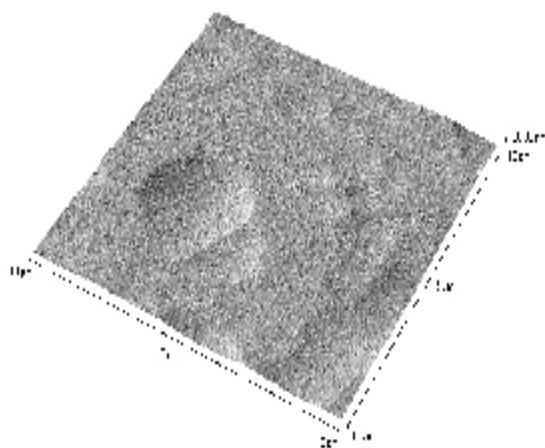


Рис.17. AFM-изображение поверхности кремния, облученной аргоном ($E_{\text{Ar}} = 40 \text{ кэВ}$, $\Phi_{\text{Ar}} = 10^{15} \text{ см}^{-2}$, $T_{\text{Ar}} = 500^\circ\text{C}$)

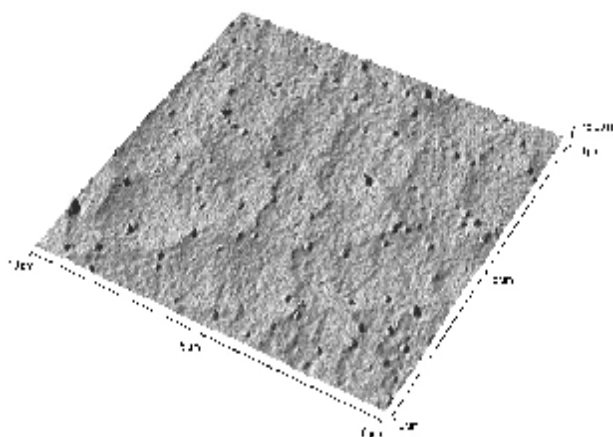


Рис.18. AFM-изображение поверхности кремния, облученной аргоном ($E_{\text{Ar}} = 40 \text{ кэВ}$, $\Phi_{\text{Ar}} = 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $T_{\text{Ar}} = 500^\circ\text{C}$)

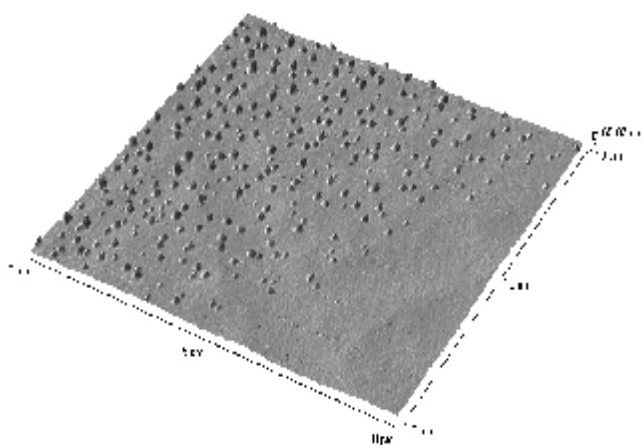


Рис.19. AFM-изображение поверхности кремния, облученной аргоном ($E_{\text{Ar}} = 40 \text{ кэВ}$, $\Phi_{\text{Ar}} = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $T_{\text{Ar}} = 500^\circ\text{C}$). Изображение получено вблизи границы тени от держателя кристалла при облучении

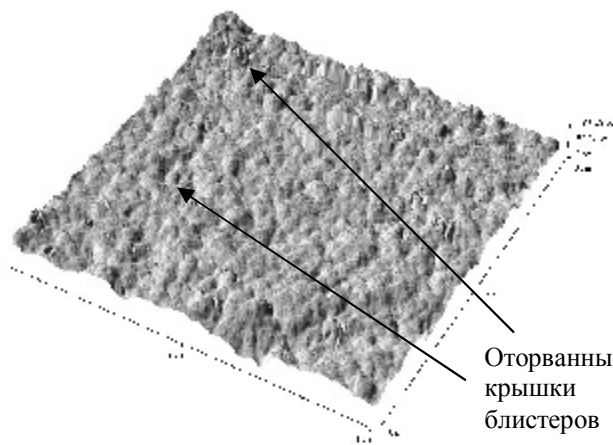


Рис.20. AFM-изображение поверхности пластины кремния, облученной ионами аргона ($E_{\text{Ar}} = 40 \text{ кэВ}$, $\Phi_{\text{Ar}} = 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_{\text{Ar}} = 100^\circ\text{C}$)

