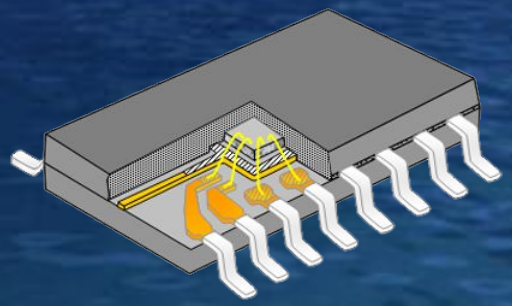
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ РАДИОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ИМЕНИ А.Н. СЕВЧЕНКО

ФОРМИРОВАНИЕ ВОДОРОДНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ДЕФЕКТОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЯХ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Ф.Ф.Комаров, О.В. Мильчанин, А.М. Миронов

1. Создание структур кремний-на-изоляторе
2. Создание внутренних геттерирующих слоев в кремнии
3. Применение имплантации протонов для изоляции приборов на полупроводниках A^3B^5
4. Анализ наноразмерных структур методом резерфордовского обратного рассеяния



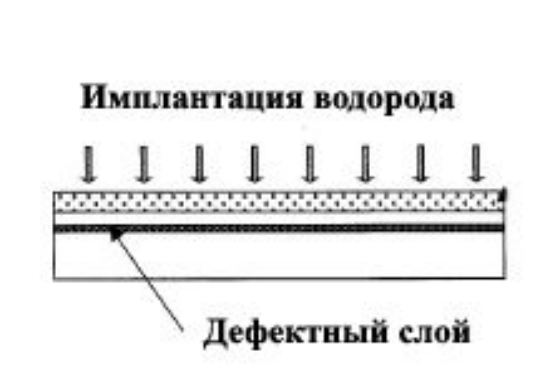
Белорусский государственный университет, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко, лаборатория элионики

Перспективность использования структур кремний-на-изоляторе (КНИ) в микроэлектронике

- Использование для построения аппаратуры **с высокой стойкостью к радиационным излучениям**, в особенности к воздействию излучения с большой мощностью дозы
- Диэлектрическая развязка в КНИ приборах препятствует паразитному взаимодействию элементов, групп элементов и подложки, уменьшает число паразитных элементов и приводит к резкому повышению радиационной **стойкости к импульсным воздействиям, тепло- и помехоустойчивости схем**
- Развитие КНИ технологий дает начало и **созданию высокотемпературных ИС** (до 350°С), **схем силовой электроники**, открывает принципиальные возможности разработки **схем трехмерной интеграции**
- Перевод производства традиционных БИС и СБИС массового применения на современные КНИ структуры делает его **в 1,5-2 раза более рентабельным**, чем производство тех же СБИС на основе подложек монокристаллического кремния. Упрощается конструкция элементов КМОП и КБиКМОП ИС (упраздняются глубокие карманы и разделительные p-n переходы). В результате упрощения конструкции элементов ИС **на 30% уменьшается площадь чипов** и, соответственно, увеличивается примерно на 30% количество чипов на пластине

Создание структур кремний-на-изоляторе

Формирование КНИ-пластин методом smart-cut



1. Отбор пластин

- {100} КДБ - 12 — ЕТО.035.206ТУ
- отклонение от плоскостности — < 9 мкм
- прогиб — < 40 мкм

2. Создание структур SiO_2/Si

- температуры термообработки — 800-1100 °С
- среда термообработок — сухой O_2, O_2+H_2O
- толщины окисла на пластинах — 20-300 нм

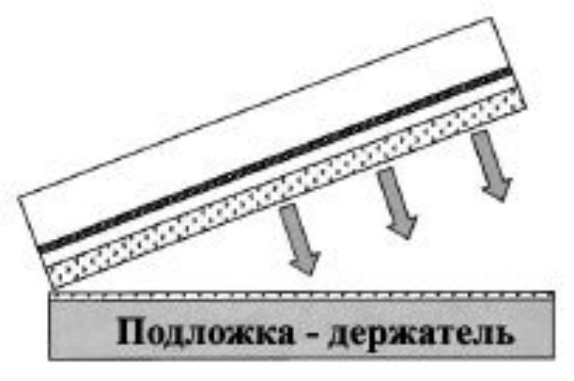
3. Ионная имплантация

- ионы — H_2^+
- дозы имплантации — 4-5x10^{16} ион/см^2
- ток в пучке — 500-600 мкА
- энергия — 80-100 кэВ
- температура — 50 °С

Белорусский государственный университет, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко, лаборатория элионики

Создание структур кремний-на-изоляторе

Формирование КНИ-пластин методом smart-cut



4. Очистка поверхностей и соединение пластин

Комбинированный метод подготовки гидрофильных поверхностей пластин - сочетание процедур плазменной обработки, химической и гидромеханической очистки

Отработана оригинальная методика подготовки химически чистых оксидированных поверхностей пластин с высокой степенью гидрофильности

Контроль качества связывания осуществлялся на просвет в ближнем ИК-диапазоне электромагнитного излучения.

5. Термообработки

- Низкотемпературный отжиг 80-200 °С, до 24 часов
- Скол по дефектному слою 400-550 °С, 5-60 минут
- Финишный отжиг 800-1100 °С, 30-120 минут

Создание структур кремний-на-изоляторе

Белорусский государственный университет, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко, лаборатория элионики

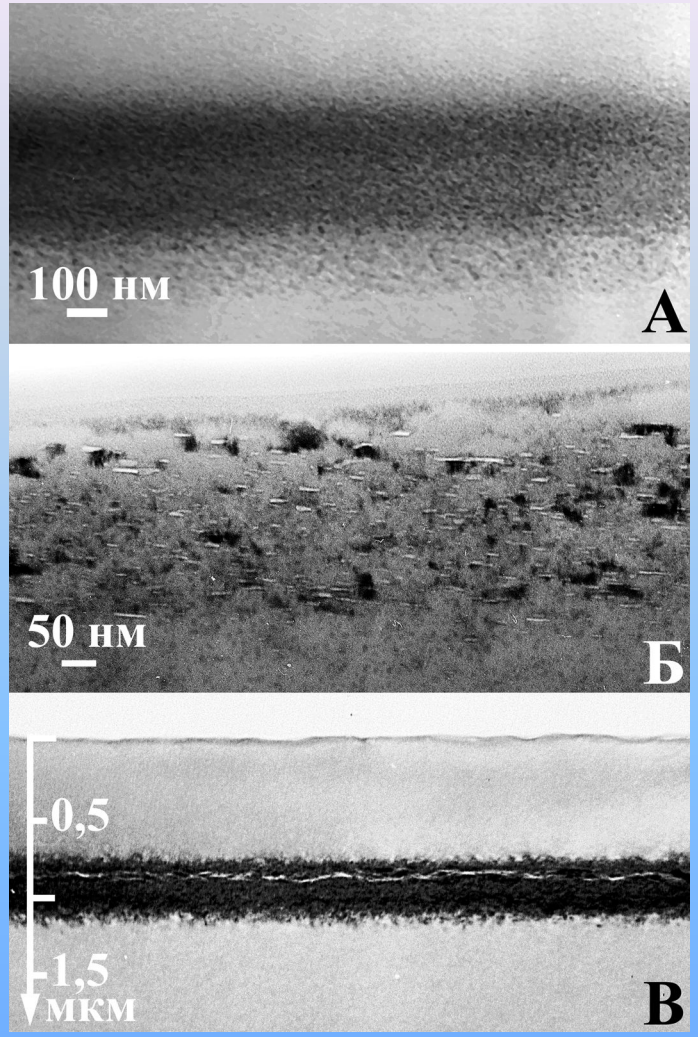


Рисунок 1 — ПЭМ фотографии дефектного слоя после имплантации ионов водорода (А) и отжига при 450 °С: 5 минут (Б) и 10 минут (В)

