

Доклад по материалам диссертации, представленной на соискание степени кандидата
физико-математических наук

Исследование образования дефектов и рекристаллизации в пленках кремния на сапфире при ионном облучении

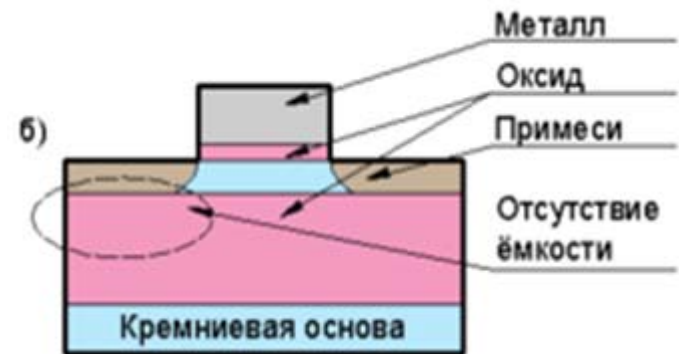
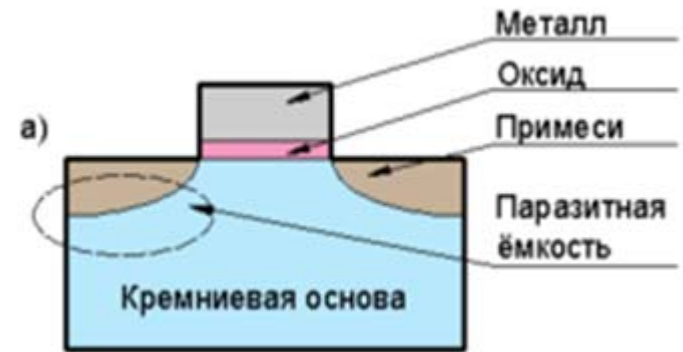
Шемухин А.А.

Руководитель:

профессор В.С. Черныш

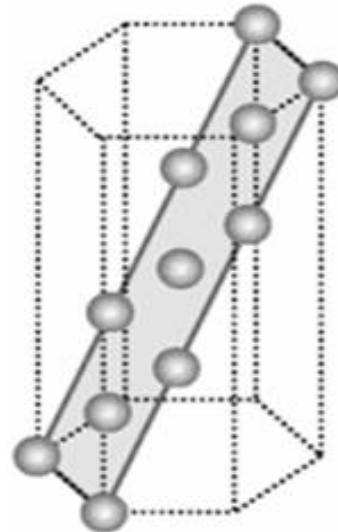
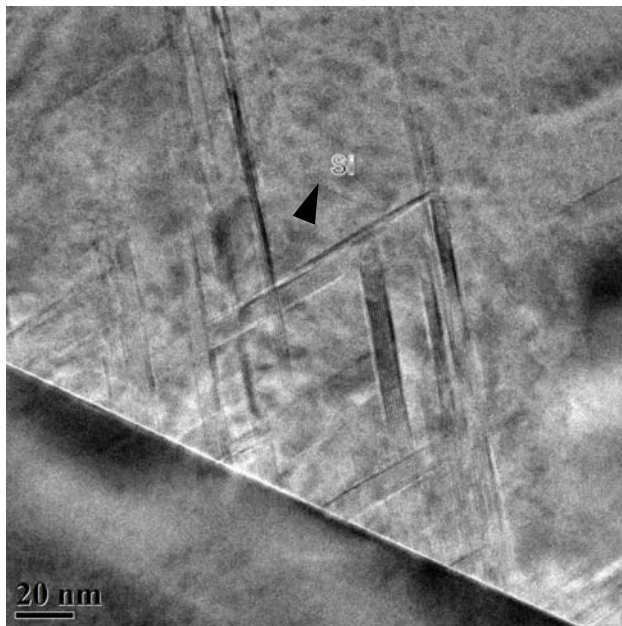
Актуальность темы

- Кремний является основным материалом современной микроэлектроники. В результате уменьшения размеров элементов интегральных микросхем, увеличилось влияние паразитных эффектов. Для уменьшения влияния паразитных эффектов было предложено использовать структуры кремний на сапфире
- КНС-структуры более долговечны, имеют высокую радиационную стойкость и потребляют меньше энергии по сравнению со структурами на массивном кремнии

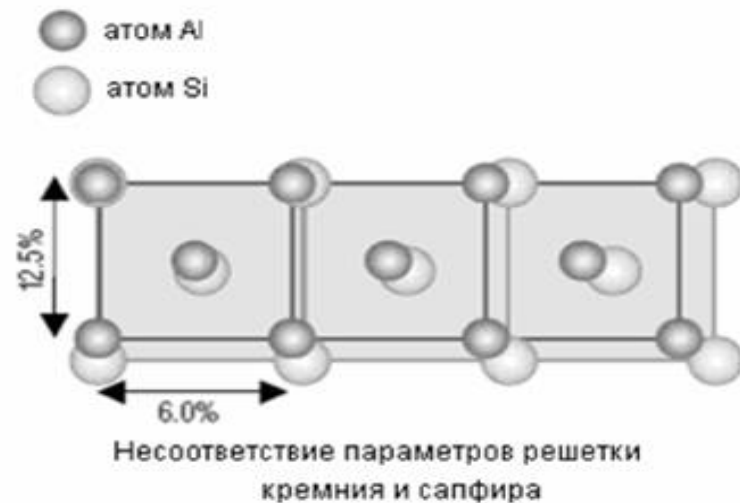


Актуальность темы

На сегодняшний день налажен выпуск 300 нм пленок кремния, однако необходимо получить кремниевую пленку 100 нм толщины с высокой степенью кристалличности на кристалле сапфира. 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.

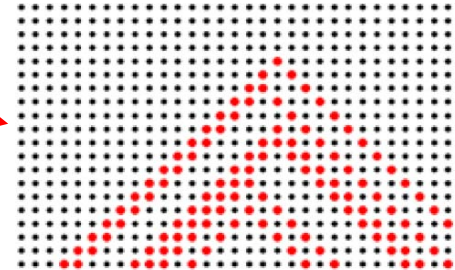
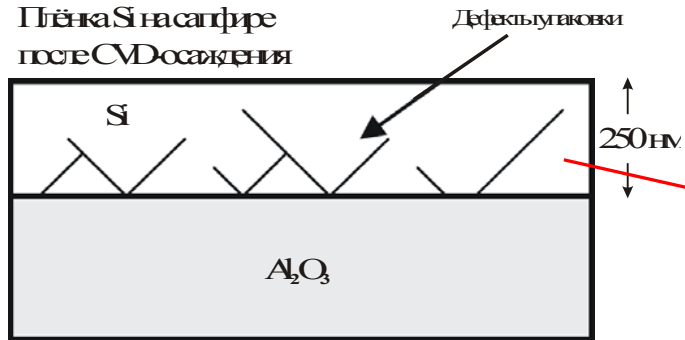


