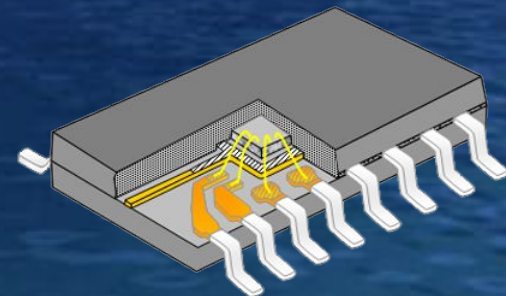


# ФОРМИРОВАНИЕ ВОДОРОДНО- ИНДУЦИРОВАННЫХ ДЕФЕКТОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЯХ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

**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 резерфордского обратного рассеяния



## 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°C), 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
  - отклонение от плоскостности
  - прогиб
- ETO.035.206ТУ  
< 9 мкм  
< 40 мкм

### 2. Создание структур SiO<sub>2</sub>/Si

- температуры термообработки
  - среда термообработок
  - толщины окисла на пластинах
- 800-1100 °С  
сухой O<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O  
20-300 нм

### 3. Ионная имплантация

- ионы
  - дозы имплантации
  - ток в пучке
  - энергия
  - температура
- H<sub>2</sub><sup>+</sup>  
4-5×10<sup>16</sup> ион/см<sup>2</sup>  
500-600 мкА  
80-100 кэВ  
50 °С



# 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

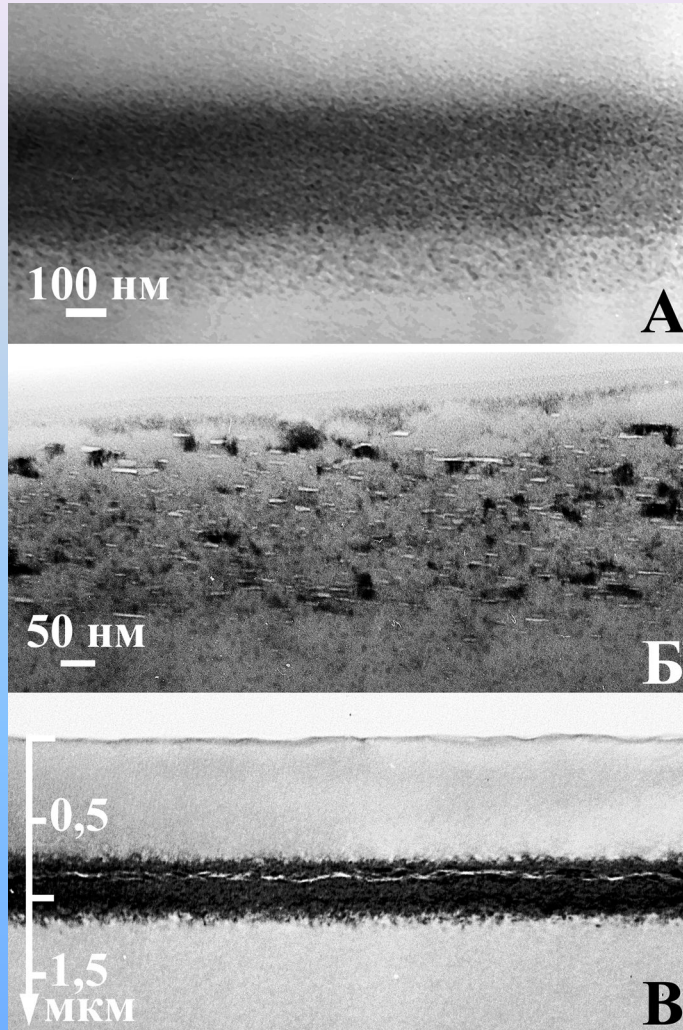


Рисунок 1 — ПЭМ фотографии дефектного слоя после имплантации ионов водорода (А) и отжига при 450 °С: 5 минут (Б) и 10 минут (В)

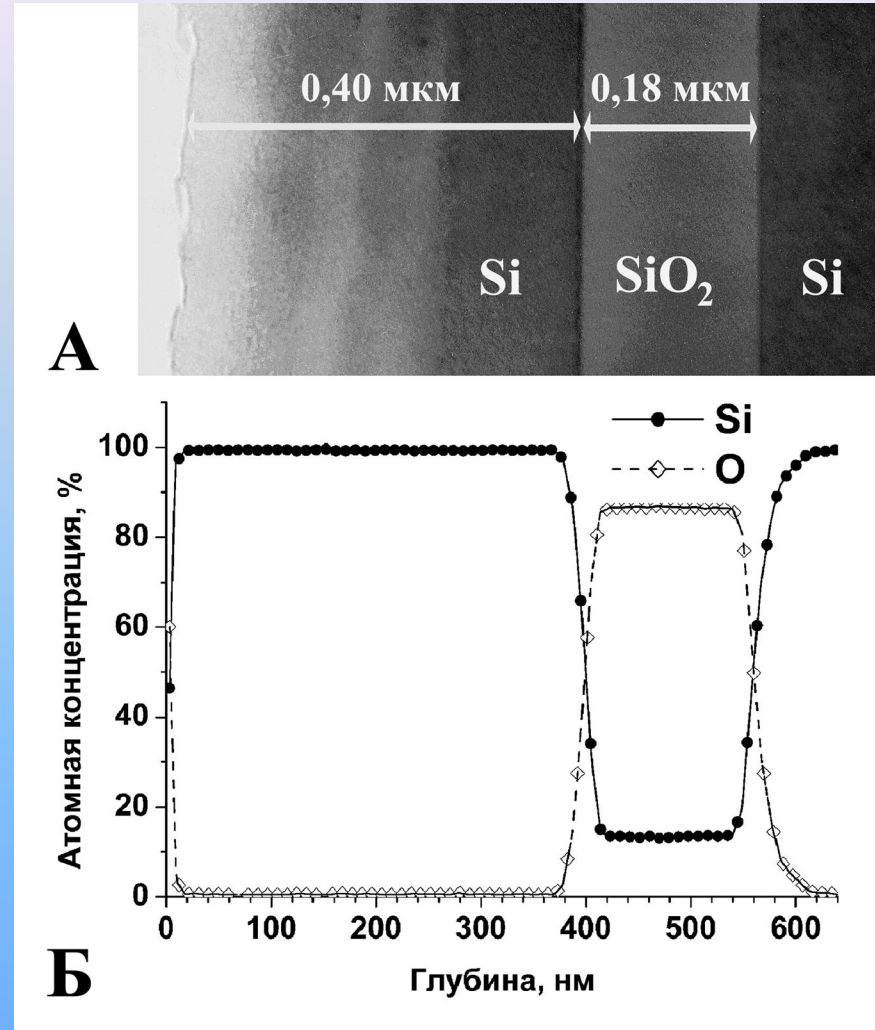
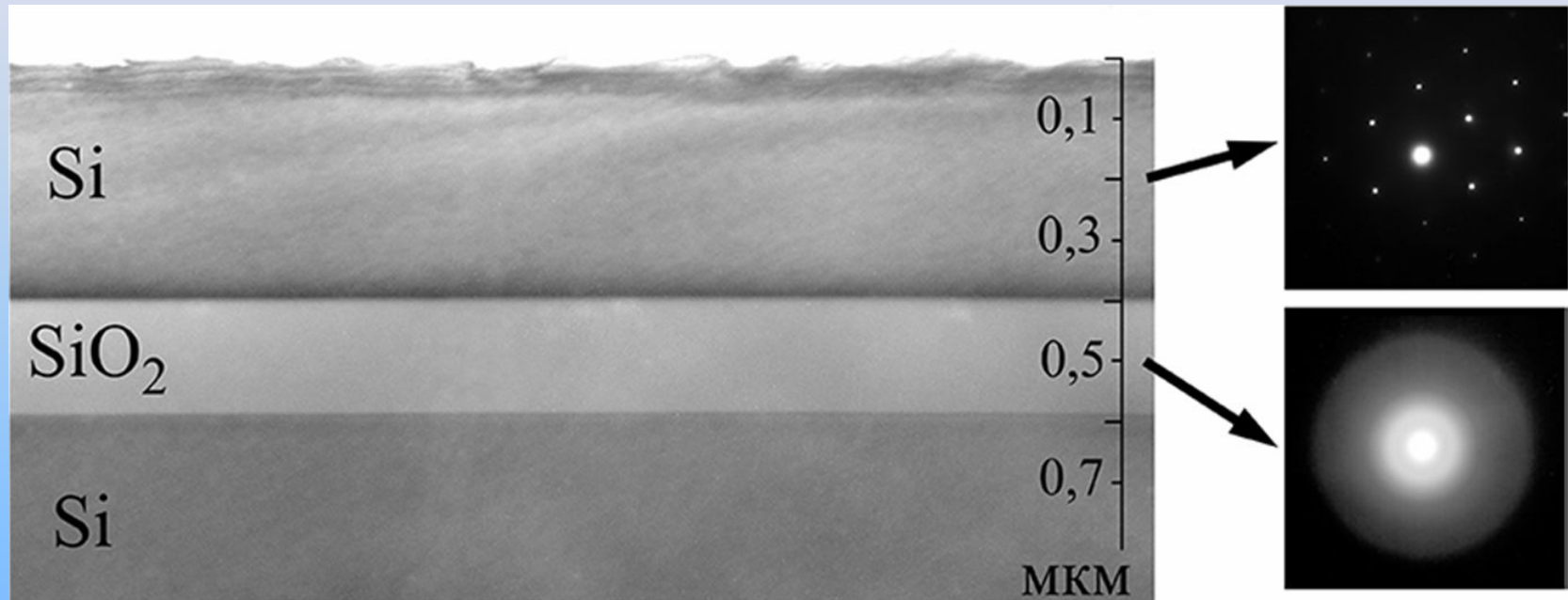