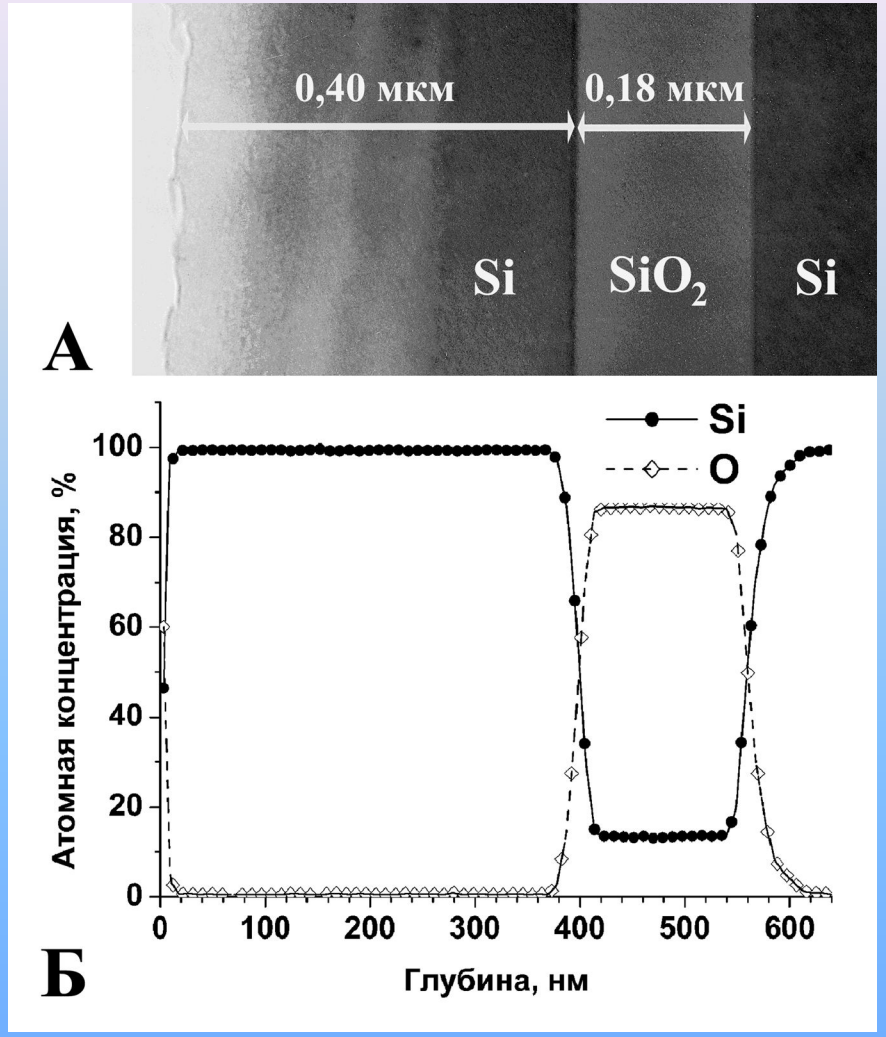


Рисунок 2 — ПЭМ фотография сечения КНИ-пластины (А) и ОЖЕ-профиль элементного состава (Б)

Формирование КНИ-структур

Формирование КНИ-пластин методом smart-cut

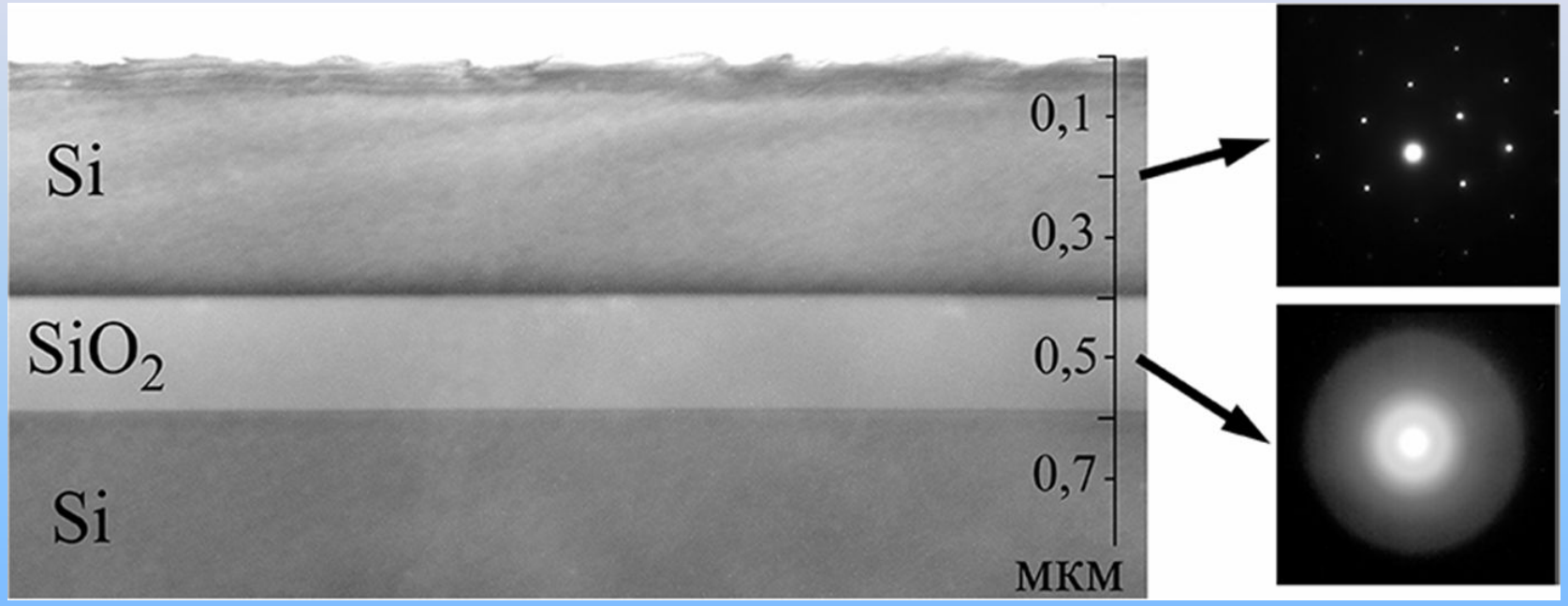


Рисунок 3 — Светлопольное ПЭМ – изображение структуры поперечного сечения КНИ-пластины и картины электронной дифракции от верхнего кристаллического слоя и аморфного захороненного оксидного слоя

Белорусский государственный университет, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко, лаборатория элионики

Формирование КНИ-структур

Формирование КНИ-пластин методом smart-cut

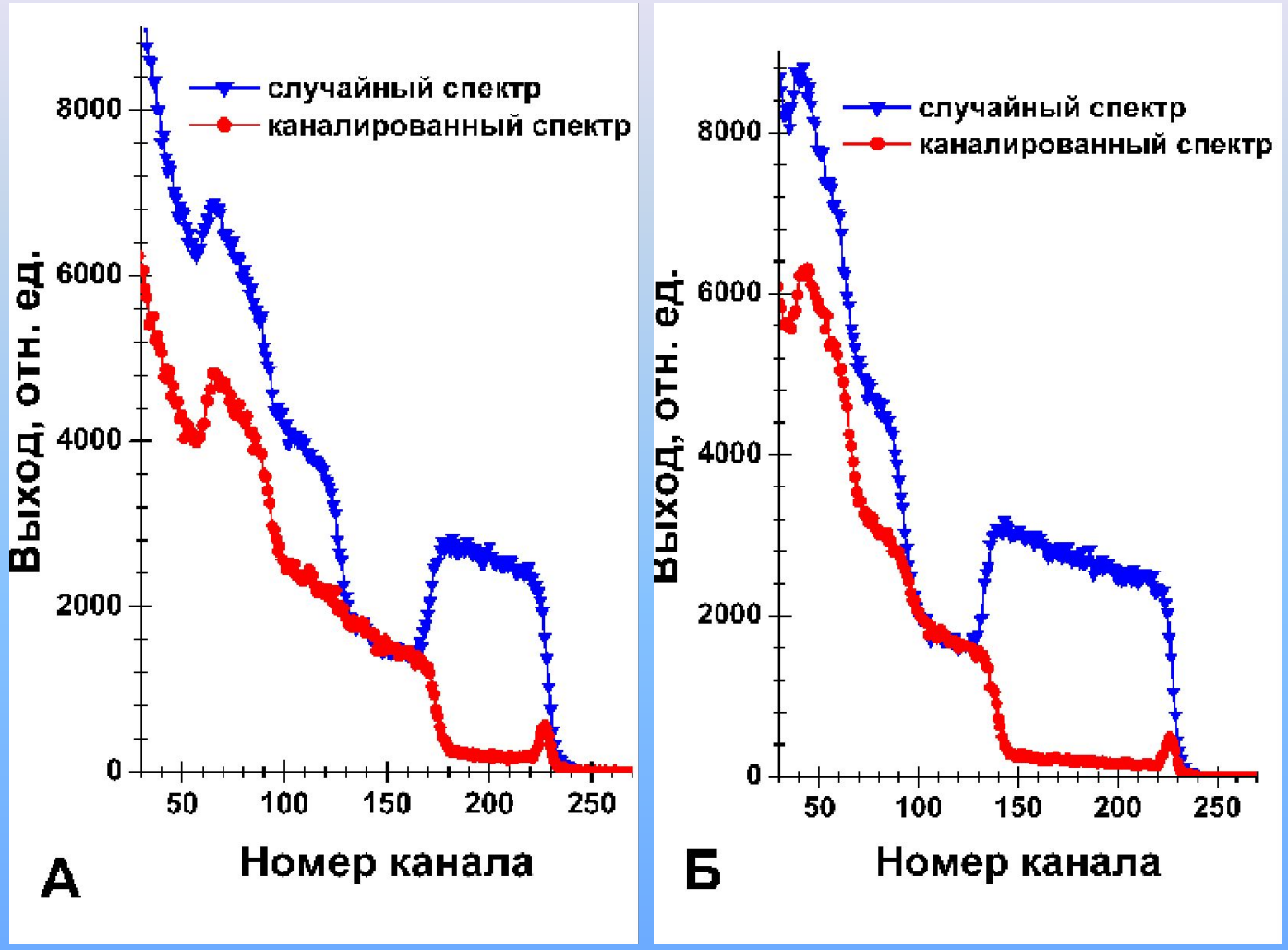


Рисунок 4 — Случайные и каналированные спектры РОР от КНИ-пластин:
А – Si(0,22 мкм)/SiO_2(0,18 мкм)/Si, **Б** – Si(0,35 мкм)/SiO_2(0,18 мкм)/Si

