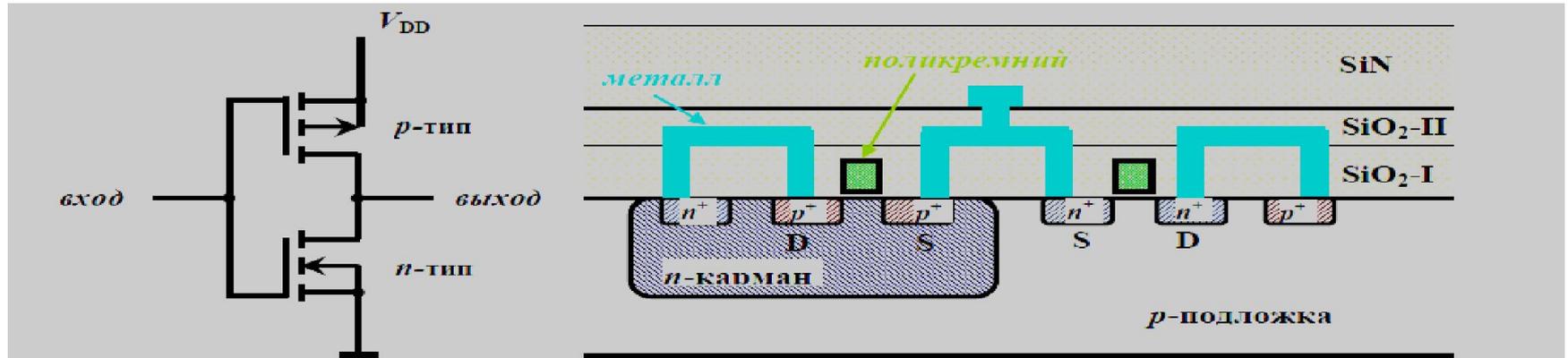
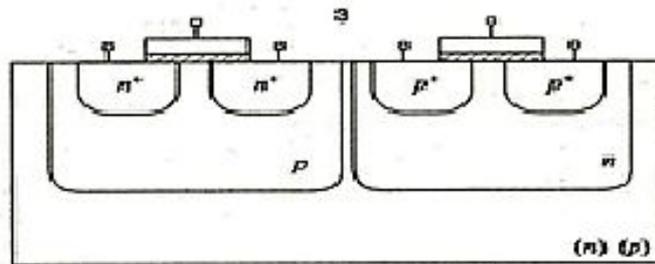
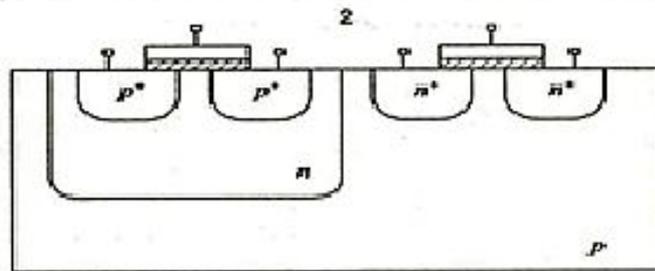
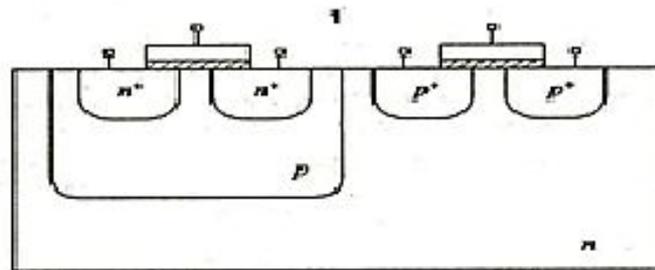


Выбор структуры и подложки для КМОП ИС

КМОП - структура



Варианты КМОП структур



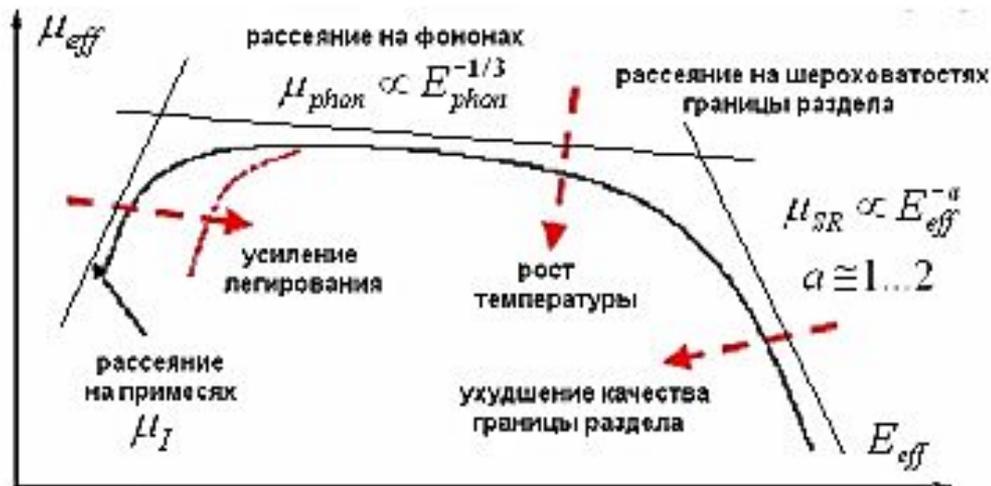
Выбор кармана КМОП - структуры

Тип кармана	Достоинства	Недгостатки
Карман р-типа	Малая площадь	1. Инверсный канал по краям кармана 2. Ухудшение частотных свойств п-канального МОП – транзистора 3. Уменьшение подвижности носителей п-канального транзистора 4. Трудность подгонки пороговых напряжений
Карман п-типа		
Два кармана		

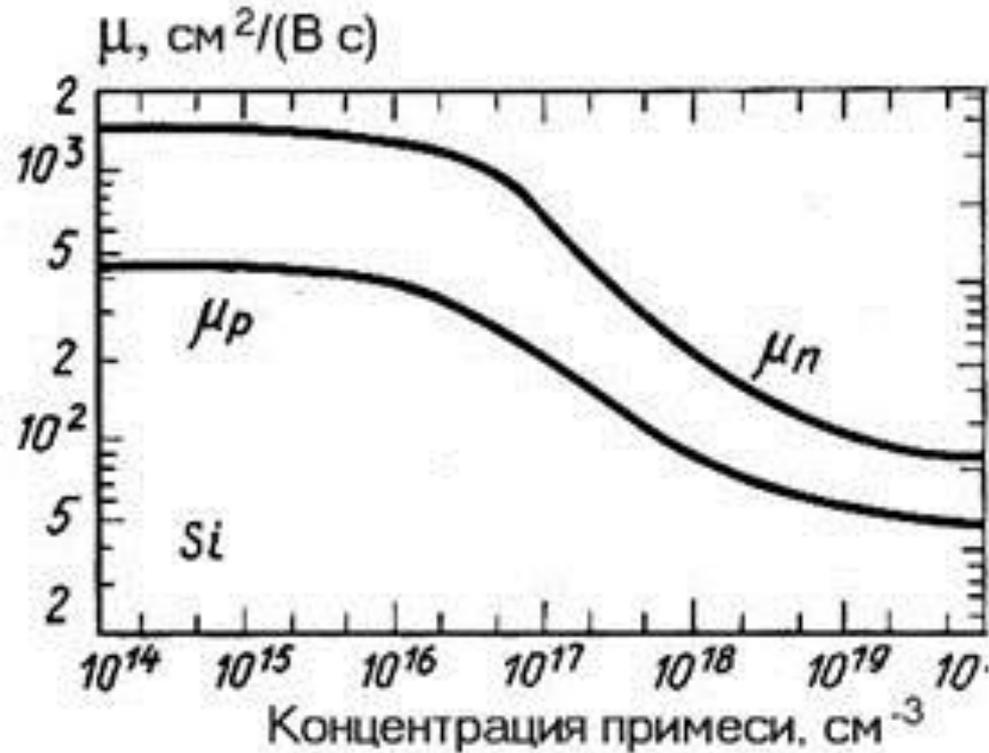
Инверсионный канал по краю кармана р-типа



Зависимость подвижности от электрического поля, легирования и температуры



Зависимость подвижности носителей от концентрации примеси



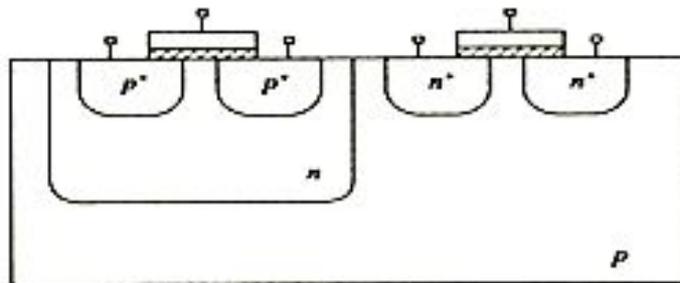
Пороговое напряжение МОП-транзистора

- - Выравнивание зон
 - Обеднение
 - Инверсия
- $$U_{\Pi} = \varphi_{МП} + Q_{д/с_д} + Q_{\Pi/с_д} + 2\varphi_F$$

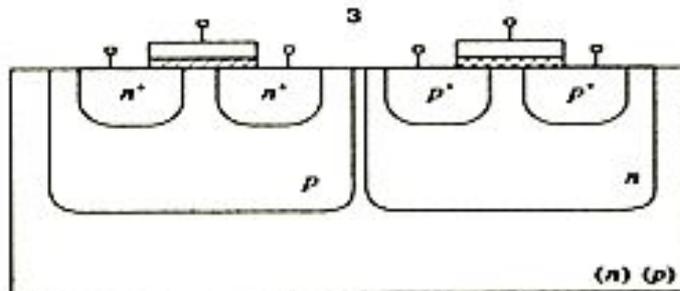
$Q_{\Pi} \sim N_{\Pi}$

Тип кармана	Достоинства	Недгостатки
Карман р-типа	Малая площадь	<ol style="list-style-type: none"> 1. Инверсный канал по краям кармана 2. Ухудшение частотных свойств п-канального МОП – транзистора 3. Уменьшение подвижности носителей п-канального транзистора 4. Трудность подгонки пороговых напряжений
Карман п-типа	<p>Сохранение частотных свойств п-канального транзистора</p> <p>Отсутствует образование инверсного</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Уменьшение подвижности носителей р-канального транзистора 2. Трудность подгонки пороговых напряжений

Карманы в КМОП структуре



Однокарманный вариант

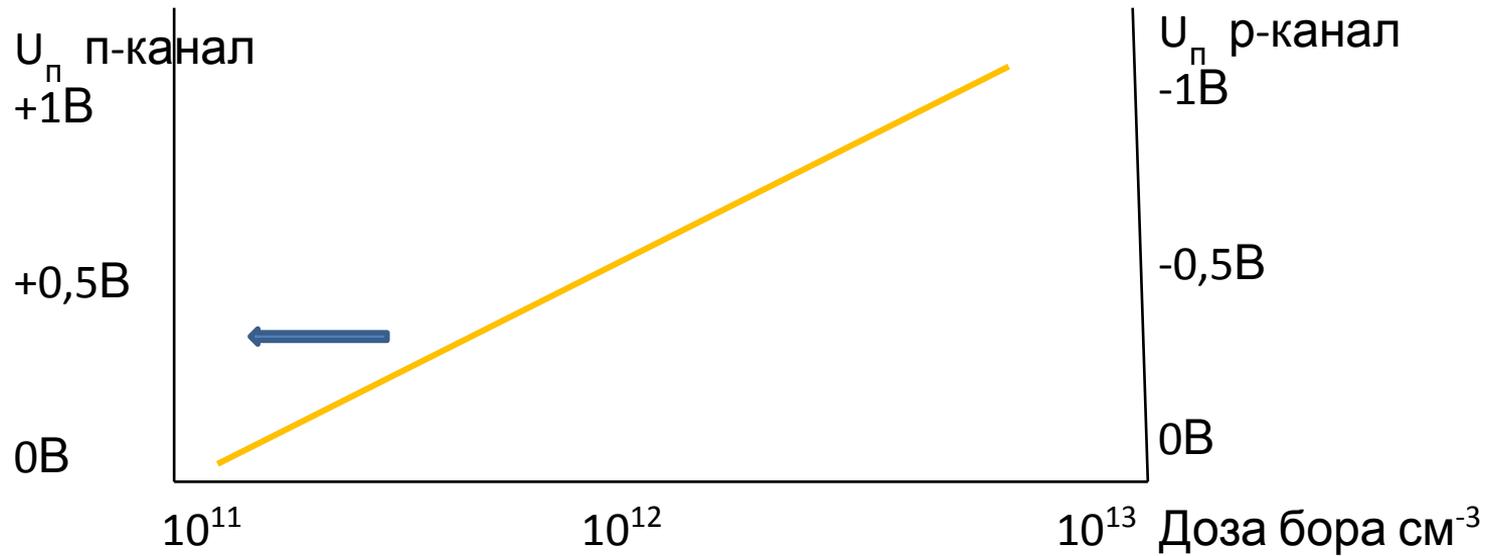


Двухкарманный вариант

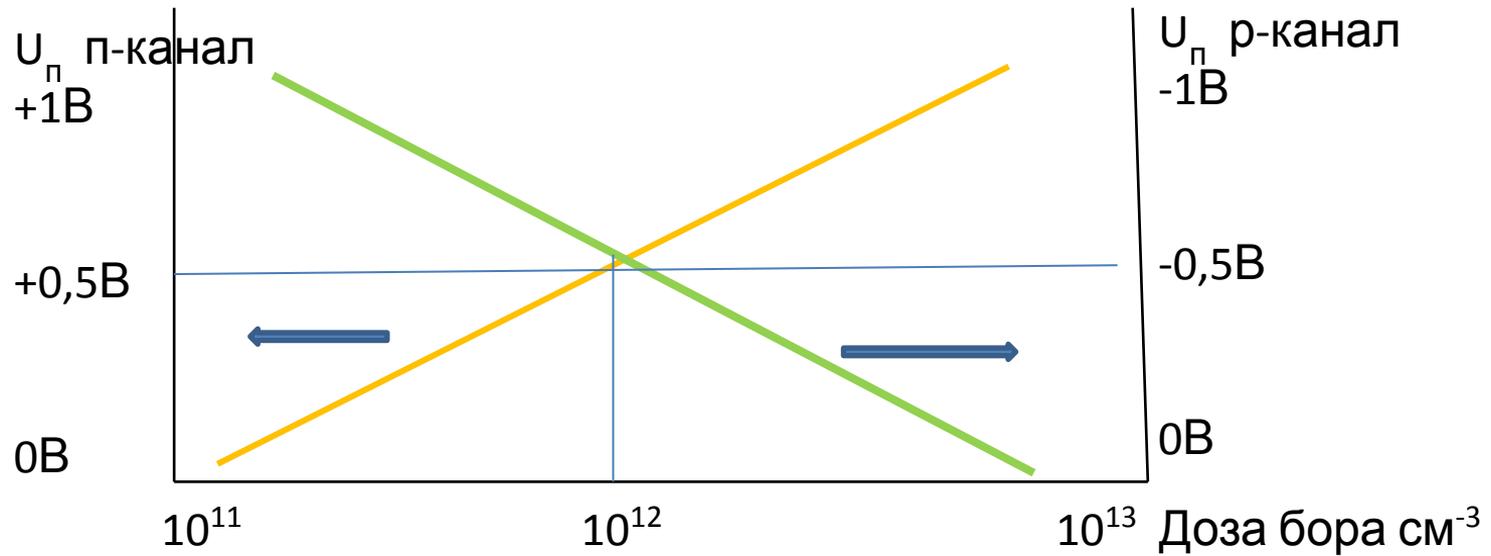
Выбор кармана КМОП - структуры

Тип кармана	Достоинства	Недгостатки
Карман р-типа	Малая площадь	<ol style="list-style-type: none">1. Инверсный канал по краям кармана2. Ухудшение частотных свойств п-канального МОП – транзистора3. Уменьшение подвижности носителей п-канального транзистора4. Трудность подгонки пороговых напряжений
Карман п-типа	Сохранение частотных свойств п-канального транзистора Нет инверсии по краям кармана	<ol style="list-style-type: none">1. Уменьшение подвижности носителей р-канального транзистора2. Трудность подгонки пороговых напряжений3. Увеличение площади ?
Два кармана	Простота подгонки порогового напряжения	<ol style="list-style-type: none">1. Усложнение технологии2. Токи утечки неосновных носителей через рп- переход кармана

Подгонка порогового напряжения в двухкарманной КМОП-структуре



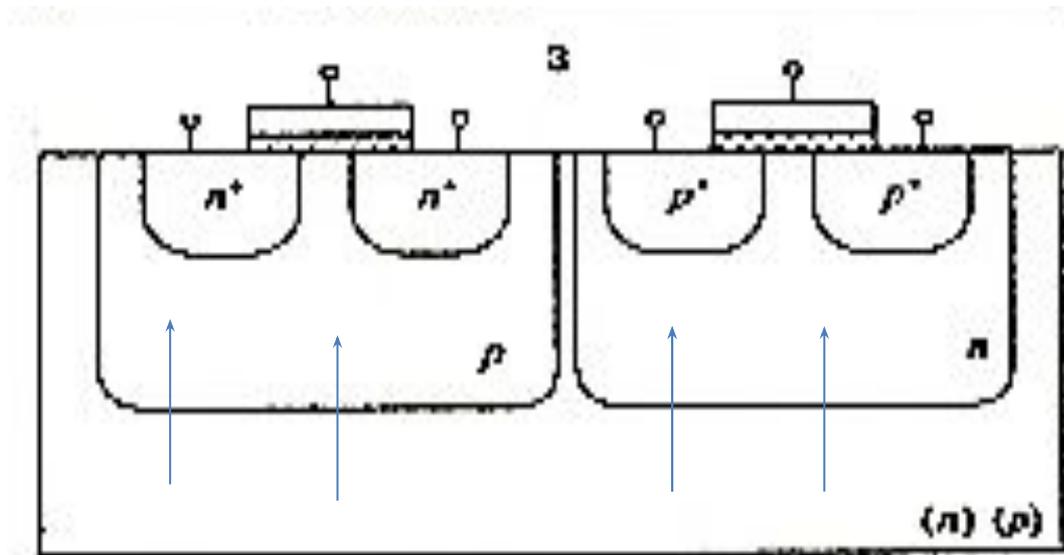
Подгонка порогового напряжения в двухкарманной КМОП-структуре



Возникает ли инверсный канал по периферии p-кармана в случае двухкарманной технологии?