Рисунок 2 — ПЭМ фотография сечения КНИ-пластины (А) и ОЖЕ-профиль элементного состава (Б)

# 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

# Формирование КНИ-структур

## Формирование КНИ-пластин методом smart-cut

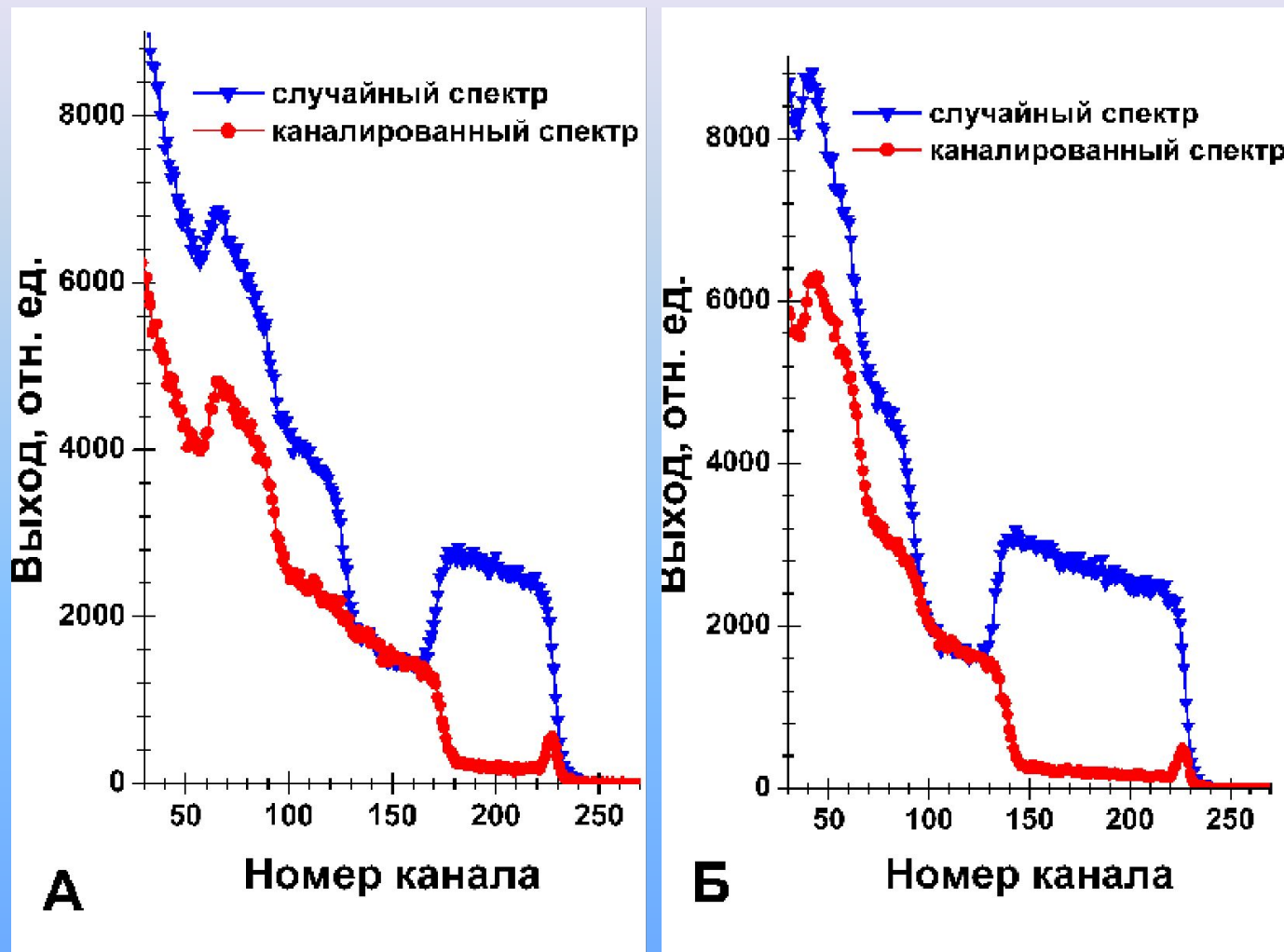


Рисунок 4 — Случайные и каналированные спектры POP от КНИ-пластин:  
А – Si(0,22 мкм)/SiO<sub>2</sub>(0,18 мкм)/Si, Б – Si(0,35 мкм)/SiO<sub>2</sub>(0,18 мкм)/Si

