

Шемухин Андрей Александрович

**Дефектообразование и рекристаллизация в пленках кремния  
на сапфире при ионном облучении**

Специальность 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и  
ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в отделе физики атомного ядра Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Научный руководитель: **Черныш Владимир Савельевич**

доктор физико-математических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник кафедры физической электроники физического факультета МГУ

Официальные оппоненты: **Лукичев Владимир Федорович**

член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, ФТИАН, зам. директора по научной работе, Москва

**Беграмбеков Леон Богданович**

доктор физико-математических наук, профессор, НИЯУ МИФИ, профессор кафедры физики плазмы, Москва

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «МАТИ» - Российский

государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского

Защита состоится « » ..... 2013 года в \_\_\_\_ часов на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, на соискание ученой степени кандидата наук Д501.001.77 на базе Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 5 («19 корпус» НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, МГУ имени М.В.Ломоносова (НИИЯФ МГУ)), ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Ломоносовский проспект 27.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» ..... 2013 г.

Учёный секретарь совета по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, на соискание ученой степени кандидата наук Д501.001.77, доктор физико-математических наук, профессор

С.И. Страхова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Кремний на сапфире (КНС) рассматривается как один из перспективных материалов для изготовления высокочастотных интегральных схем (ИС) с повышенной плотностью элементов. Структуры, изготовленные по этой технологии, более долговечны, имеют высокую радиационную стойкость и потребляют меньше энергии по сравнению со структурами, изготовленными на массивном кремнии.

Обычно КНС-структуры создаются методом газофазного осаждения кремния на монокристаллические сапфировые подложки с ориентацией  $(1, \bar{1}, 0, 2)$ .

В настоящее время для производства микросхем выращиваются плёнки кремния с толщинами около 300 нм. Однако, для изготовления электронных приборов с высоким быстродействием толщина кремниевого слоя должна быть не более 100 нм. Проблема получения таких тонких слоев заключается в том, что на ранних стадиях эпитаксиального роста из-за различия параметров кристаллической решетки кремния и сапфира именно в этом слое возникает большое количество структурных дефектов. Наличие таких дефектов является существенным препятствием для производства интегральных схем на основе КНС структур.

Уменьшить плотность дефектов в переходном слое возможно за счет эпитаксиальной рекристаллизации в твёрдой фазе. На первом этапе этого процесса пленка кремния аморфизуется вблизи границы раздела с сапфиром с помощью ионной имплантации. При этом вблизи поверхности кристаллическая структура пленки кремния остается неповрежденной. В указанных публикациях установлено, что после имплантации и процедуры отжига кристаллическая структура пленки кремния на сапфире существенно улучшается. Однако анализ опубликованных к моменту начала выполнения настоящей диссертационной работы показал, что до

этого не были оптимизированы параметры процессов имплантации и отжига. И, главное, не были ясны механизмы существенного улучшения кристаллического совершенства кремниевой пленки. В частности, не ясен вопрос с выбором оптимальной энергии имплантации.

Поэтому **целью диссертационной работы** являлось:

Экспериментально изучить процессы образования дефектов в пленках кремния на сапфире под действием ионного облучения и выявить механизмы эпитаксиальной твердофазной рекристаллизации.

**Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие задачи:**

1. Разработать методику исследования образования радиационных дефектов в пленках кремния на сапфире под действием облучения ионов высоких энергий.

2. Изучить влияние энергии, дозы и плотности потока имплантируемых частиц на степень аморфизации КНС-структур.

3. Исследовать влияния температурных режимов, при которых происходит имплантация, на степень разрушения кристаллической решетки кремниевой пленки под действием ионного облучения.

4. Провести анализ механизмов восстановления кристаллической решетки после ионного облучения и высокотемпературного отжига.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. В отличие от массивного кремния, для которого аморфизация наблюдается при  $5 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>, пленки кремния на сапфире аморфизуются при меньших критических дозах облучения ( $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>).

2. Основным механизмом восстановления кристаллической структуры является рекристаллизация в пленке кремния от поверхностного слоя, являющегося затравкой. Оптимальная толщина затравочного слоя составляет 30 нм.

3. Для процесса реализации эпитаксиальной рекристаллизации необходимо разрушить ионным облучением сильно дефектную область плёнки кремния. Показано, что для получения пленок кремния с высоким качеством кристалличности, необходимо также разупорядочить кристаллическую структуру сапфира вблизи границы кремний-сапфир.

4. Полное разрушение сильнодефектной области зависит от энергии имплантируемых ионов и температуры. Оптимальная энергия разупорядочения сильнодефектной области при температуре жидкого азота 200 кэВ, а при комнатной температуре 230 кэВ.

**Практическая значимость** диссертации обусловлена тем, что в работе разработаны физические основы промышленной технологии изготовления ультратонких слоев кремния на сапфире. При этом основные результаты были получены как на «лабораторных» образцах КНС, так и на КНС пластинах диаметром 150мм, используемых в промышленности для производства ИС.

**Личный вклад диссертанта** состоит в модернизации вакуумной камеры линии имплантации, проектировании и изготовлении дополнительных устройств, позволяющих проводить эксперименты по имплантации в широком диапазоне температур облучаемых объектов, созданию устройства для контроля однородности дозы имплантируемых ионов. Диссертантом проведены экспериментальные исследования и выполнен анализ экспериментальных результатов по исследованию влияния параметров ионного облучения на качество кристалличности пленок кремния на сапфире.