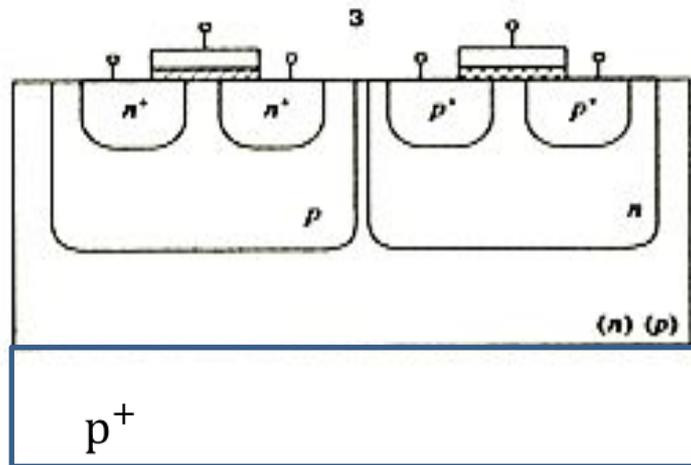


Токи утечки в двухкарманной КМОП структуре



$$N_{\text{э}} \times N_{\text{д}} = 10^{20}$$

$p^+ p$ - подложка в КМОП структуре



Преимущества p^+ - p подложки

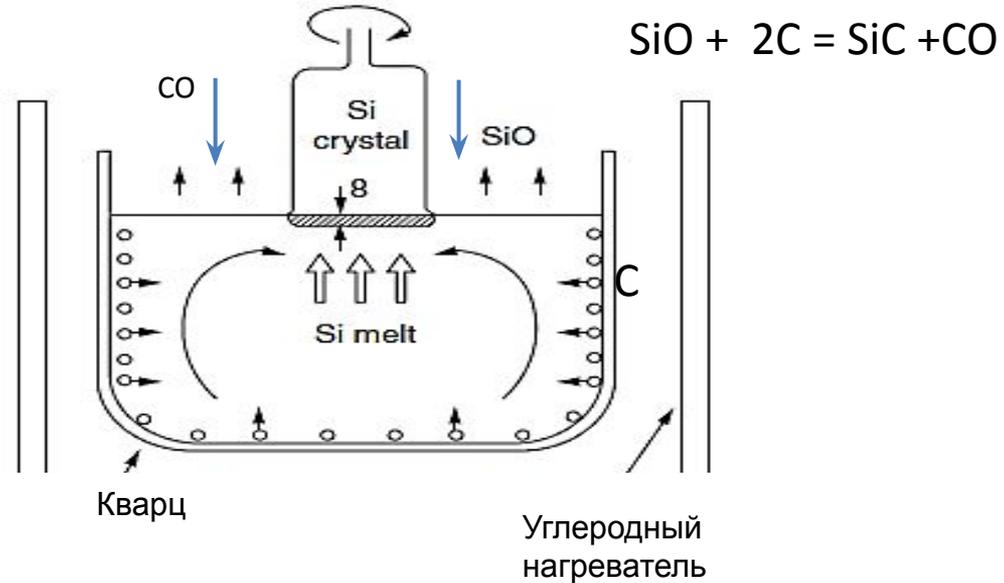
- 1. Улучшение качества полупроводника
- 2. Уменьшение потока неосновных носителей из подложки в pn – переходы карманов
- 3. Подавление эффекта «защелкивания»
- 4. Геттерирование кислорода из пленки p^+ - подложкой
- 5. Геттерирование металлов из пленки переходом p^+p пленка-подложка

Выращивание слитка кремния по методу Чохральского

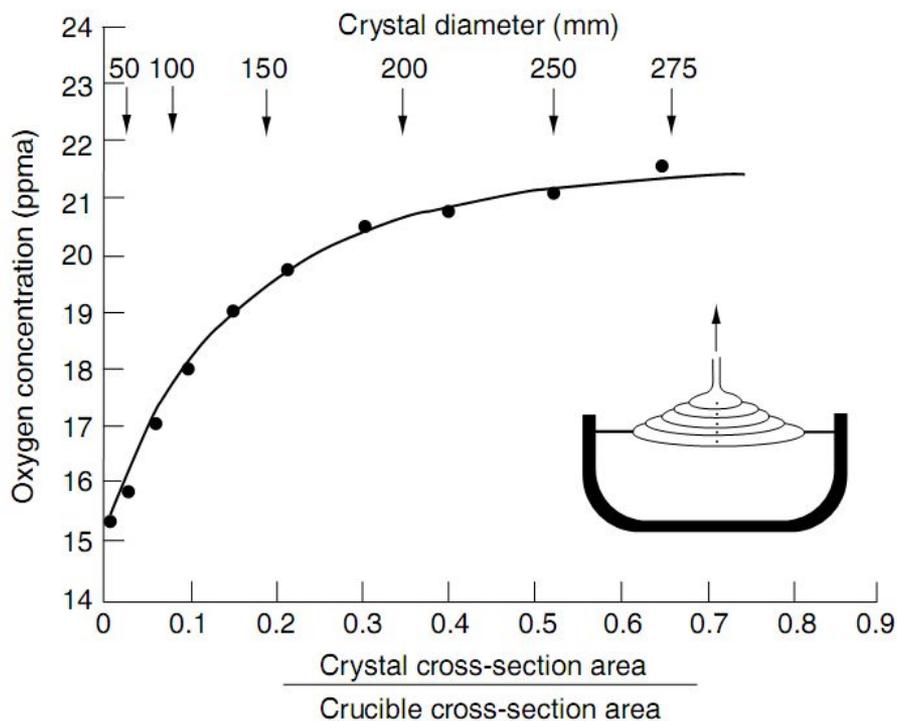
C - 10^{16} см^{-3}

O - 10^{18} см^{-3}

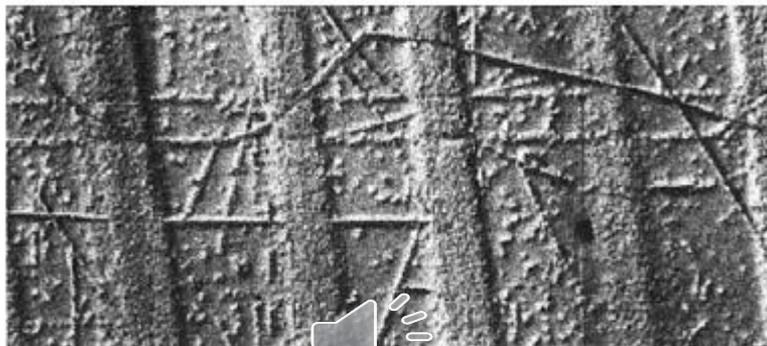
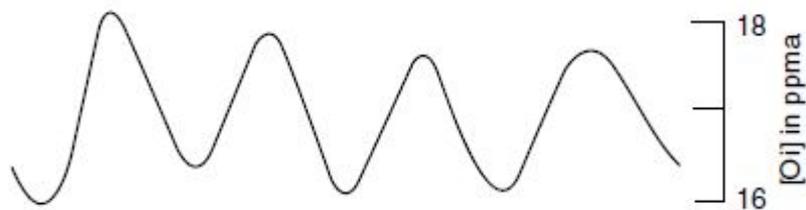
Me



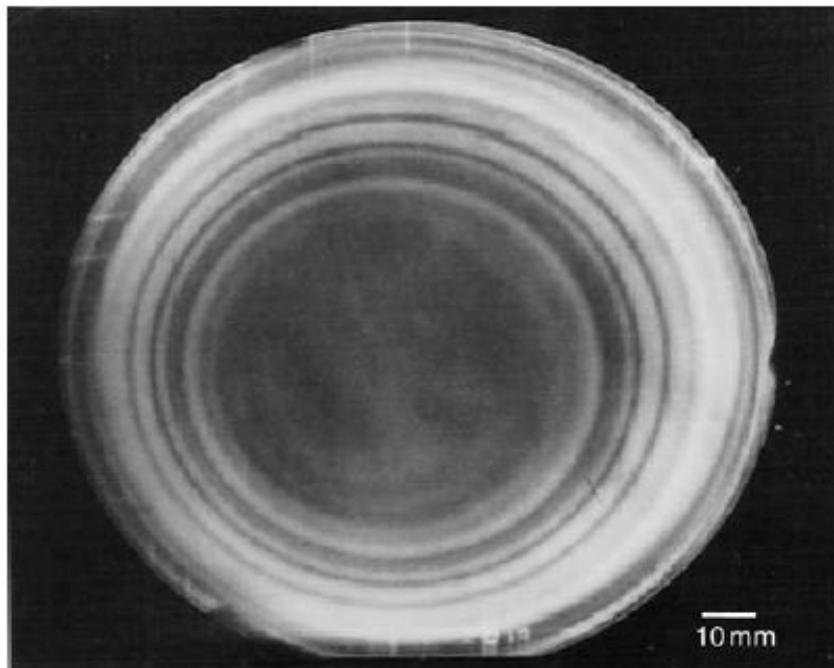
Зависимость концентрации кислорода в кремнии от диаметра слитка



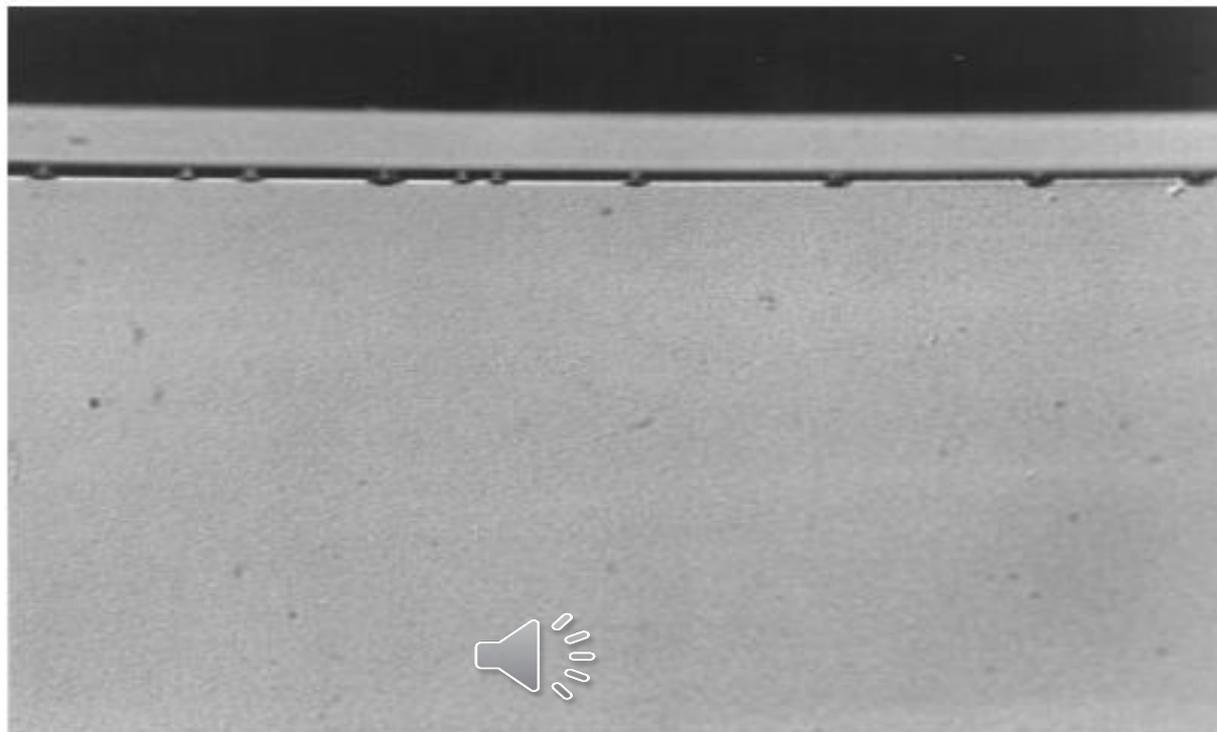
Дефекты кремния, вызванные преципитацией кислорода



Дефекты слитка кремния, вызванные преципитацией кислорода

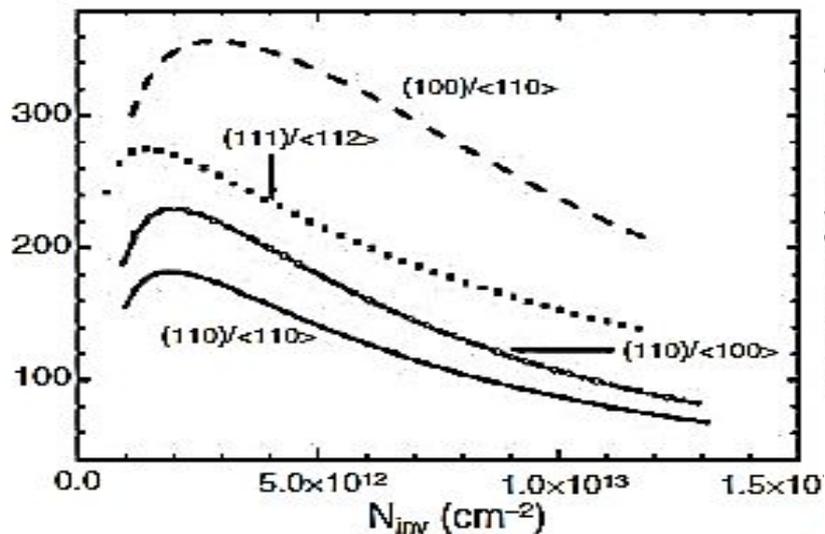


Геттерирование примесей на границе раздела пленка-подложка

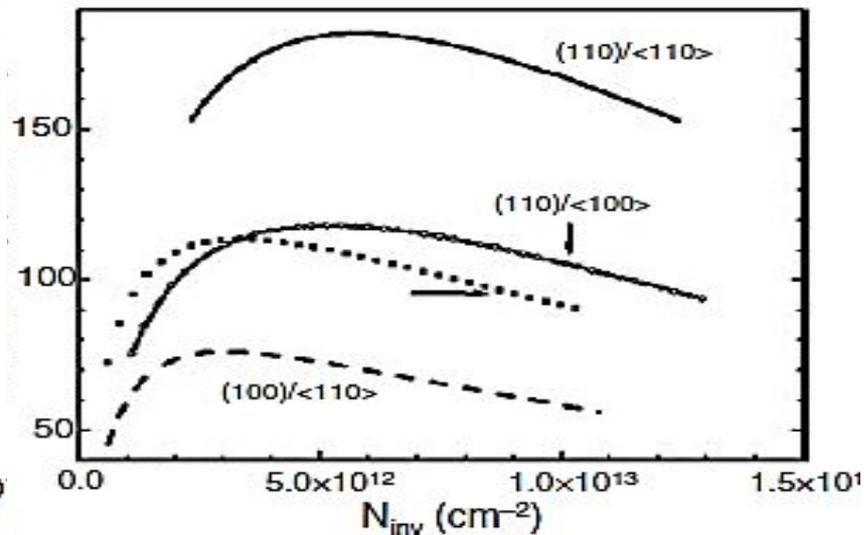


Зависимость подвижности носителей от концентрации носителей и ориентации подложки

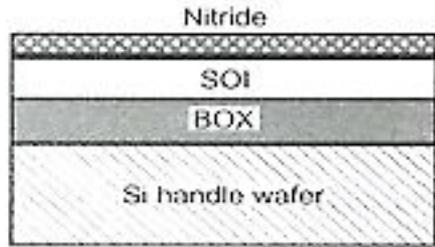
Подвижность электронов,
 cm^2/Vs



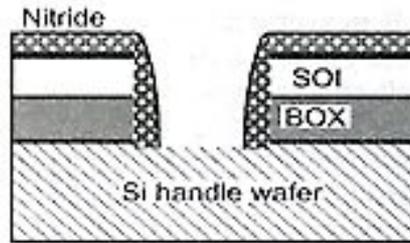
Подвижность дырок,
 cm^2/Vs



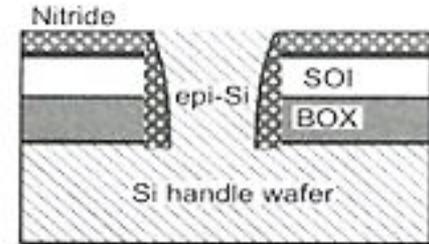
Создание КМОП структуры на гибридно-ориентированной подложке



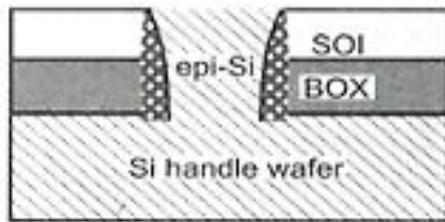
Стадия 1. Окисление рабочего слоя монокремния на КНИ-платине осаднение слоя нитрида кремния (nitride)



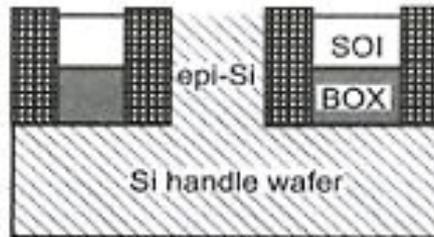
Стадия 2. Реактивное ионное травление структуры до слоя монокремния подложки (Si handle wafer) и осаднение спейсера из нитрида кремния



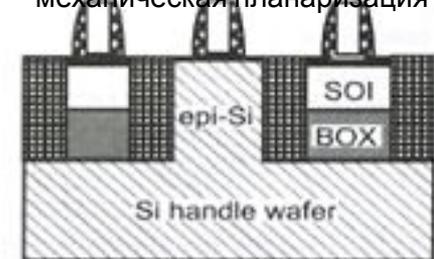
Стадия 3. Эпитаксиальное осаднение монокремния (epi-Si) и его химико-механическая планаризация



Стадия 4. Травление монокремния (epi-Si) и удаление слоев нитрида и оксида кремния

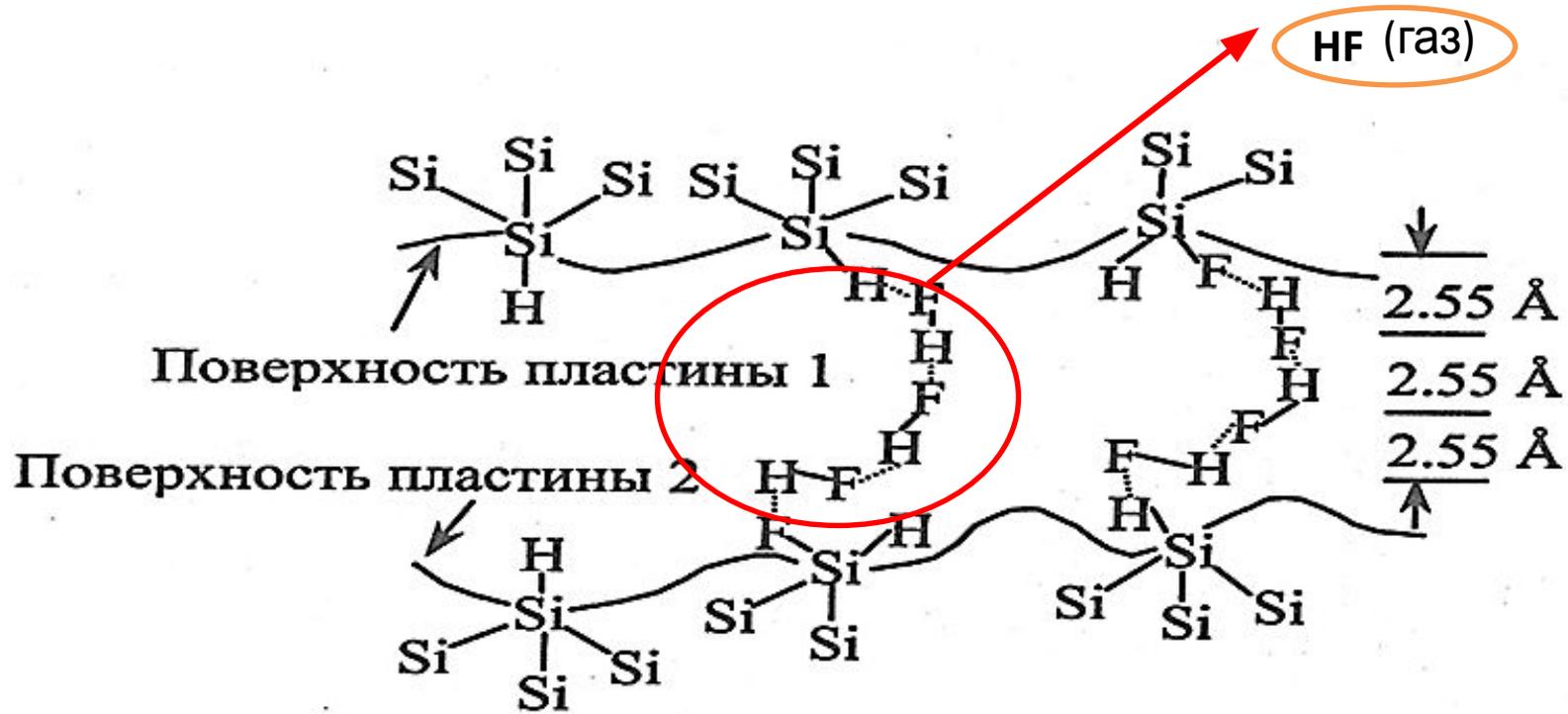


Стадия 5. Формирование щелевой изоляции между КМОП-транзисторами



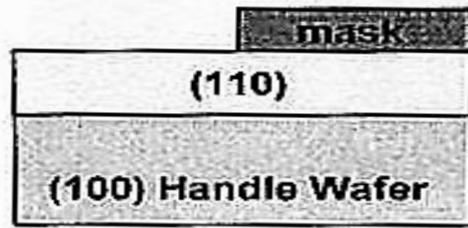
Стадия 6. Формирование транзисторных КМОП-структур

Механизм гидрофобного срачивания

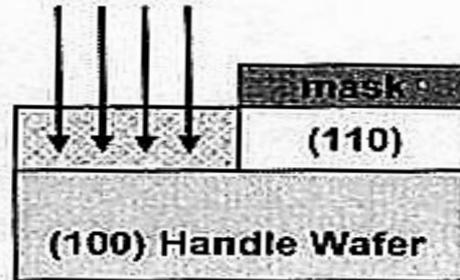


Формирование гибридно-ориентированной подложки методом аморфизации и рекристаллизации кремния

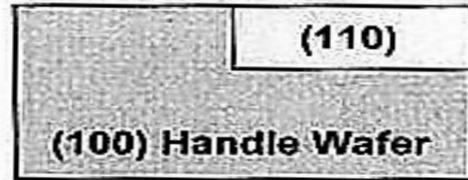
Эпитаксия кремния + осаждение нитрида + фотолитография