# Формирование КНИ-структур

## Формирование КНИ-пластин методом smart-cut

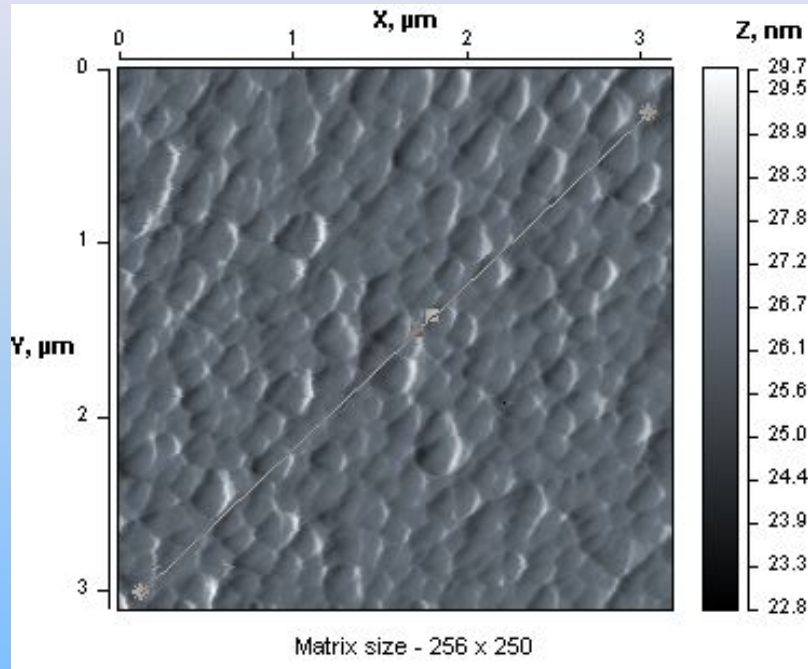
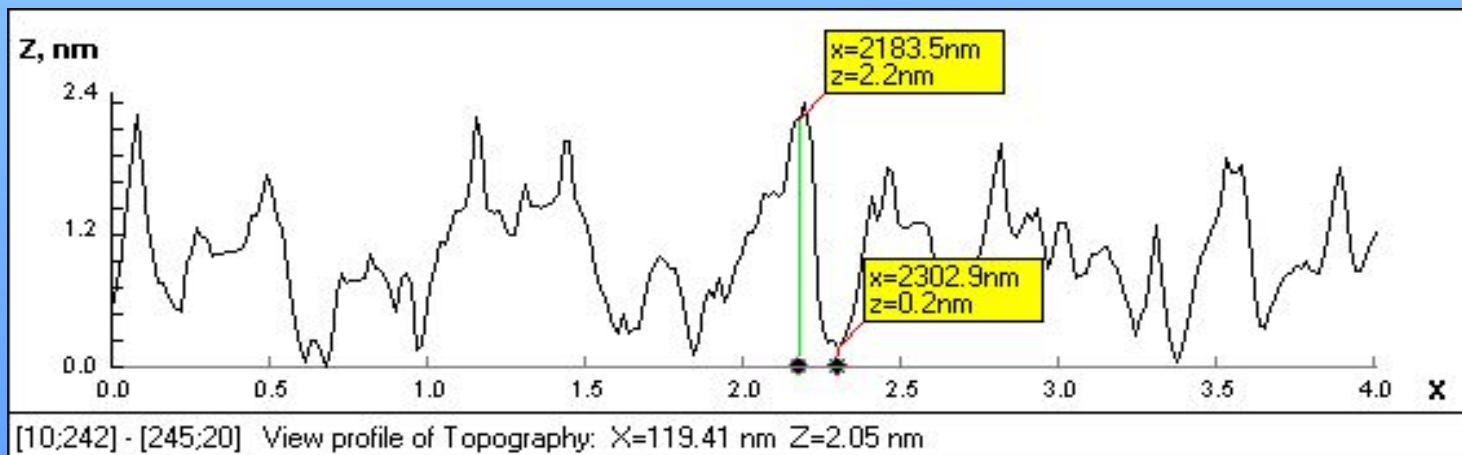


Рисунок 5 — Топография и профили шероховатости поверхности КНИ-пластины (метод АСМ)

Si(0,35 мкм)/SiO<sub>2</sub>(0,18 мкм)/Si

Режимы термообработки:

1. 80 °С, 2 ч.; 120 °С, 1 ч
2. 500 °С, 30 минут
3. 1050 °С, 30 минут





## Простой технологический процесс

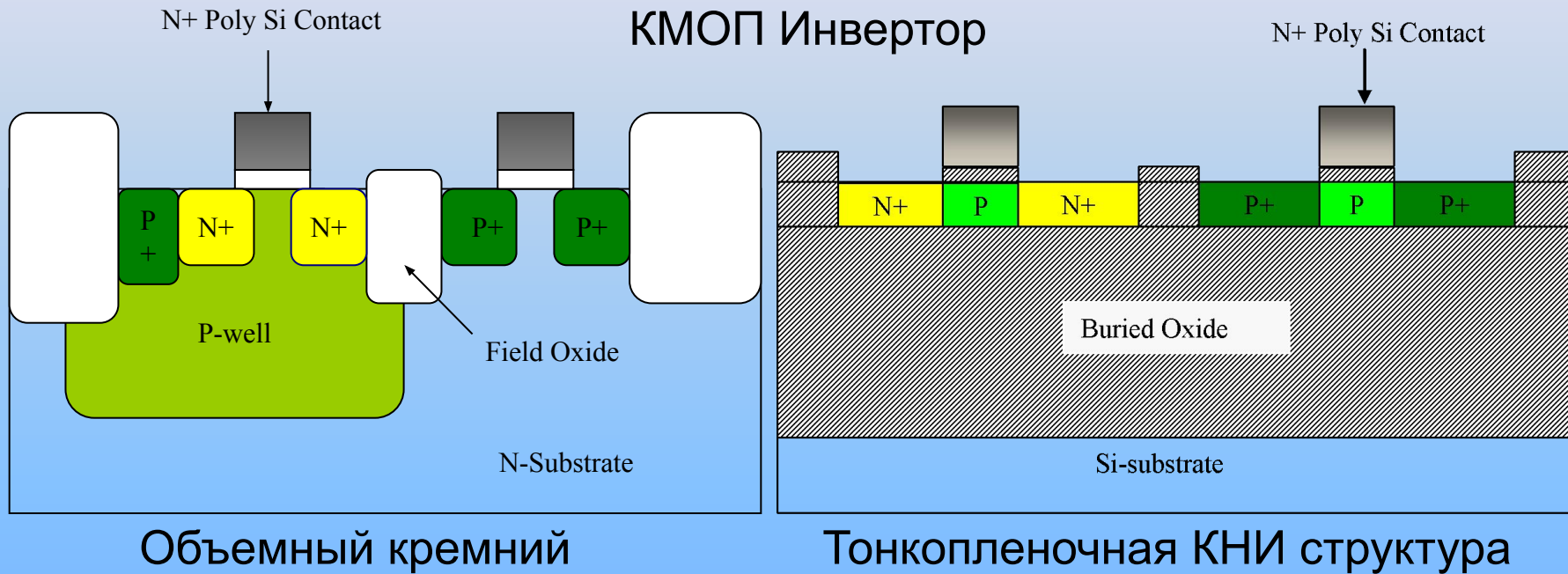
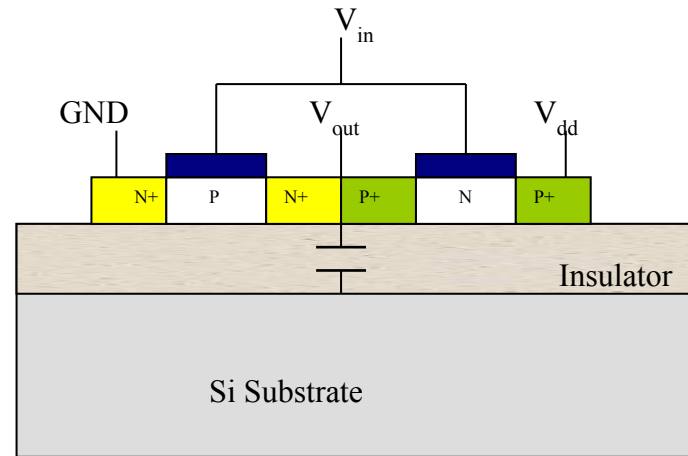
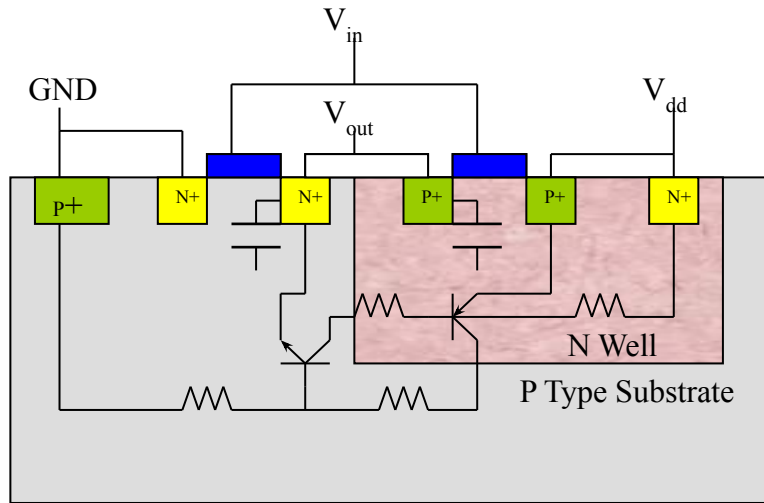