Оторванные
крышки
блистеров

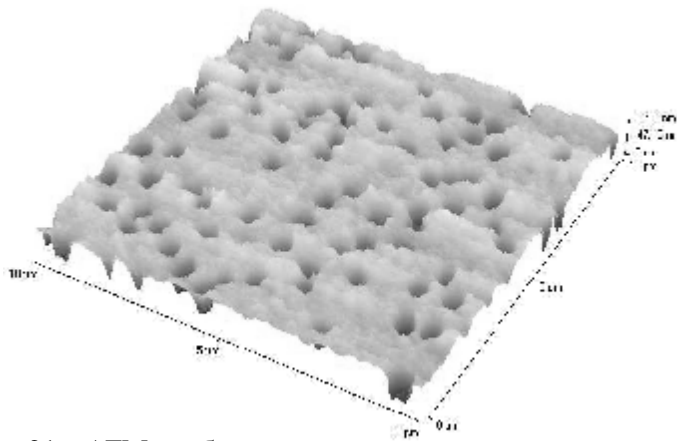


Рис.21. AFM-изображение поверхности пластины кремния, облученной ионами аргона ($E_{Ar}=40$ кэВ, $\Phi_{Ar}=3 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$, $T_{Ar}=500^\circ$ С)

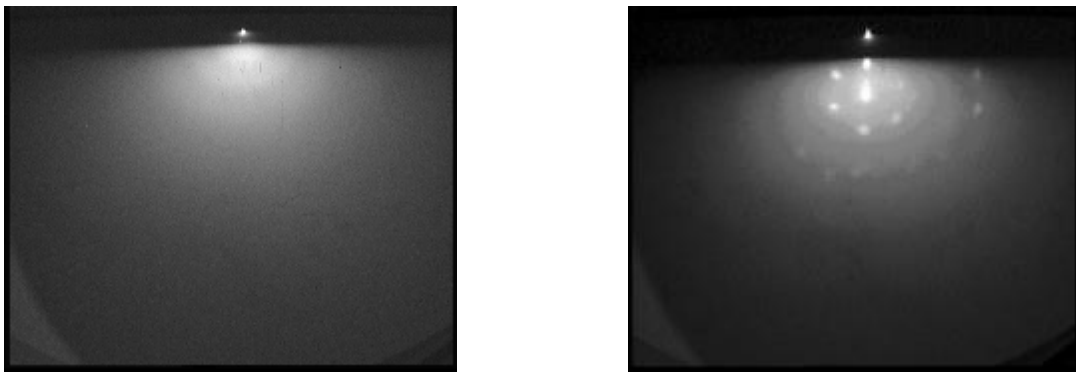
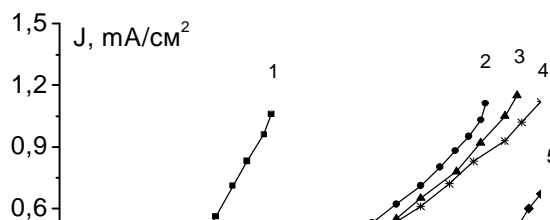


Рис.22. Электронограмма поверхности образца, облученного ионами аргона с энергией $E_{Ar}=40$ кэВ, дозой $\Phi_{Ar}=10^{17}$ см $^{-2}$, снятые на отражение при ускоряющем напряжении 50 кВ
(а) - $T_{Ar}=20^\circ$ С
(б) - $T_{Ar}=500^\circ$ С

С целью определения того, являются ли изменения ионно-синтезированного слоя следствием образования дислокаций под облученным слоем кремния, блистеров аргона и (или) их взрыва, было проведено сравнительное исследование воздействия дополнительного облучения Ne^+ , Si^+ и Ar^+ тыльной стороны пластины кремния, ранее облученной с лицевой стороны ионами азота. Такой выбор ионов обусловлен разной реакцией поверхности кремния на облучение. Известно, что в случае имплантации Ne^+ , блистеры образуются в глубине и не взрываются, при имплантации Si^+ блистеров нет. В обоих случаях под облученным слоем образуется дислокационная сетка.