(a)



(b)



(c)



(d)

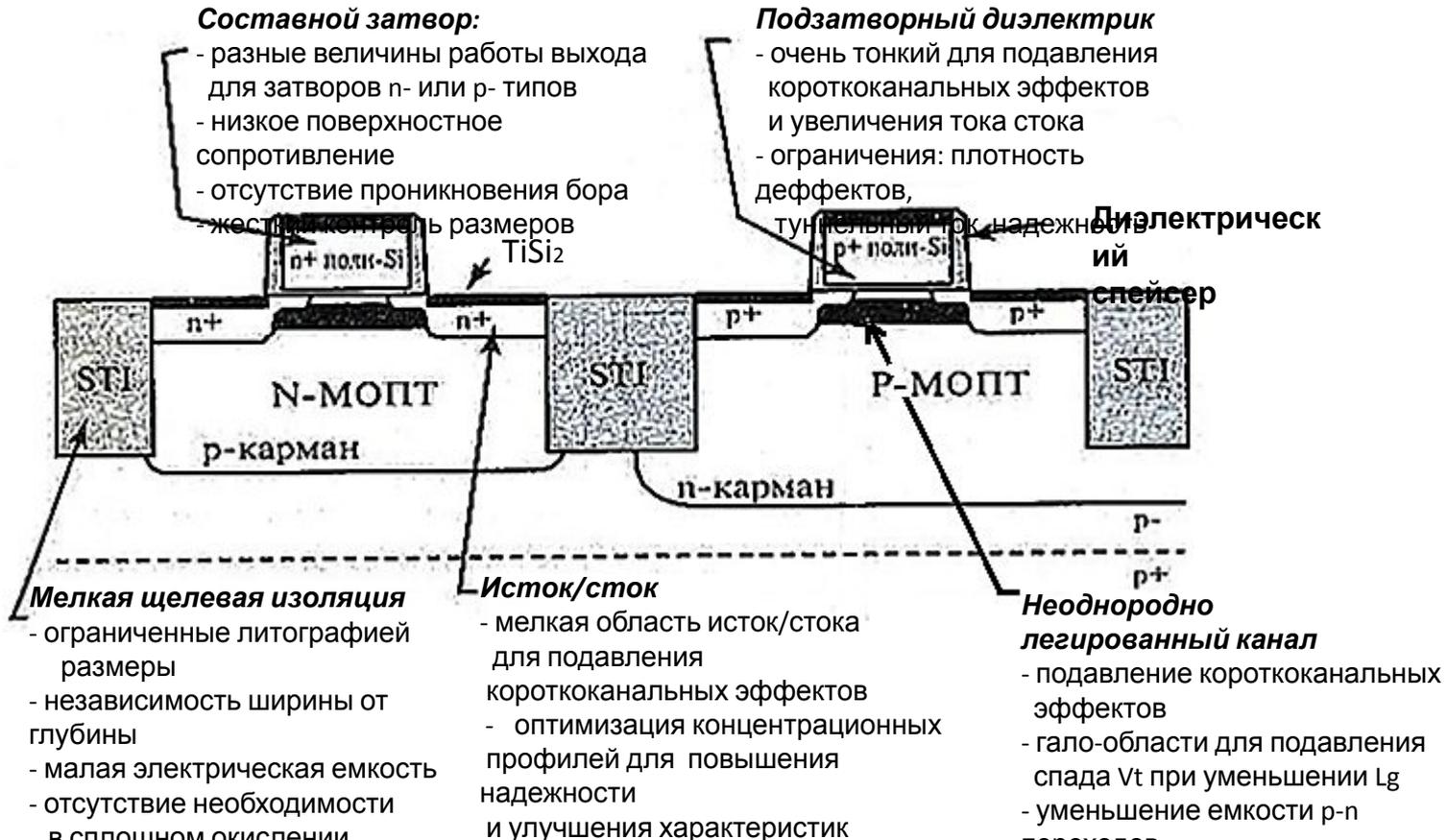
Аморфизация (ионная имплантация кремния)

Термообработка (рекристаллизация кремния) +

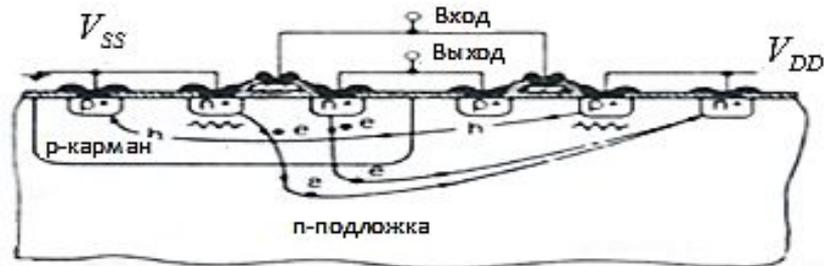
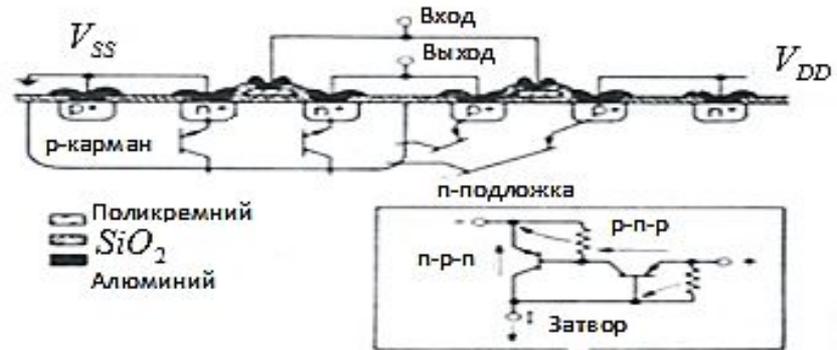
Формирование щелевой изоляции

Конструкция и проблемы формирования наноразмерной КМОП структуры

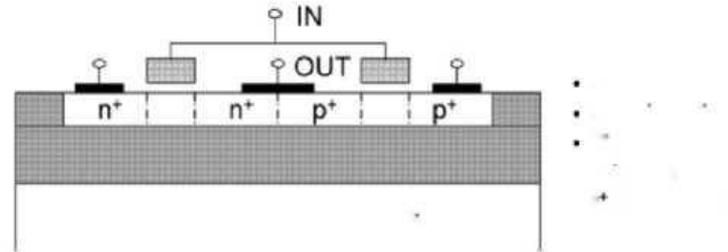
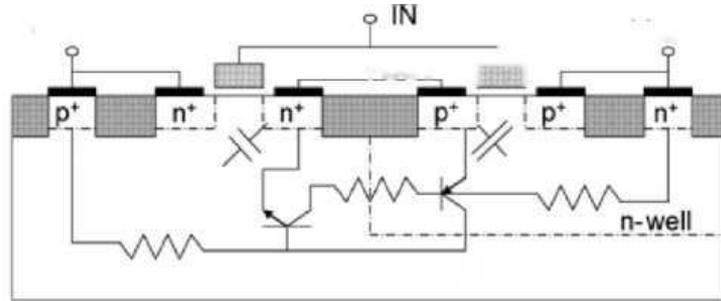
[1]



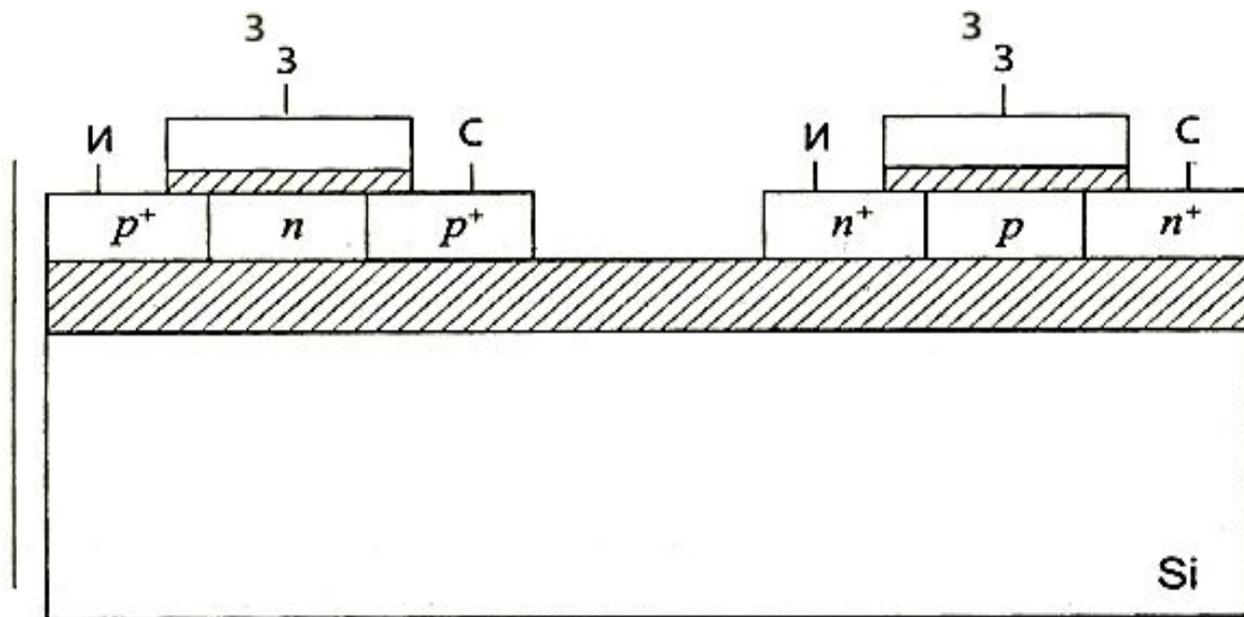
Эффект защелкивания в КМОП структуре



Эффект защелкивания в КМОП структуре

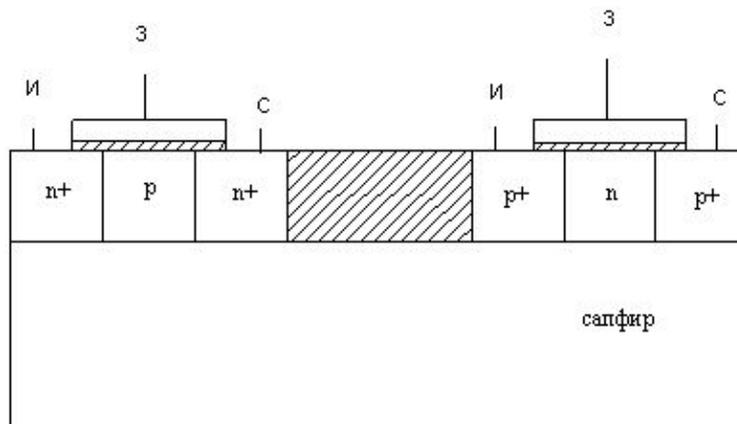


КНИ КМОП структура



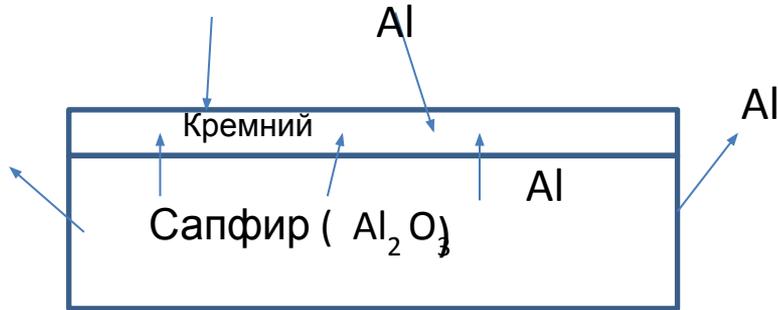
[2]

КМОП-структура на основе КНС



Недостатки КНС - структуры

Подлегирование алюминием!



Улучшение КНС - структуры

Ориентированная имплантация по каналам!

Ионы кремния



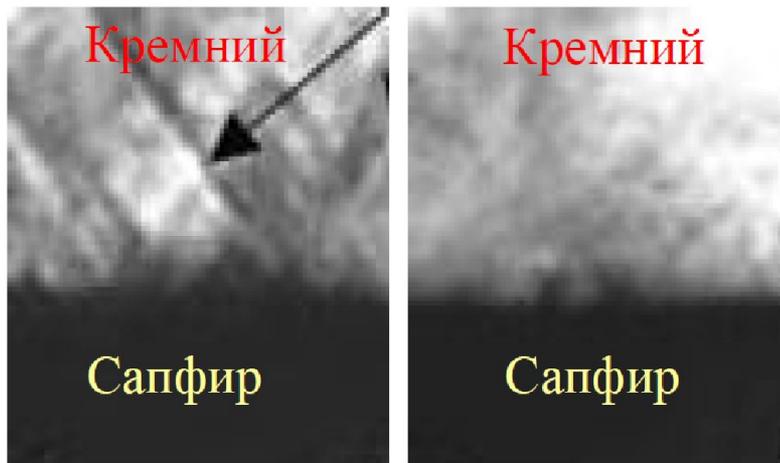
а)
Гетероэпитаксия
рекристаллизация

б)
Аморфизация
Аморфизация лишь
дефектного слоя!

в)
ТО (1100⁰С) -
и окисление кремния

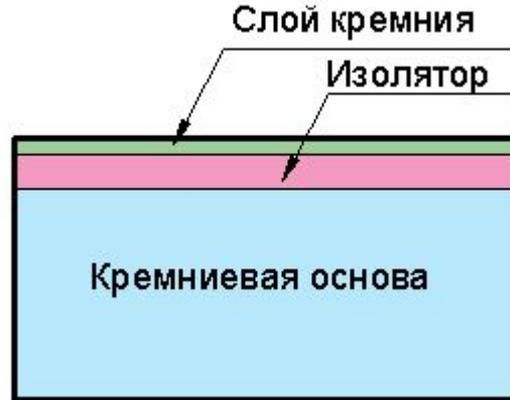
РЭМ - фото границы раздела КНС - структуры до и после рекристаллизации

Дефекты



До рекристаллизации После рекоисталлизации

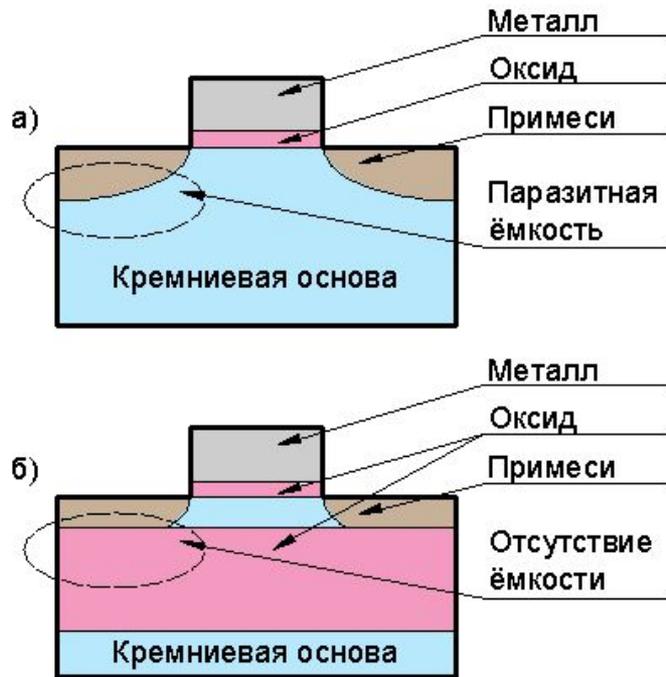
КНИ -структура



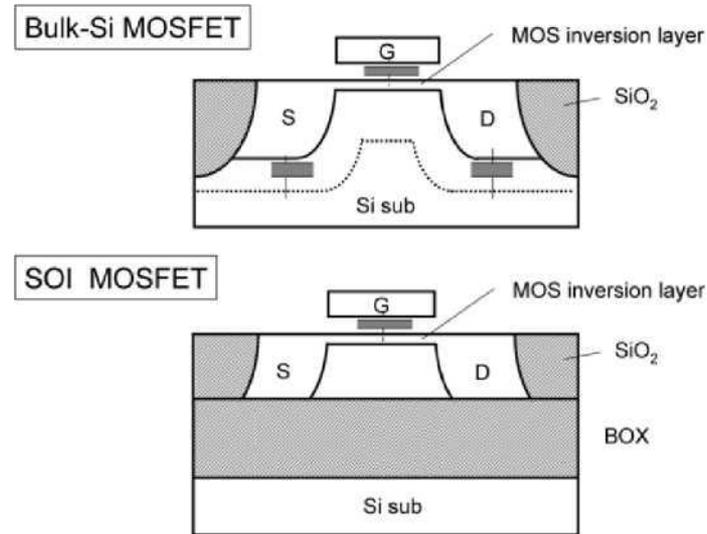
Преимущества КНИ КМОП структуры

- Резкое уменьшение ёмкостей стока и истока на подложку
- Уменьшенный эффект подложки при последовательном соединении приборов
- Отсутствие «защелки»
- Отличная изоляция приборов, малая площадь
- Повышенная радиационная стойкость
- Малые токи утечки торцевых рп-переходов
- Уменьшенные короткоканальные эффекты
- Работа при повышенных температурах

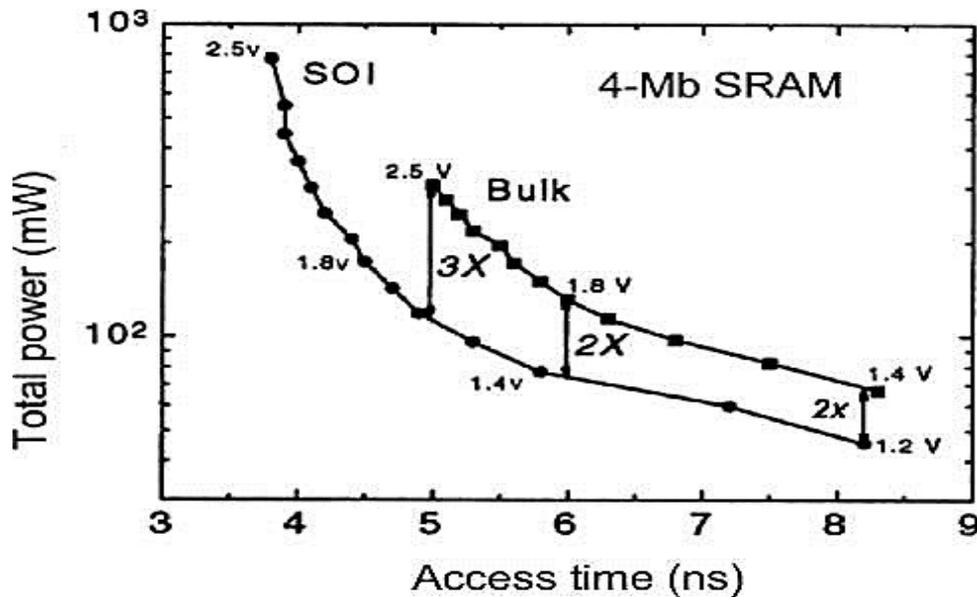
Уменьшение емкости сток/исток - подложка



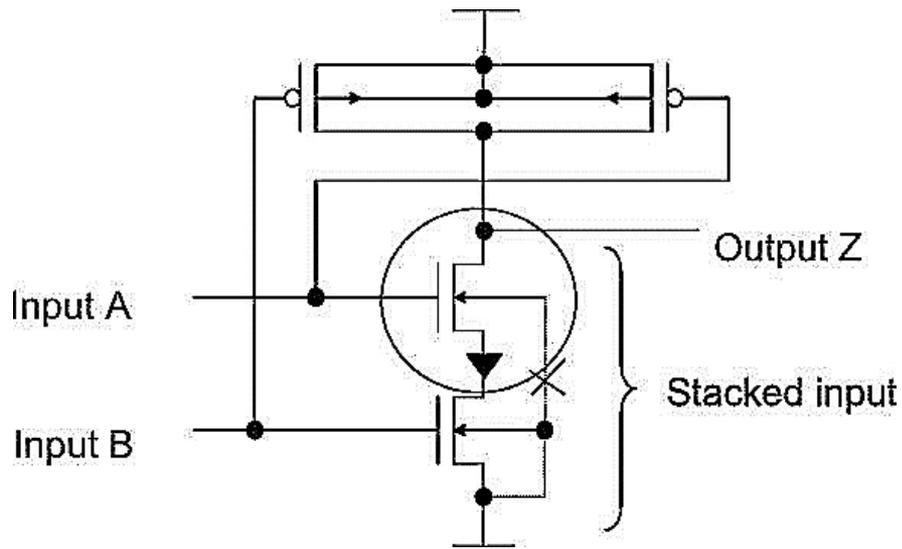
Уменьшение емкости сток/исток - подложка