### **Апробация результатов работы.**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях и симпозиумах:

- Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2010, 2011, 2012, 2013);
- Научная сессия в МИФИ (Москва, 2011);
- Научная конференция «Ломоносовские чтения» (Москва, 2011);
- XII Межвузовская школа молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (Москва, 2011);
- International Conference «Micro- and Nanoelectronics - 2012» (Russia, Zvenigorod, 2012);
- International Conference on Atomic Collisions in Solids» (Japan, Kyoto, 2012)

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 работ, список которых приведён в конце автореферата.

### **Структура диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения. Работа содержит 111 страниц машинописного текста, 58 рисунков, 5 таблиц. Список литературы включает 89 наименований.

### **Содержание диссертации**

**Во введении** дано обоснование актуальности темы представленной работы, сформулированы цели исследования, показана новизна и значимость работы, изложены выносимые на защиту положения, а также приведены сведения об апробации работы.

**В главе 1** дается обзор экспериментальных и теоретических работ по изучению влияния параметров ионного облучения и температуры мишени на дефектообразование и рекристаллизацию в твердотельных структурах.

В обзоре приводится сравнение электрофизических параметров пленок кремния на сапфире и массивных образцов кремния. Приведена краткая история исследования КНС-структур. Показано, что улучшить качество кристалличности пленок кремния возможно с помощью ионной имплантации и последующей твердофазной эпитаксиальной рекристаллизации.

Далее рассмотрен процесс ионной имплантации и образование дефектов в твердых телах под действием ионного облучения. Дано краткое определение характеристик, используемых при описании взаимодействия ионов с веществом, рассмотрены экспериментальные и теоретические работы по изучению зависимости профиля распределения внедренных частиц и образованию дефектов в твердых телах. Показано, что образование дефектов в полупроводниках при ионном облучении зависит от типа внедренных ионов, энергии и дозы облучения, а также от температуры, при которой происходит облучение материала.

Завершается обзор обсуждением работ, в которых рассмотрено влияние различных параметров облучения на степень разупорядочения и твердофазную эпитаксиальную рекристаллизацию пленок кремния на сапфире.

В выводах к главе 1 производится постановка задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** описывается аппаратура и методы исследования, используемые в работе.

В разделе 2.1 описан созданный для проведения исследований ускорительный комплекс на базе имплантатора «High Voltage Engineering Europe» на энергии ионов до 500 кэВ. Описана модернизированная экспериментальная камера с дополнительным оборудованием (систем диафрагм, систем контроля температуры образцов, и т.д.). Приведено описание систем охлаждения образцов, системы контроля температуры,

системы контроля однородности пучка. В виде блок-схемы приведено разработанное программное обеспечение, позволяющее контролировать температурный режим.

Раздел 2.2 посвящен рассмотрению используемых в работе методик. Показаны сильные и слабые стороны таких методик, как методика ширины кривой качания рентгеновского луча (ШКК), просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), масс-спектрометрия вторичных ионов (ВИМС), атомно-силовая микроскопия (АСМ).

Особое внимание уделено методике Резерфордского обратного рассеяния (РОР) в сочетании с каналированием, так как в данной работе этот метод являлся основным для определения структурного совершенства пленки кремния на сапфире.

**В третьей главе** представлены результаты исследования образования дефектов и рекристаллизации в пленках кремния на сапфире под действием ионного облучения. Исследовано влияние параметров облучения (энергия, доза) КНС-структур ионами  $\text{Si}^+$  на качество кристаллической структуры пленки кремния после проведения твердофазной эпитаксиальной рекристаллизации.

Эксперименты проводились на КНС-структурах с ориентацией кремниевой пленки (100), толщина которой составляла 300 нм.

Облучение КНС-структур ионами  $\text{Si}^+$  проводили на ускорителе НУЕЕ-500. Для предотвращения эффекта каналирования пучок ионов падал на образец под углом  $\alpha=7^\circ$  от нормали к поверхности. Остаточное давление в камере не превышало  $2 \cdot 10^{-4}$  Па. Доза имплантации варьировалась от  $10^{14}$  до  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>. Для предотвращения нагрева образца плотность тока во время эксперимента поддерживалась постоянной и составляла 1 мкА/см<sup>2</sup>. Равномерность имплантации обеспечивалась сканированием ионного пучка в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для точного определения дозы

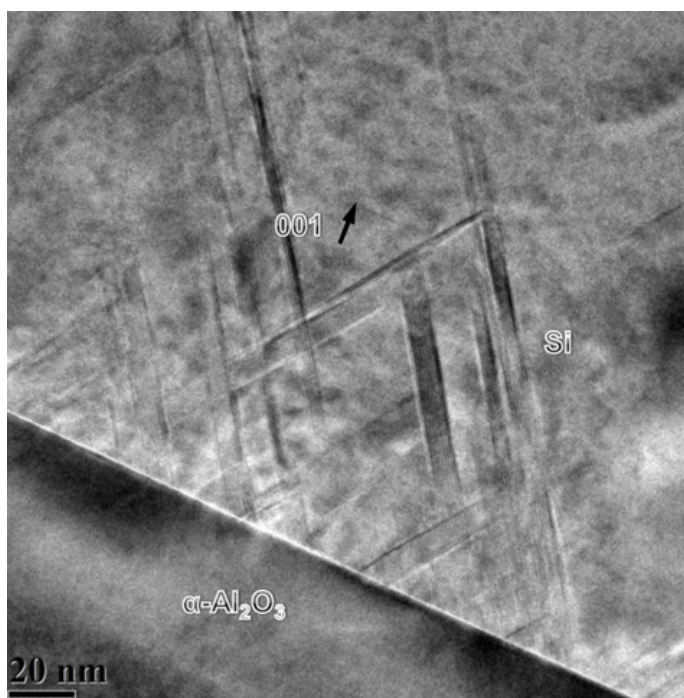


имплантации использовалась система диафрагм, позволяющая подавить ток вторичных электронов. Облучение образцов производилось в диапазоне температур от комнатной до температуры жидкого азота.