Решетка сапфира

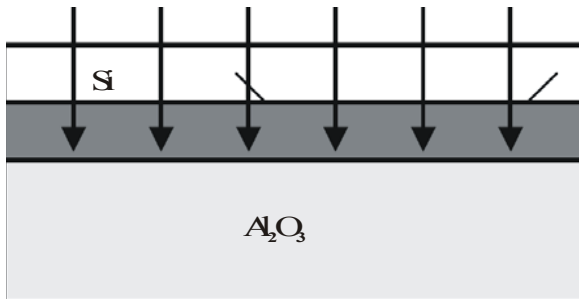


Твердофазная эпитаксиальная рекристаллизация

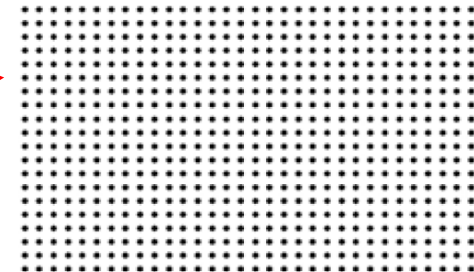
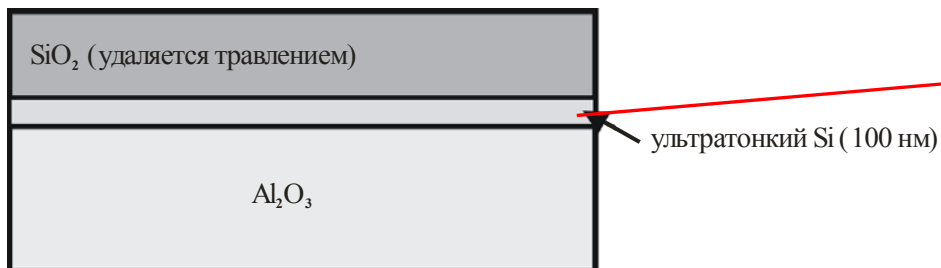
Плёнка Si на сапфире
после CVD осаждения



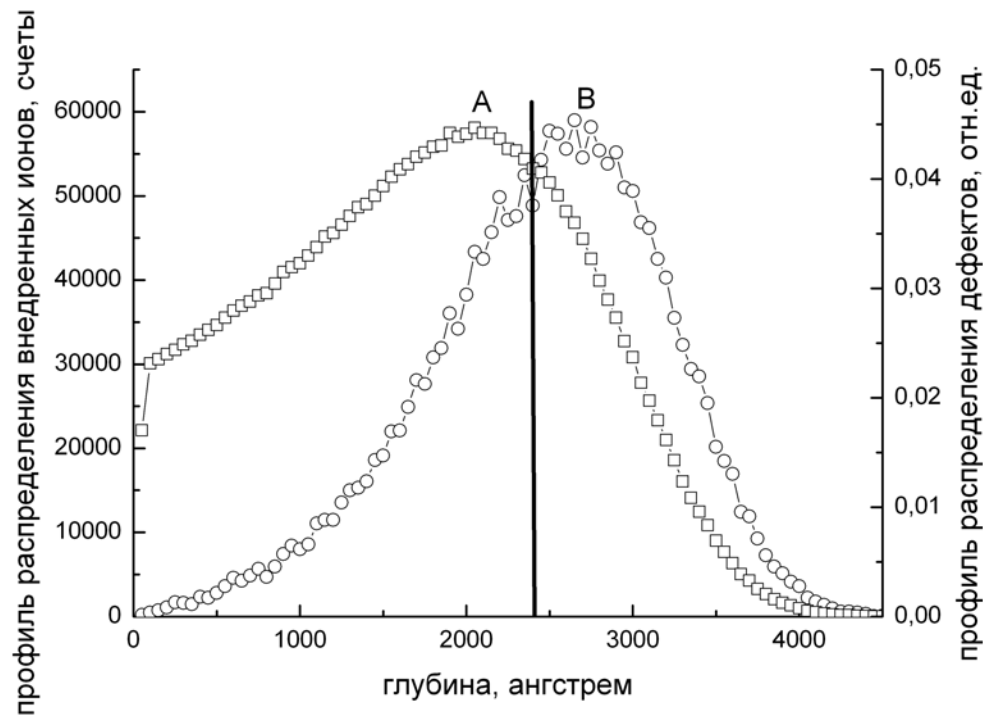
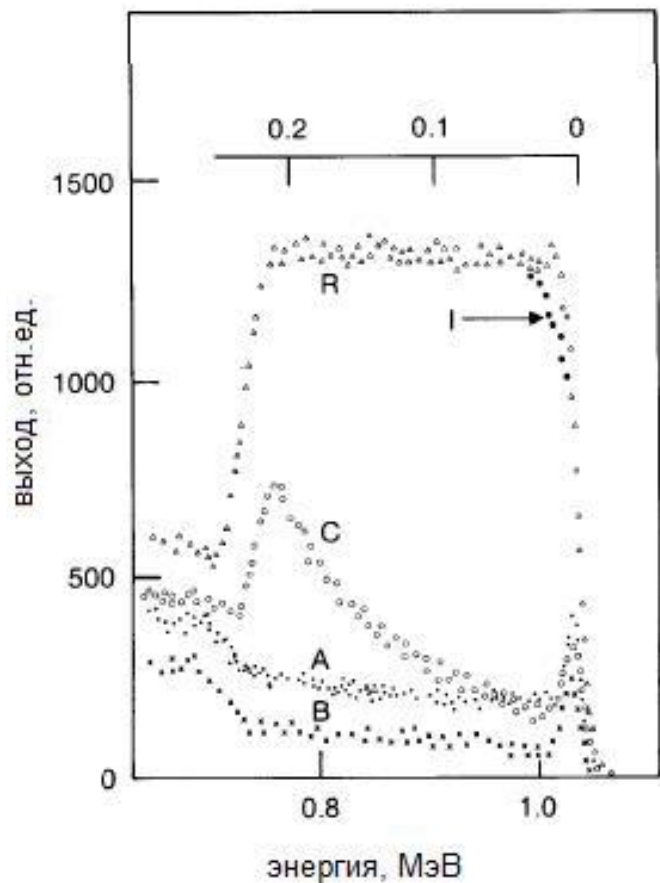
Имплантация ионов Si^+



Отжиг и термическое окисление

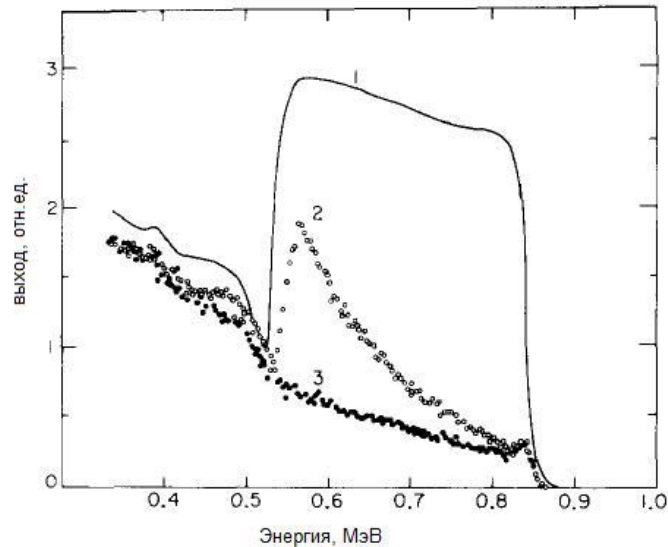


Твердофазная эпитаксиальная рекристаллизация



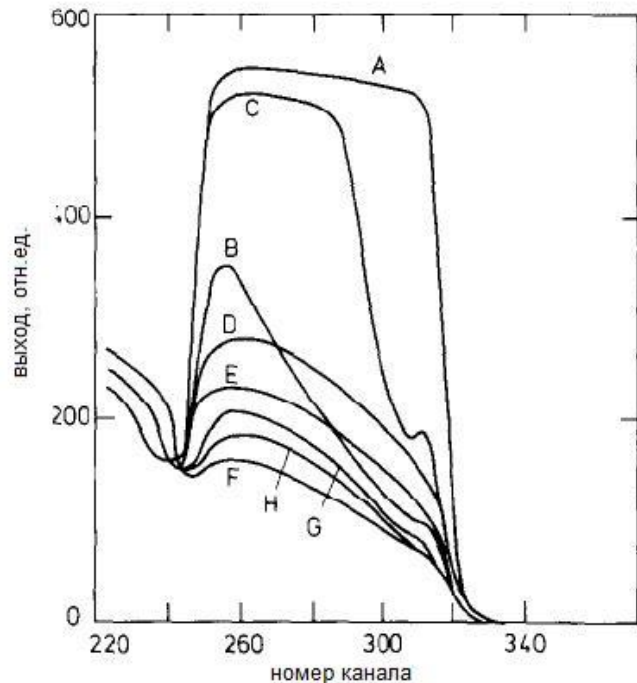
Параметры имплантации: $1,4 \times 10^{15} \text{ Si/cm}^2$, 180 кэВ