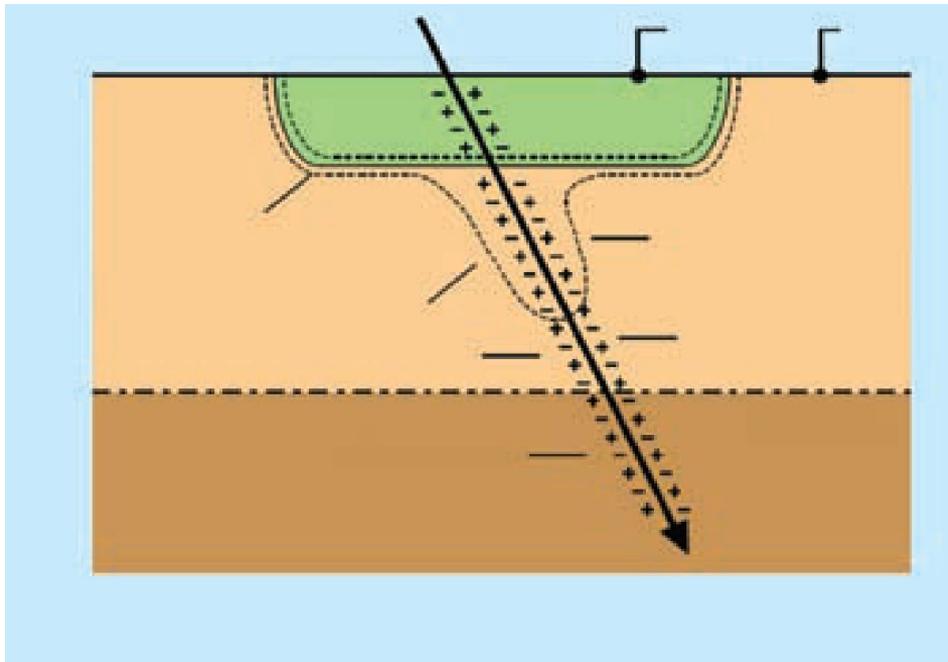
Увеличение быстродействия и уменьшение потребляемой мощности ИС ЗУ в случае КНИ структуры



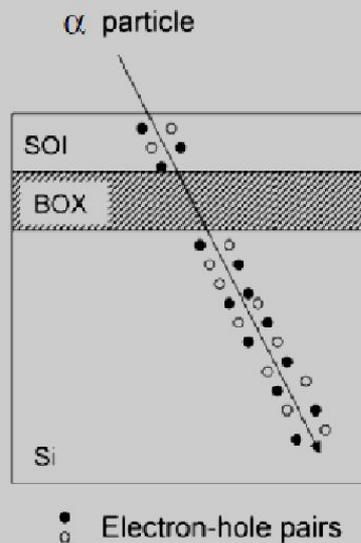
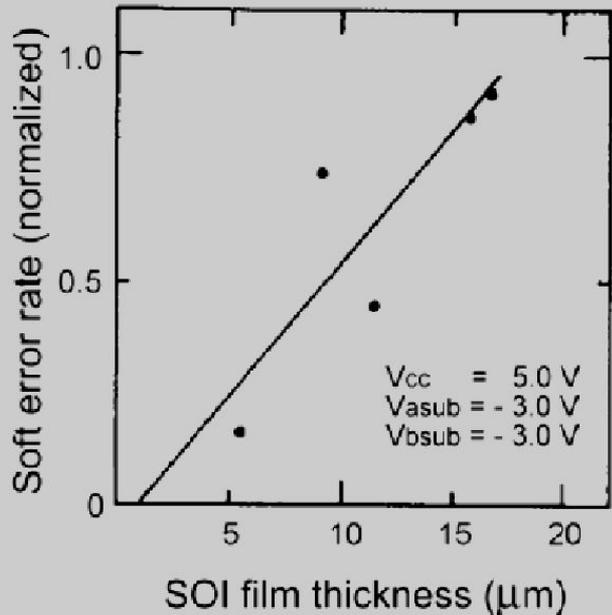
Увеличение порогового напряжения МОП-транзистора при последовательном соединении для объёмных КМОП ИС.



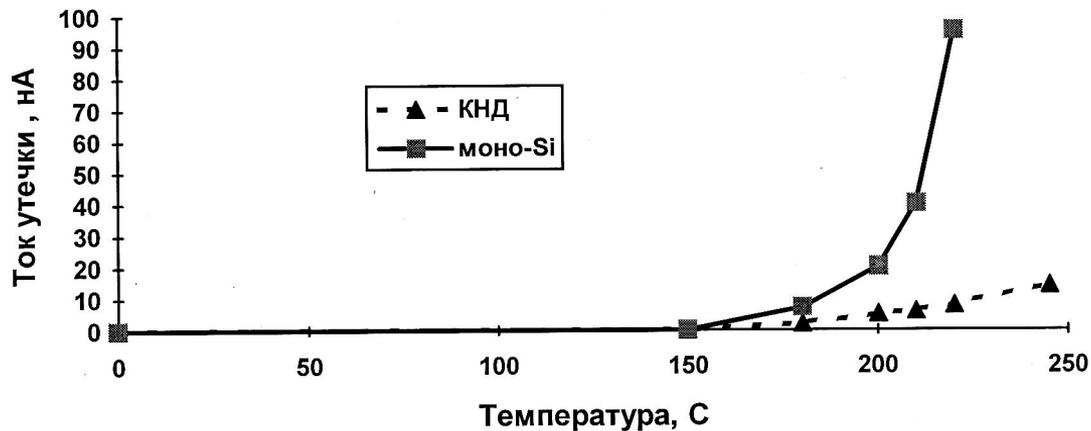
Образование электрон-дырочных пар при облучении полупроводниковой структуры



Повышение радиационной стойкости КНИ КМОП ИС



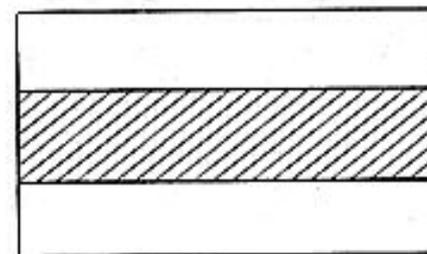
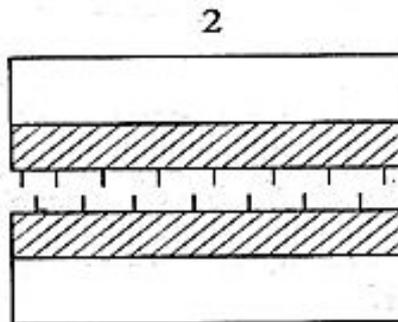
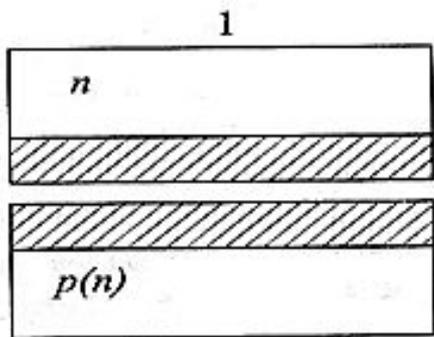
Температурная зависимость тока утечки КНИ и объемного МОП-транзисторов



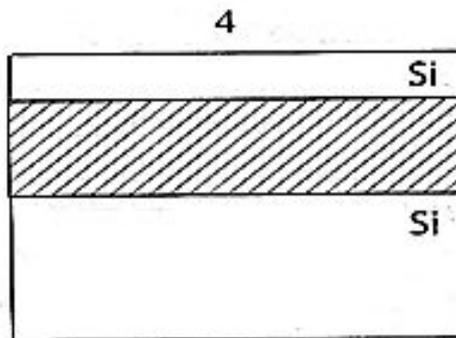
Сращивание окисленных кремниевых пластин

Исходные структуры

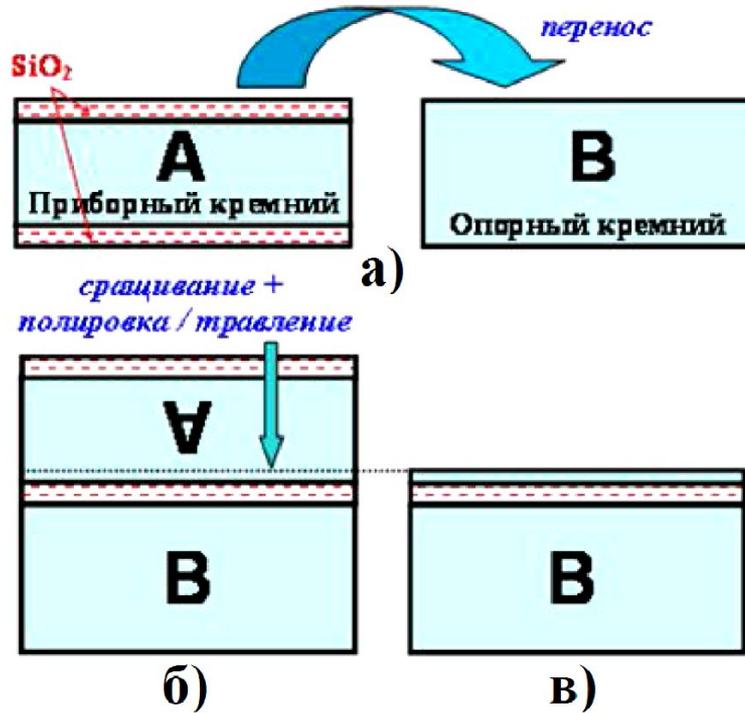
Термокомпрессия
(бондинг)