Формирование КНИ-структур

Формирование КНИ-пластин методом smart-cut

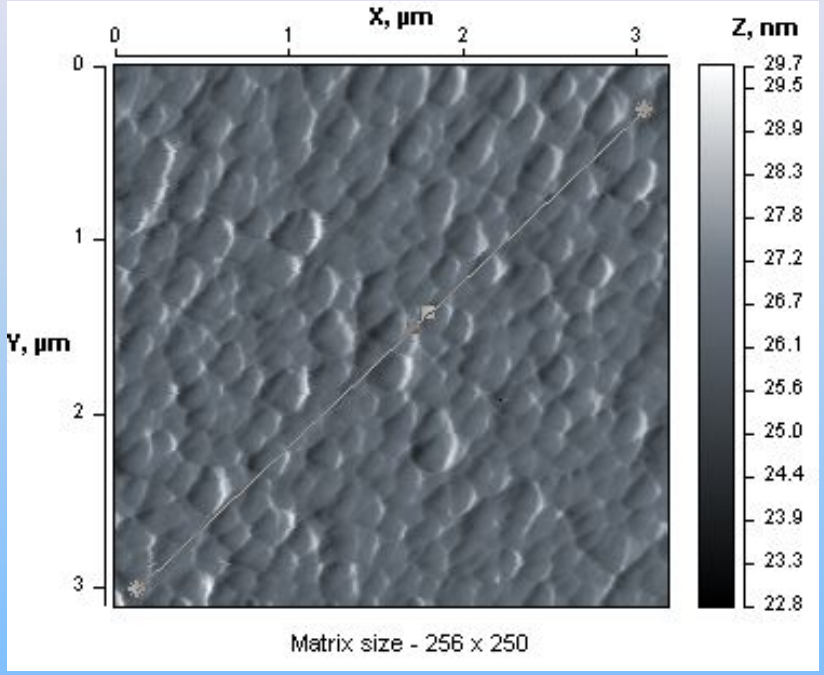
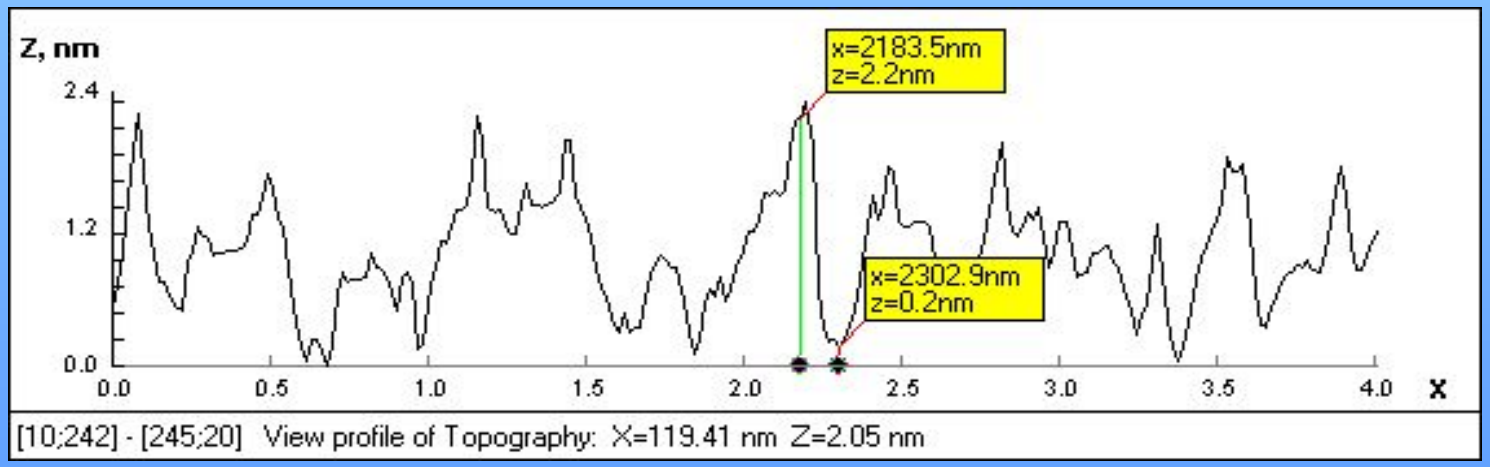


Рисунок 5 — Топография и профили шероховатости поверхности КНИ-пластины (метод АСМ)

Si(0,35 мкм)/SiO2(0,18 мкм)/Si

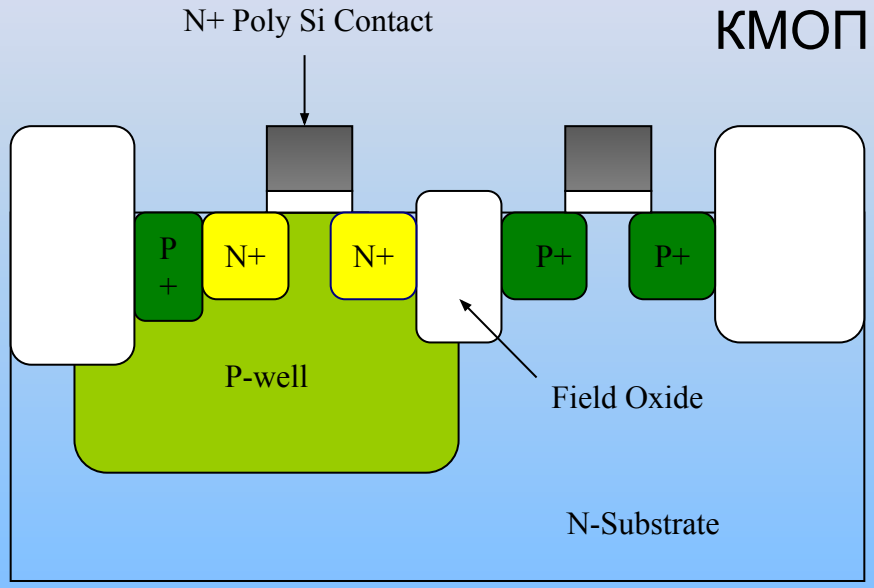
Режимы термообработки:
1. 80 °C, 2 ч.; 120 °C, 1 ч
2. 500 °C, 30 минут
3. 1050 °C, 30 минут