Рисунок 6 — Использование КНИ структур позволяет упростить технологический процесс - отсутствуют этапы литографии, легирования и диффузии для создания р-кармана

# 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

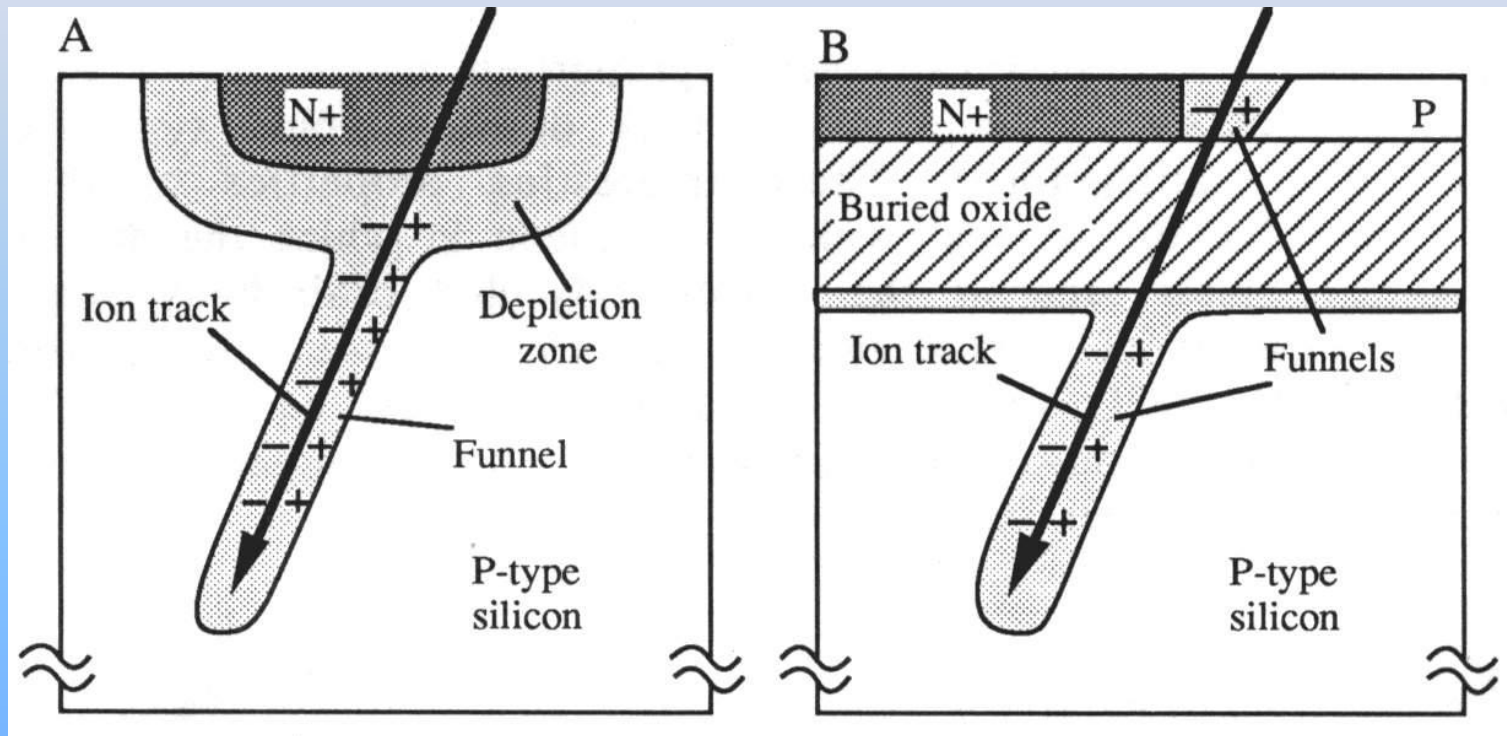