Контроль кристалличности структуры приготовленных образцов проводился с помощью метода рентгеноструктурного анализа (измерения ширины кривой качания (ШКК)), а также методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР). Запись спектров РОР проводилась с использованием ионов  $\text{He}^+$  с энергией 1,5 МэВ на ускорителе HVEE AN-2500. Пучок ионов падал вдоль нормали к поверхности образца, а угол рассеяния составлял  $\theta=120^\circ$ .

После имплантации проводился двухстадийный отжиг образцов в атмосфере азота при температурах 600-950° С.

Раздел 3.1 посвящен анализу исходных КНС-структур. На рис. 1 представлено ПЭМ изображение, на котором видно образование несовершенств кристаллической структуры эпитаксиально выращенной пленки кремния на сапфировой подложке.



*Рис. 1. ПЭМ изображение.*

Во всех образцах в пленке кремния обнаружены дефекты в виде двойников. Плотность проникающих дислокаций в образцах сравнительно

низка. В местах выклинивания двойников присутствуют двойникоующие дислокации. После объединения «островков» большая часть дефектов упаковки исчезла, однако небольшая часть все же присутствует вплоть до поверхности. Поэтому для получения пленок кремния на сапфире с высоким качеством кристаллического совершенства необходимо полностью разрушать кристаллическую структуру кремниевой пленки для того, чтобы кристаллическая структура пленки кремния не восстанавливалась по этим дефектам двойникам.

Измерение высоты пиков вторичных ионов основных элементов исходной изучаемой структуры  $^{27}\text{Al}^+$ ,  $^{28}\text{Si}^+$  показало, что граница раздела кремний-сапфир достаточно резкая.

Для оценки кристалличности напылённой плёнки спектры ROP записывались для двух направлений ориентирования кристалла относительно зондирующего пучка: в направлении, содержащем открытые каналы («align» или в режиме каналирования), и в направлении, не содержащем открытые каналы («random»). Сравнительная картина спектров для этих направлений показана на рис. 2.

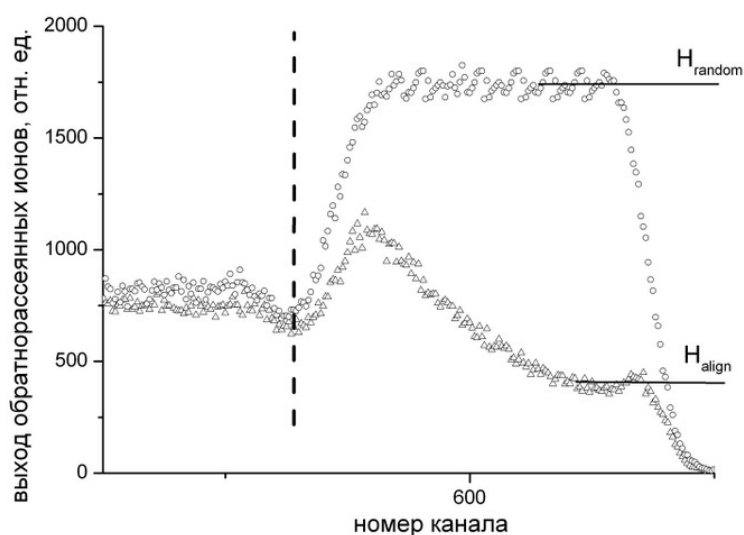


Рис. 2. Спектры ROP для исходной структуры кремний на сапфире.

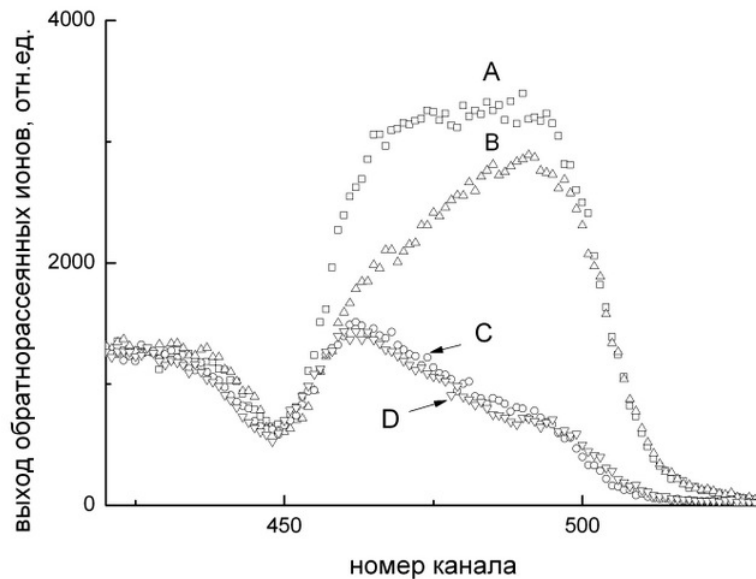
Моделирование, выполненное с помощью программных пакетов RUMP и SIMNRA, показало, что толщина плёнки кремния на сапфире

составляет 300 нм, что согласуется с результатами, полученными методом ВИМС.

В разделе 3.2 обсуждаются результаты экспериментов по исследованию механизмов образования дефектов и твердофазной рекристаллизации при ионном облучении. С помощью программного обеспечения SRIM 2010 рассчитаны теоретические профили залегания имплантируемых ионов.