Твердофазная эпитаксиальная рекристаллизация



Appl. Phys. Lett., Vol. 34, No.1

РОР спектр обратнорассеянных ионов 2 MeV
He⁺, параметры имплантации 3×10^{14} Si/cm²,
360 кэВ



Materials Science and Engineering B72 (2000)
189-192

РОР спектр обратнорассеянных ионов 2 MeV
He⁺, параметры имплантации 2×10^{15} Si/cm²,
330 кэВ

Цель диссертационной работы:

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

Для достижения поставленной цели в работе поставлены следующие задачи:

- Разработать методику исследования образования радиационных дефектов в пленках кремния на сапфире под действием облучения ионов высоких энергий.
- Изучить влияния энергии, дозы и плотности потока имплантируемых частиц на степень аморфизации КНС-структур.
- Исследовать влияние температурных режимов, при которых происходит имплантация, на степень разрушения кристаллической решетки кремниевой пленки под действием ионного облучения.
- Провести анализ механизмов восстановления кристаллической решетки после ионного облучения и высокотемпературного отжига.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

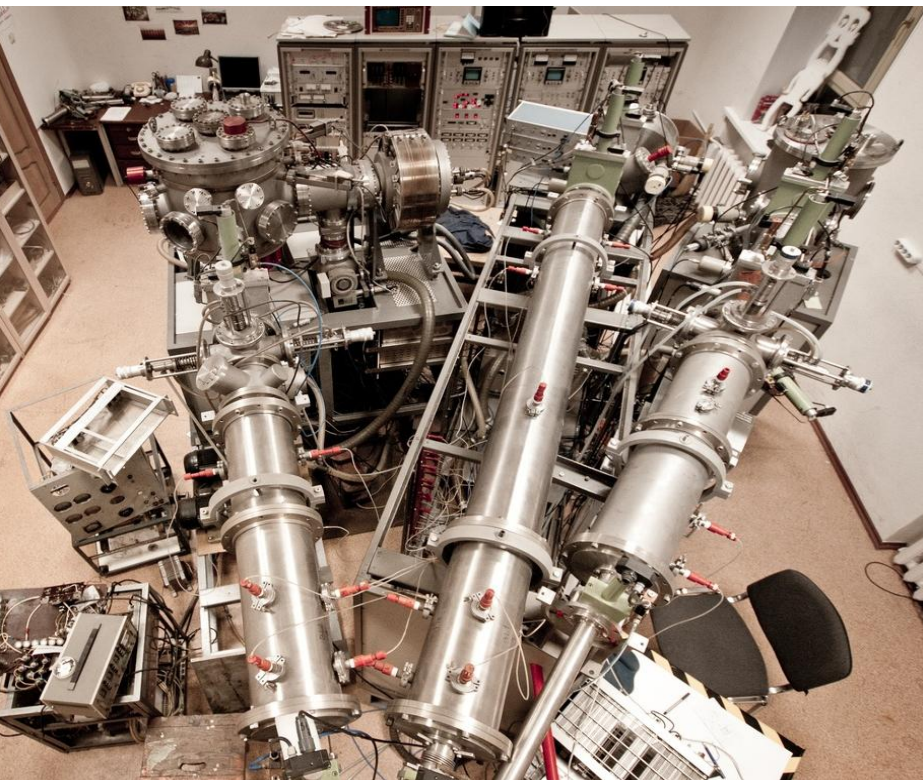
- Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2010, 2011, 2012);
- Научная сессия в МИФИ (Москва, 2011);
- Научная конференция «Ломоносовские чтения» (Москва, 2011);
- XII Межвузовская школа молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической 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)

и опубликованы в 16 работах, из них 2 статьи в журналах рекомендованных ВАК

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения.

Глава 2. Аппаратура и методы исследования.



Эксперименты по имплантации ионов проводились на ускорителе HVVE-500 на энергии до 500 кэВ.

Линия имплантации

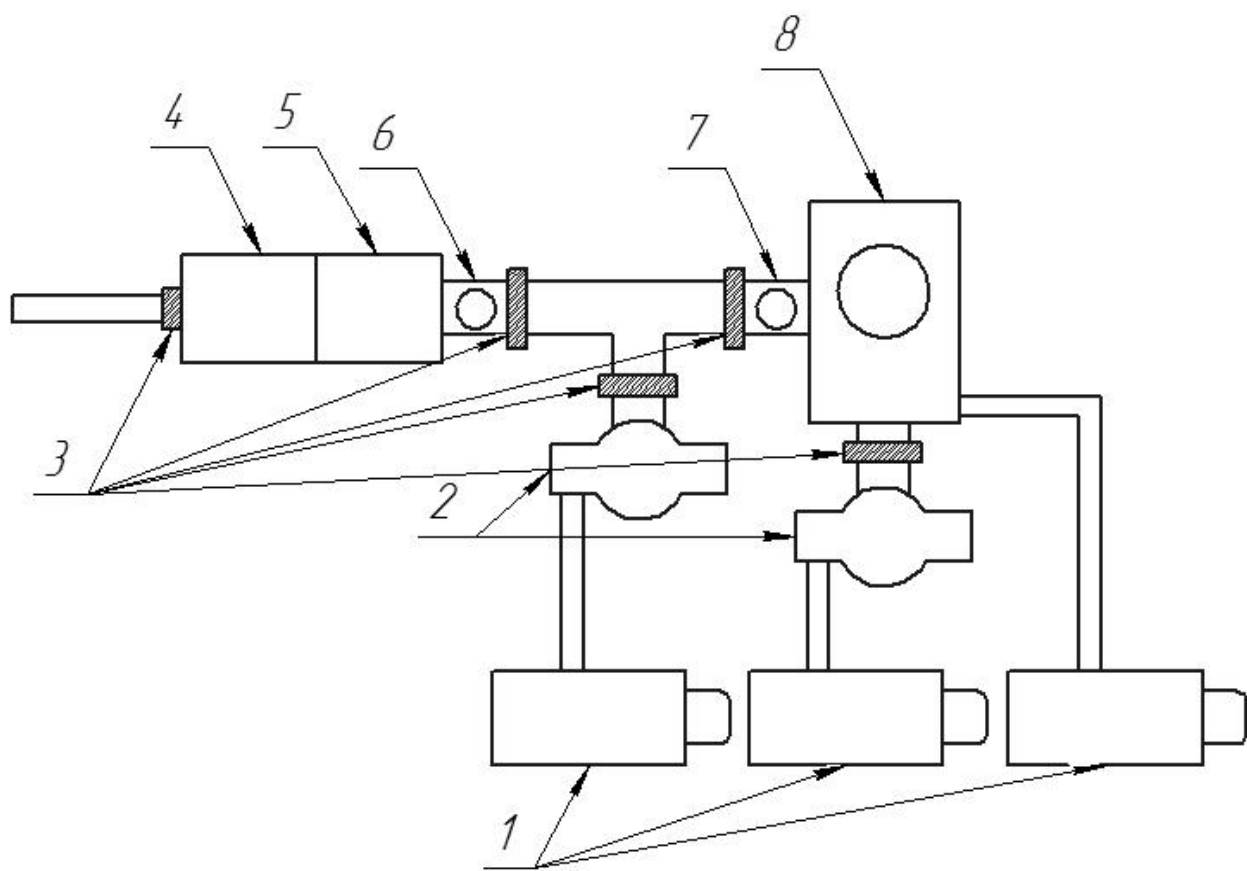
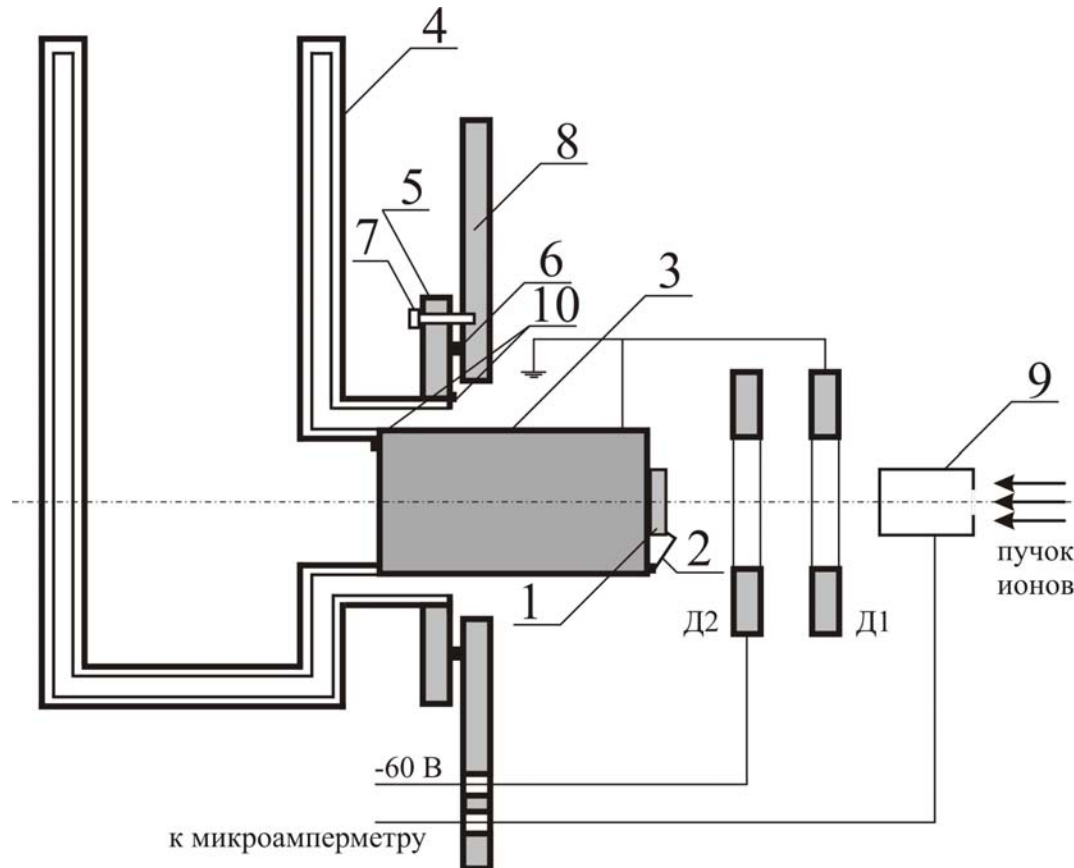