Рисунок 8 — Формирование трека при попадании энергетической частицы

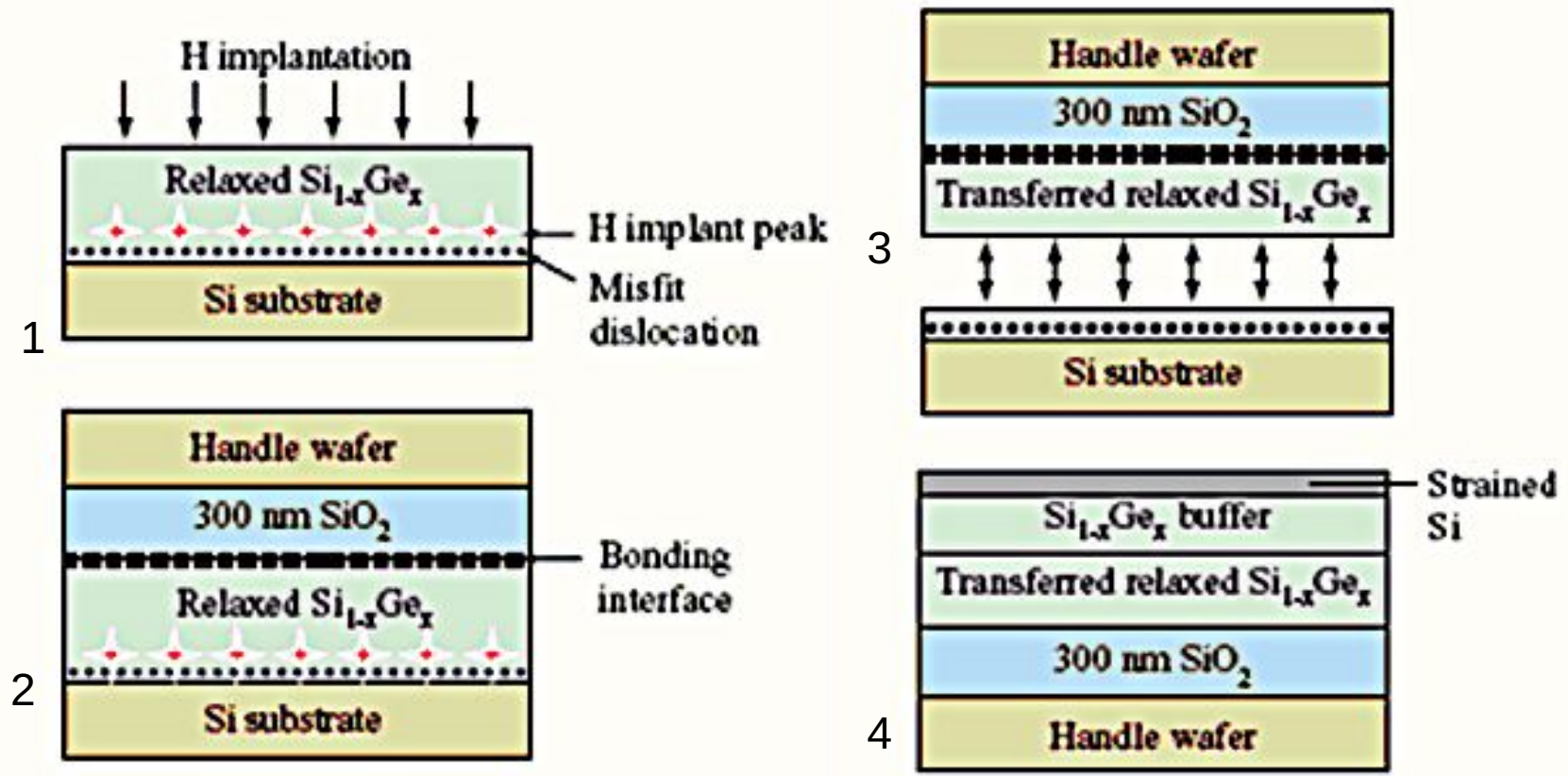
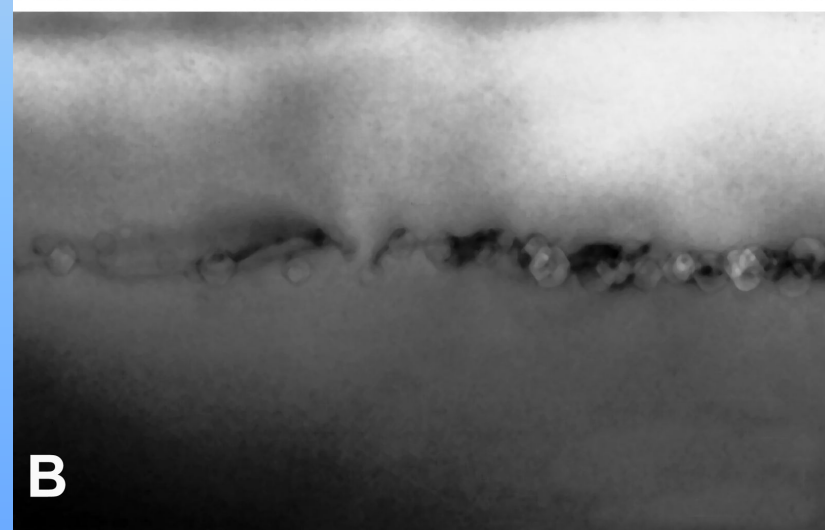
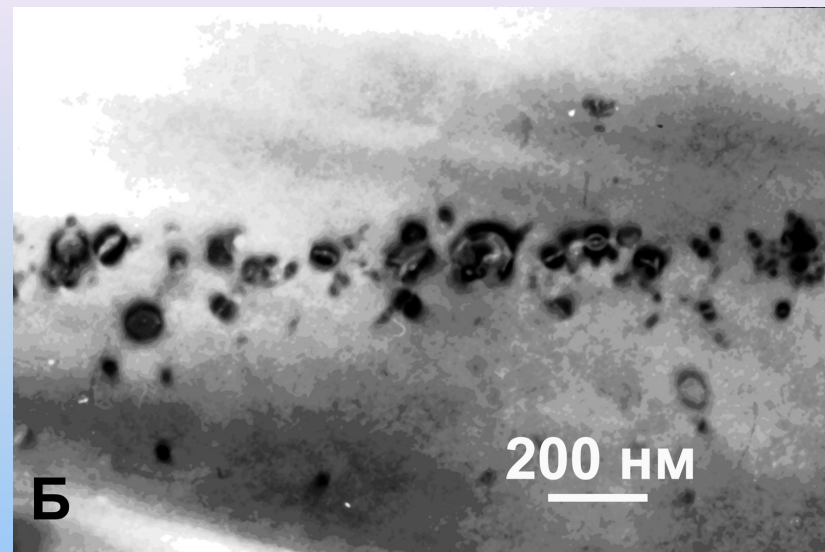
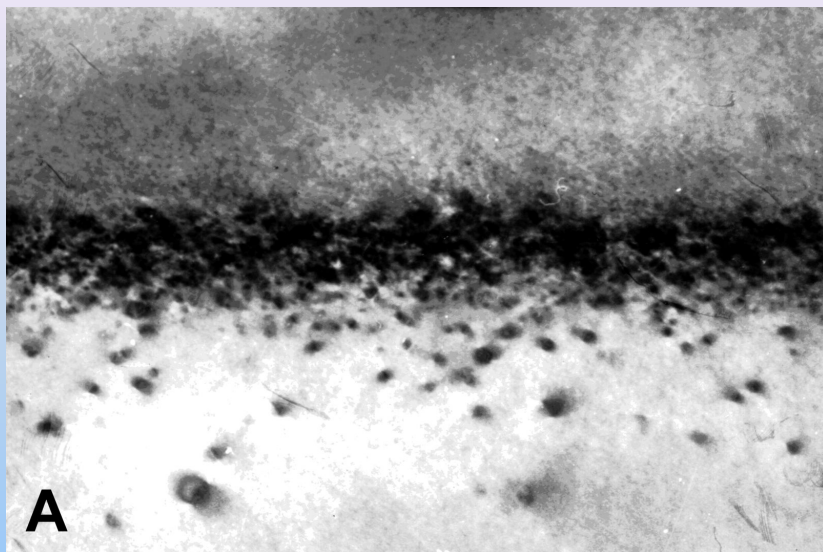