Сравнение свойств ионно-синтезированной гетеросистемы Si_xN_y -Si после облучения противоположной стороны пластины кремния ионами Ne^+ , Si^+ , Ar^+ показало (рис. 23), что эффект стимулирования реакции синтеза фазы нитрида кремния наблюдался только в образцах, облученных ионами аргона. В случае же облучения Ne^+ и Si^+ некоторое улучшение изолирующих свойств было таким же, как и без облучения в случае отжига при $T_{отж}=500^\circ$ С. Проведенные исследования также показали, что в образцах со слоем Si_xN_y , облученных ионами Ne^+ и Si^+ , в отличие от аргона, ничего существенного не происходит. Граница раздела остается нечеткой (рис.24), сохраняется сильная дефектность азотированного слоя. В случае же облучения аргоном наблюдалась наиболее резкая граница раздела, заметно уменьшалось количество дефектов в нитридном слое, он становился однороднее.

Эксперименты с облучением неоном или кремнием дают основание полагать, что изменение свойств ионно-синтезированного слоя Si_xN_y происходит не по причине изменения дислокационной системы кристалла или скачкообразного роста блистеров, а вследствие взрыва блистеров.



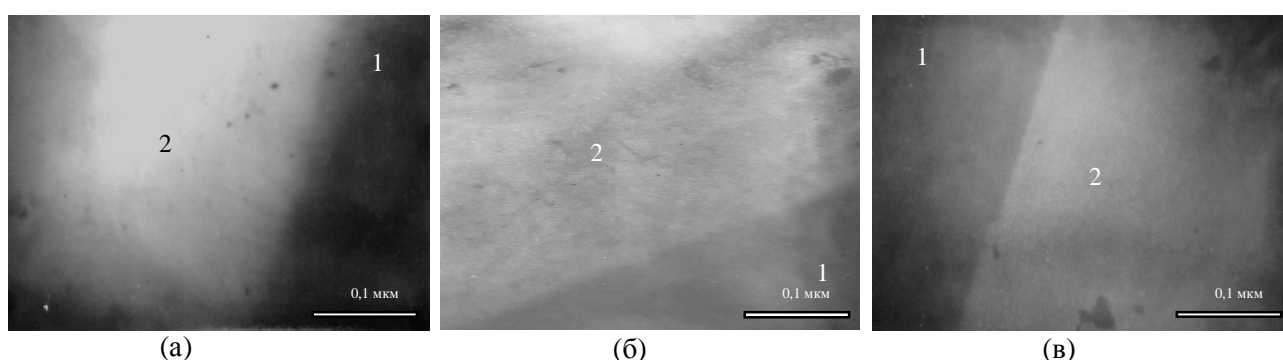


Рис.24. Микрофотографии границ раздела $\text{Si}_x\text{N}_y\text{-Si}$ в образцах, облученных азотом с $E_N=50$ кэВ, $\Phi_N=5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_N=400$ °С и с обратной стороны ионами: а – неона, б – кремния, в – аргона (во всех трех случаях $E=50$ кэВ, $\Phi=10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T=500$ °С). Здесь: 1- кремниевая подложка, 2 – синтезированный слой

В следующем эксперименте в пластину кремния, содержащую ионно-синтезированный слой Si_xN_y на противоположной стороне, производилась имплантация ионов аргона с параметрами, достаточными для изменения изолирующих и структурных свойств ($E_{\text{Ar}}=50$ кэВ, $\Phi_{\text{Ar}}=10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_{\text{Ar}}=500$ °С). При этом половина образца с азотированным слоем закрывалась другой кремниевой пластиной для частичной экранировки пучка ионов аргона (рис.25). Между экраном и образцом с азотированным слоем был зазор для предотвращения передачи акустических импульсов из экранирующей пластины кремния. Изучались электрические характеристики диодных структур металл(Al)-азотированный слой-кремний. Металлические контакты наносились напротив облученной и необлученной аргоном сторон образца. Контакты находились на расстоянии 2,5 мм от этой границы. Вольтамперные характеристики представлены на рис.26.