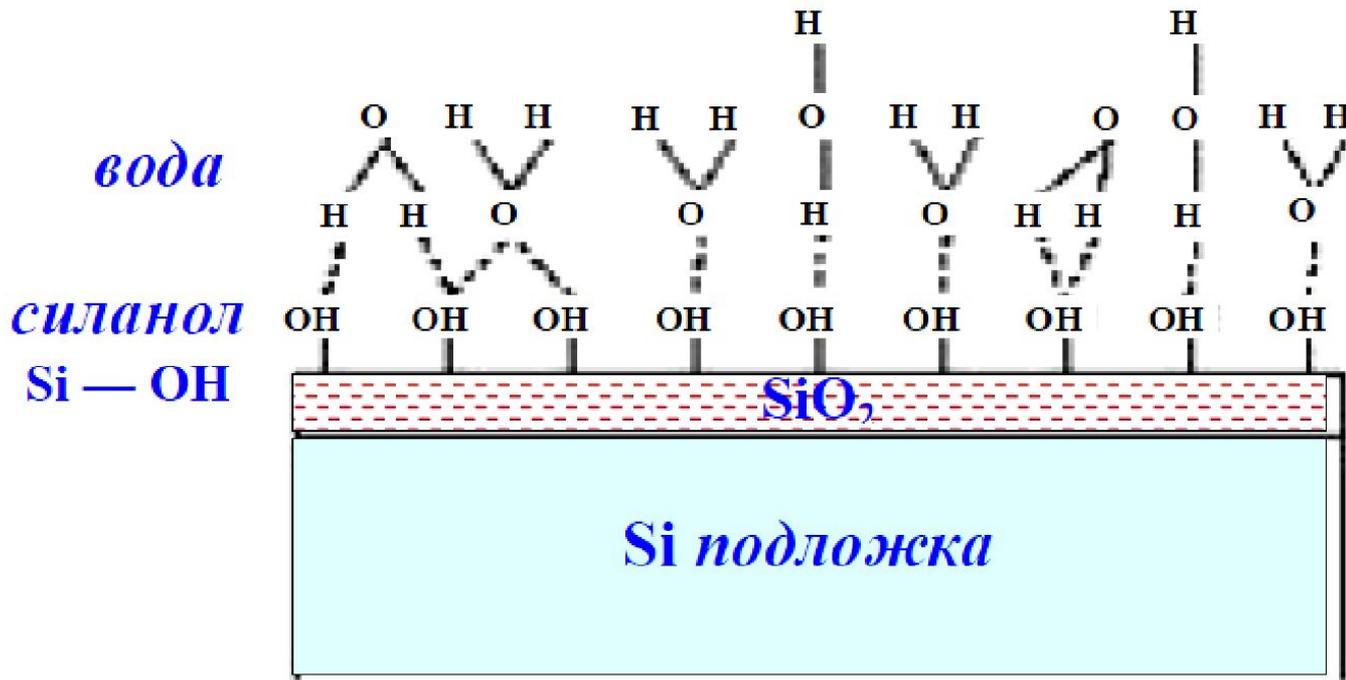
Утонение
рабочего слоя



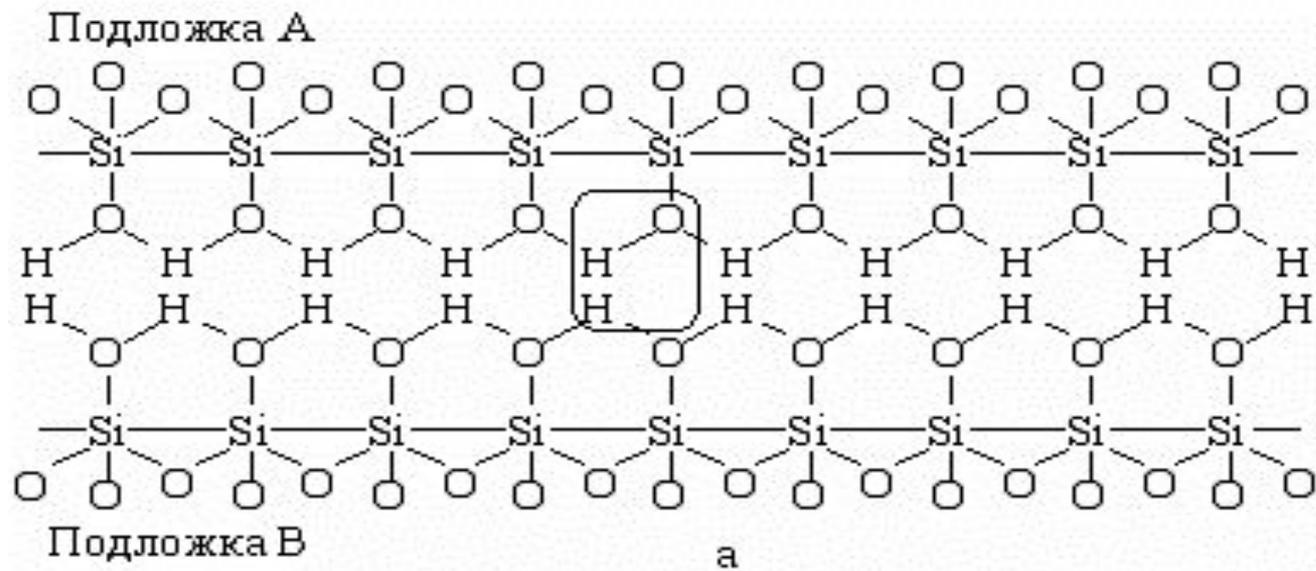
Бондинг-метод



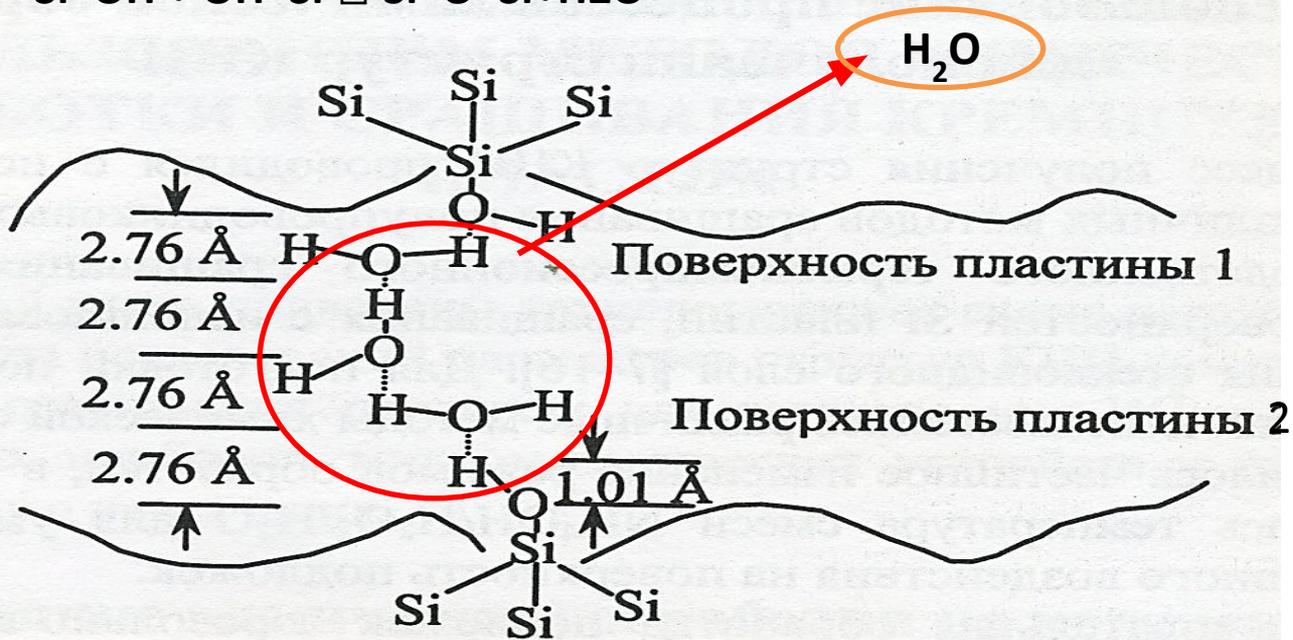
Поверхность окисленной пластины кремния



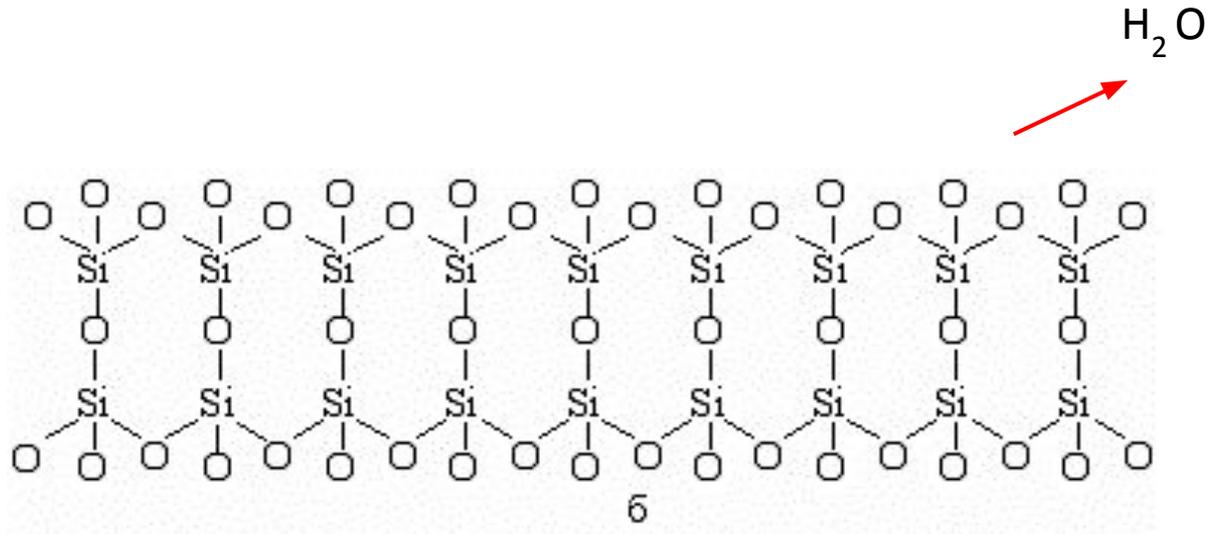
Механизм гидрофильного бондинга



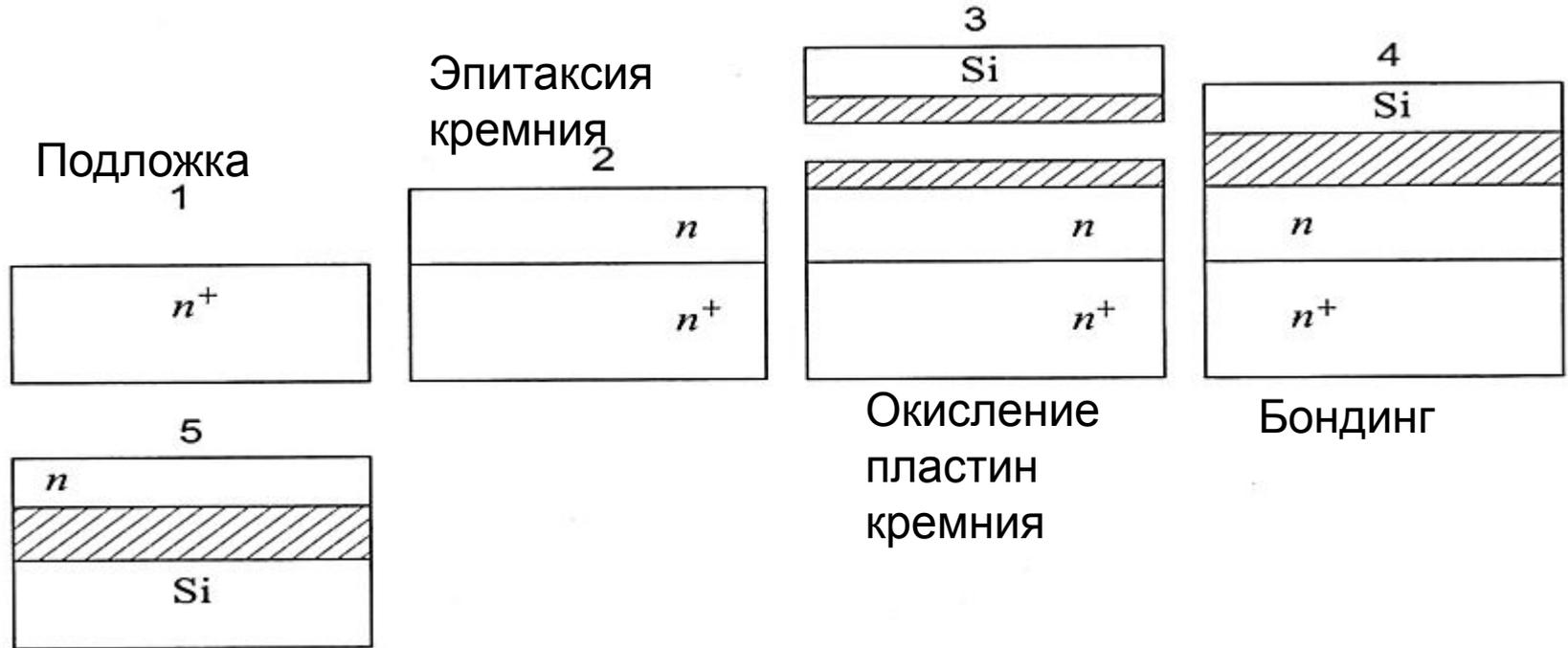
Механизм гидрофильного сращивания



Механизм гидрофильного сращивания

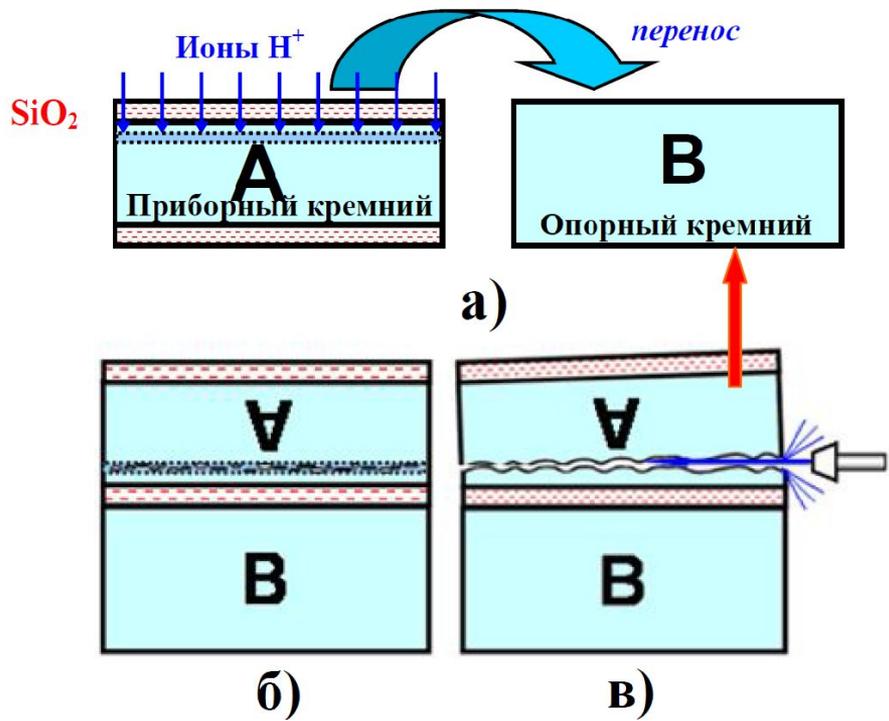


Метод сращивания со стоп-слоем



$$V_{\text{тр}} n^+ = 10 V_{\text{тр}} n$$

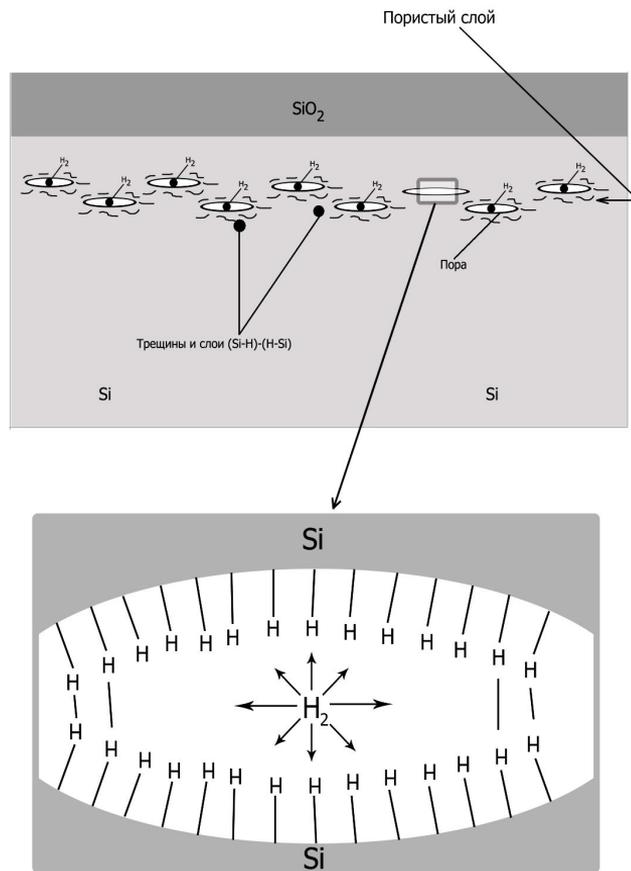
Smart-cut - метод сращивания пластин кремния



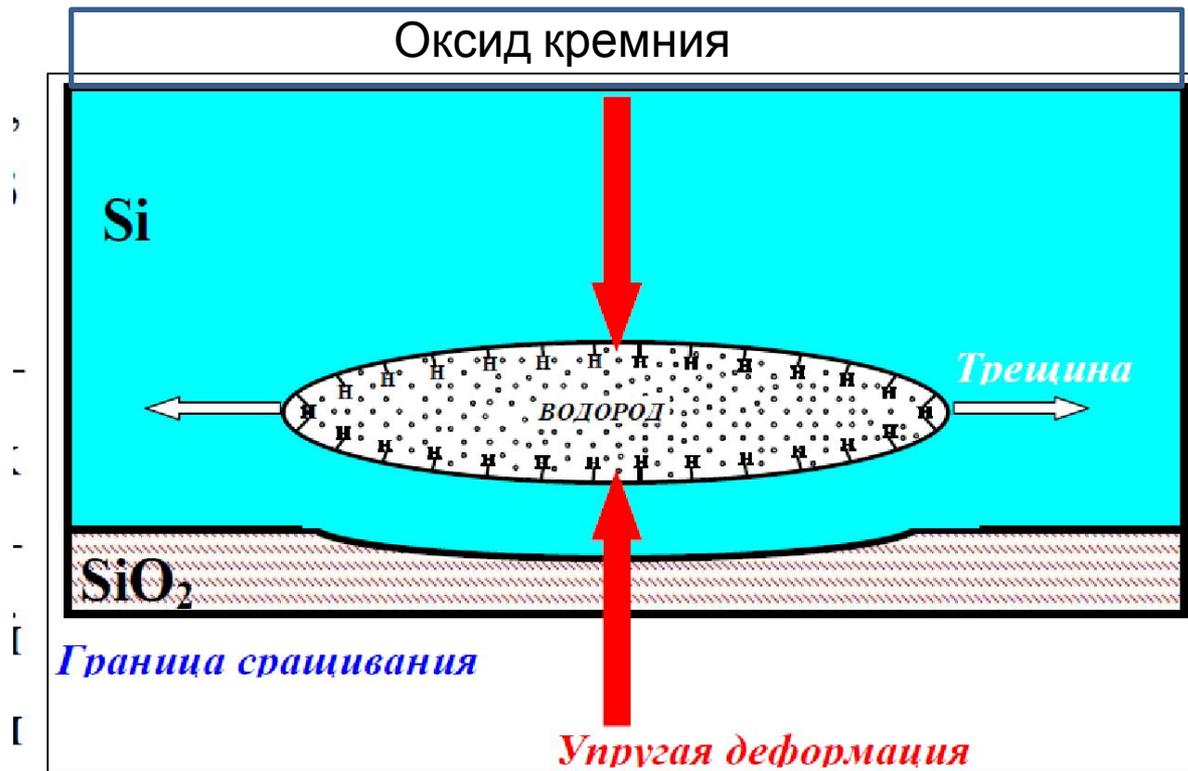
Smart-cut - метод сращивания пластин кремния



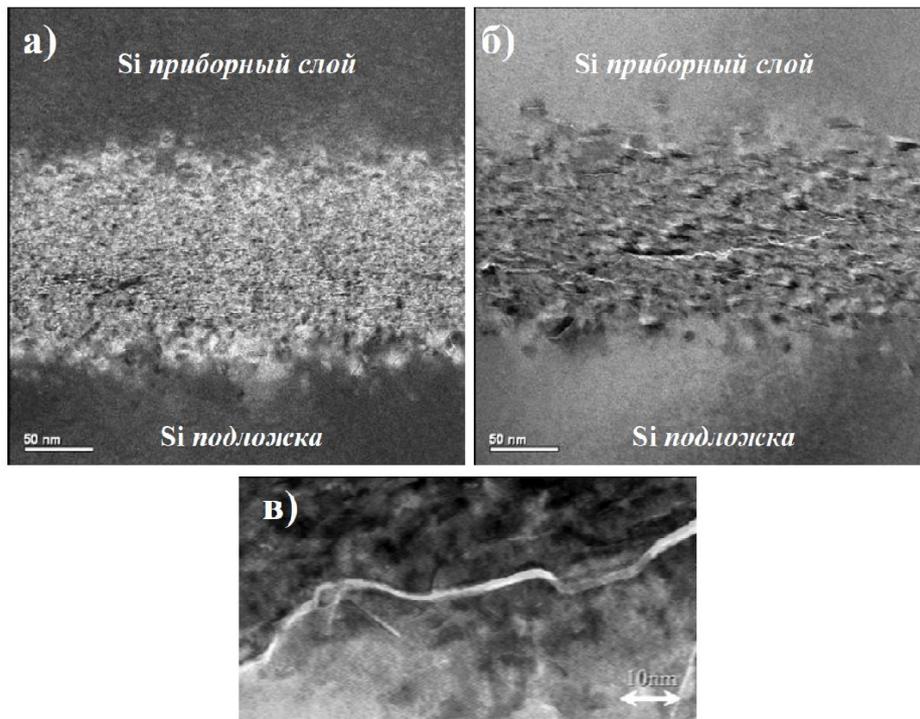
Образование пузырьков водорода



Механизм газового расщепления

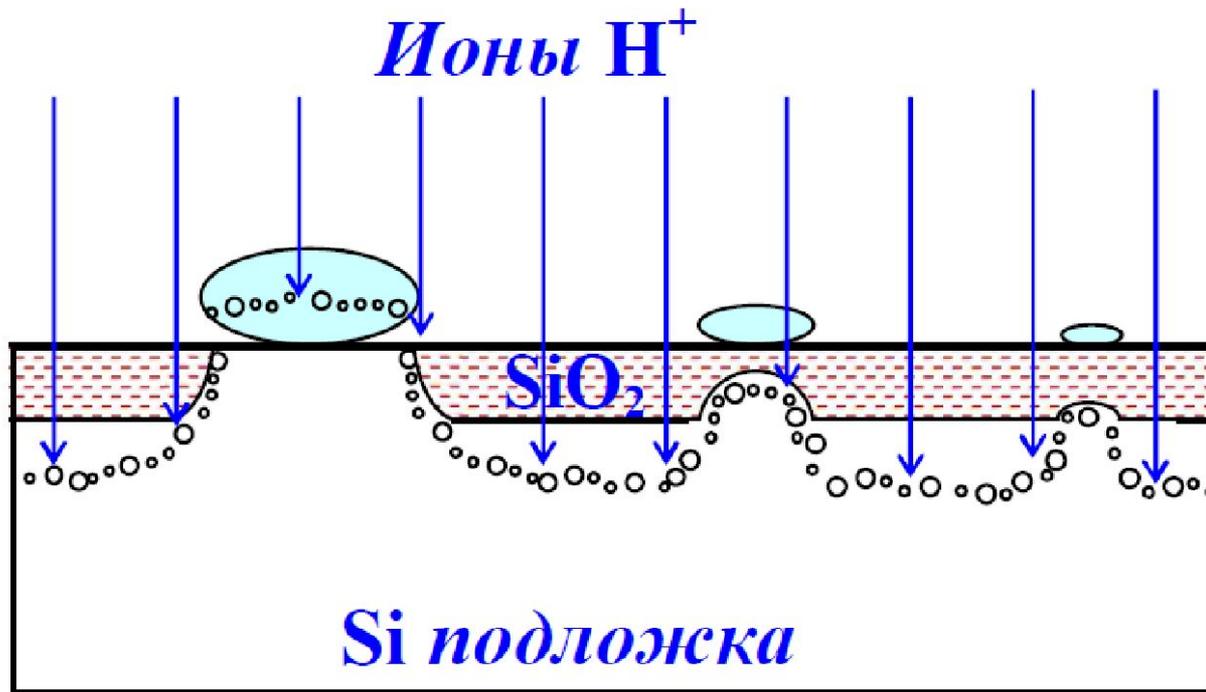


ПЭМ изображение скрытого дефектного слоя

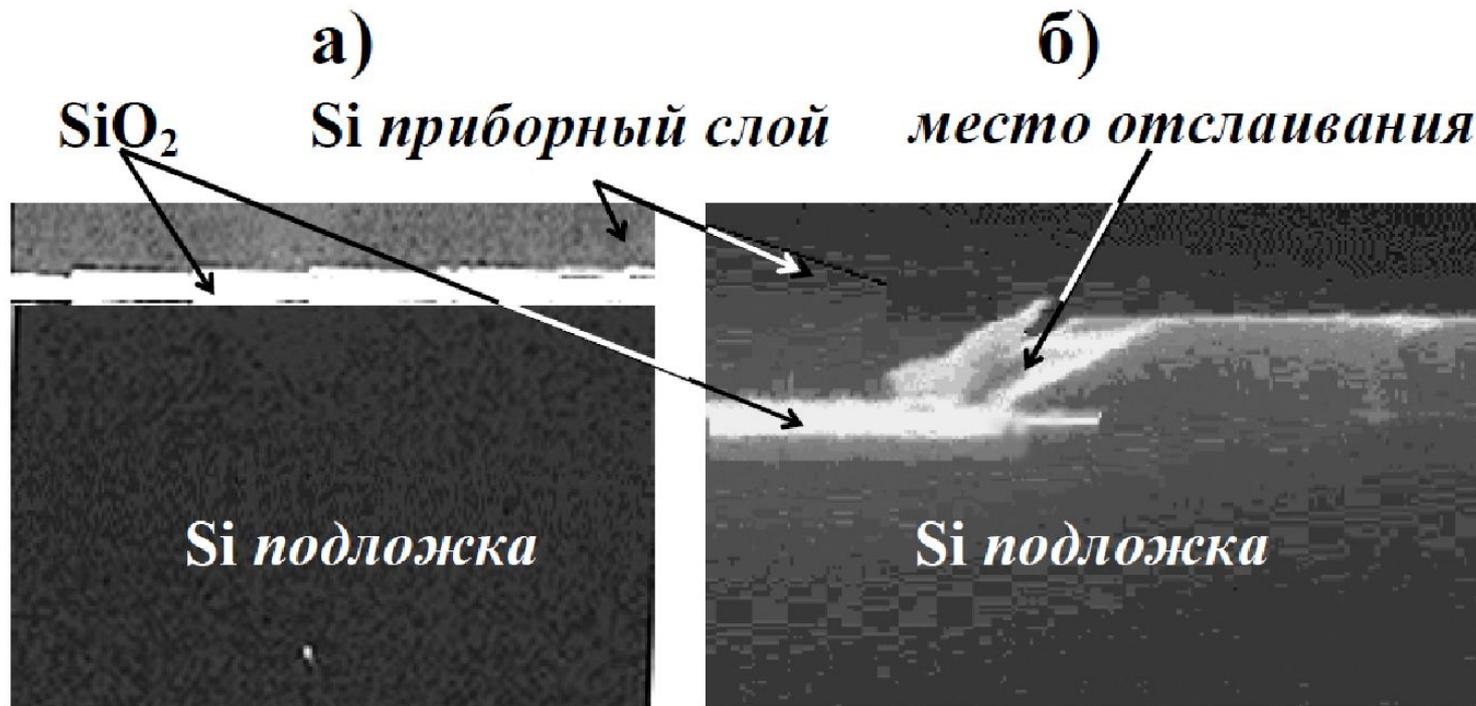


(а) после облучения, (б); после предварительного отжига при 350 °С ;
(в) увеличенное изображение микротрещины.

Влияние пыли на ионную имплантацию водорода

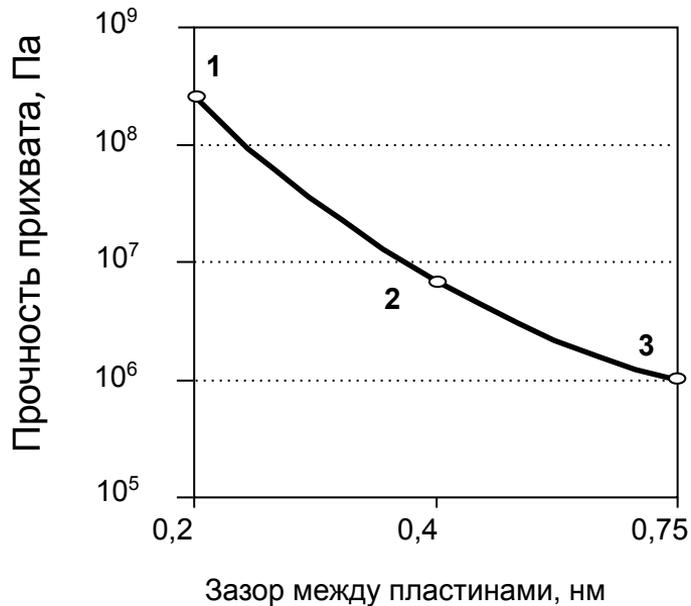


ПЭМ –изображение КНИ – структуры перед расщеплением



Заглубленный слой окисла (а) и отшелушивание части его в результате блистеринга (б).