Рисунок 9 — Использование методики КНИ в SiGe - технологии

# Формирование внутреннего геттера



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

# Формирование внутреннего геттера

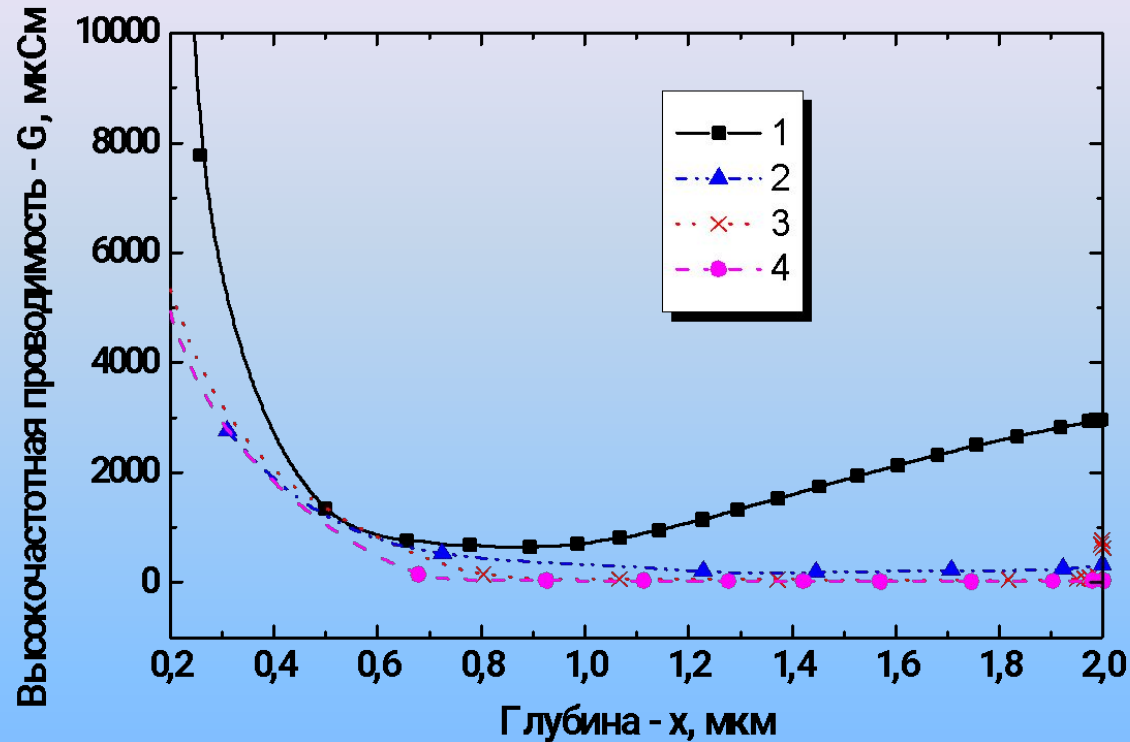
**Табл. 1** — Режимы формирования геттерирующих слоев

№	Тип подложки	Энергия и доза имплантации H <sup>+</sup>	Режимы термического отжига
1	Si (2 мкм, 1 Ом·см)/(111)Cz-Si (КЭФ-0,01)	215 (H <sub>2</sub> <sup>+</sup> ) кэВ, 2,5×10 <sup>16</sup> см <sup>-2</sup>	1) 800 °С, 5 мин. 2) 800 °С, 30 мин. 3) 900 °С, 5 мин. 4) 1000 °С, 5 мин. 5) 900 °С, 15 мин.
2	Si (2 мкм, 1 Ом·см)/(111)Cz-Si (КЭФ-0,01)	215 (H <sub>2</sub> <sup>+</sup> ) кэВ, 3×10 <sup>16</sup> см <sup>2</sup>	1) 800 °С, 5 мин. 2) 800 °С, 30 мин. 3) 900 °С, 5 мин. 4) 1000 °С, 5 мин. 5) 900 °С, 15 мин.
3	(001)Cz-Si (КЭФ-4,5)	75 (H <sup>+</sup> ) кэВ, 2,5×10 <sup>16</sup> см <sup>-2</sup>	900 °С, 30 мин.
4	(001)Cz-Si (КЭФ-4,5)	75 (H <sup>+</sup> ) кэВ, 3,5×10 <sup>16</sup> см <sup>2</sup>	900 °С, 30 мин.

**Табл. 2** — Режимы формирования тестовых структур

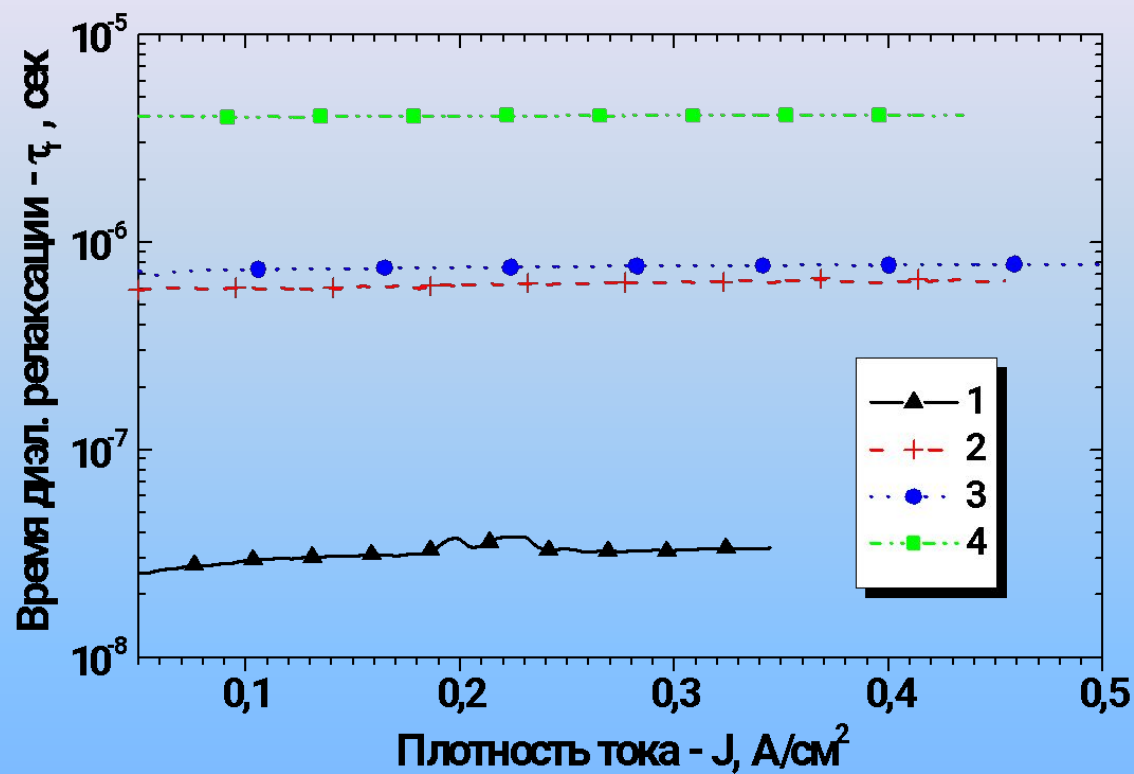
№	Проводимая операция	Описание режимов операции	Температура обработки
1	Формирование диодов Шоттки	1. Напыление пленки металла (Ni), методом термического испарения 2. Формирование силицида никеля (NiSi) при термическом отжиге в среде сухого азота (450 °С, 15 мин.)	< 50 °С 450 °С
2	Формирование контактных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

# 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 ( $215 \text{ кэВ}$ ,  $2,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ) и последующим термическим отжигом: 2 –  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , 5 минут; 3 –  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , 5 минут; 4 –  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , 30 минут