Из данных на рис.26 следует, что латерального эффекта нет. Распространение воздействующих на азотированный слой волн давления вследствие взрыва блистеров аргона происходит не по поверхности, а сквозь объем пластины кремния. При этом азотированный слой не отражает акустические импульсы, является эффективным поглотителем гиперзвука.

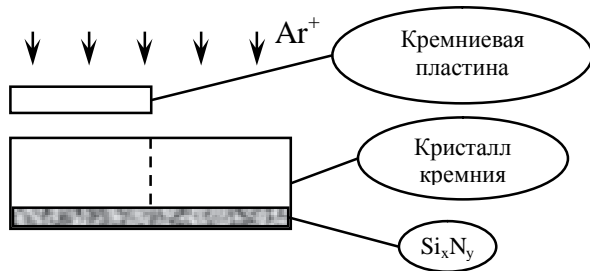


Рис.25. Схема эксперимента

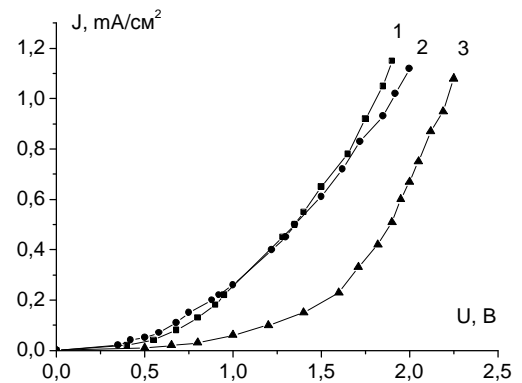


Рис.26. Вольтамперные характеристики образцов кремния, облученных азотом ($E_N=50\text{кэВ}$, $\Phi_N=5\cdot 10^{17}\text{см}^{-2}$, $T_N=400^\circ\text{C}$): 1 - только отжиг при $T_{\text{отж}}=500^\circ\text{C}$; 2 - закрытая от ионов аргона часть пластины; 3 - облученная аргоном часть пластины ($E_{\text{Ar}}=40\text{кэВ}$, $\Phi_{\text{Ar}}=10^{17}\text{см}^{-2}$, $T_{\text{Ar}}=500^\circ\text{C}$)

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Показано, что с увеличением температуры отжига ($T_{\text{отж}}$), облученных ионами азота слоёв кремния, существует корреляция между немонотонными зависимостями от $T_{\text{отж}}$ электросопротивления и числа парамагнитных центров этих слоёв.
2. Определено, что до $T_{\text{отж}}\cong 700^\circ\text{C}$ взаимодействие азота с кремнием происходит через образование парамагнитных достехиометрических комплексов, компенсирующих проводимость, а после $T_{\text{отж}}\cong 700^\circ\text{C}$ избыточный кремний выделяется во вторую фазу, начинается кристаллизация нитрида кремния, приводящая к растрескиванию слоёв и росту их проводимости через дополнительные каналы протекания тока.
3. Стимулирование реакции взаимодействия кремния с азотом происходит при последовательном облучении кремниевой пластины встречными пучками ионов азота и аргона ($E_{\text{Ar}}=40\text{кэВ}$, $\Phi_{\text{Ar}}\geq 10^{17}\text{см}^{-2}$, $T_{\text{Ar}}=500^\circ\text{C}$). При этом разрушаются центры кристаллизации сформированного нитрида кремния, а ионно-синтезированные слои Si_3N_4 сохраняются в аморфном состоянии. По крайней мере, до температуры отжига 1100°C не происходит связанного с кристаллизацией растрескивания слоёв и ухудшения их изолирующих свойств.
4. Отсутствие заметных изменений свойств ионно-синтезированного слоя нитрида кремния при последовательном облучении встречными по отношению к пучку ионов азота ионами неона или кремния, в отличие от ионов аргона, позволяет утверждать, что предполагавшийся ранее вклад в эффект дальнего действия скачкообразного изменения сетки дислокаций, формирующейся в области торможения ионов аргона, не является существенным.
5. Модификация изолирующих и структурных свойств ионно-синтезированного слоя нитрида кремния происходит при последующем, встречном по отношению к имплантации азота, облучении ионами аргона в узком интервале доз $(8-10)\cdot 10^{16}\text{см}^{-2}$ ($E_{\text{Ar}}=40\text{кэВ}$, $T_{\text{Ar}}=500^\circ\text{C}$).
6. Основной вклад в стимулирование реакции взаимодействия азота с кремнием оказывают акустические импульсы от взрыва блистеров аргона. Этому способствует аморфно-кристаллическое состояние поверхности кремния, облученной ионами аргона.