Первый этап работ представлял собой изучение рекристаллизации от сапфировой подложки. Одним из вариантов ее активации было проведение высокодозного облучения (дозами свыше  $5 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>). При этом имплантация производилась с энергиями недостаточными для проникновения внедренных ионов в сильнодефектный переходный слой.

Результаты исследования КНС-структур с помощью методики РОР представлены на рис. 3. Выход обратнорассеянных ионов He<sup>+</sup> вблизи границы раздела меньше, чем вблизи поверхности. Это говорит о том, что восстановление кристаллической структуры идет от сапфировой подложки. Однако после твердофазной эпитаксиальной рекристаллизации качество кристалличности кремниевой пленки заметно не улучшилось. После проведения повторного отжига при 1100<sup>0</sup> С наблюдается некоторое улучшение, по-видимому, связанное с тем, что часть дефектов все же отжигается.

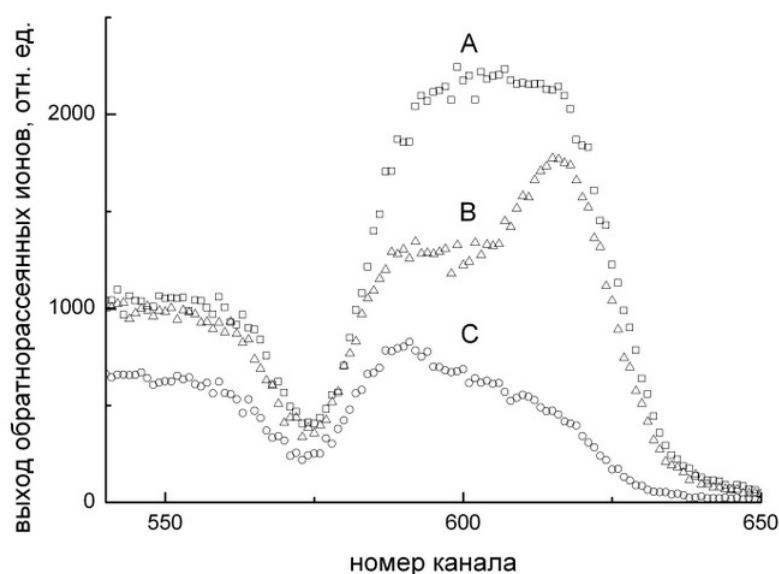


*Рис. 3. Энергетический спектр обратнорассеянных ионов  $He^+$ . В (канал): после имплантации 160 кэВ,  $5 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> и высокотемпературной обработки; С (канал): исходная КНС-структура; D – после обработки 1100<sup>0</sup>С; А – направление, в котором канал отсутствует. Пленка 300 нм.*

Другой возможный вариант активации рекристаллизации от сапфировой подложки – это имплантация в две стадии с разными энергиями. При этом разрушение структуры происходит на разной глубине. Таким образом, варьируя энергию и дозу облучения, можно разупорядочить необходимую толщину кремниевой пленки.

Из представленных на рис. 4 РОР-спектров видно, что высокотемпературный отжиг не приводит к заметному улучшению кристаллической структуры кремниевой пленки. Ступеньки на кривой говорят о том, что при использовании двойной имплантации в пленке кремния разупорядочение происходило неравномерно. Между профилями распределения внедренных ионов есть буферный слой, где структура была не полностью разупорядочена. Это говорит о том, что при проведении двойной имплантации в пленке кремния, на «стыке» профилей распределения внедренных ионов могут оставаться не разрушенные облучением области, по которым может происходить восстановление структурных дефектов. Обнаружено также, что дальнейшее увеличение

температуры и времени отжига приводит к внедрению алюминия в кремниевую подложку.



*Рис. 4 Энергетический спектр обратнорассеянных ионов  $He^+$ . В (канал) - после двойной имплантации: 130 кэВ,  $5 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> + 65 кэВ,  $5 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> и высокотемпературной обработки; С (канал): исходная КНС-структура; А – направление, в котором канал отсутствует. Пленка 250 нм.*

Таким образом, наши исследования не подтверждают выводы работ, в которых утверждается, что затравкой в процессе твердофазной эпитаксиальной рекристаллизации является поверхность сапфира. Отметим, что в указанных работах для исследования кристалличности КНС-структур применялась методика ШКК, которая даёт интегральную по толщине плёнки информацию. Авторы установили, что степень кристалличности улучшается в 1,5 раза. Некоторое улучшение кристалличности КНС-структур, наблюдавшееся авторами, связано, на наш взгляд, с тем, что после имплантации и высокотемпературного отжига происходит отжиг дефектов в верхней части плёнки, тогда как кристаллическая структура сильно нарушенного слоя вблизи границы раздела кремний-сапфир не изменяется.

На втором этапе работы изучалась возможность реализации рекристаллизации с двумя центрами. В этих экспериментах имплантация производилась с энергией, недостаточной для полного разрушения сильнодефектной области, а доза подбиралась таким образом, чтобы вблизи поверхности остался слой кремния, не разрушенного ионным облучением.

Для изучения влияния энергии имплантируемых частиц был проведен следующий эксперимент: образцы с толщиной кремниевой пленки в 300нм облучались с энергиями 150-180 кэВ. Доза имплантации на всех образцах  $5 \times 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>. После проведения отжига были получены спектры РОР образцов. На рис. 5 показаны параметры кристалличности, полученные с помощью методики РОР. Заметного улучшения структуры в исследуемом диапазоне не происходит. Вероятнее всего, восстановление кристаллической структуры идет по не разрушенным ионной имплантацией центрам в сильнодефектной области.