Схема экспериментального тракта: 1 – Формакуумные насосы; 2 – Турбомолекулярные насосы; 3 – Вакуумные затворы; 4 – Квадрупольная линза; 5 – Конденсатор; 6, 7 – Диафрагмы; 8 – Экспериментальная камера

Для проведения экспериментов по имплантации при различных температурах были сконструированы держатели образцов различных типов



Система охлаждения образцов : 1 – образец, 2 – пружинные прижимы, 3 – массивный держатель образца, 4 – сосуд Дьюара, 5 – вакуумный фланец, 6 – витоновая вакуумная прокладка, 7 – прижимные болты, 8 – крышка вакуумной камеры, 9 – подвесной цилиндр Фарадея, 10 – соединение аргонно-дуговой сваркой.

Анализ кристаллической структуры проводили:

- с помощью резерфордовского обратного рассеяния в сочетании с каналированием
- методом ширины кривой качания
- с помощью просвечивающей микроскопии высокого разрешения

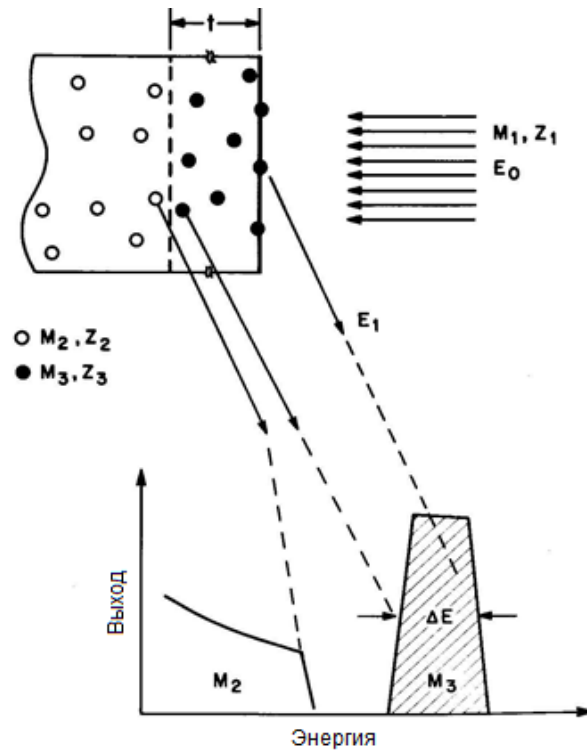
Рельф поверхности КНС-структур на всех стадиях обработки проводился с помощью:

- атомно-силовой микроскопии
- растровой электронной микроскопии

Состав КНС-структур исследовался с помощью:

- вторичной ионной масс-спектрометрии
- рентгеновского микроанализа

Методика спектрометрии резерфордского обратного рассеяния

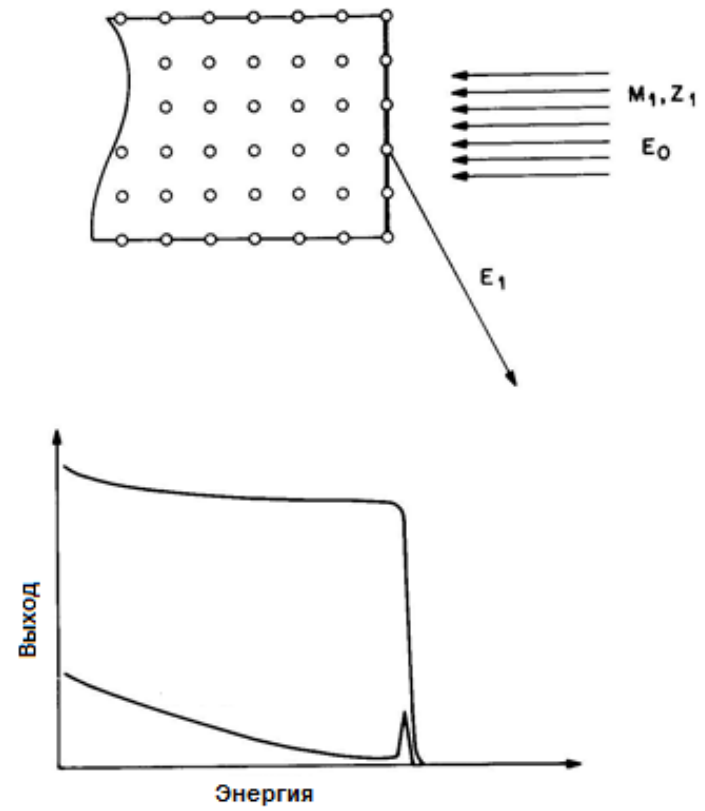
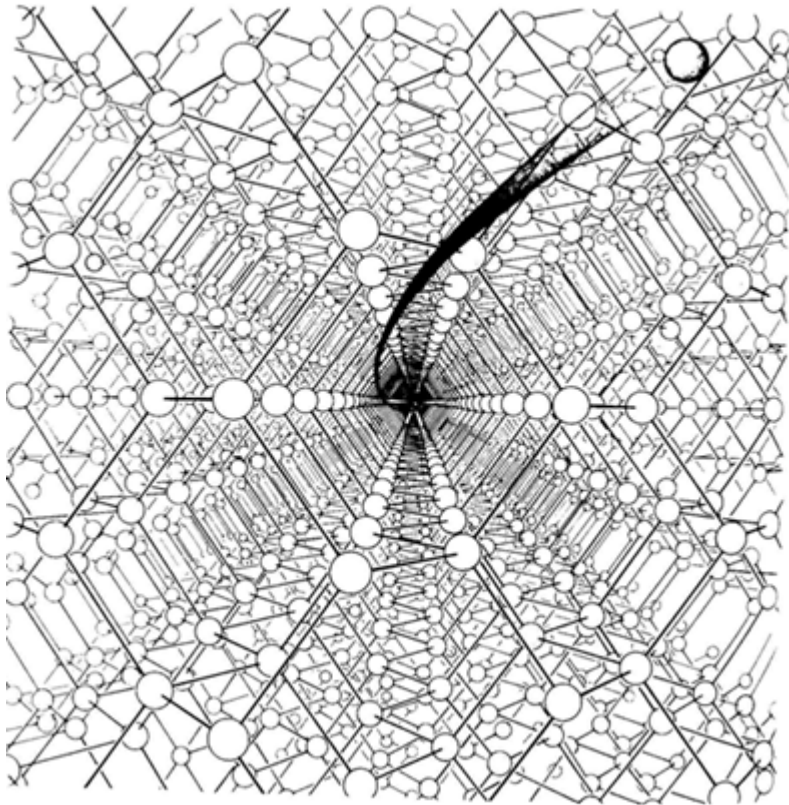