Список цитируемой литературы

1. Данилин, А.Б. Ионный синтез скрытых слоев в кремнии и его перспективы в современной микроэлектронике /А.Б. Данилин // Электронная промышленность. –1990. – №4. – С. 55–61.
2. Физические величины, справочник под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Михайлова. –М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

3. Исследование слоев нитрида кремния, синтезированных ионно–лучевым методом / Г.А. Крузе, Д.И. Тетельбаум, Е.И.Зорин, Э.В.Шитова, П.В.Павлов // Неорганические материалы. –1975. –Т. 11, №8. –С. 1381–1384.
4. Спонтанно–акустическое гиперзвуковое дальнедействующее стимулирование синтеза нитрида кремния при ионном облучении аргоном / Е.С.Демидов, В.В.Карзанов, К.А.Марков, В.В.Сдобняков // ЖЭТФ. – 2001. – Т.120, вып. 3(9). –С. 637–649.
5. Гриценко, В.А. Численное моделирование собственных дефектов в SiO_2 и Si_3N_4 / В.А. Гриценко, Ю.Н.Новиков, А.В.Шапошников, Ю.Н.Мороков //ФТТ. –2001. – Т.35, вып. 9. – С. 1041–1049.

Основные публикации по теме диссертации

- A1. Стимулирование реакции синтеза диэлектрической фазы Si_3N_4 в слоях Si_xN_y дальнедействующей ионной обработкой / К.А.Марков, В.В.Карзанов, Е.С.Демидов, Д.И.Курицын, Д.А.Лобанов, В.В.Сдобняков // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Структура и свойства твердых тел», посвященной 40–летию физического факультета ННГУ им. Н.И.Лобачевского. Нижний Новгород. – 1999г. – 27–28 сентября. – С. 148–149.
- A2. Лобанов, Д.А. Влияние дозы внедрения аргона в обратную сторону кремниевой пластины на синтез фазы Si_3N_4 на лицевой стороне пластины / Д.А.Лобанов, В.В.Сдобняков // Тезисы докладов Всероссийской молодежной научной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто– и наноэлектронике. С.–Петербург. – 1999г. – 30 ноября – 3 декабря. – С. 53.
- A3. Влияние дополнительной ионно–лучевой обработки на синтез фазы Si_3N_4 в слоях кремния, обогащенных азотом / Е.С.Демидов, В.В.Карзанов, Д.А.Лобанов, К.А.Марков, В.В.Сдобняков // Тезисы докладов II Российской конференции по материаловедению и физико–химическим основам технологии получения легированных кристаллов кремния («Кремний – 2000»). Москва. – 2000г. – 9–11 февраля. – С. 259–260.
- A4. Карзанов, В.В. Влияние дополнительной имплантации ионов аргона на синтез фазы Si_xN_y в слоях кремния, обогащенных азотом / В.В.Карзанов, В.В.Сдобняков // Тезисы докладов Пятой Нижегородской сессии молодых ученых (Голубая Ока – 2000). Нижний Новгород. – 2000 г. – 24–28 апреля. – С. 25–26.
- A5. Влияние процессов образования и взрыва блистеров на поверхности кремния при облучении ионами аргона на свойства ионно–синтезированного слоя Si_xN_y / Е.С.Демидов, В.В.Карзанов, К.А.Марков, Е.А.Питиримова, В.В. Сдобняков // Тезисы докладов V Всероссийского семинара по физическим и физико–химическим основам ионной имплантации. Нижний Новгород. – 2000г. – 11–13 октября. – С. 29–30.
- A6. Стимулирование реакции синтеза фазы Si_3N_4 в слоях Si_xN_y с помощью дополнительной ионно–лучевой обработки тыльной стороны пластины кремния/ Е.С. Демидов, В.В.Карзанов, Д.И.Курицын, К.А.Марков, Д.А.Лобанов, В.В. Сдобняков // Вестник ННГУ. – 2000г. – Вып.1(3). – С. 271–280.
- A7. Сдобняков, В.В. Сопоставление влияния отжига и облучения инертными газами на свойства ионно–синтезированного слоя Si_xN_y / В.В.Сдобняков // Тезисы докладов Второй всероссийской молодежной научной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто– и наноэлектронике. С.–Петербург. –2000 г. – 4–8 декабря. – С. 35.
- A8. Влияние отжига и облучения инертными газами на свойства ионно–синтезированного слоя Si_xN_y / Е.С.Демидов, В.В. Карзанов, Д.А.Лобанов, К.А. Марков, Е.А. Питиримова, В.В. Сдобняков // Тезисы докладов XIX научных чтений имени академика Н.В. Белова. Нижний Новгород. – 2000г. – 14–15 декабря. – С. 118–120.
- A9. Дальнедействующее влияние облучения ионами аргона на синтез стехиометрической фазы нитрида кремния в слоях Si_xN_y , сформированных ионной имплантацией / Е.С.Демидов, В.В.Карзанов, Д.А.Лобанов, К.А.Марков, В.В. Сдобняков // ФТП. – 2001. – Т.35, вып.1. – С. 21–24.