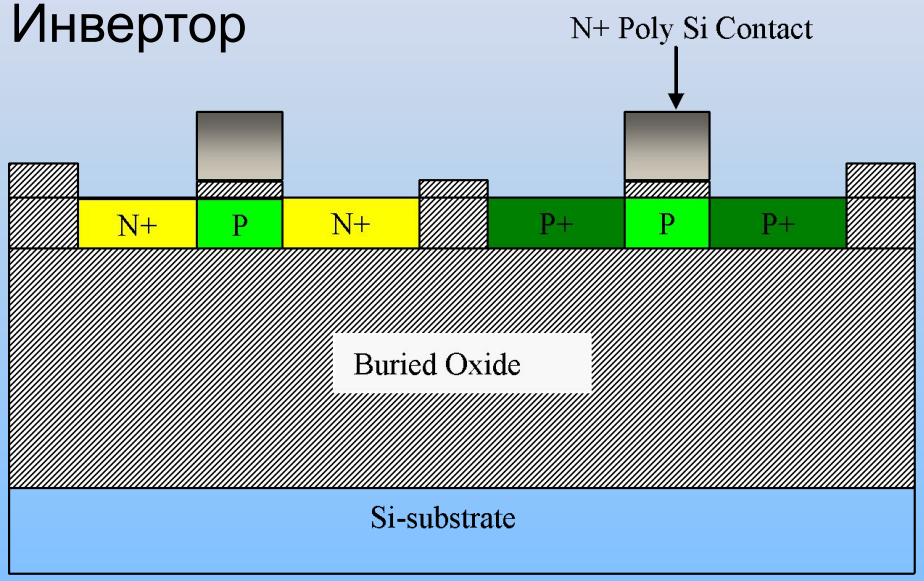
Применение КНИ структур

Простой технологический процесс

КМОП Инвертор



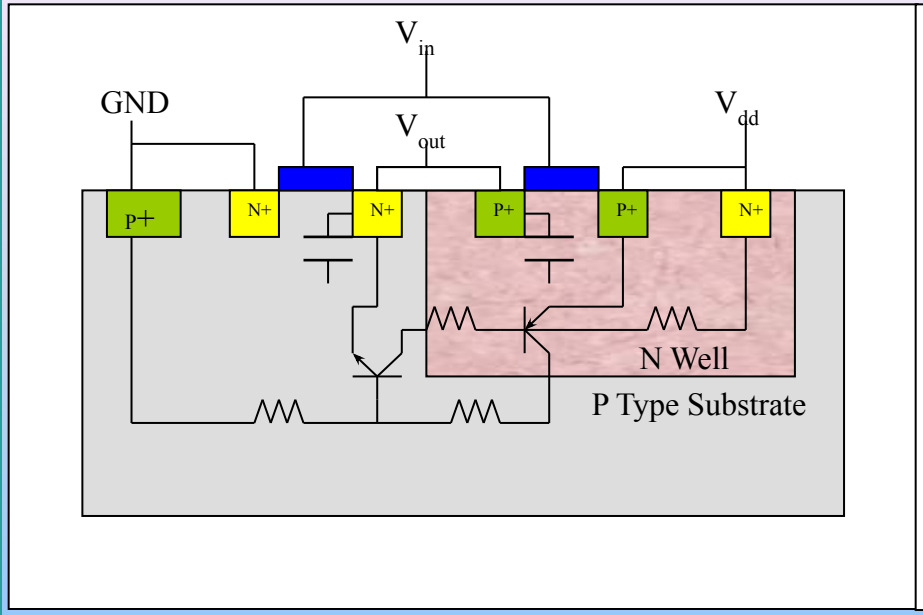
Объемный кремний

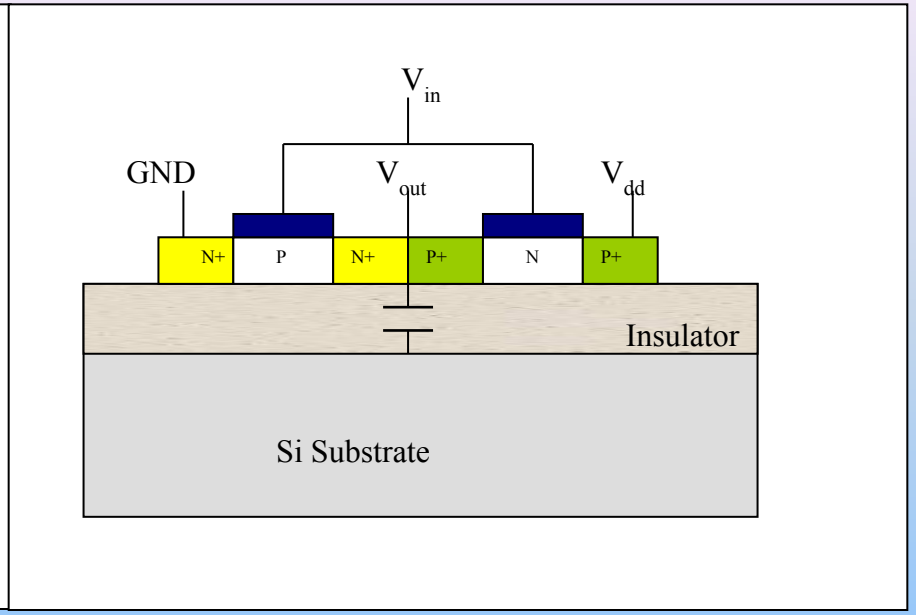


Тонкопленочная КНИ структура

Рисунок 6 — Использование КНИ структур позволяет упростить технологический процесс - отсутствуют этапы литографии, легирования и диффузии для создания p-кармана

Применение КНИ структур





Объемный кремний

Тонкопленочная КНИ-структура

Рисунок 7 — Уменьшение паразитных емкостей

При использовании КНИ структур:

- Отсутствие паразитных емкостей между областями истока, стока и подложки;
- Отсутствие паразитной PNPN-тиристорной структуры