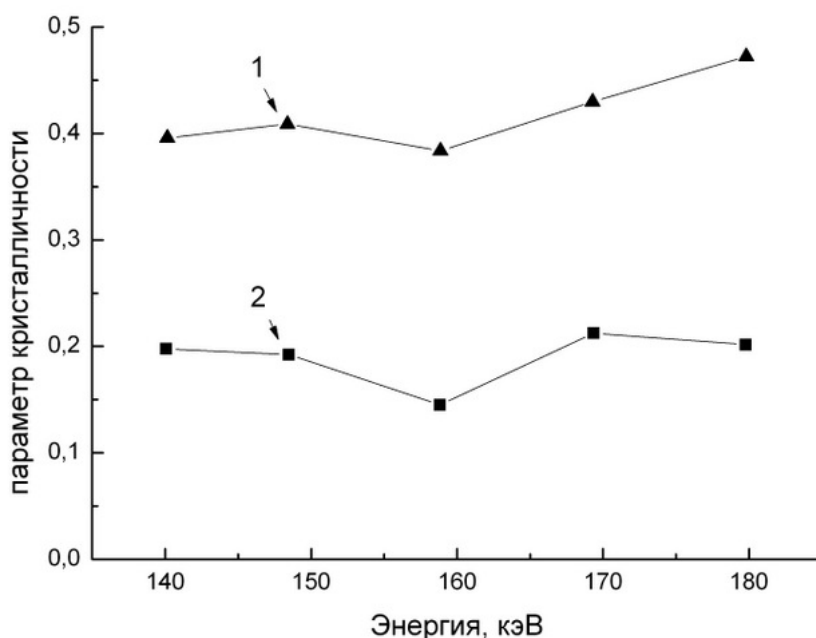


Рис. 5. Зависимость качества кристалличности кремниевой пленки от энергии облучения. 1 – у границы раздела, 2 – у поверхности.

Для изучения влияния дозы облучения при определенной энергии на процесс рекристаллизации была проведена следующая серия

экспериментов. В образцы с толщиной пленки кремния 250 нм была проведена имплантация при энергии 140 кэВ. Набранные дозы варьировались от  $2.5 \times 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> до  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>. После проведения отжига были получены спектры РОР образцов. Как видно из рис. 6, с увеличением дозы облучения заметного изменения кристаллической структуры не происходит. Наилучшая кристалличность была достигнута при дозе облучения  $7,5 \times 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>.

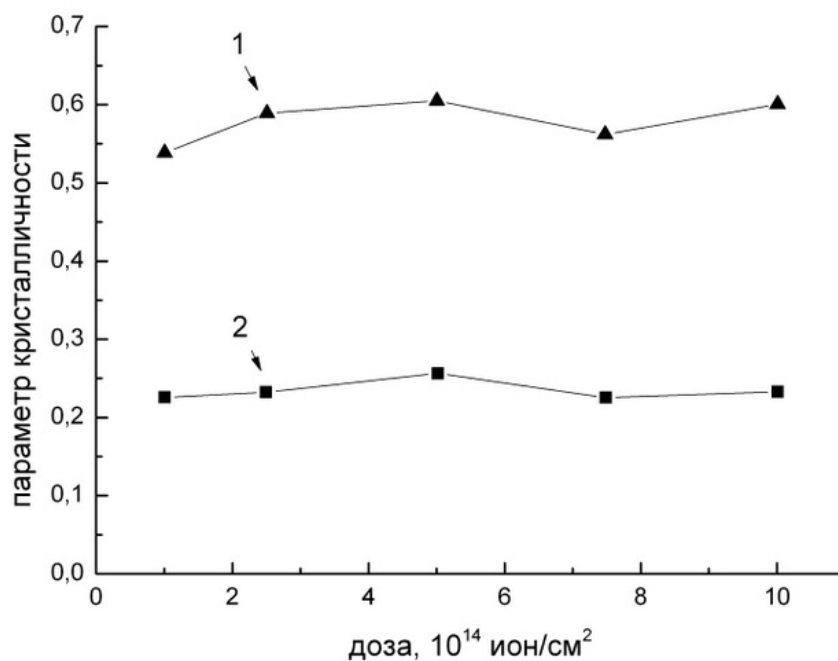


Рис.6. Влияния дозы облучения на процесс твердофазной эпитаксиальной кристаллизации. 1 – у границы раздела, 2 – у поверхности.

В проведенных экспериментах не было установлено однозначного влияния параметров ионного облучения на твердофазную рекристаллизацию.

И наконец, исследовалась возможность рекристаллизации от внешней поверхности кремниевой пленки. В работе показано, что при температурах жидкого азота требуются меньшие дозы аморфизации. Поэтому дальнейшие эксперименты были проведены при температурах жидкого азота.

В таблице I представлены результаты изучения кристаллической структуры кремниевой пленки с помощью РОР и ШКК после имплантации ионов кремния с энергией 200 кэВ различными дозами и последующего высокотемпературного отжига. В столбце 3 указаны параметры кристалличности, полученные с помощью методики РОР. Величины рассчитаны как отношение максимума сигнала обратнорассеянных ионов  $\text{He}^+$  в направлении каналирования к сигналу в направлении, не содержащем открытых каналов. Из представленных данных в таблице I видно, что точность определения оптимальной дозы облучения выше при использовании метода РОР.

Таблица I.