$$E_1 = \kappa E_0$$

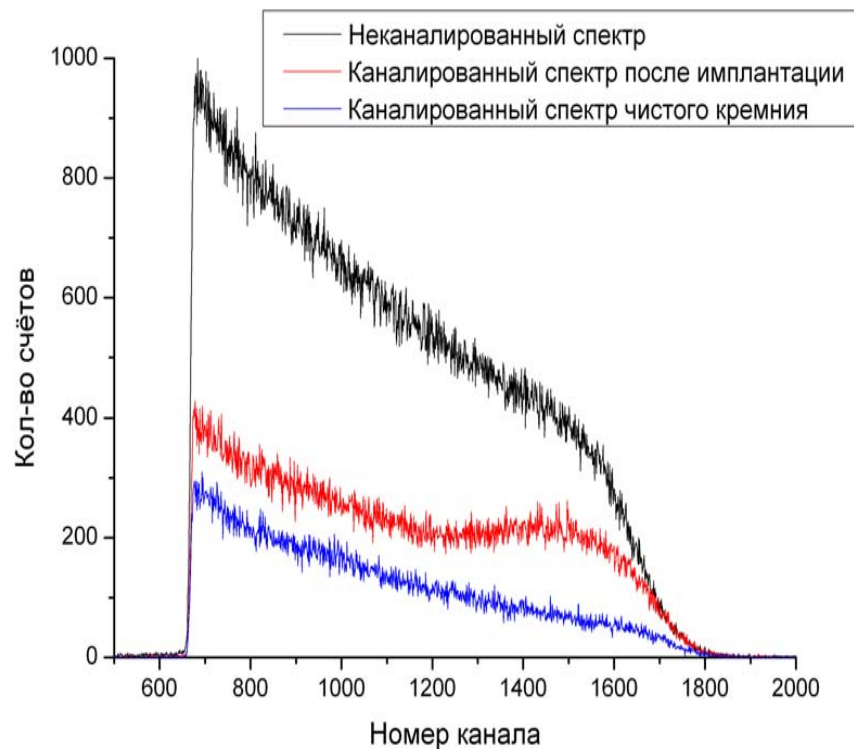
$$\kappa = \left[\frac{(M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}} + M_1 \cos \theta}{M_1 + M_2} \right]^2$$

$$\sigma(\theta) = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E} \right)^2 \frac{4}{\sin^4 \theta} \frac{\left[\sqrt{1 - \left(\frac{M_1}{M_2} \sin \theta \right)^2} + \cos \theta \right]^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{M_1}{M_2} \sin \theta \right)^2}}$$

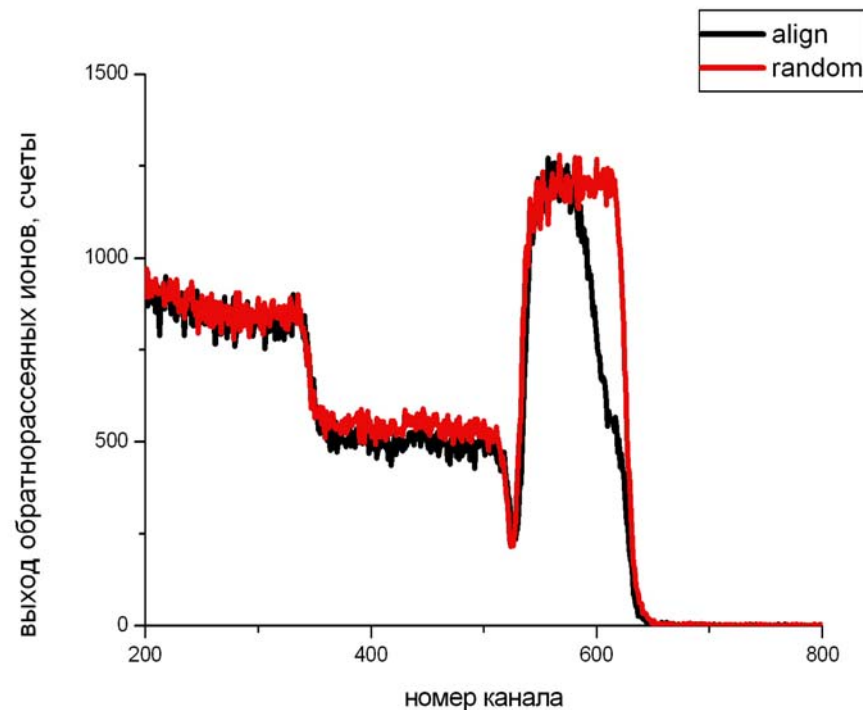
Каналирование



Глава 3. Результаты экспериментов и обсуждение

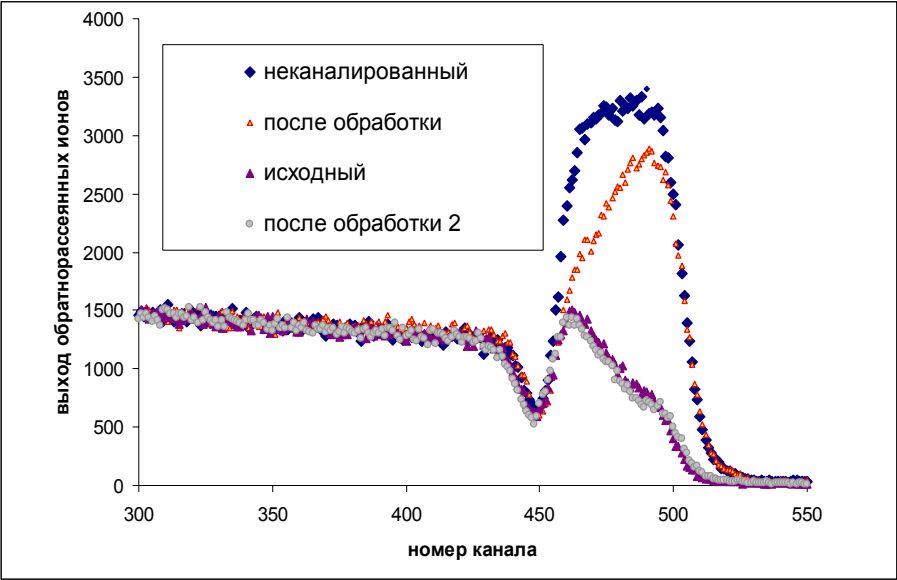


Экспериментальные РОР спектры ионов 4He^+ с энергией 400 кэВ. Угол рассеяния 155° . Параметры имплантации: $E=50$ кэВ, доза $2 \cdot 10^{15}$ ион/см²