Зависимость прочности срачивания от зазора между пластинами при бондинге



1 – предельная прочность кремния на растяжение

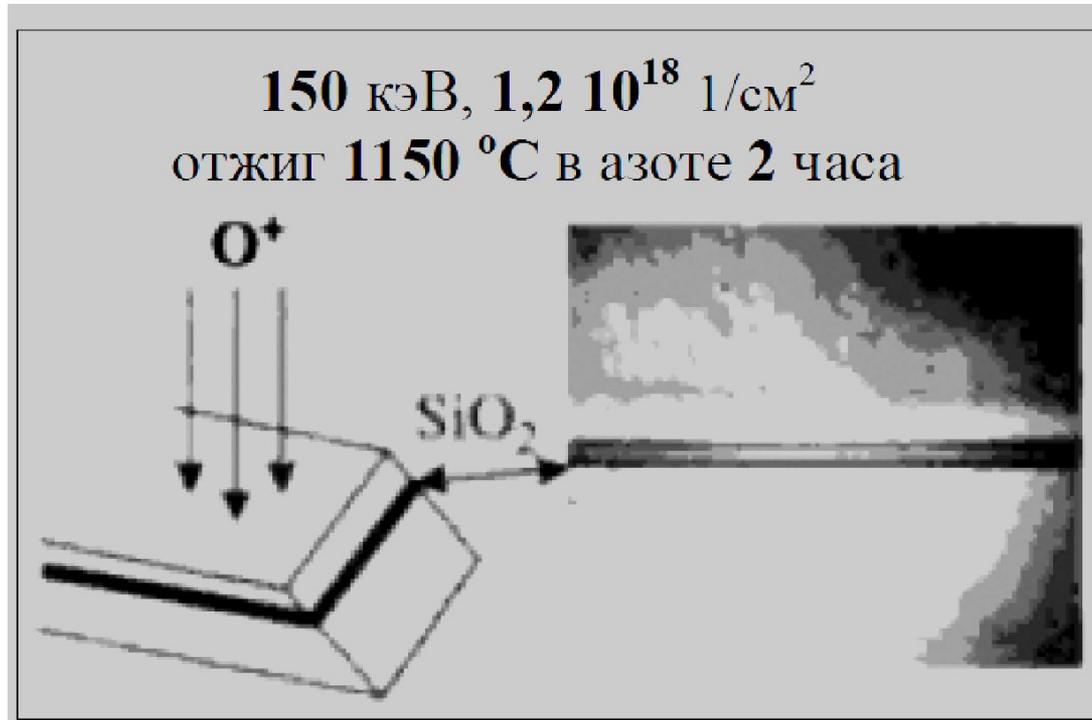
2 – шероховатость поверхностей $\sim 2 \text{ \AA}$ и гидроксильные группы занимают менее 10% поверхностей

3 – гидроксильные группы покрывают около 100% поверхностей

Формирование КНИ структуры методом имплантации кислорода (SIMOX)



Микрофотография косого шлифа первой SIMOX структуры (1976 год)



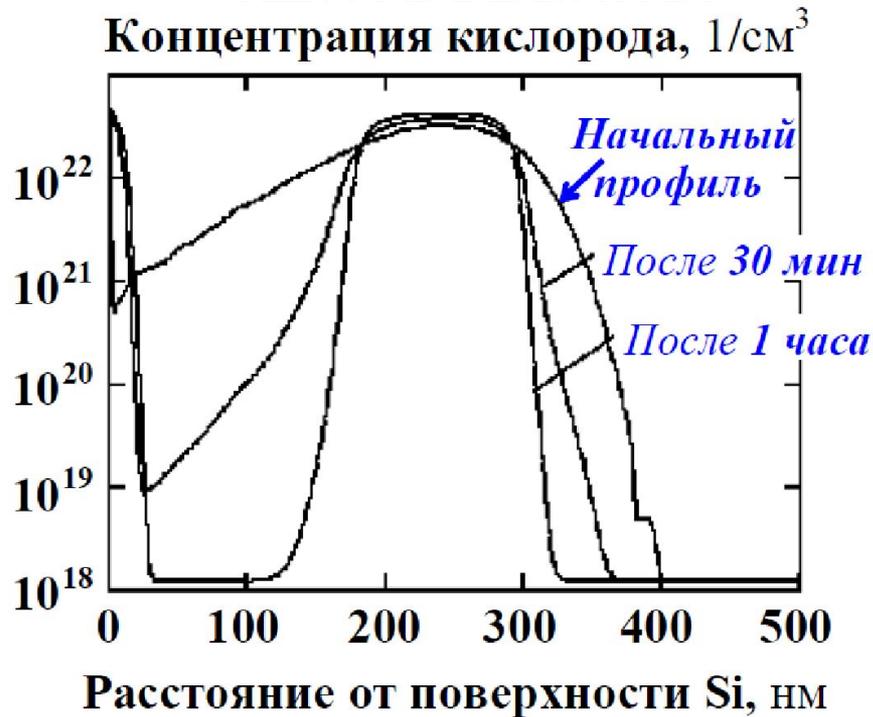
Ток ионного пучка - 100 мкА, для облучения кремниевой пластины диаметром 100 мм дозой $1,2 \cdot 10^{18}$ O⁺/см² потребовалось 65 часов.

Факторы, влияющие на параметры КНИ-структуры

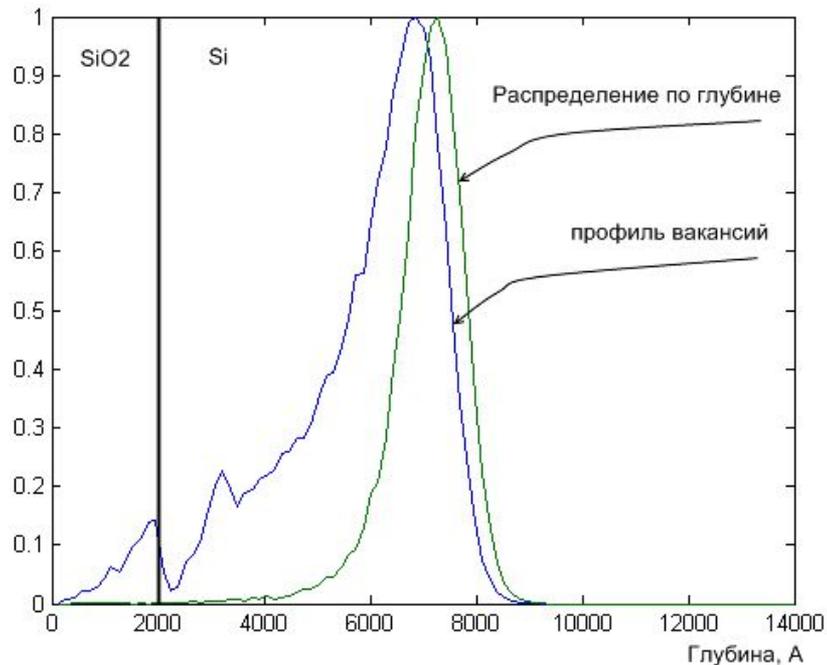
- Доза ионов более 10^{18} см⁻²
- Температура при облучении более 400⁰С
- Плотность ионного тока разогрев, диффузия
- Энергия ионов глубина слоя изолятора
- Постимплантационный отжиг 1300⁰С, часы
- Слой искусственных центров преципитации В, С, Н, N



Изменение распределения кислорода в процессе термообработки после имплантации (шнурование)

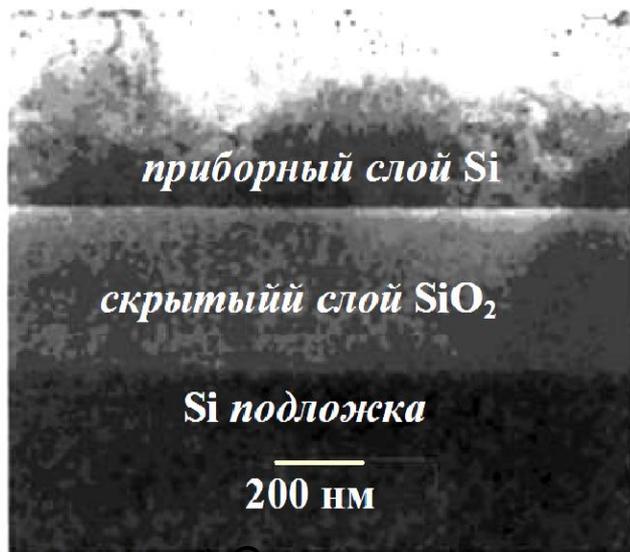


Влияние искусственных центров преципитации на распределение кислорода – «шнурование»

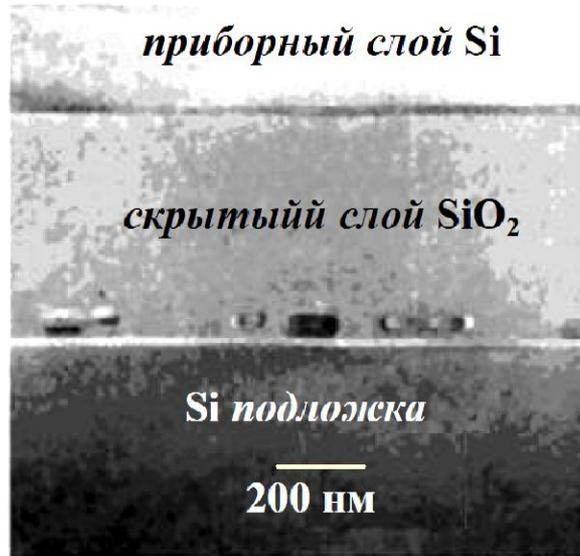


Поперечное сечение структур КНИ SIMOX, полученное с помощью ПЭМ

а)



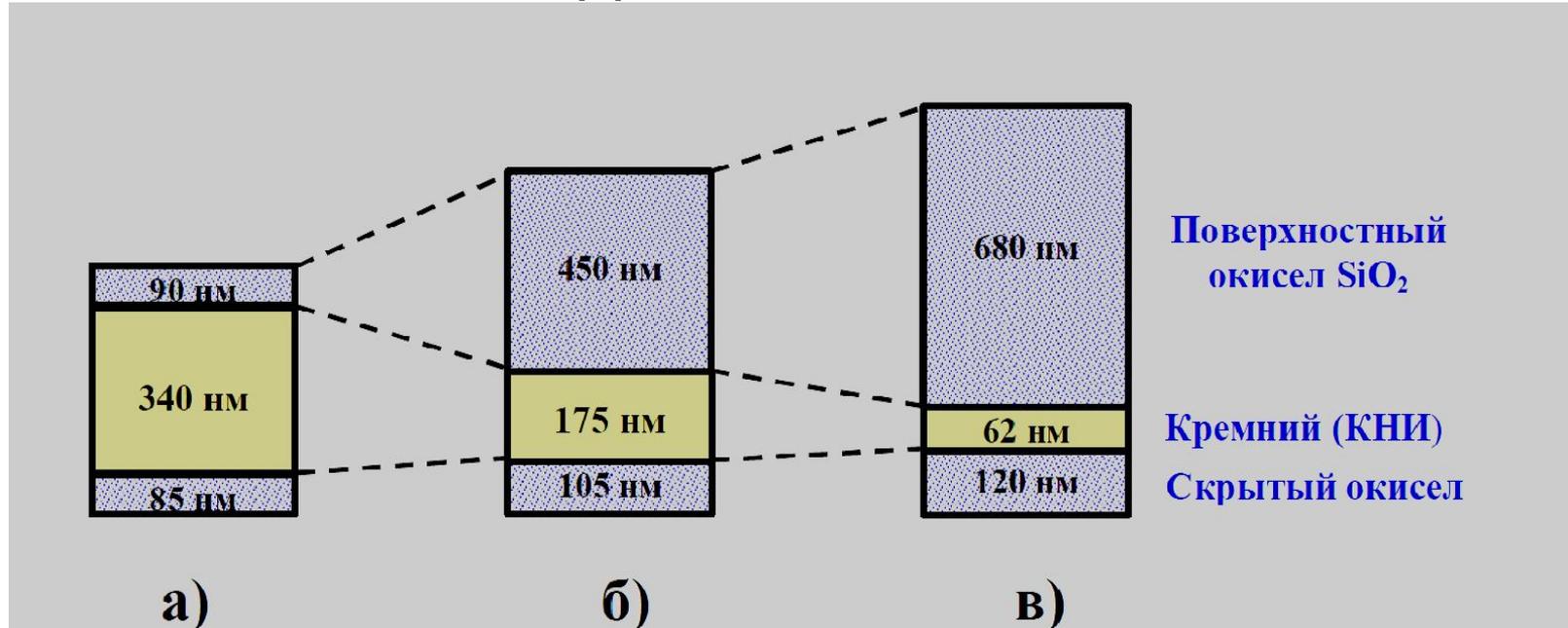
б)



а) Сразу же после имплантации;

б) после высокотемпературного отжига.

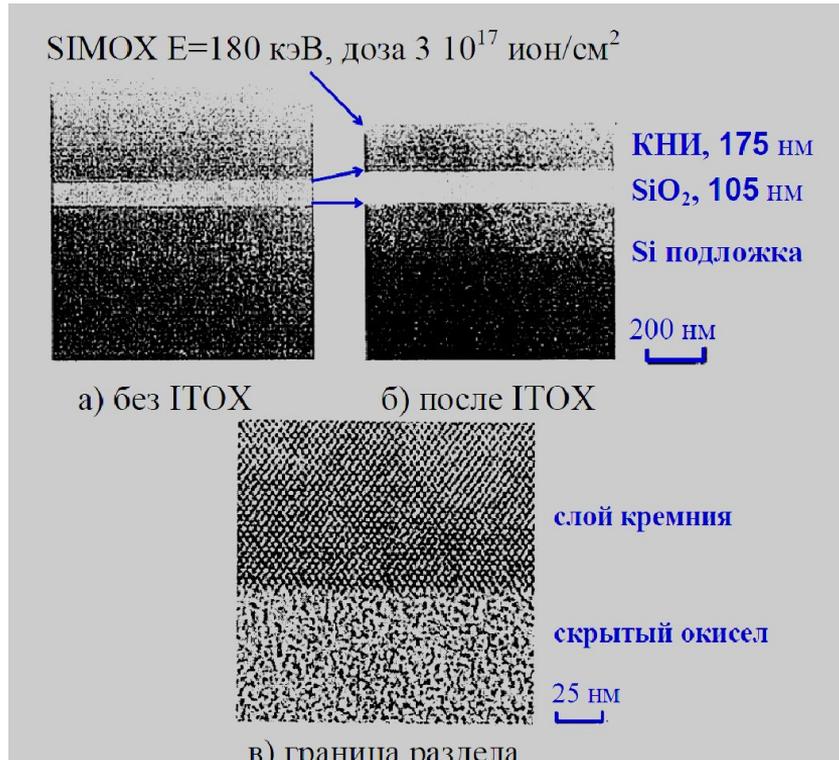
Структура ITOX–SIMOX подложки на различных стадиях технологии



а) ИИ кислорода: 180 кэВ, $3-4,5 \cdot 10^{17}$ ион/см², 550–650 °С

б) ТО (> 1300 °С) азот. 3 час, в)) ТО (> 1300 °С) кислород, 5 час.

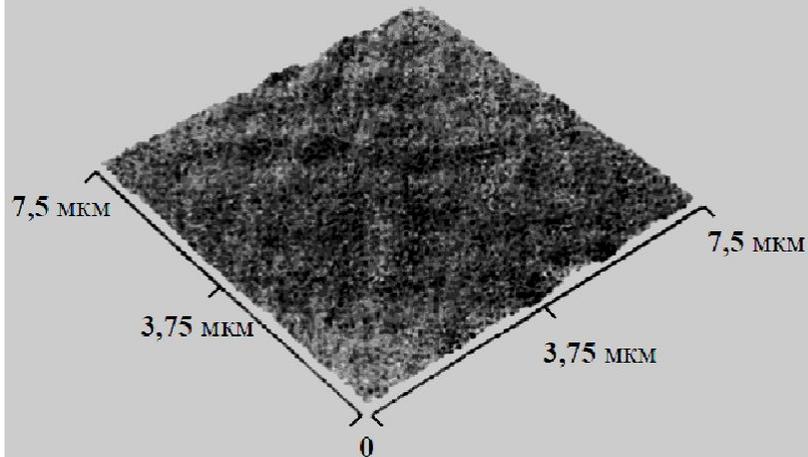
ПЭМ–изображения поперечного сечения КНИ ITOX–SIMOX - структуры



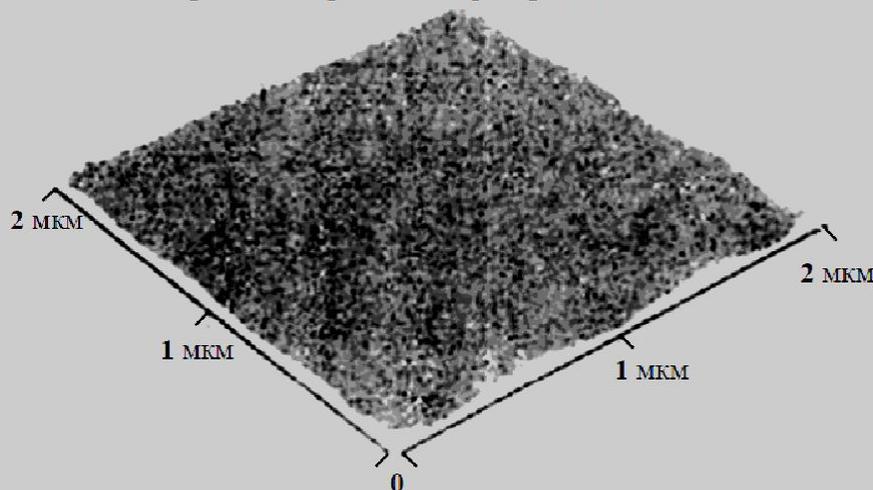
- а) сразу после имплантации;
- б) после отжига при 1350°C ;
- в) увеличенное изображение границы раздела КНИ/SiO₂

АСМ изображения поверхности кремния и границы раздела КНИ структур ITOX–SIMOX.

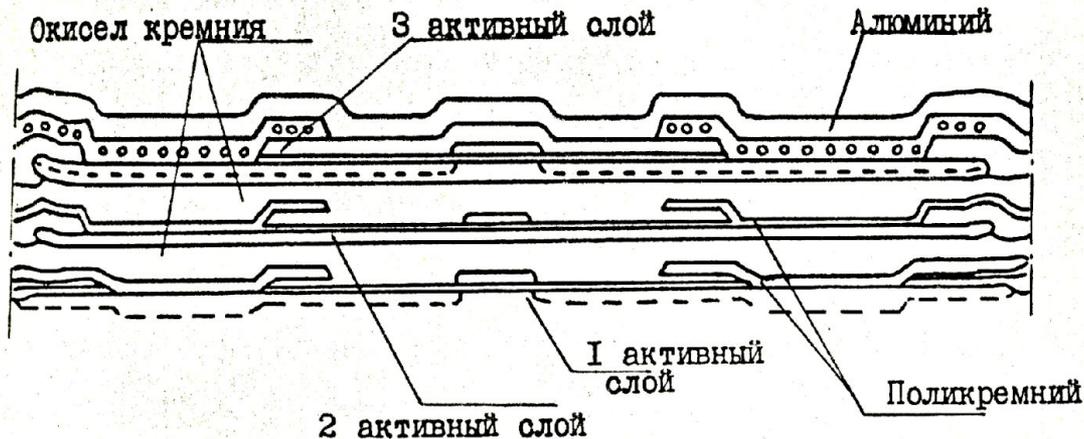
а) ПОВЕРХНОСТЬ КРЕМНИЯ
среднеквадратичный разброс 0,25 нм



б) ГРАНИЦА РАЗДЕЛА Si/SiO₂
среднеквадратичный разброс 0,1 нм

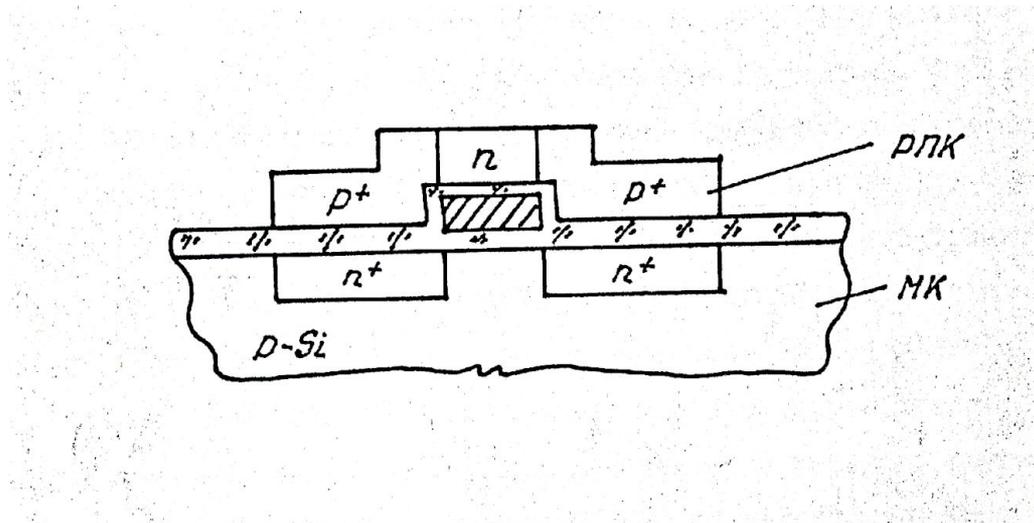


Трехмерная интегральная схема на основе КНИ - структуры

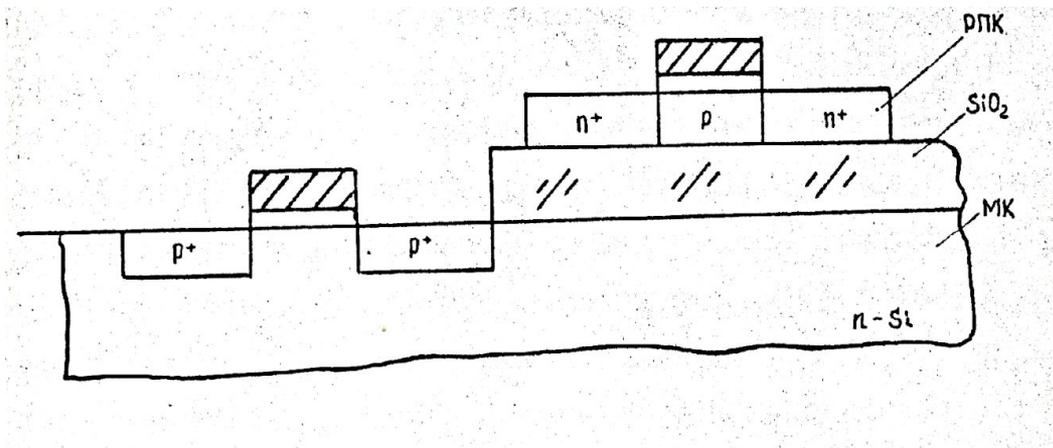


Бондинг и SIMOX не применимы из-за высокотемпературных обработок!