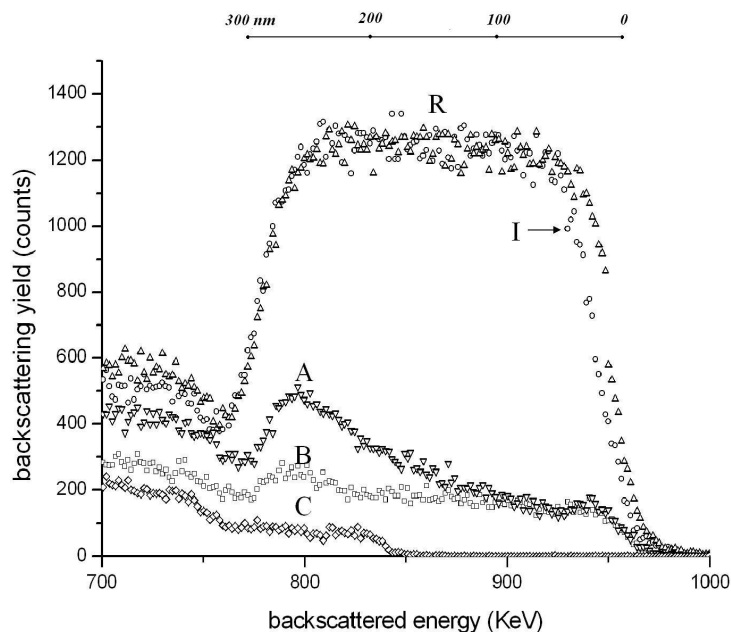
Доза имплантации, ион/см <sup>2</sup>	Параметр кристалличности по ШКК, град	Параметр кристалличности по РОР
$1 \cdot 10^{14}$	0,43	0,46
$2 \cdot 10^{14}$	0,42	0,46
$4 \cdot 10^{14}$	0,37	0,41
$6 \cdot 10^{14}$	0,36	0,31
$8 \cdot 10^{14}$	0,38	0,45
$10 \cdot 10^{14}$	0,67	0,48
исходная	0,40	0,46

Наибольшее улучшение кристаллической структуры достигнуто при облучении ионами  $\text{Si}^+$  с дозой  $6 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>. При указанных параметрах эксперимента толщина приповерхностной монокристаллической пленки кремния, служащей «затравкой», составляет около 30 нм. При уменьшении толщины этой области (то есть при увеличении дозы имплантированных ионов) качество кристалличности структуры падает. Имплантация с меньшими дозами не приводит к разрушению сильнодефектного слоя вблизи границы раздела. В этом случае центрами кристаллизации кроме верхнего «затравочного» слоя являются и недостаточно разрушенные облучением области. При имплантации с дозами выше  $6 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> происходит полное разрушение кристаллической структуры затравочного



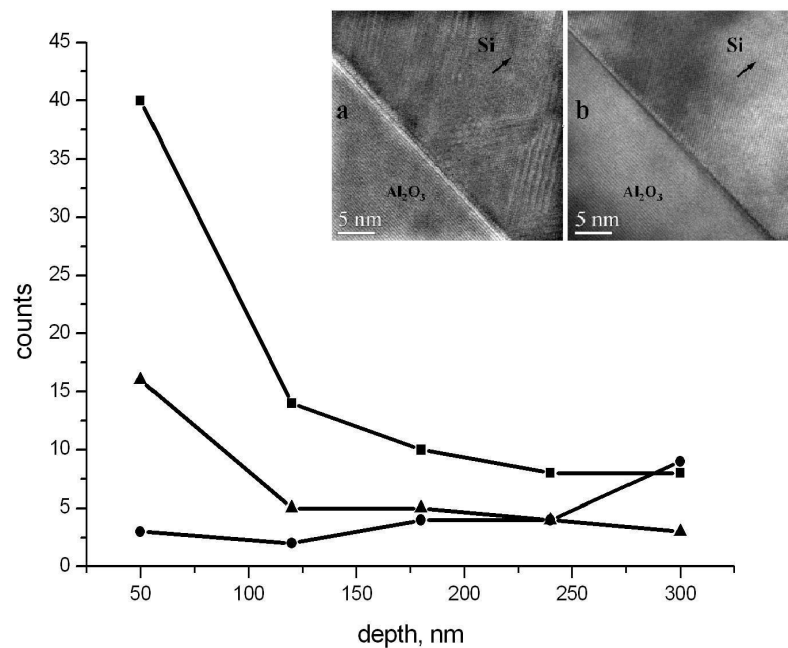
слоя. Восстановление кристаллической структуры при отжиге, по всей видимости, идет в этом случае от кристаллического слоя, оставшегося у границы раздела кремний-сапфир, не до конца разрушенного ионной имплантацией.

Из представленного спектра РОР (рис. 7) видно, что после имплантации в исходной структуре осталась узкая область кристаллического кремния порядка 30 нм вблизи поверхности. Остальная часть пленки кремния полностью разупорядочена. Тонкая монокристаллическая область вблизи поверхности кремния является центром кристаллизации для аморфной части. Остальные возможные центры рекристаллизации, находящиеся в сильнодефектной области у границы раздела «кремний-сапфир», были разрушены ионным облучением. После проведения высокотемпературной обработки качество кристаллической структуры улучшилось более чем в два раза, а после утонения с последующим отжигом остаточных дефектов оно улучшилось в четыре раза по сравнению с исходной структурой. Отметим также, что в отличие от метода ШКК, дающего интегральную по толщине кремниевой пленки информацию, методика РОР в режиме каналирования позволяет определить распределение степени дефектности по глубине.