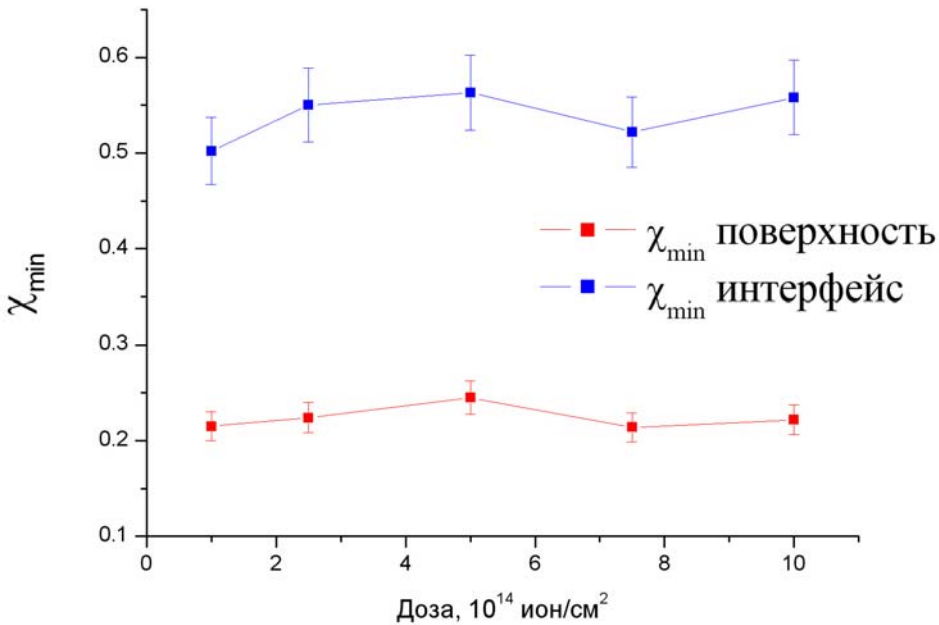


Экспериментальные РОР спектры ионов 4He^+ с энергией 2 МэВ. Угол рассеяния 155° . Параметры имплантации: $E=200$ кэВ, доза $0,9 \cdot 10^{15}$ ион/см²

Рекристаллизация от поверхности сапфира

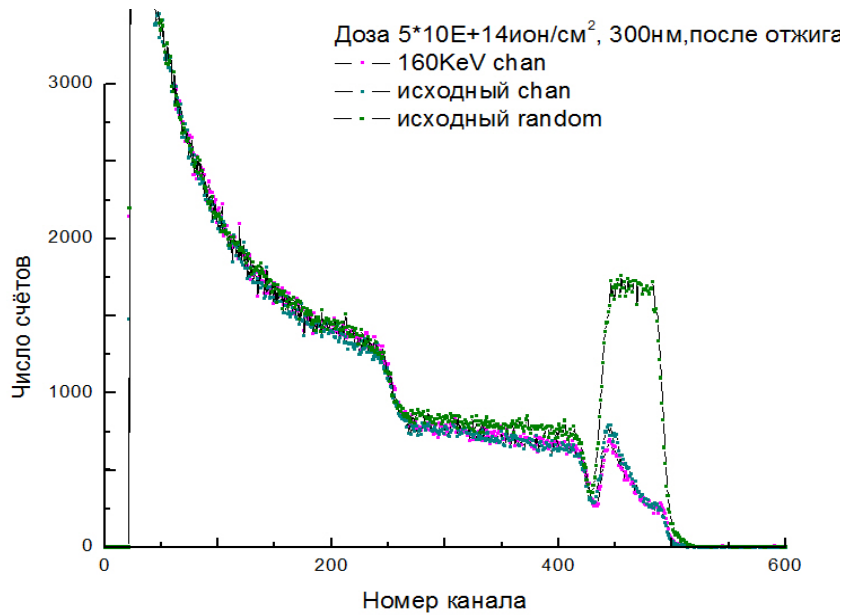


Энергия 160 кэВ в 300 нм КНС-структуры;
доза $5 \cdot 10^{15}$ ион/см².

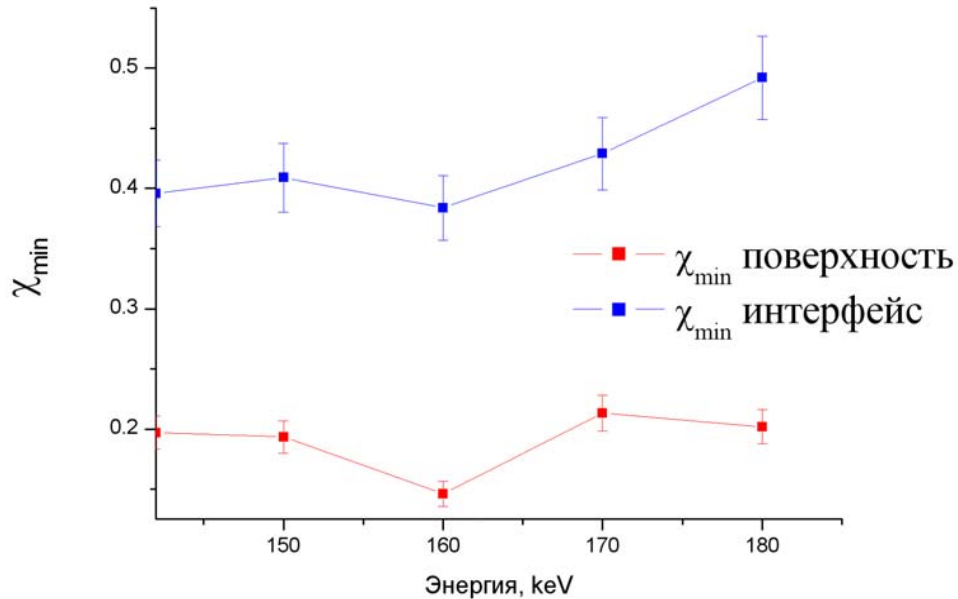


Степень разупорядочения
интерфейсного и поверхностного
слоев кремния для различных доз
ионов, имплантируемых с энергией
140 keV