Высокая радиационная стойкость КНИ структур

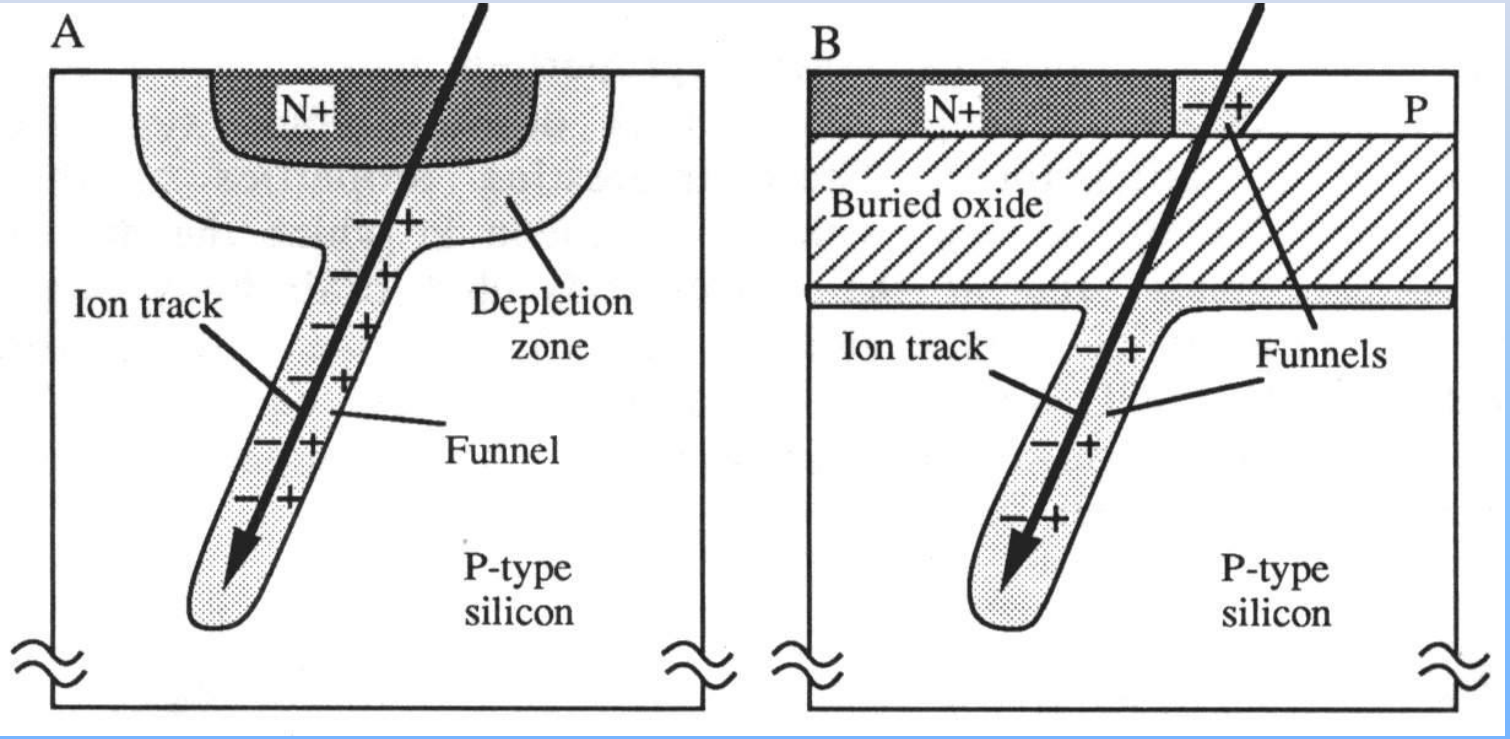


Рисунок 8 — Формирование трека при попадании энергетической частицы

Применение КНИ структур

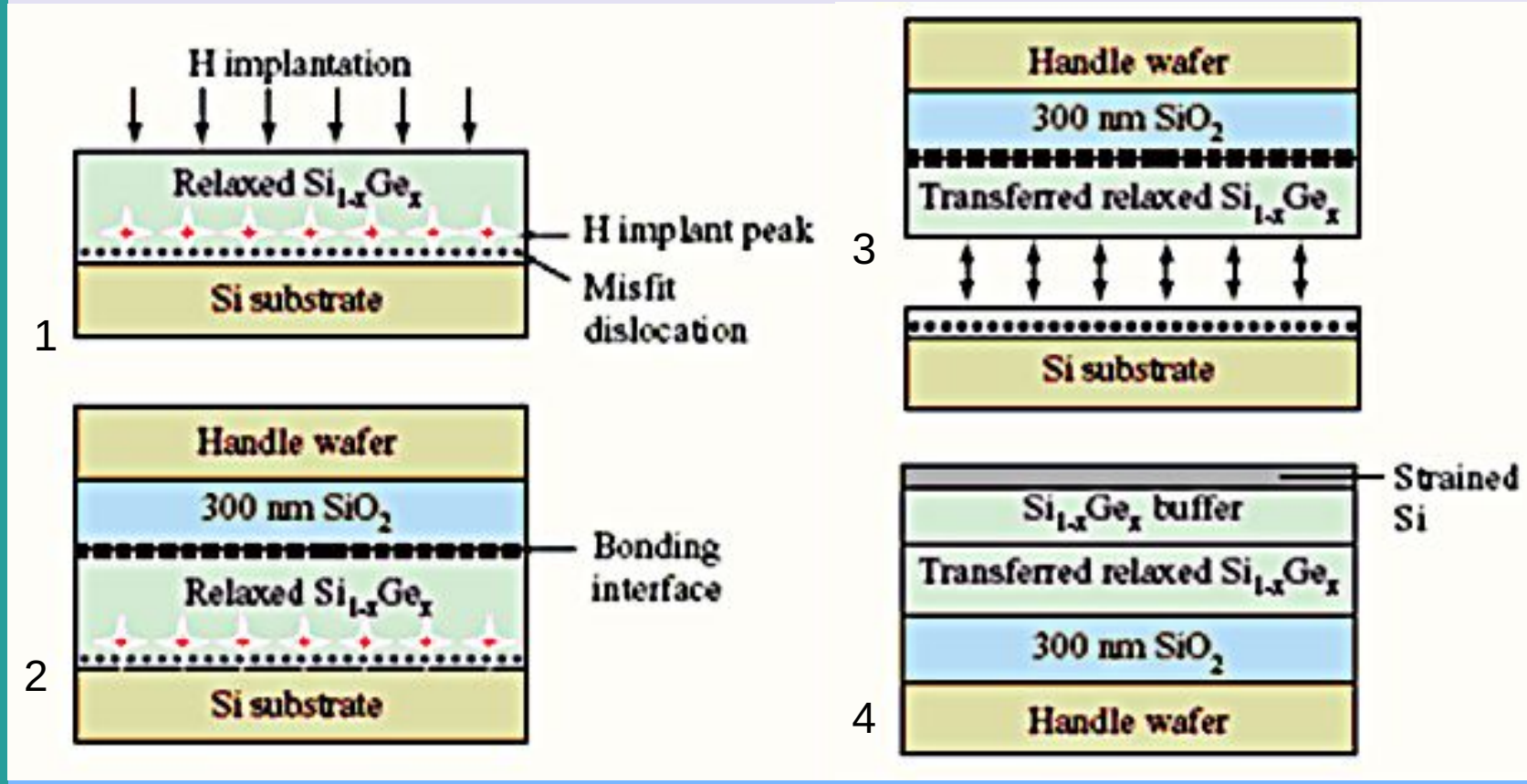
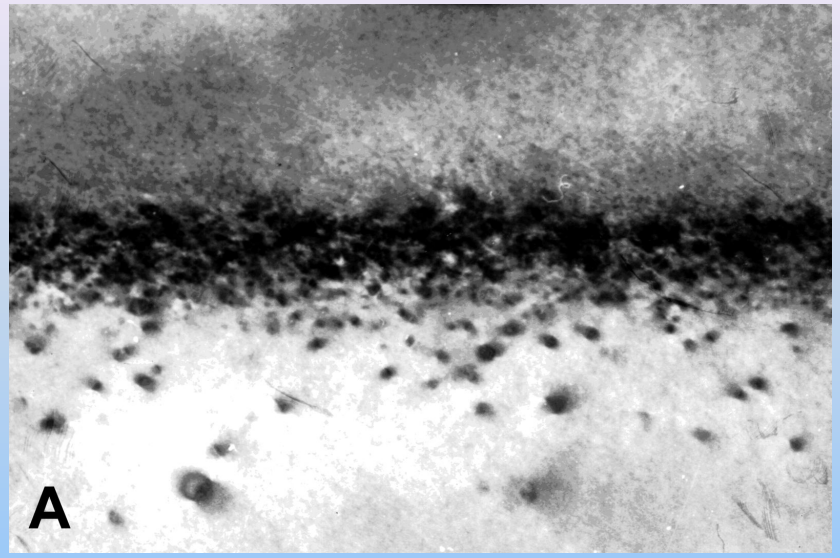
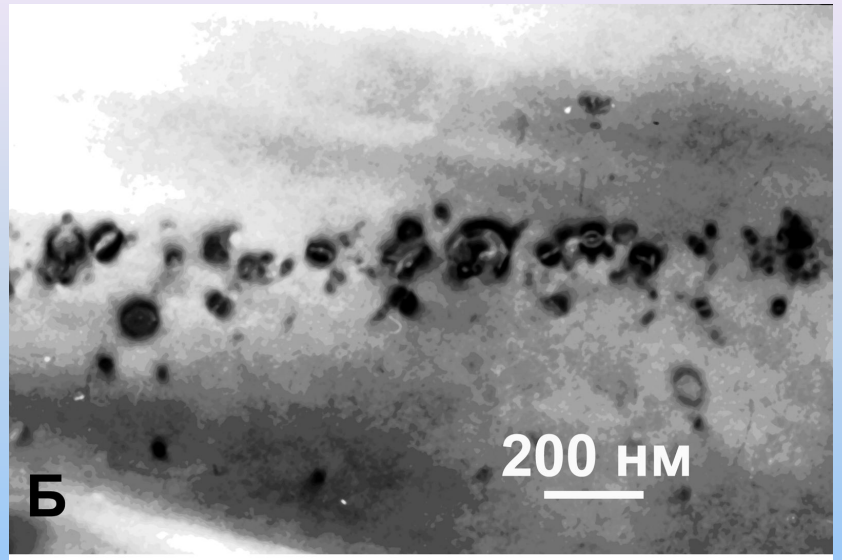


Рисунок 9 — Использование методики КНИ в SiGe - технологии

Формирование внутреннего геттера





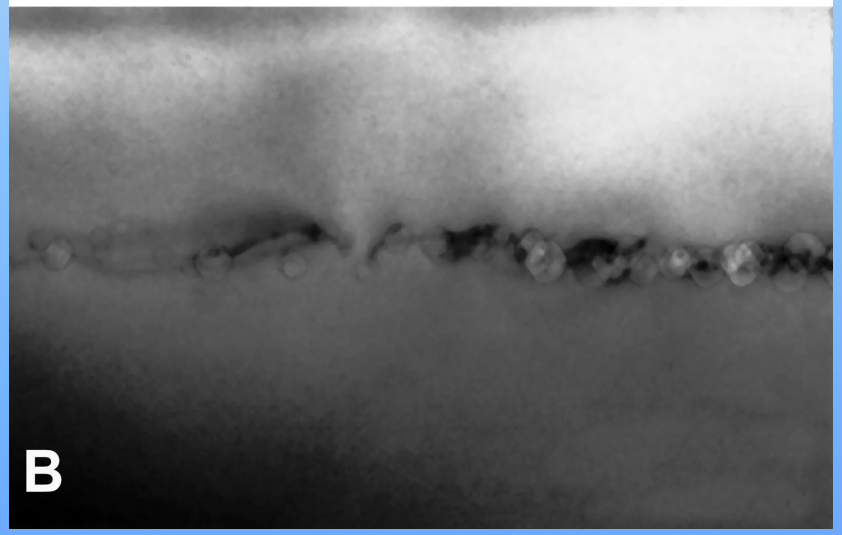


Рисунок 10 — Светлопольные ПЭМ изображения в поперечном сечении структуры внутреннего дефектного слоя в кремнии после имплантации (140 кэВ, 10^{16} см$^{-2}$) ионов водорода (А) и последующего термического отжига: Б – 800 °С, 5 минут; В – 900 °С, 15 минут

Белорусский государственный университет, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко, лаборатория элионики

Формирование внутреннего геттера

Табл. 1 — Режимы формирования геттерирующих слоев

№	Тип подложки	Энергия и доза имплантации H^+	Режимы термического отжига
1	Si (2 мкм, 1 Ом·см)/(111)Cz-Si (КЭФ-0,01)	215 (H_2^+) кэВ, $2{,}5\times10^{16}$ см$^{-2}$	1) 800 °C, 5 мин. 2) 800 °C, 30 мин. 3) 900 °C, 5 мин. 4) 1000 °C, 5 мин. 5) 900 °C, 15 мин.
2	Si (2 мкм, 1 Ом·см)/(111)Cz-Si (КЭФ-0,01)	215 (H_2^+) кэВ, 3×10^{16} см ^{2}	1) 800 °C, 5 мин. 2) 800 °C, 30 мин. 3) 900 °C, 5 мин. 4) 1000 °C, 5 мин. 5) 900 °C, 15 мин.
3	(001)Cz-Si (КЭФ-4,5)	75 (H^+) кэВ, 2,5×1016 см$^{-2}$	900 °C, 30 мин.
4	(001)Cz-Si (КЭФ-4,5)	75 (H^+) кэВ, $3{,}5\times10^{16}$ см ^{2}	900 °C, 30 мин.