*Рис. 7 Энергетический спектр обратнорассеянных ионов  $He^+$  с энергией 1,5 МэВ для угла рассеяния 120 градусов. I (канал): после имплантации 200 кэВ,  $6 \times 10^{14} Si/cm^2$ ; A (канал): исходная КНС-структура; B (канал): имплантирован Si + высокотемпературная обработка; C (канал): после всех стадий обработки; R – направление, в котором канал отсутствует.*

Результаты исследования КНС-структур после проведения ионного облучения и активации твердофазной рекристаллизации с применением методики ПЭМ подтверждают данные измерений РОР. Представленная на рис. 8 зависимость показывает распределение структурных дефектов по толщине кремниевой пленки. Видно, что в области толщиной 100 нм вблизи границы раздела кремний-сапфир в исходной пленке имеется большое количество дефектов двойникования. После облучения двойники практически исчезают, что говорит о рекристаллизации кремниевой пленки также и вблизи границы раздела. Сравнение кристалличности образца после имплантации и термической обработки с исходным состоянием показывает, что концентрация двойников значительно падает. Это хорошо согласуется с данными РОР в режиме каналирования. Отчетливо видно наличие высокой концентрации двойников в исходной структуре (рис. 4б, вставка **a**) и их отсутствие после ионной имплантации  $Si^+$  и последующей термической обработки (рис. 8, вставка **b**).



*Рис. 8 Зависимость концентрации двойников от расстояния, отсчитываемого от границы раздела «кремний-сапфир»: ■ – исходная КНС-структура; ● - после имплантации  $Si^+$  с энергией 200 кэВ, дозой  $6 \times 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>; ▲- после имплантации  $Si^+$  и высокотемпературной обработки.  
– ПЭМ изображение «КНС»- структур: *a* - до модификации; *b* – после модификации.*

Далее в этой главе обсуждаются результаты исследования влияния температуры мишени при облучении на степень разупорядочения пленки кремния. На рис. 9 представлены результаты сравнения экспериментальных данных с расчетами по модели, учитывающей каскадный механизм столкновений. Видно, что рассчитанные данные хорошо согласуются с экспериментальными. При указанных параметрах имплантации, когда каждый дефект как бы «вморожен», наблюдается практически полная аморфизация. При увеличении температуры мишени подвижность дефектов увеличивается и наблюдается частичный самоотжиг дефектов. Чем выше температура, тем ниже плотность радиационных дефектов.

Моделирование производили с помощью программы SRIM, где мишень предполагается неупорядоченной и гладкой на атомарном уровне.

Тепловые колебания решетки не учитываются, то есть фактически можно считать, что мишень находится при  $0^{\circ}\text{K}$ .

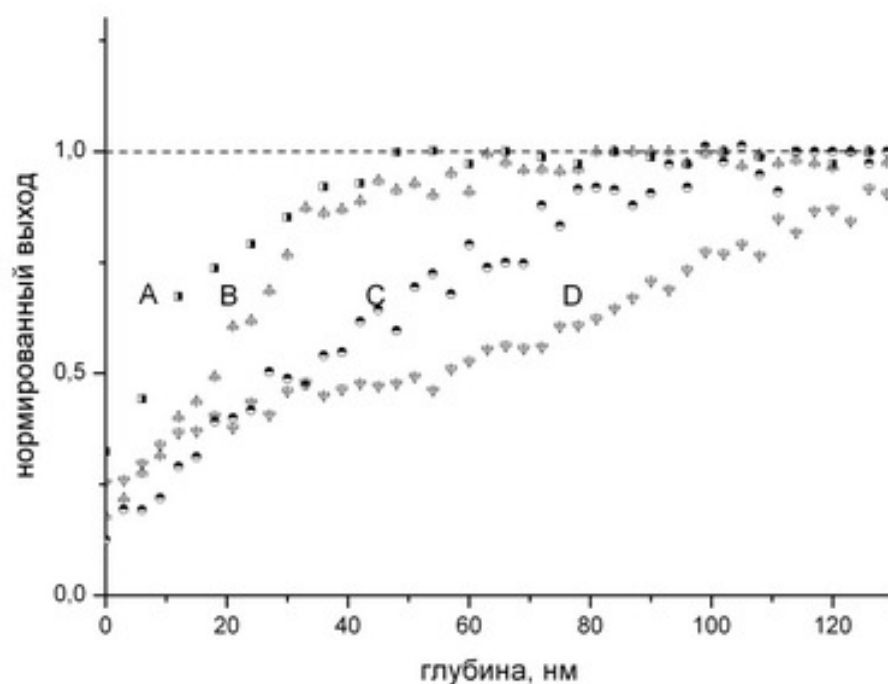


Рис. 9. Сравнение экспериментальных данных с расчетами. A – TRIM; B - при  $-10^{\circ}\text{C}$ ; C - при  $0^{\circ}\text{C}$ ; D - при  $22,5^{\circ}\text{C}$ .

В конце раздела обсуждаются результаты исследования дефектообразования и рекристаллизации при различных энергиях облучения. На рис 10 представлены РОР спектры КНС структур после облучения с энергией 200 кэВ, 215 кэВ и 230 кэВ. Доза имплантации составляла  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>. Облучение происходило при  $0^{\circ}\text{C}$ . При облучении ионами с энергией 200 кэВ и проведения температурной обработки наблюдается небольшое улучшение кристалличности. Из спектра видно, что в случае имплантации с энергией 215 кэВ количество структурных дефектов на глубинах соответствующих каналам 400-425 заметно уменьшилось. А при энергии 230 кэВ качество кристалличности сильнодефектной области улучшается в еще большей степени.