Рекристаллизация с двумя центрами рекристаллизации



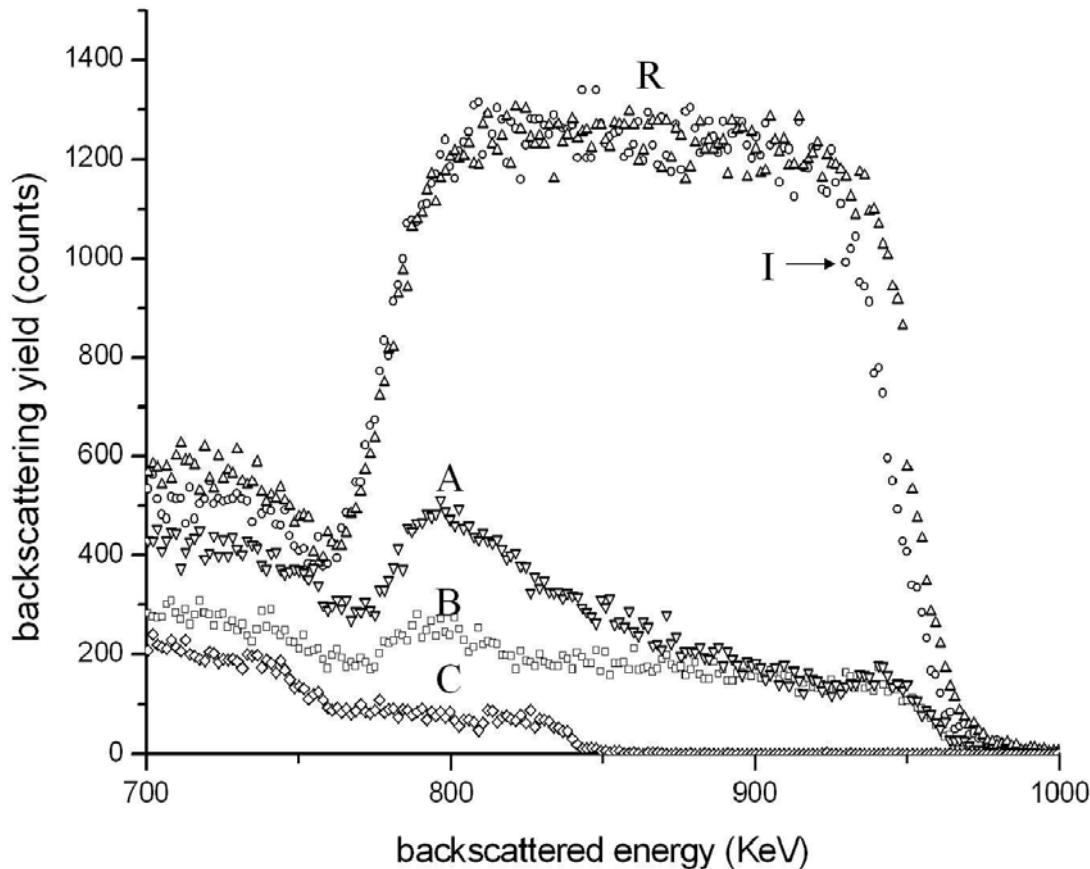
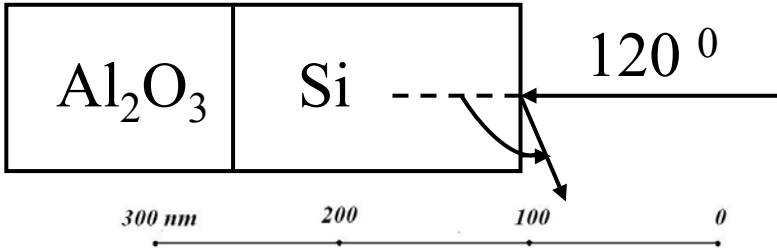
Энергия имплантируемых ионов 160 кэВ.



Степень разупорядочения интерфейсного и поверхностного слоев кремния для дозы $5 \cdot 10^{14}$ ион/см² набранной при 150-180 keV

Рекристаллизация от кремния

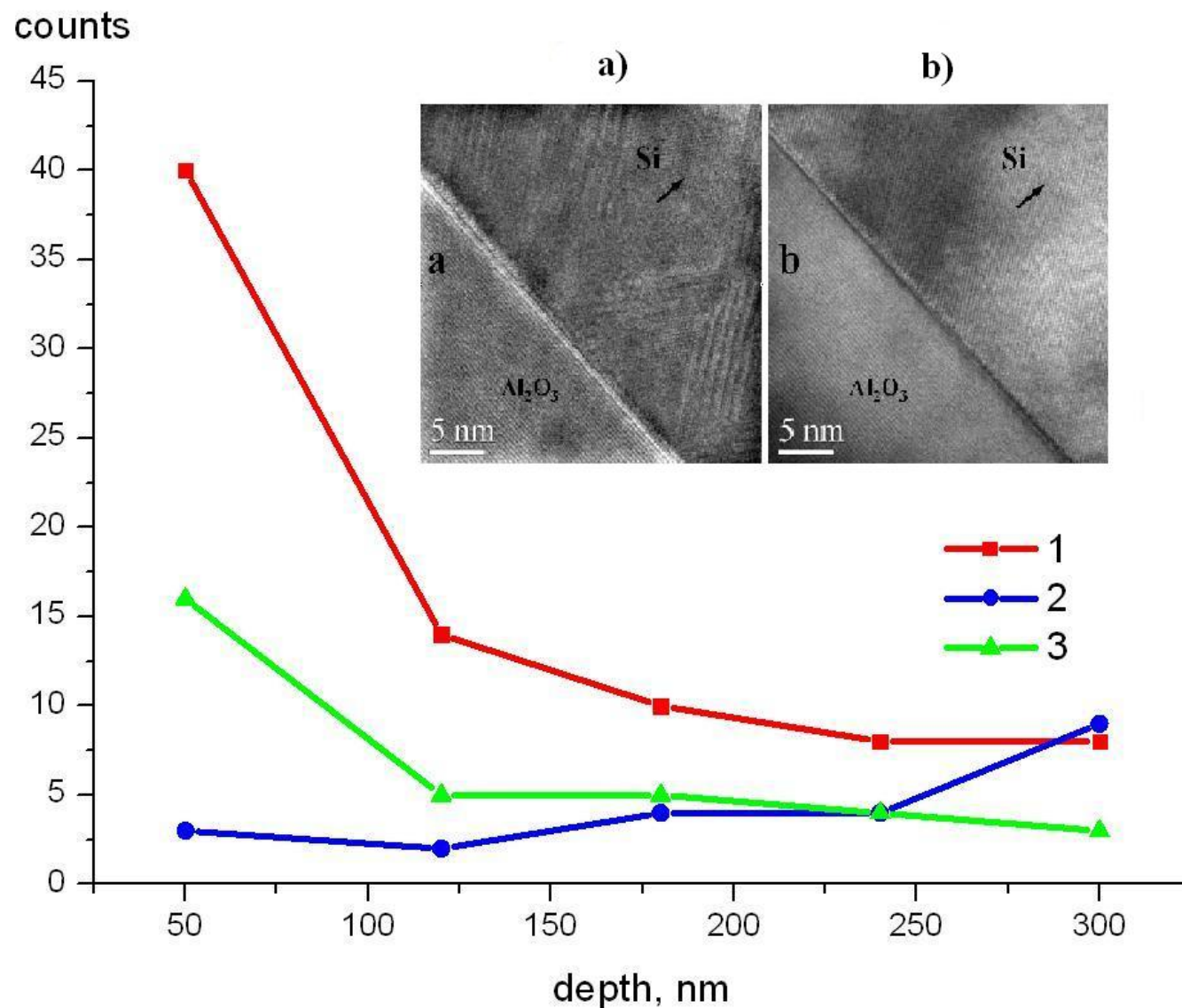
1,5 МэВ $^4\text{He}^+$



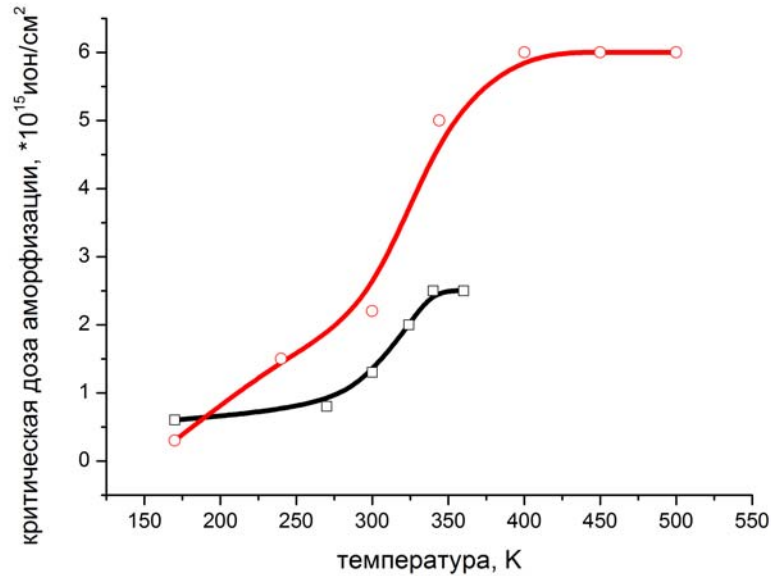
Сравнение
рентгеноструктурного анализа
и методики резерфордского
обратного рассеяния