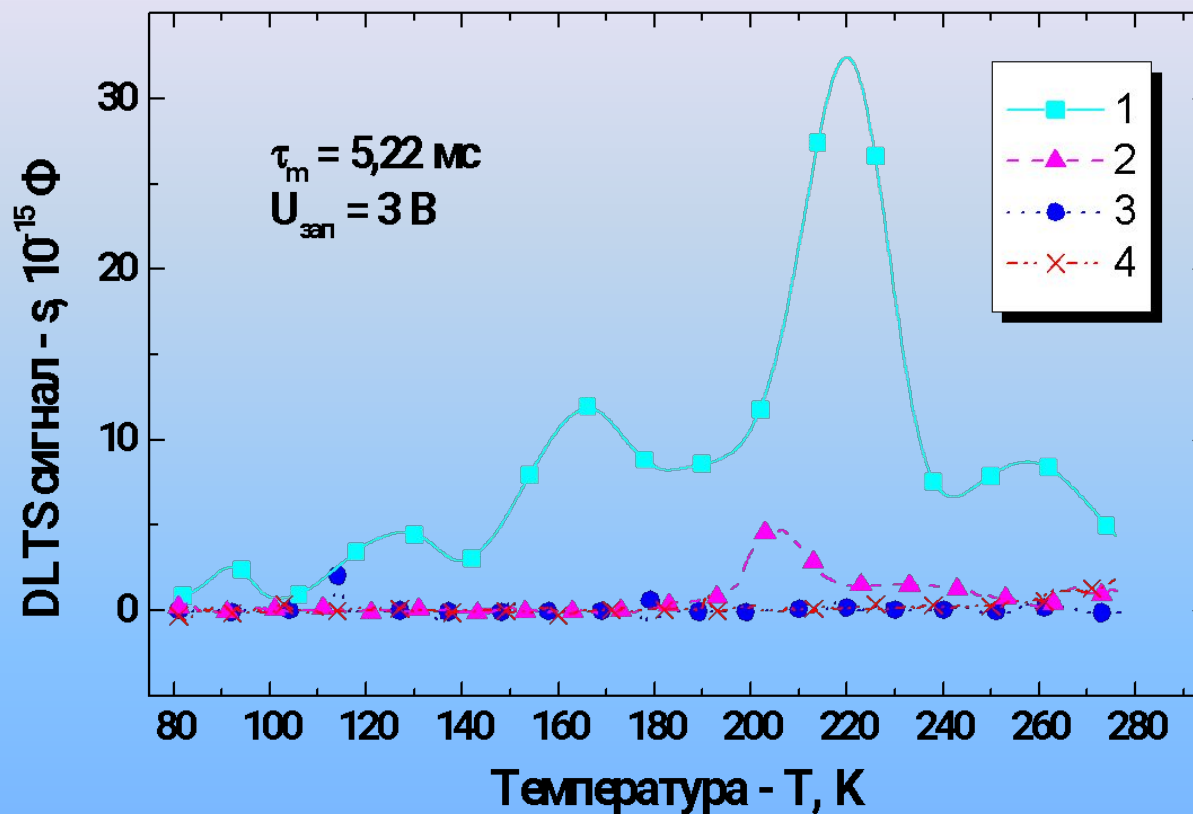
# Формирование внутреннего геттера



**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 ( $215 \text{ кэВ}$ ,  $2,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ) и последующим термическим отжигом: 2 –  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , 5 минут; 3 –  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , 5 минут; 4 –  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , 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 ( $215 \text{ кэВ}$ ,  $2,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ) и последующим термическим отжигом: 2 –  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , 5 минут; 3 –  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , 5 минут; 4 –  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , 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;  $\alpha$  — 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  $N_V = 2,5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  на глубине до 4 мкм. Рассчитанные энергии и дозы ионов  $H^+$  представлены в таблице:

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

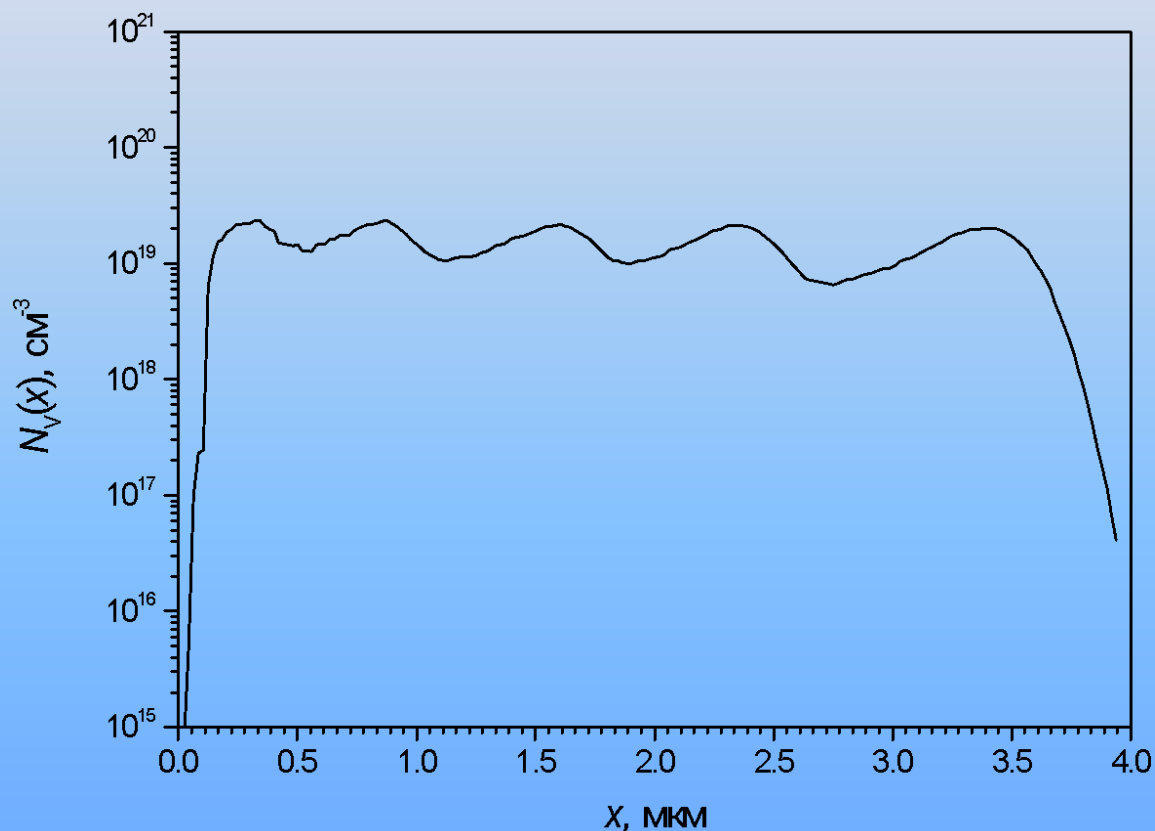


Рисунок 14 — Рассчитанное распределение вакансий в GaAs в результате имплантации ионов  $H^+$  с 5 энергиями.

# Полиэнергетическая ионная имплантация

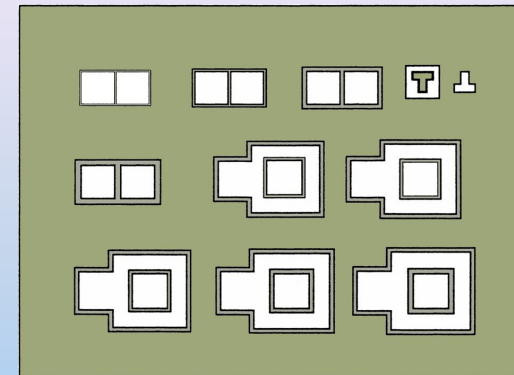
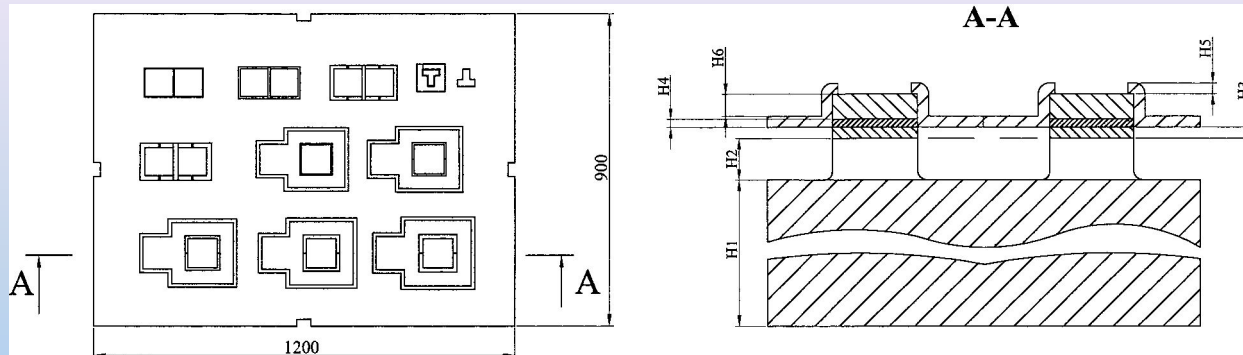