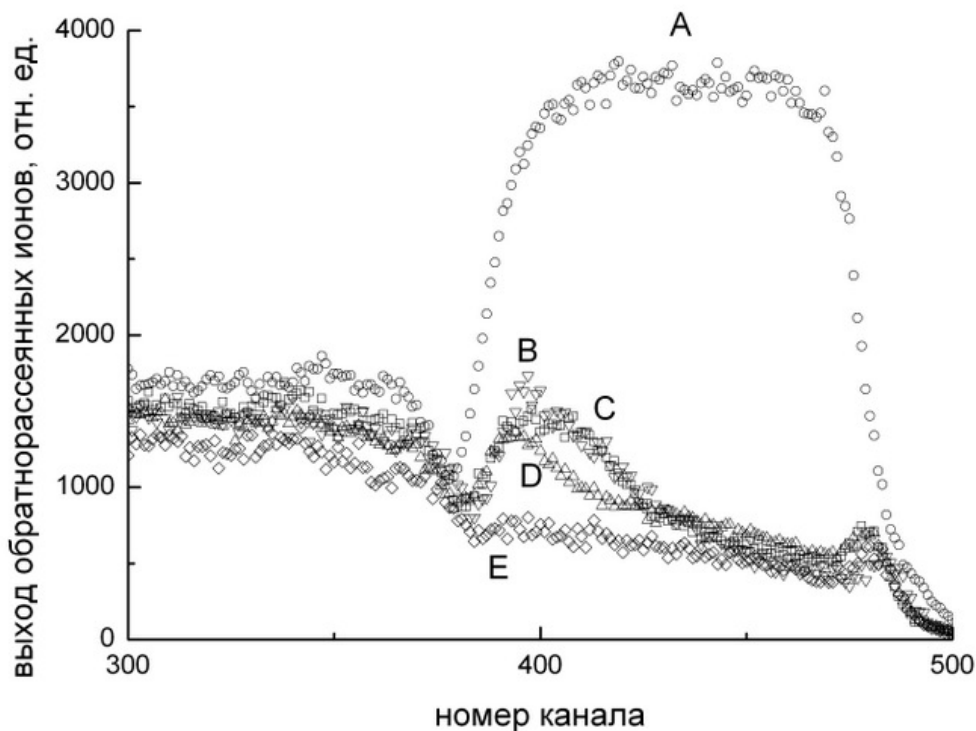


Рис. 10 Энергетический спектр обратнорассеянных ионов  $He^+$  с энергией 1,5 МэВ для угла рассеяния 120 градусов. I (канал): после имплантации 200 кэВ,  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>; B (канал): исходная КНС-структура; C (канал): имплантирован Si +, 200 кэВ высокотемпературная обработка; D (канал): Si+ 215кэВ; (E) (канал): Si+, 230кэВ; A – направление, в котором канал отсутствует.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

### Список публикаций по теме диссертации

1. А.А. Шемухин, Ю.В. Балакшин, В.С. Черныш А.С., Патракеев, С.А. Голубков, Н.Н. Егоров, А.И. Сидоров, Б.А. Малюков, В.Н.Стаценко, В.Д. Чумак. Формирование ультратонких слоев кремния на сапфире. Письма в ЖТФ, т. 38, вып. 19, стр. 83-89, 2012.

2. А.А. Шемухин, Ю.В. Балакшин, П.Н. Черных, В.С. Черныш. Спектроскопия рассеяния ионов средних энергий: изучение аморфизации германия под действием ионного облучения. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, №4, стр. 1-4, 2013.

3. A. Shemukhin, Yu. Balakshin, V.S. Chernysh. Mechanisms of improvement of the silicon layer crystal structure. Book of abstracts

«International Conference on Atomic Collisions in Solids» Japan, Kyoto, October 21-25, 2012 (ICACS-25). P. 202

4. Ю.В. Балакшин, С.А. Голубков, Н.Н. Егоров, А.С. Патракеев, В.С. Черныш, А.А. Шемухин. Формирование и исследование ультратонких слоев кремния на сапфировой подложке с помощью ионной имплантации. Тезисы докладов международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Россия, Москва, 2012 (PCI-2012). стр. 147

5. А.С. Патракеев, В.С. Черныш, Ю.В. Балакшин, С.А. Голубков, Н.Н. Егоров, И.А. Иванов, Д.В. Петров, А.А.Шемухин. Модификация свойств структуры «кремний-на-сапфире» методом ионной имплантации. Труды XII Межвузовской школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». Россия, Москва, 21-22 ноября 2011, стр. 210-212.

6. N.G. Chechenin, P.N. Chernykh, V.S. Chernysh, A.A. Shemukhin, A.A. Andreev, B.A. Bedulin, Yu.A. Ermakov, A.S. Patrakeev. Accelerator of heavy ions up to 500 keV. Proceedings of 40-th international conference on physics of interaction charged particles with crystals. Russia, Moscow, May 25-May 27, 2010 (PCI-2010). P. 142.

7. V.Chernysh, A. Shemukhin, Yu. Balakshin et. al. On a way to fabrication technology of ultra thin Si on sapphire. Proceedings of International Conference «Micro- and Nanoelectronics - 2012» Russia, Zvenigorod, October 1st – 5th, 2012 (ICMNE-2012). P. O3-37.

8. А.А. Шемухин, В.С. Черныш, П.Н. Черных, А.В. Назаров. Ускорительный комплекс на энергии ионов до 500 кэВ. Труды XII Межвузовской школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». Россия, Москва, 21-22 ноября 2011, стр. 213-217.

9. Шемухин А.А., Черных П.Н., Черныш В.С., Балакшин Ю.В., Назаров А.В. Ионно-пучковые методики ускорительного комплекса НУЕЕ-500 НИИЯФМГУ. Сборник трудов 11 всероссийского семинара «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики». Россия, Москва, 2013, стр. 149-152.

10. А.А. Шемухин, В.С. Черныш, Ю.В. Балакшин. Механизмы улучшения качества кристалличности слоев кремния. Тезисы докладов 43 международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Россия, Москва, 28-30 мая 2013, (МКФВЗЧК -2013). с. 137.