Табл. 2 — Режимы формирования тестовых структур

№	Проводимая операция	Описание режимов операции	Температура обработки
1	Формирование диодов Шоттки	1. Напыление пленки металла (Ni), методом термического испарения 2. Формирование силицида никеля (NiSi) при термическом отжиге в среде сухого азота (450 °C, 15 мин.)	< 50 °C 450 °C
2	Формирование контактных областей	1. Напыление пленки металла (Al), методом термического испарения 2. Вжигание алюминия для формирования омического контакта при термическом отжиге в среде сухого азота (450 °C, 15 мин.)	< 50 °C 450 °C

Формирование внутреннего геттера

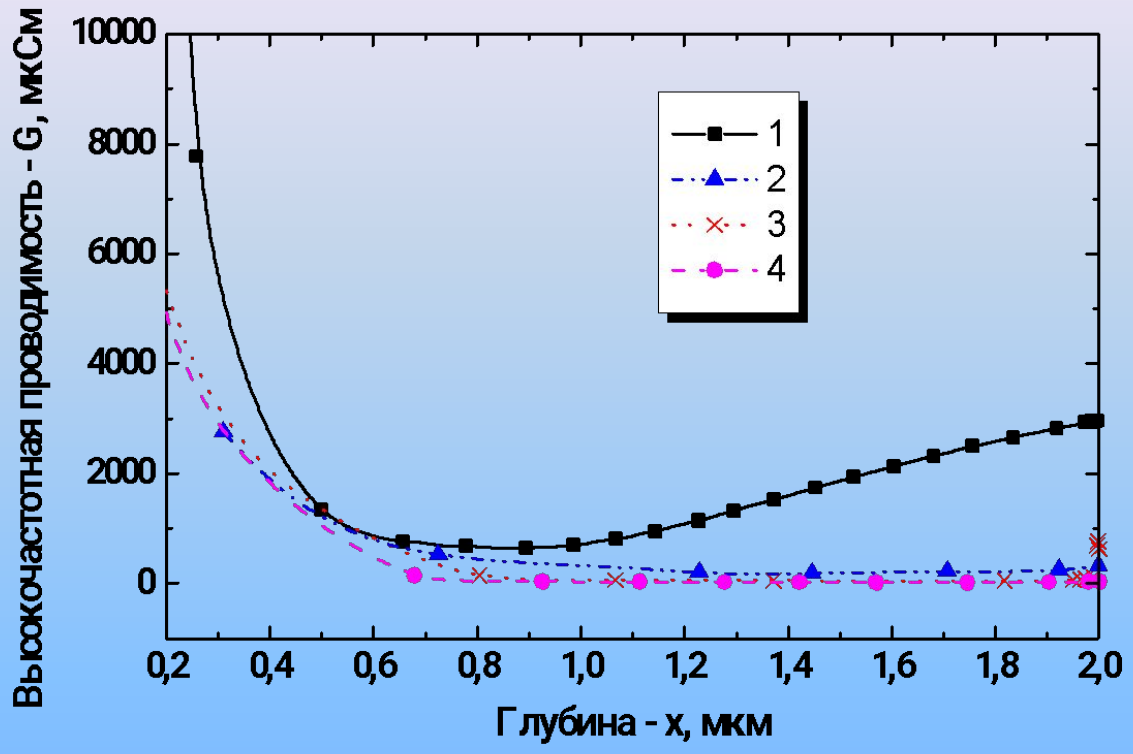


Рисунок 11 — Зависимость высокочастотной проводимости от глубины в обратносмещенных диодах Шоттки в Si без (1) и с внутренним геттером (2–4), полученным имплантацией ионов водорода (215 кэВ, $2{,}5\times10^{16}$ см$^{-2}$) и последующим термическим отжигом: 2 – 900 °C, 5 минут; 3 – 1000 °C, 5 минут; 4 – 800 °C, 30 минут

Формирование внутреннего геттера

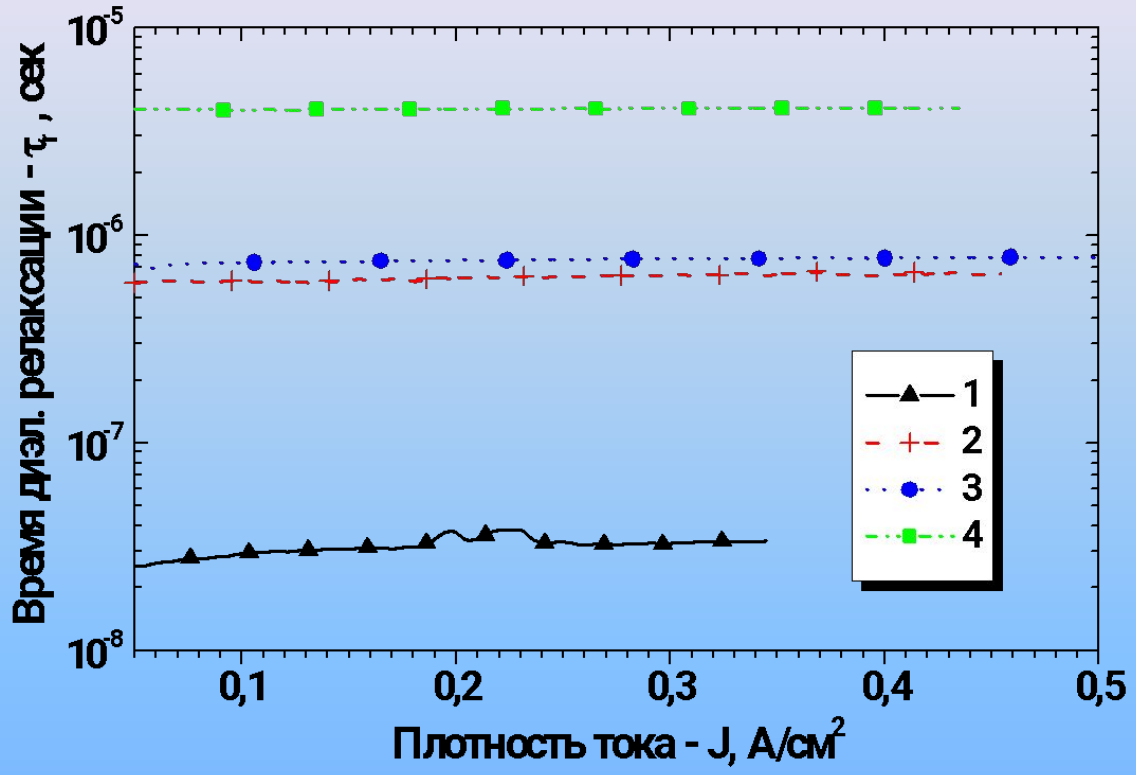


Рисунок 12 — Зависимость времени жизни неосновных носителей заряда от плотности тока обратносмещенного диода Шоттки в Si без (1) и с внутренним геттером (2–4), полученным имплантацией ионов водорода (215 кэВ, $2{,}5\times10^{16}$ $см^{-2}$) и последующим термическим отжигом: 2 – 900 °C, 5 минут; 3 – 1000 °C, 5 минут; 4 – 800 °C, 30 минут