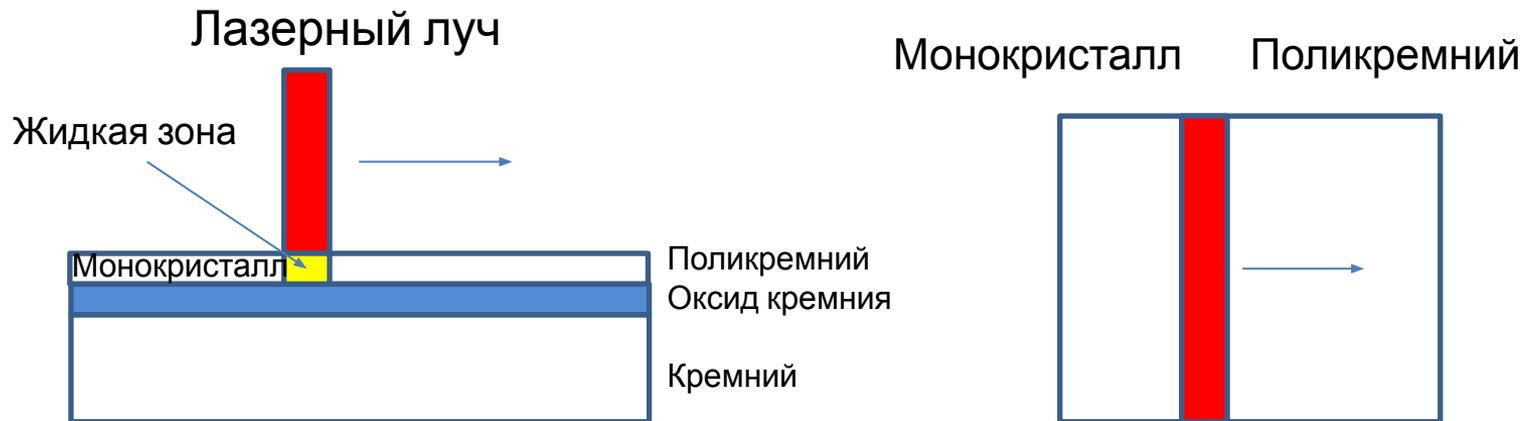
Трехмерная КМОП –структура этажерочного типа



Трехмерная КМОП – структура мезонинного типа



ZMR - процесс



Скорость движения луча - 40 см/с Температура подложки – 400 °С

Проблемы ZMR

- Кристаллографические дефекты вследствие взаимодействия лазерного луча с кремнием
- Изменение оптических свойств кремния в процессе расплавления
- Необходимость высокой степени поглощения лазерного излучения поликремнием
- Возникновение крупноблочной структуры пленки кремния из-за множественности зародышевых центров кристаллизации

Требования к источнику лазерного излучения

Мощность излучения - более 20 Вт/см²

Длина волны излучения - менее 0,8 мкм

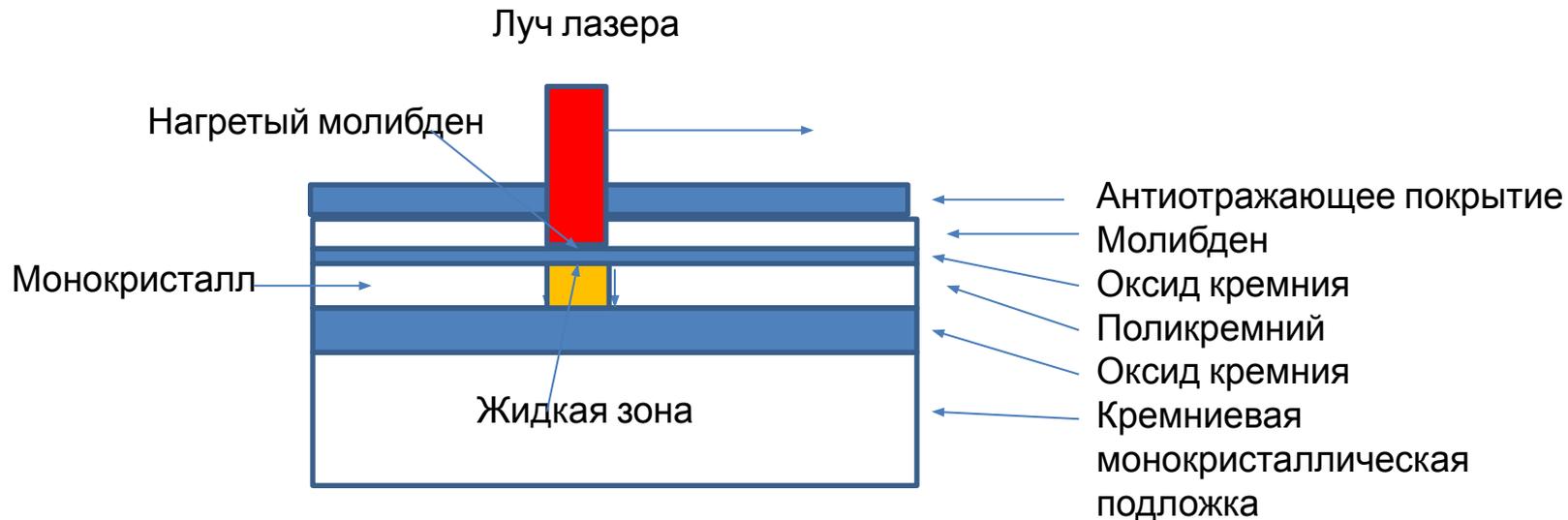
Непрерывное действие

Высокая стабильность величины мощности излучения при обработке пленки поликремния

Промышленные лазеры непрерывного действия:

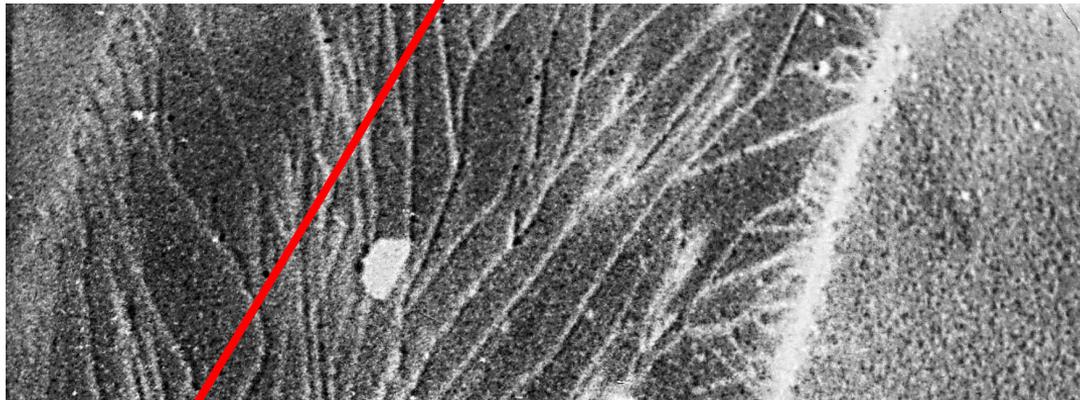
1. Аргоновый газовый лазер (0,5 мкм, 250 Вт, **невысокая стабильность**)
2. Твердотельный на основе иттрий-алюминиевого граната (**1,06 мкм**, высокая стабильность , до 250 Вт)

Косвенный лазерный нагрев (КЛН)



Структура пленки кремния после рекристаллизации

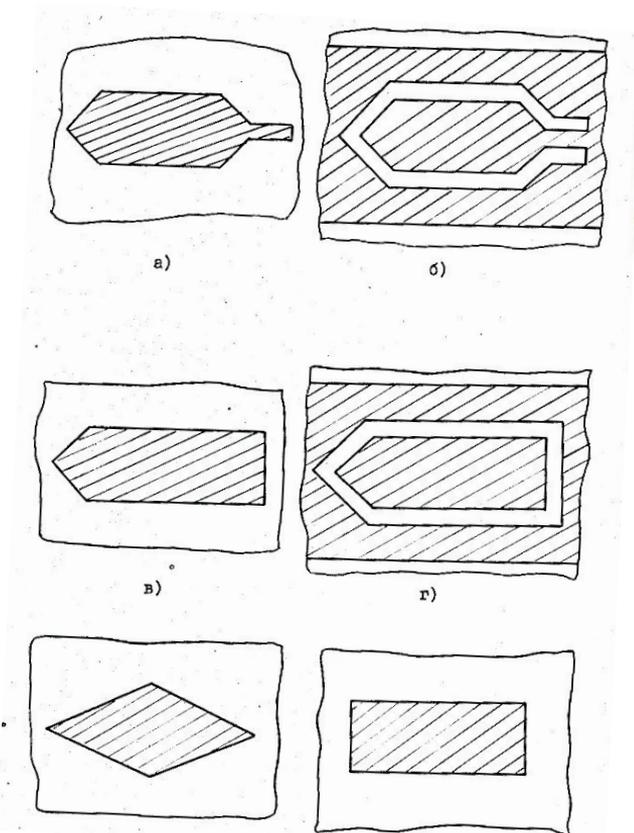
Направление движения луча лазера



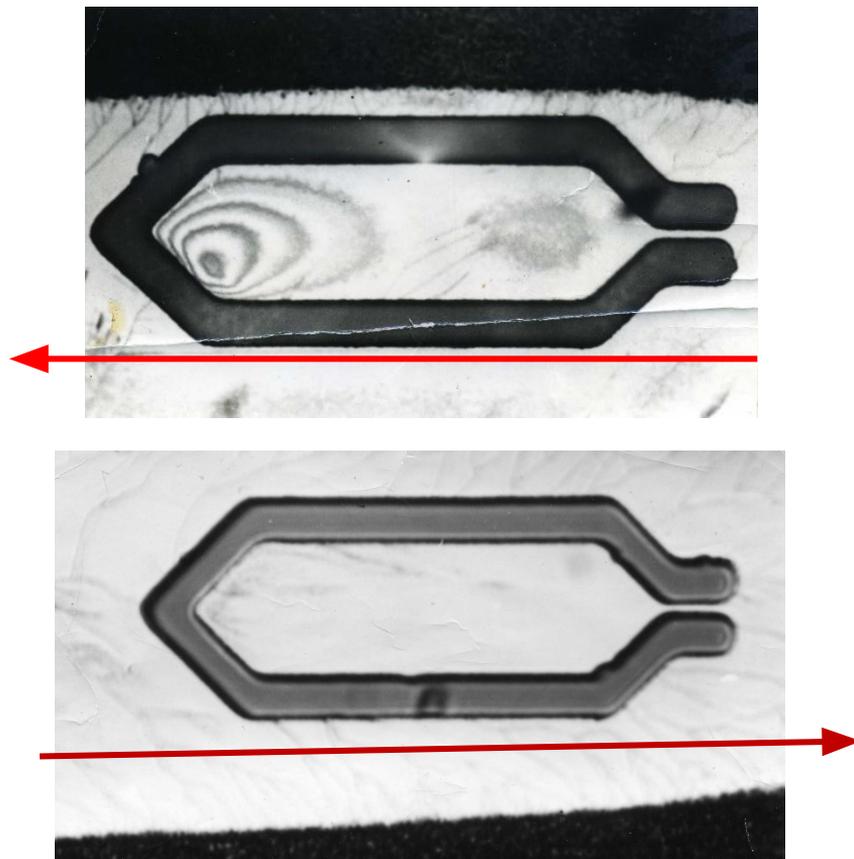
Крупноблочная структура

Поликремний

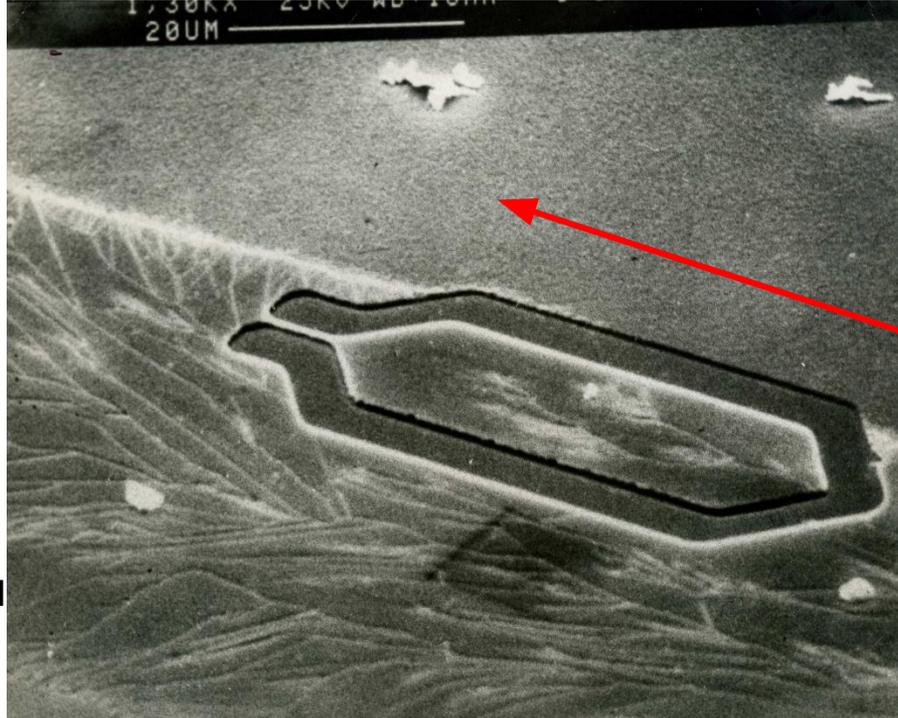
Конфигурации островков из поликремния



Влияние направления движения лазера на равномерность толщины пленки кремния



Результат ZMR обработки пленки поликремния



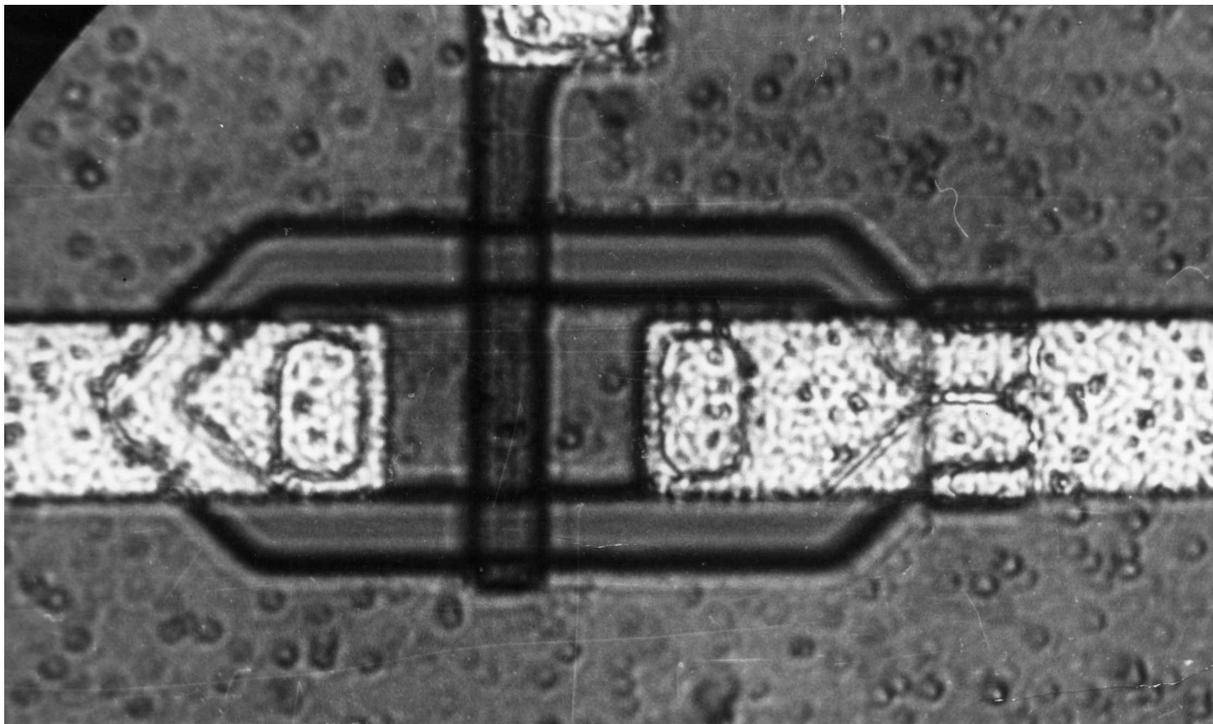
Поликремний

Направление
движения луча
лазера

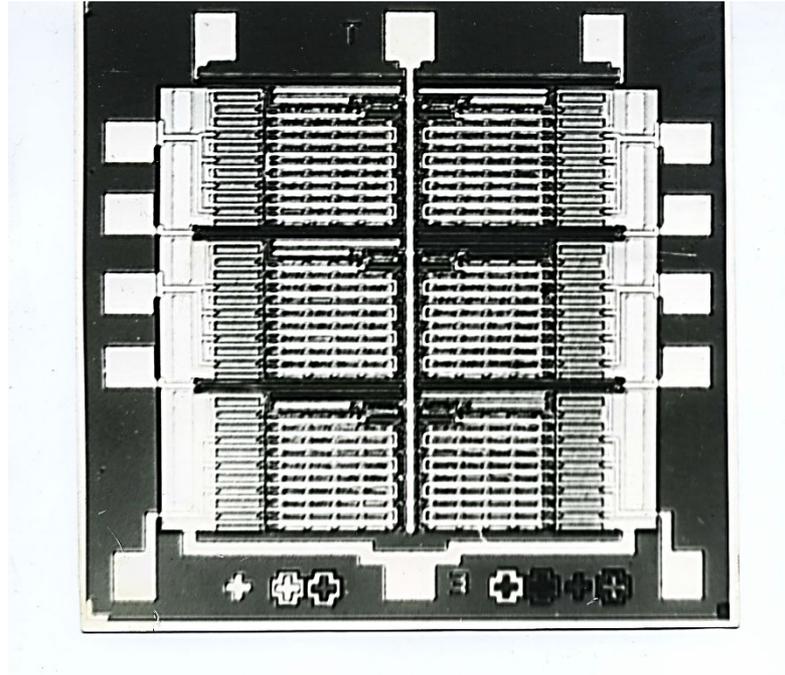
Островок
монокристалл
кремния

Крупноблочная
структура

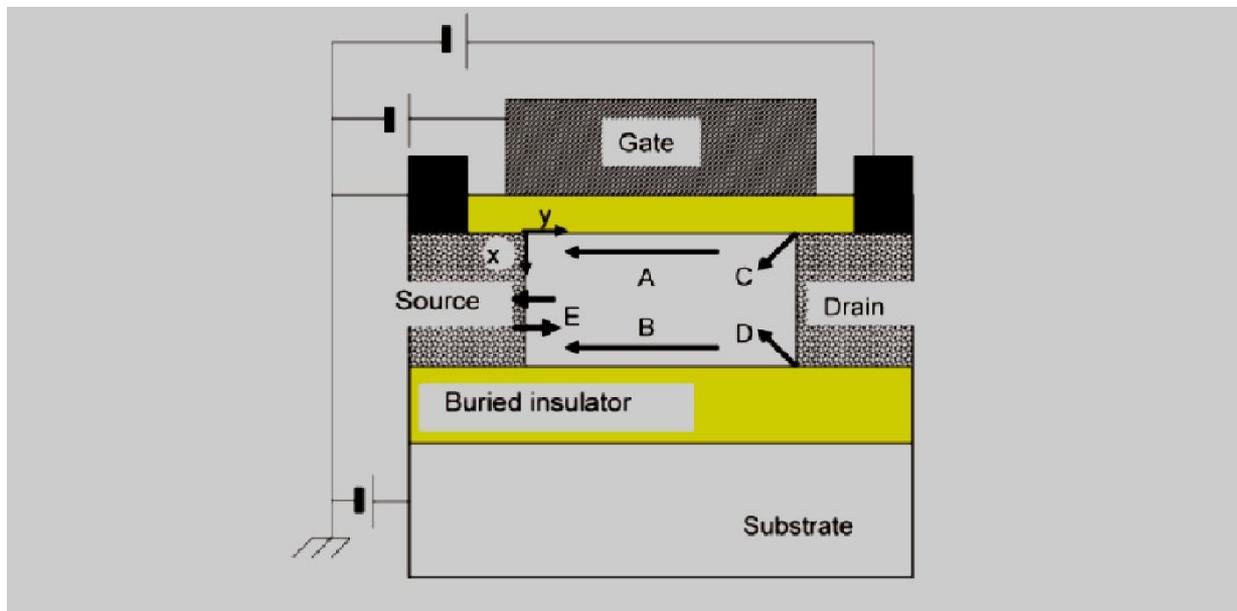
КНИ МОП - транзистор, сформированный ZMR - процессом