Доза, ион/см ²	ШКК	$\chi_{\min}$
1*10 ¹⁴	0,43	0,46
2*10 ¹⁴	0,42	0,46
4*10 ¹⁴	0,37	0,41
6*10 ¹⁴	0,36	0,31
8*10 ¹⁴	0,38	0,45
10*10 ¹⁴	0,67	0,48
исходная	0,40	0,46

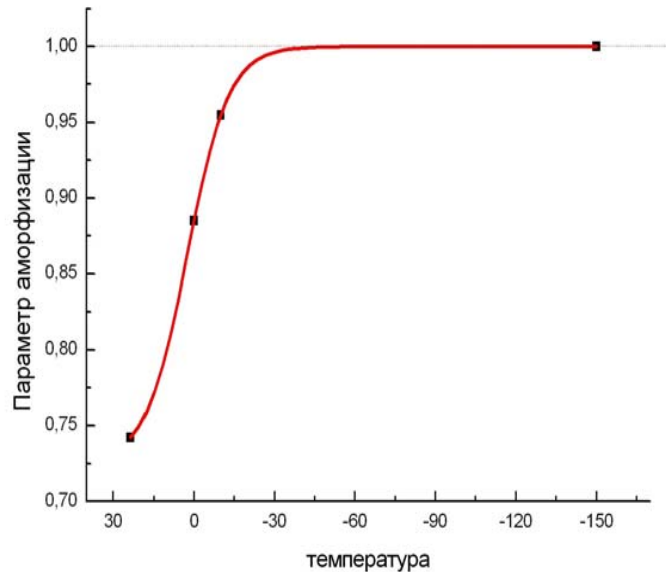
Данные полученные с помощью просвечивающей электронной микроскопии



Зависимость от температуры мишени



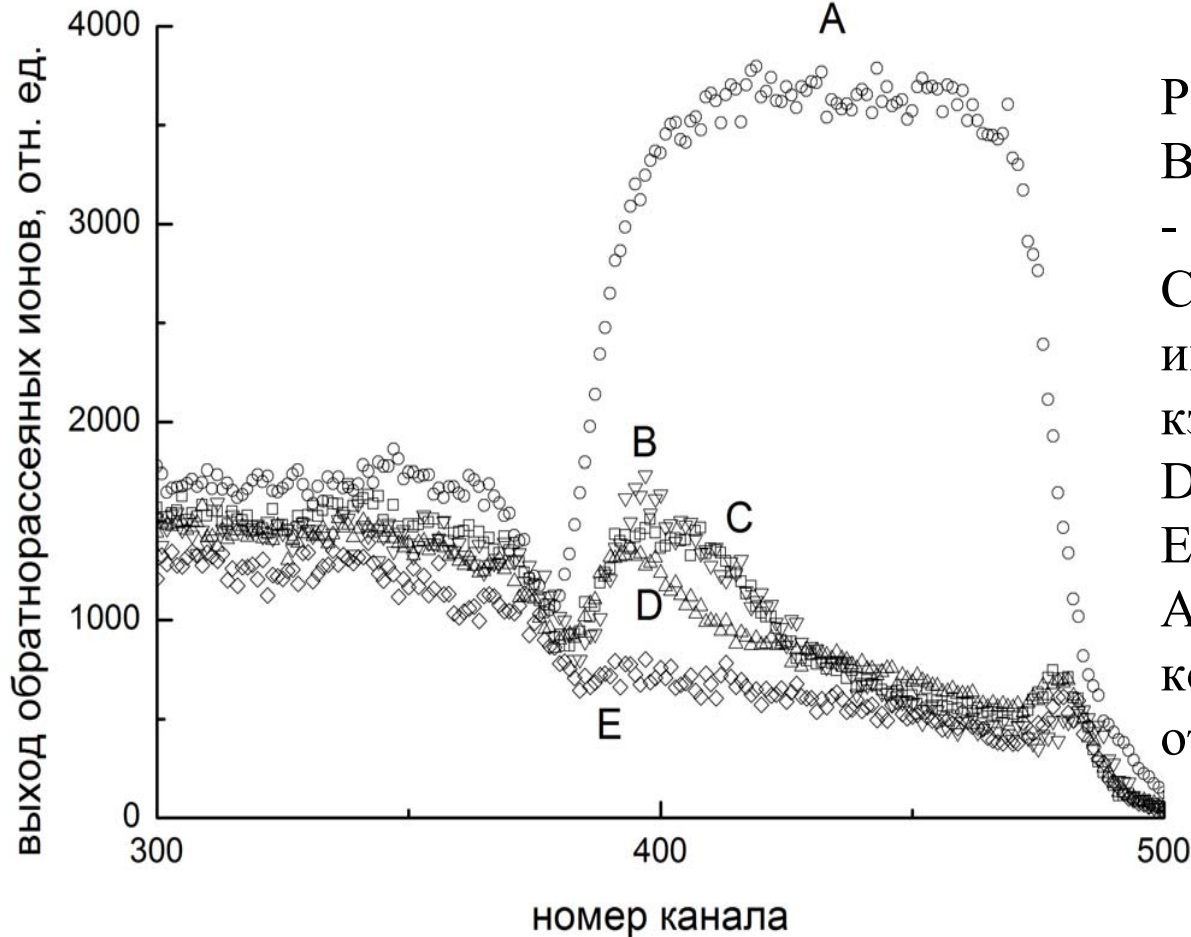
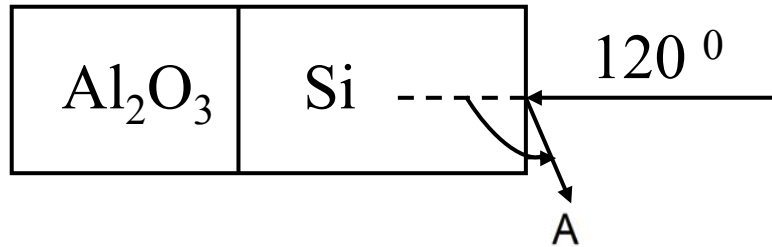
Зависимость критической дозы аморфизации от температуры



Степень разупорядочения пленки кремния на сапфире после облучения ионами кремния с энергией 200 кэВ, доза 10^{15} ион/см²

Зависимость от энергии имплантации и температуры мишени

1,5 МэВ $^4\text{He}^+$



РОР спектр.

В (канал) - исходная КНС
- структура;

С (канал) -
имплантирован Si +, 200
кэВ;

Д (канал) - Si+, 215кэВ;

Е (канал) - Si+, 230кэВ;

А — направление, в
котором канал
отсутствует.

Заключение

1. С использованием резерфордовского обратного рассеяния разработана методика проведения экспериментов по изучению образования дефектов под действием ионного облучения и процессов рекристаллизации с более высокой точностью по сравнению с работами опубликованными ранее.
2. Исследование процессов образования дефектов в пленках кремния на сапфире при облучении ионами Si^+ с энергиями от 120 до 230 кэВ в зависимости от дозы облучения позволило установить что:
 - в отличие от массивного кремния пленки кремния на сапфире аморфизуются при меньших критических дозах облучения,
 - основным механизмом восстановления кристаллической структуры является рекристаллизация от поверхностного слоя кремния, являющегося затравкой. Оптимальная толщина такого слоя 30 нм.
 - температурная зависимость критической дозы аморфизации, измеренная в данной работе отличается от данных опубликованных для массивного кремния
3. Экспериментально установлено, что полное разрушение сильнодефектной области зависит от энергии имплантируемых ионов. Оптимальная энергия при азотных температурах 200 кэВ. Оптимальная энергия при комнатных 230 кэВ.
4. Получена ультратонкая пленка кремния на сапфире с высоким качеством кристалличности на пластине диаметром 150 мм, которая используется для производства ИС.

Спасибо за внимание!