Формирование внутреннего геттера

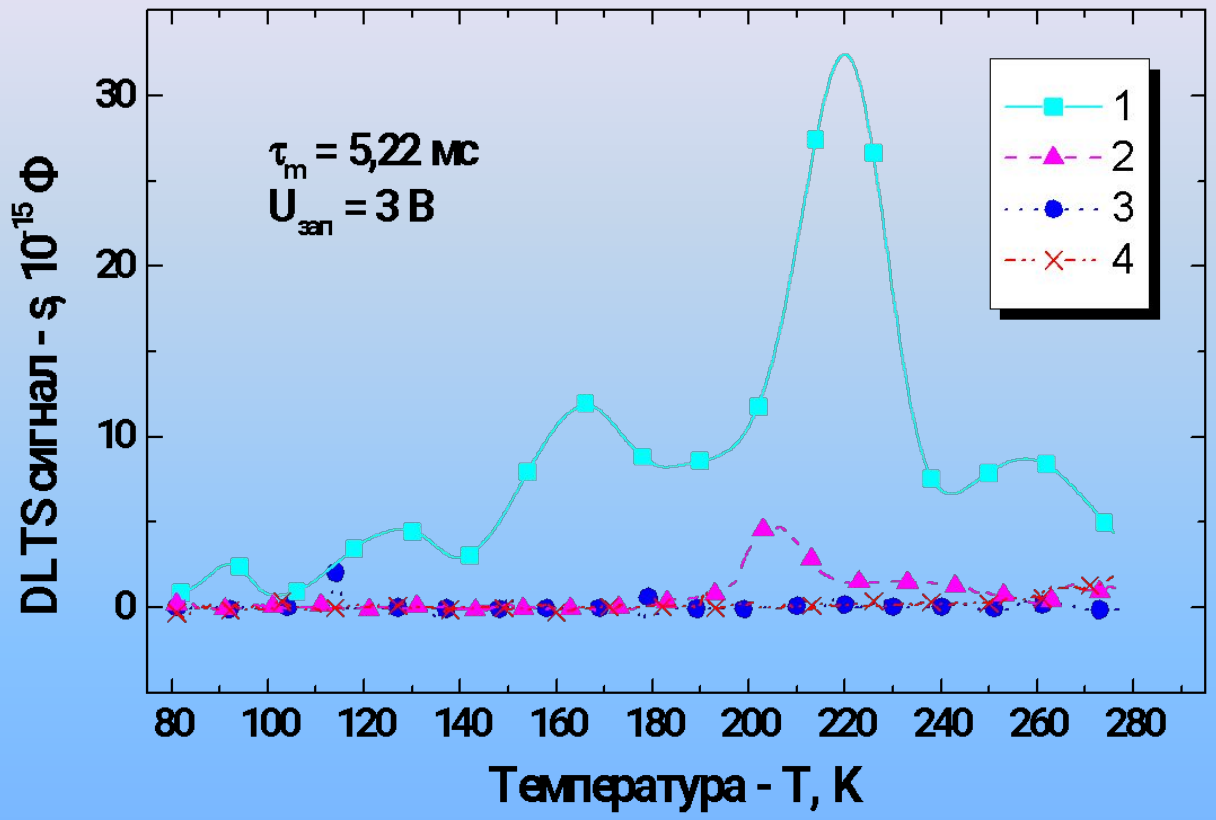


Рисунок 13 — DLTS спектры тестовых диодов Шоттки в образцах без (1) и с внутренним геттером (2–4), полученным имплантацией ионов водорода (215 кэВ, 2,5×10^{16} см$^{-2}$) и последующим термическим отжигом: 2 – 900 °C, 5 минут; 3 – 1000 °C, 5 минут; 4 – 800 °C, 30 минут

Полиэнергетическая ионная имплантация

Разработана физико-математическая модель и программное обеспечение, позволяющие исходя из заданной формы профиля распределения имплантированных ионов или радиационных дефектов по глубине мишени рассчитать технологические параметры (энергии и дозы) ионной имплантации.

Результирующий профиль распределения примеси при многократной имплантации ионов можно представить как суперпозицию профилей, полученных на отдельных этапах внедрения:

$$N(x) = \sum_i D_i n_0(x, E_i)$$

где $N(x)$ — результирующая концентрация вакансий; i — количество имплантаций; D_i — доза облучения ионами с энергией E_i. Функция $n_0(x, E)$ описывает распределение по глубине внедренных ионов, созданных моноэнергетическим ионным пучком. В случае непрерывного изменения энергии:

$$N(x) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} g(E) n_0(x, E) dE$$

Здесь $g(E)$ — распределение дозы облучения по энергии. Относительно искомой функции $g(E)$ выражение для $N(x)$ представляет собой уравнение Фредгольма первого рода. Для решения данного уравнения используется метод регуляризации: исходя из условия минимума сглаживающего функционала, задача сводится к уравнению Фредгольма второго рода, сеточным аналогом которого является система линейных уравнений:

$$\sum_k A_k K_{ik} g_k + \alpha g_i \delta_{ik} = W_i$$

где $K_{ik} = K(E_i, E_k)$ — интеграл перекрытия функций распределения $n_0(E_i)$ и $n_0(E_k)$; W_i — интеграл перекрытия моноэнергетического профиля $n_0(E_i)$ и заданного профиля $N(x)$; A_k — веса интегрирования; α — параметр регуляризации. Система решается методом Гаусса. Дискретные дозы определяются интегрированием непрерывного спектра в выбранных энергетических диапазонах.

Полиэнергетическая ионная имплантация

Для получения изоляции требуемого качества в полупроводнике A^3B^5 необходимо создать равномерное по толщине эпитаксиального слоя распределение дефектов структуры

Расчеты проводились исходя из условия минимизации интегрального отклонения полученных с помощью полиэнергетической имплантации ионов H^+ в GaAs распределений вакансий от $N_V = 2{,}5\times10^{19}$ см$^{-3}$ на глубине до 4 мкм. Рассчитанные энергии и дозы ионов H^+ представлены в таблице:

Энергия, кэВ	Доза, 10^{13} см$^{-2}$
400	10,0
300	8,0
220	6,2
130	5,3
50	4,5

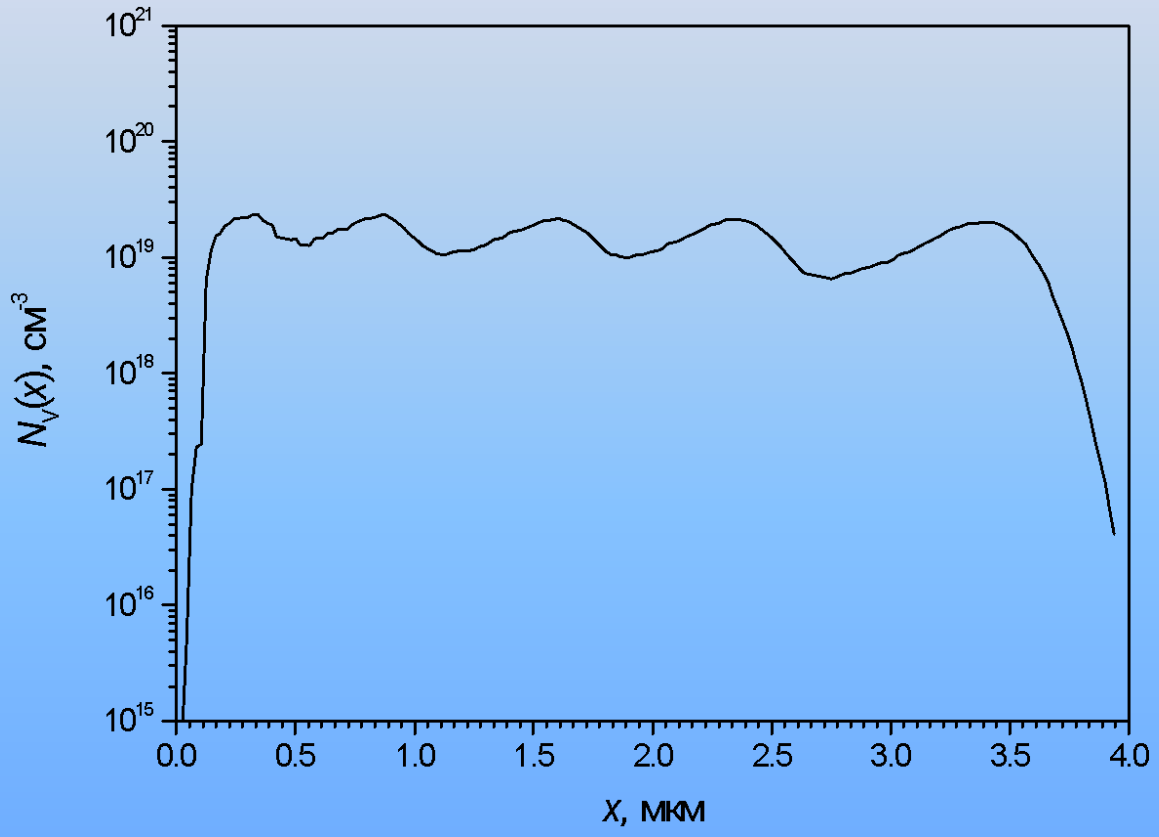
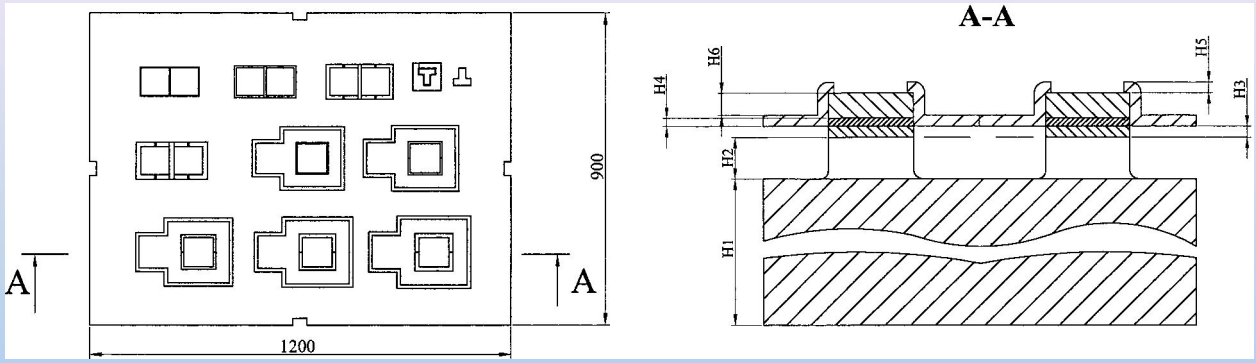


Рисунок 14 — Рассчитанное распределение вакансий в GaAs в результате имплантации ионов H^+ с 5 энергиями.