Трехмерная КНИ КМОП ИС преобразователя сигналов (106 транзисторов 2 уровня, МИЭТ 1987 г)

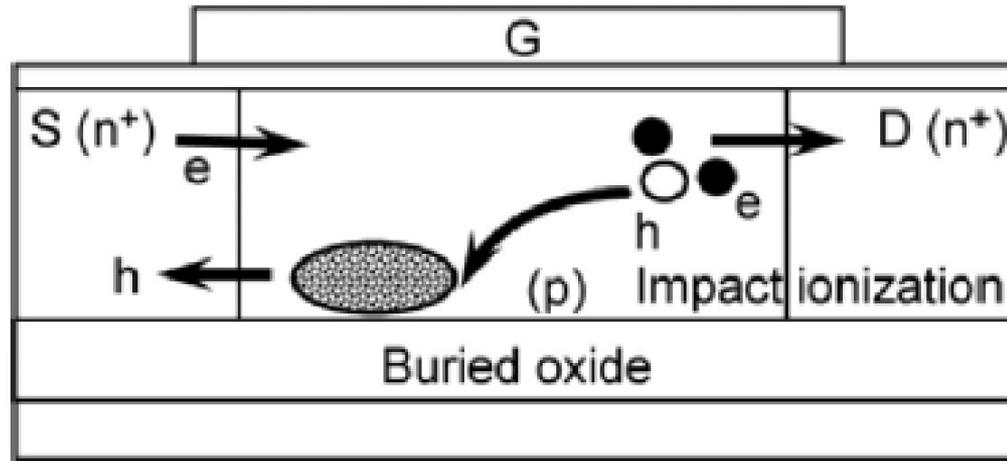


Токовые потоки в КНИ МОП транзисторе

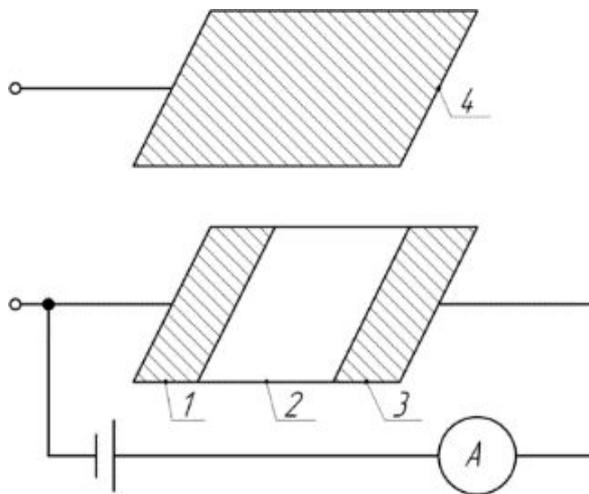


A- нормальный верхний кана,, B – нижний канал C - туннельный ток сверху, D - туннельный ток снизу, E - инжекция паразитного биполярного транзистора..

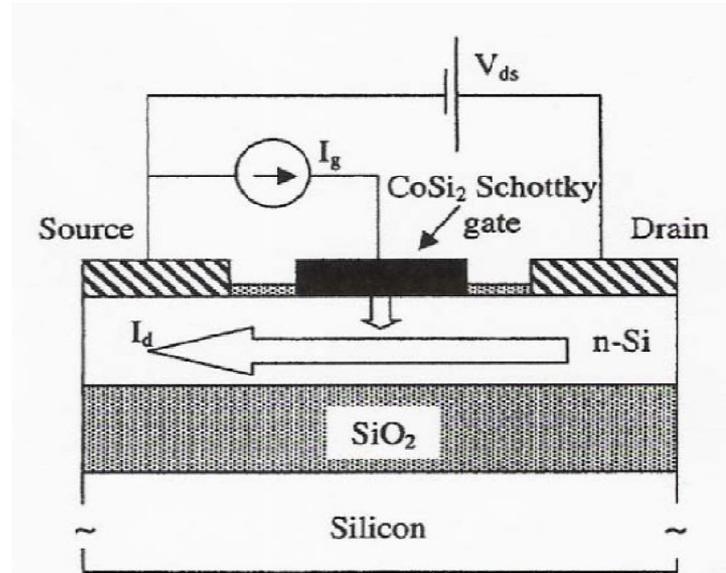
Биполярный эффект в КНИ МОП транзисторе



Принцип работы полевого транзистора (из патента Лилиенфельда, 1926 год)

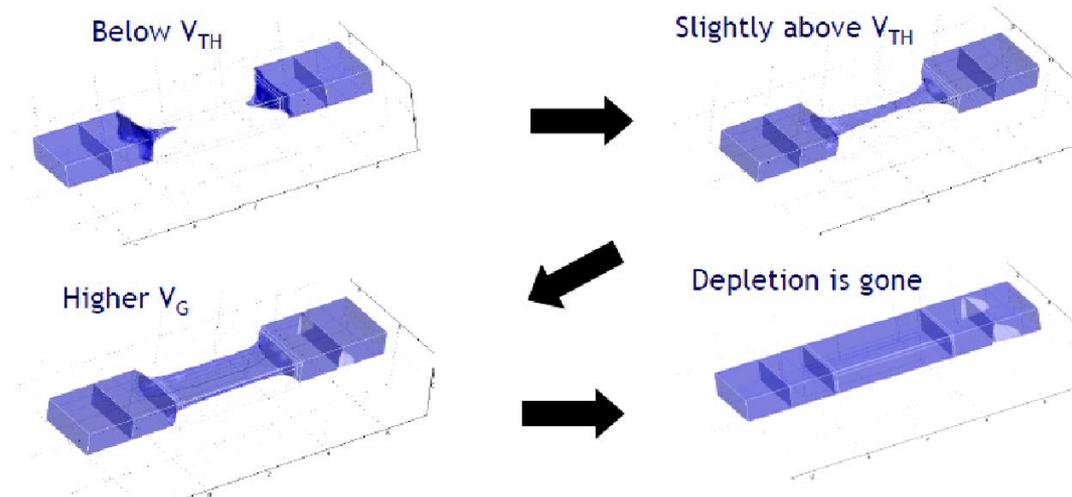


Принцип работы беспереходного (БПТ) КНИ МОП - транзистора

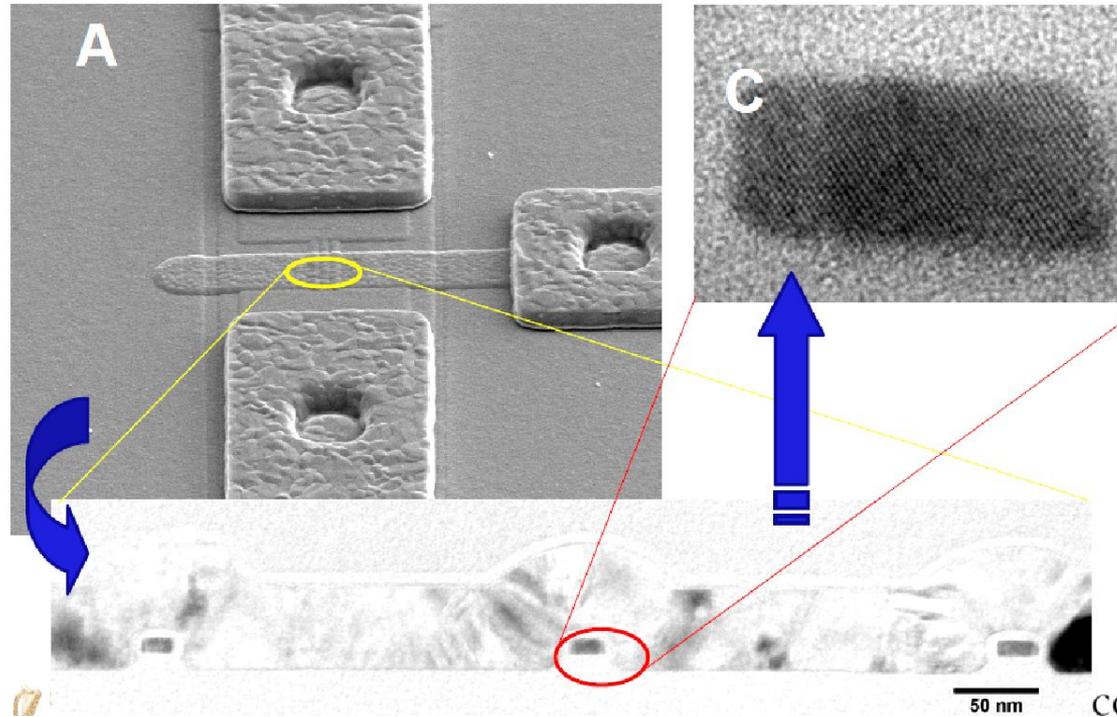


Изменение области обеднения в БПТ

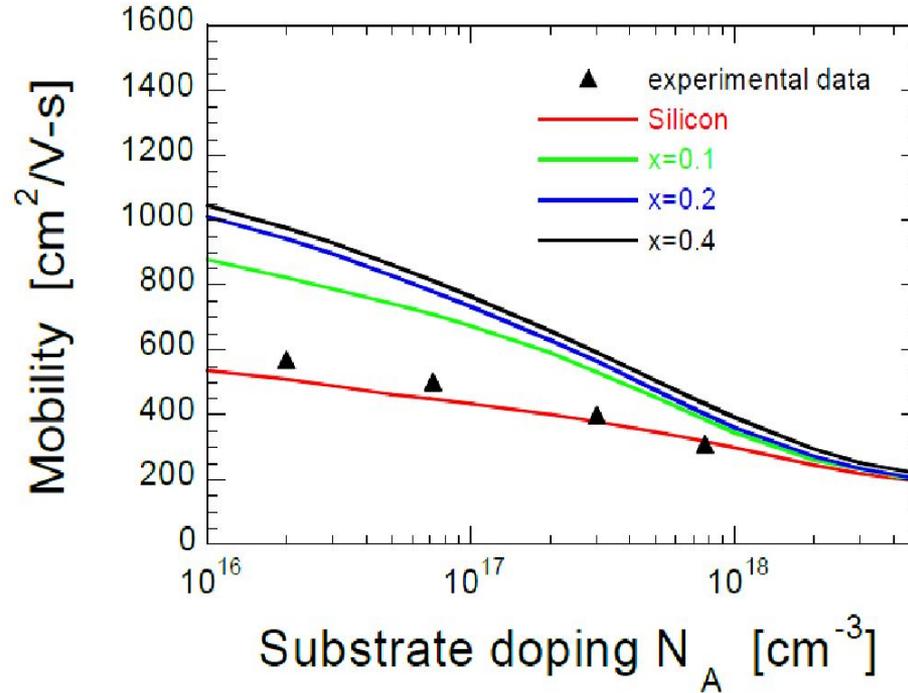
($V_D=50\text{mV}$, $N_d>5e18/\text{cm}^3$)



Микрофотографии КНИ МОП БПТ

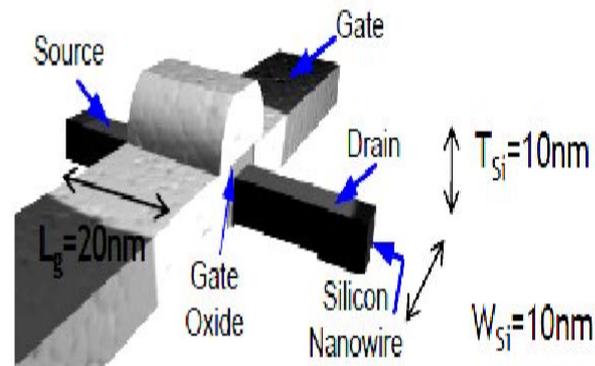


Зависимость подвижности электронов от концентрации примеси в кремнии



«Нанопроволочный» КНИ МОП БПТ

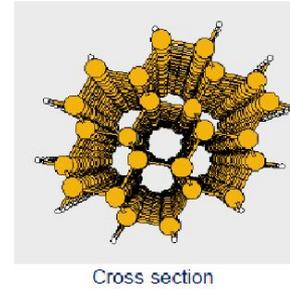
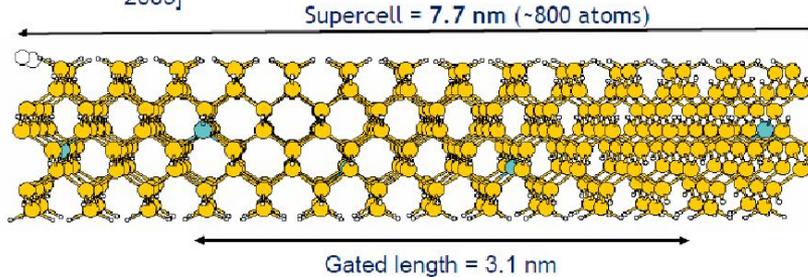
Doping concentration [cm^{-3}]	Statistical number of doping atoms in the channel
$1\text{e}15$	0.002
$1\text{e}18$	2
$1\text{e}19$	20



«Нанопроволочный» КНИ МОП БПТ

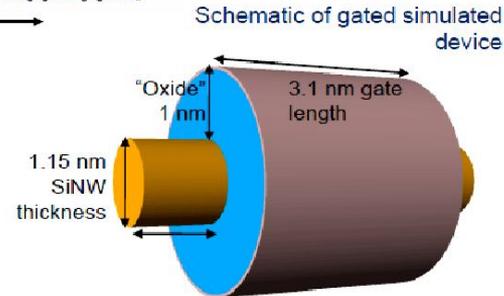
- Relaxed H-saturated [110] SiNW (below & right)

- Diameter = 1.15 nm
- Dopant atoms: As or P
- Structure from [G. Fagas, J. C. Greer, Nano Lett., 2009]



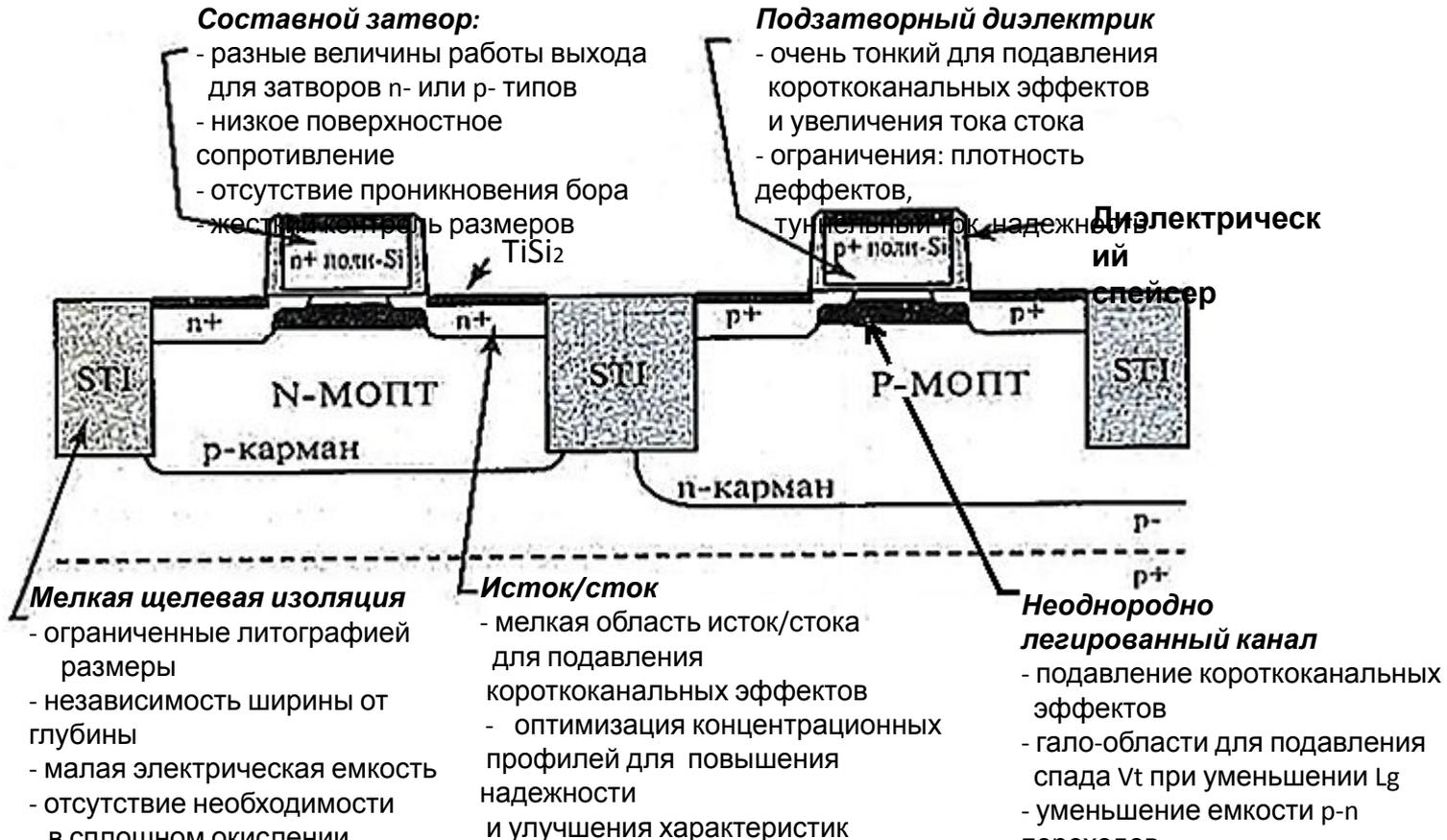
- Simulated GAA junctionless transistor (right):

- "Oxide" thickness 1 nm – continuum dielectric, κ
- Gate length = 3.1 nm
 - Fixed point charges ($> 3 \cdot 10^3$, spaced 1 Å)
- Natural length = 0.76 nm



Конструкция и проблемы формирования наноразмерной КМОП структуры

[1]



Мелкая щелевая изоляция

- - ограниченные литографией размеры
- - независимость ширины от глубины
- - малая электрическая емкость
- - отсутствие необходимости в сплошном окислении
- паразитные связи

Неоднородно легированный канал

- - подавление короткоканальных эффектов
- - гало-области для подавления спада $V_{\text{п}}$ при уменьшении $L_{\text{к}}$
- - уменьшение емкости р-п переходов

Подзатворный диэлектрик

- - очень тонкий для подавления короткоканальных эффектов и увеличения тока стока
- - ограничения: плотность дефектов, туннельный ток, надежность

Составной затвор

- - разные величины работы выхода для затворов n- или p- типов
- - низкое поверхностное сопротивление
- - отсутствие проникновения бора
- - жесткий контроль размеров

Исток/сток

- - мелкая область исток/стока для подавления короткоканальных эффектов
- оптимизация концентрационных профилей для повышения надежности и улучшения характеристик
- - низкое поверхностное сопротивление