- A10. Спонтанно–акустическое гиперзвуковое дальнедействующее стимулирование синтеза нитрида кремния при ионном облучении аргоном / Е.С.Демидов, В.В.Карзанов, К.А.Марков, В.В.Сдобняков // ЖЭТФ. – 2001. – Т.120, вып. 3(9). –С. 637–649.
- A12. Демидов, Е.С. Сопоставление влияния дополнительного облучения инертными газами и постимплантационных отжигов на свойства ионно–синтезированного слоя Si_xN_y / Е.С.Демидов, В. В.Сдобняков // Тезисы докладов Шестой Нижегородской сессии молодых ученых (Голубая Ока – 2001). Нижний Новгород. – 2001 г. – 22–27 апреля. – С. 36–37.
- A13. Sdobnyakov, V.V. Influence of additional processing by inert gases on the properties of the ion–synthesized layer Si_xN_y / V.V. Sdobnyakov // IEEE Microwave Magazin. – 2001. –Vol.2, №2. – P. 94.
- A14. Изменения свойств ионно–синтезированной гетеросистемы Si_xN_y –Si в результате термических и ионно–лучевых обработок аргоном, неоном и кремнием / В.В.Карзанов, К.А.Марков, В.В.Сдобняков, Е.С.Демидов. // ФТП. – 2002. – Т.36, вып.9. – С. 1060–1065.
- A15. Сопоставление результатов стимулирования синтеза изолирующих слоев Si_xN_y стационарным постимплантационным отжигом и дальнедействующим ионным облучением / Е.С.Демидов, В.В.Карзанов, К.А.Марков, В.В. Сдобняков // Тезисы докладов VI Всероссийского семинара по физическим и физико–химическим основам ионной имплантации. Нижний Новгород. – 2004 г. – 15–17 октября. – С. 54–55.
- A16. Демидов, Е.С. Спонтанно–акустическое гиперзвуковое дальнедействующее стимулирование синтеза нитрида кремния в кремнии при ионном облучении аргоном /В.В.Карзанов, К.А.Марков, В.В. Сдобняков // Сборник кратких описаний Важнейшие научные результаты. Нижегородский университет им. Н.И. Лобачевского. – 2004 г. – С. 123.
- A17. Стимулирование реакции синтеза фазы нитрида кремния в слоях Si_xN_y с помощью дополнительной ионно–лучевой обработки тыльной стороны пластины кремния и стационарных отжигов / Е.С.Демидов, В.В.Карзанов, К.А.Марков, В.В.Сдобняков // Тезисы докладов VII Всероссийского семинара физические и физико–химические основы ионной имплантации. Нижний Новгород. – 2004г. – 26–29 октября. – С. 60–61.
- A18. Демидов, Е.С. Парамагнитные дефекты в ионно–синтезированных слоях Si_xN_y / Е.С. Демидов, В.В.Карзанов, В.В.Сдобняков // Тезисы докладов VII Всероссийского семинара физические и физико–химические основы ионной имплантации. Нижний Новгород. – 2004г. – 26–29 октября. – С. 81.