Полиэнергетическая ионная имплантация



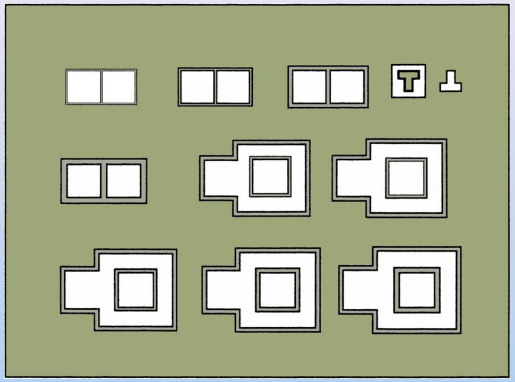


Рисунок 15 — Структура для оценки качества изоляции

ХАРАКТЕРИСТИКА	ВЕЛИЧИНА
Пробивное напряжение при толщине изолирующего слоя 4 мкм (В)	200
Ток утечки при напряжении 5 В, не более (нА)	10
Слоевое сопротивление (Ω· см)	10^8
Толщина изолирующего слоя (мкм)	0.5 - 4.0

Полиэнергетическая ионная имплантация

Увеличение проводимости с ростом частоты является признаком наличия прыжковой проводимости.

При увеличении температуры отжига прыжковая проводимость подавляется, при температуре более 380 °C зонный механизм проводимости становится основным, а роль прыжкового механизма снижается, что соответствует отжигу радиационных дефектов.

Отжиг при температурах 250-300 °C стабилизирует температурную зависимость проводимости в интервале рабочих температур интегральных схем (-50..+100 °C)

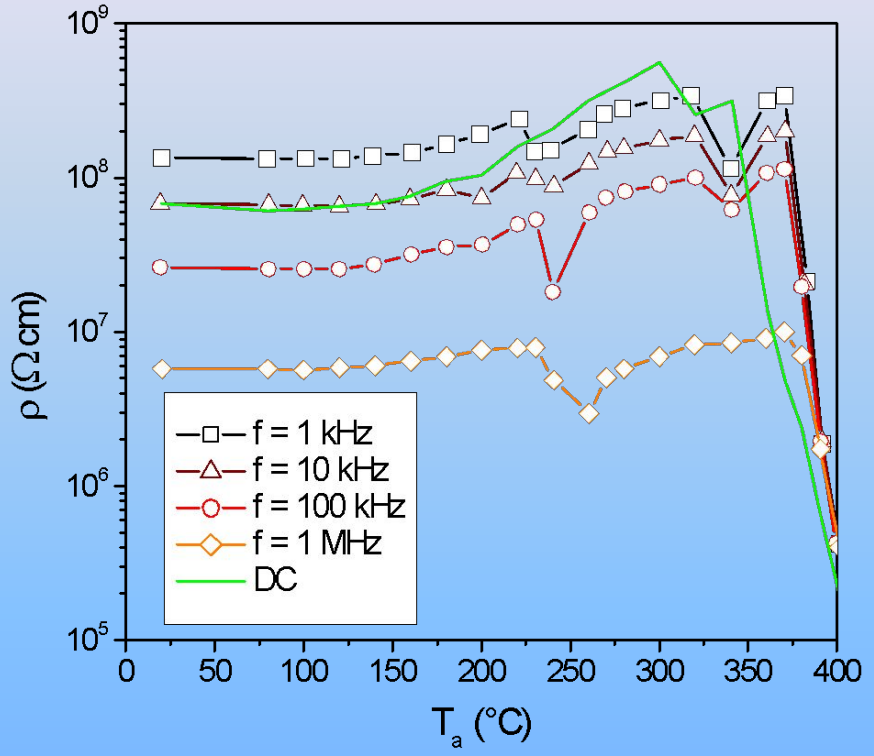


Рисунок 16 — Зависимость слоевого сопротивления от температуры отжига, измеренная при различных частотах переменного тока и при постоянном токе

РОР-анализ наноразмерных структур

Образцы кремния облучались ионами мышьяка с энергией 32 кэВ и дозой 1×10^{15} см$^{-2}$, затем термически окислялись (оценочная толщина SiO_2 — 4 нм) и подвергались быстрому термическому отжигу в течение 10 секунд при 1050 °С. На профиле виден острый пик с максимумом на глубине около 6 нм, отсутствовавший до отжига. Рассчитанное слоевое содержание мышьяка в образце с точностью не хуже 10% соответствует дозе легирования.

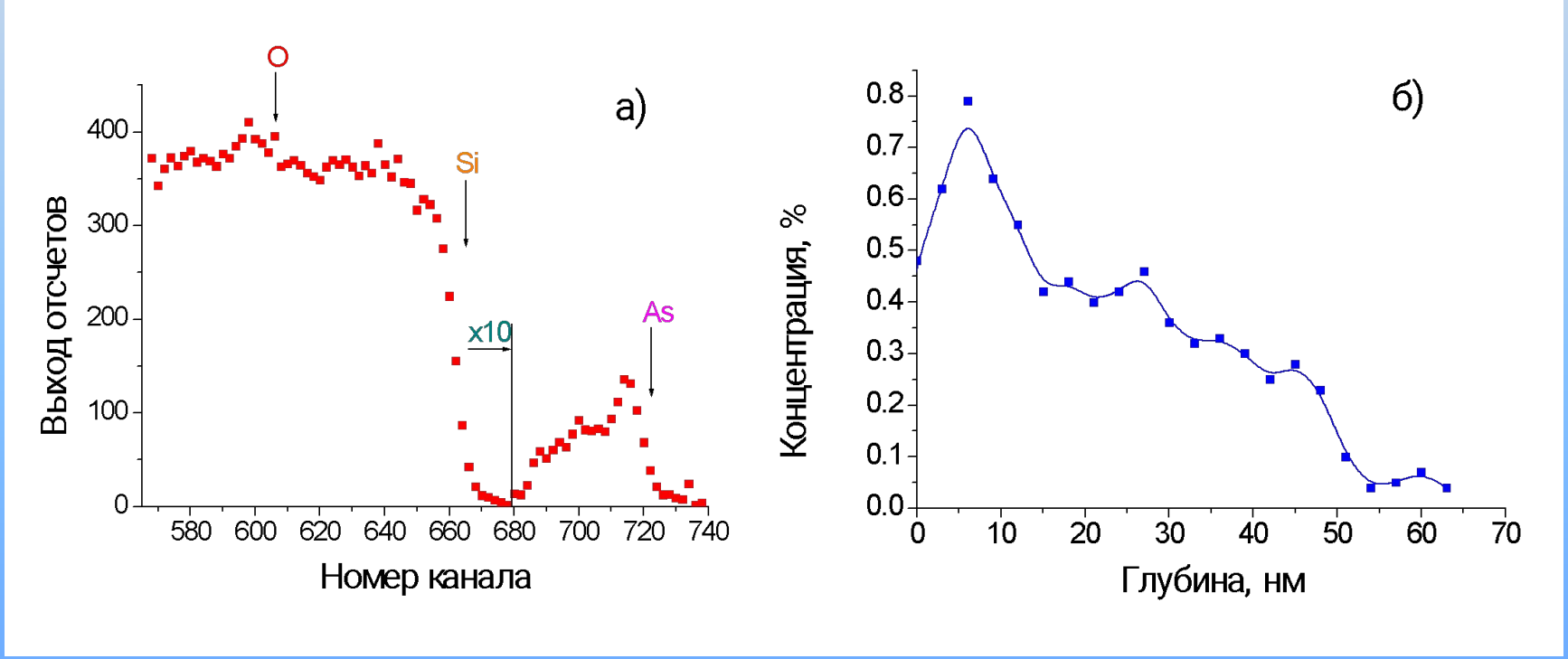


Рисунок 17 — Энергетический спектр РОР протонов с энергией 214 кэВ в отожженном образце **(а)** и рассчитанный по нему профиль распределения по глубине атомов мышьяка в кремнии **(б)**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Продемонстрирована возможность создания качественных КНИ-пластин с использованием стандартного технологического оборудования. С использованием многоступенчатого набора дозы имплантации водорода, а также дополнительных низкотемпературных отжигов, в работе показана возможность существенного снижения шероховатости поверхности КНИ-пластин (изготавливаемых в сочетании методов прямого связывания окисленных пластин и прецизионного ионного скола) вплоть до 2 нм;
- Разработаны основные режимы формирования в кремниевых пластинах внутреннего геттера, состоящего из узкого барьерного слоя, содержащего большое количество микропустот. Результаты исследований методами DLTS и C-V измерений свидетельствует о повышении структурного совершенства эпитаксиальных слоев кремния (за счет геттерирования) в тестовых диодах Шоттки. Установлено, что использование геттерирующих слоев позволяет на 2 порядка снизить концентрацию глубоких уровней в эпитаксиальных слоях кремния, связанных с наличием дефектов и нежелательных металлических примесей;
- Разработаны режимы формирования на пластинах GaAs n-типа межприборной изоляции высокого качества (термостабильность изоляции — не менее 300 °C; пробивное напряжение при ширине изолирующего слоя не менее 4 мкм — не менее 200 В; ток утечки при напряжении 5В — не более 10 нА);
- Применение протонных пучков для низкоэнергетического РОР с использованием электростатического анализатора позволяет эффективно решать задачи анализа структур наноэлектроники.