Рисунок 15 — Структура для оценки качества изоляции

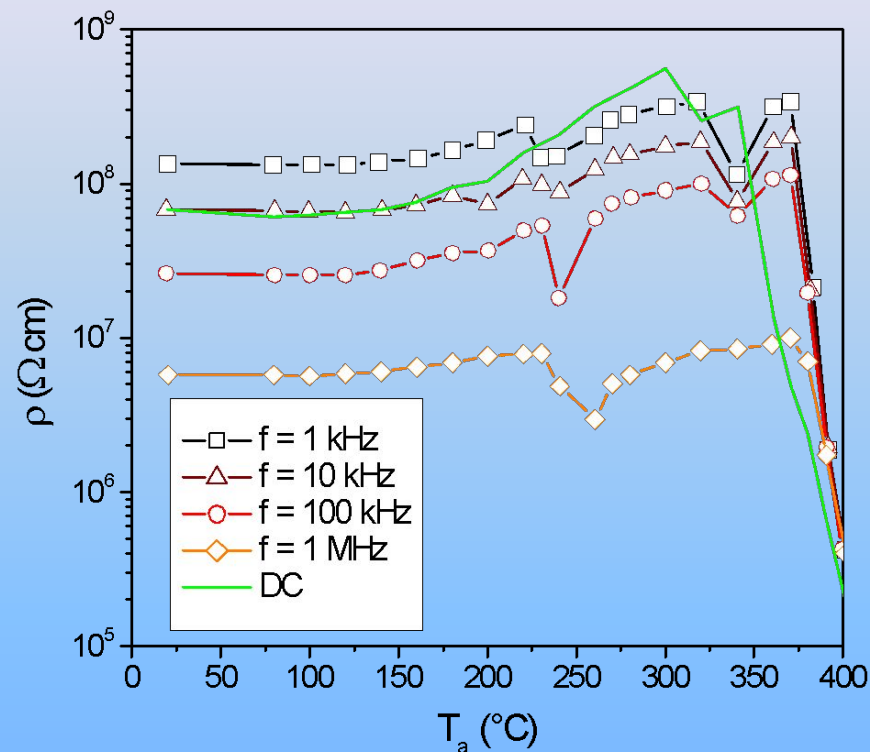
ХАРАКТЕРИСТИКА	ВЕЛИЧИНА
Пробивное напряжение при толщине изолирующего слоя 4 мкм (В)	200
Ток утечки при напряжении 5 В, не более (нА)	10
Слоевое сопротивление ( $\Omega \cdot \text{см}$ )	$10^8$
Толщина изолирующего слоя (мкм)	0.5 - 4.0

# Полиэнергетическая ионная имплантация

Увеличение проводимости с ростом частоты является признаком наличия прыжковой проводимости.

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

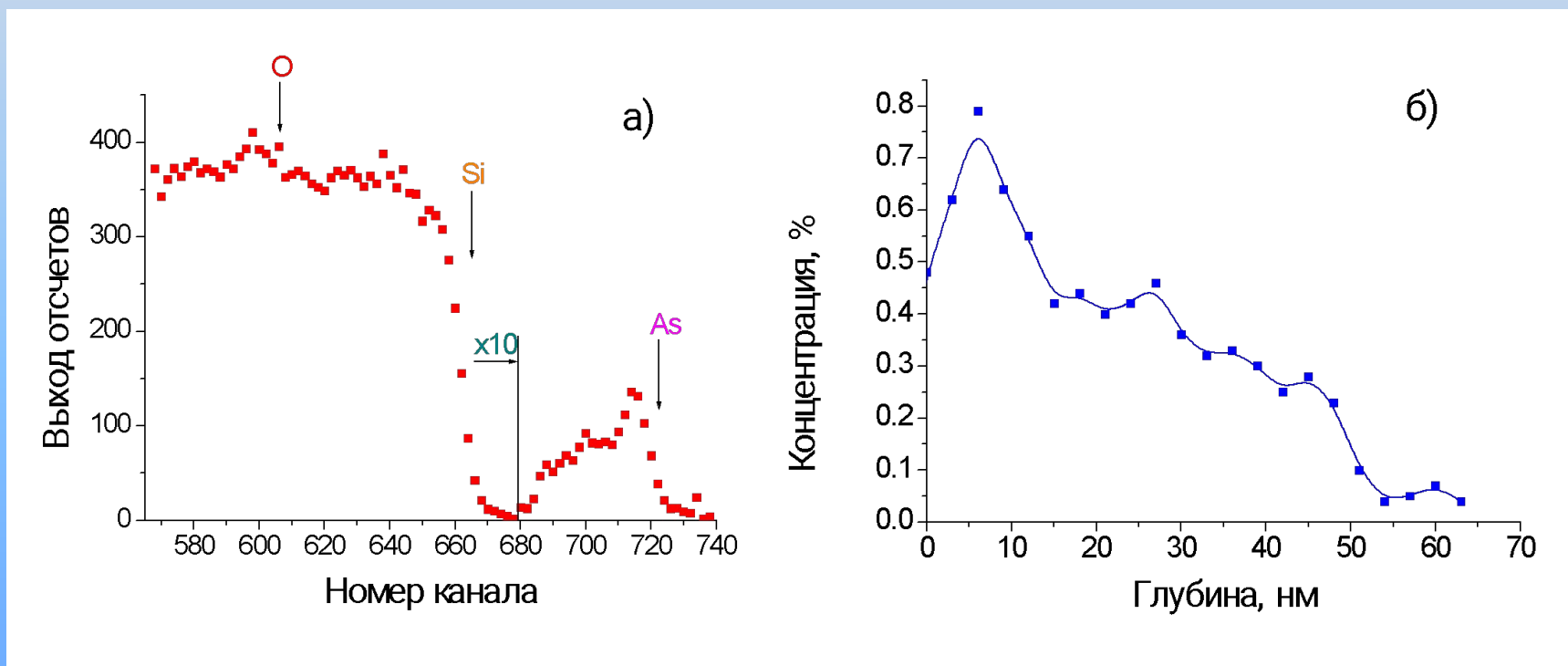
Отжиг при температурах 250-300 °С стабилизирует температурную зависимость проводимости в интервале рабочих температур интегральных схем (-50..+100 °С)



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

# POР-анализ наноразмерных структур

Образцы кремния облучались ионами мышьяка с энергией 32 кэВ и дозой  $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , затем термически окислялись (оценочная толщина  $\text{SiO}_2$  — 4 нм) и подвергались быстрому термическому отжигу в течение 10 секунд при  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ . 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 POР 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 °С; 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 POP с использованием электростатического анализатора позволяет эффективно решать задачи анализа структур нанoeлектроники.