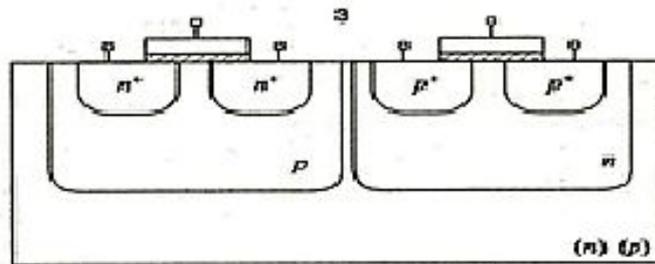
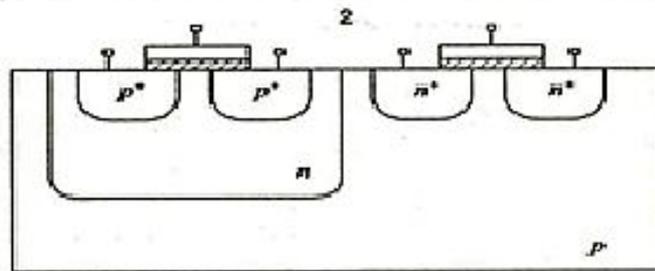
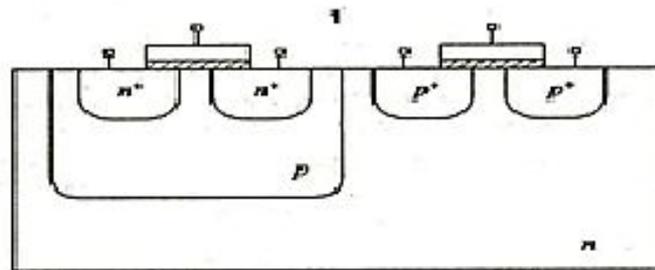


# **Выбор структуры и подложки для КМОП ИС**



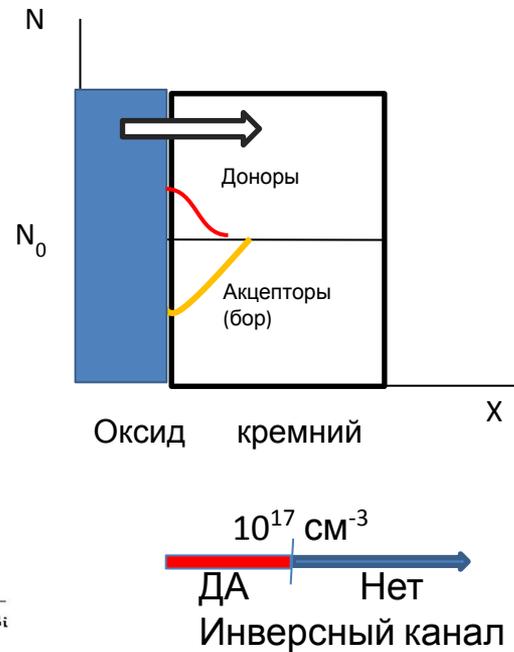
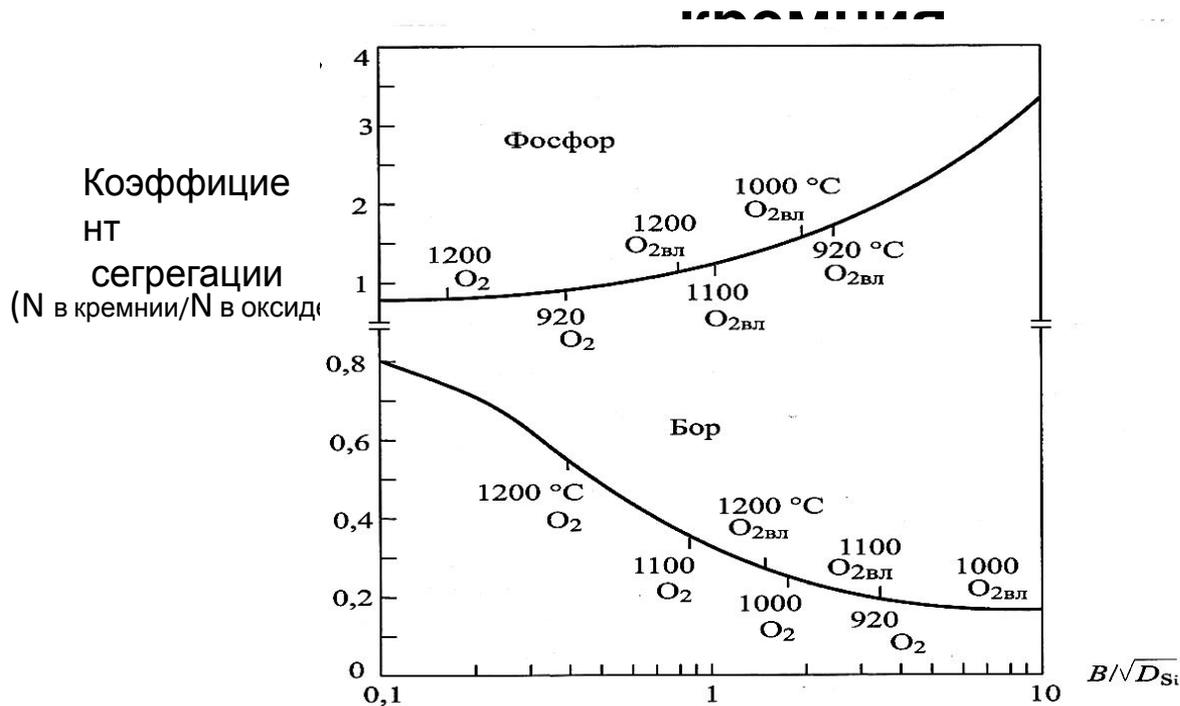
# Варианты КМОП структур



# Выбор кармана КМОП - структуры

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

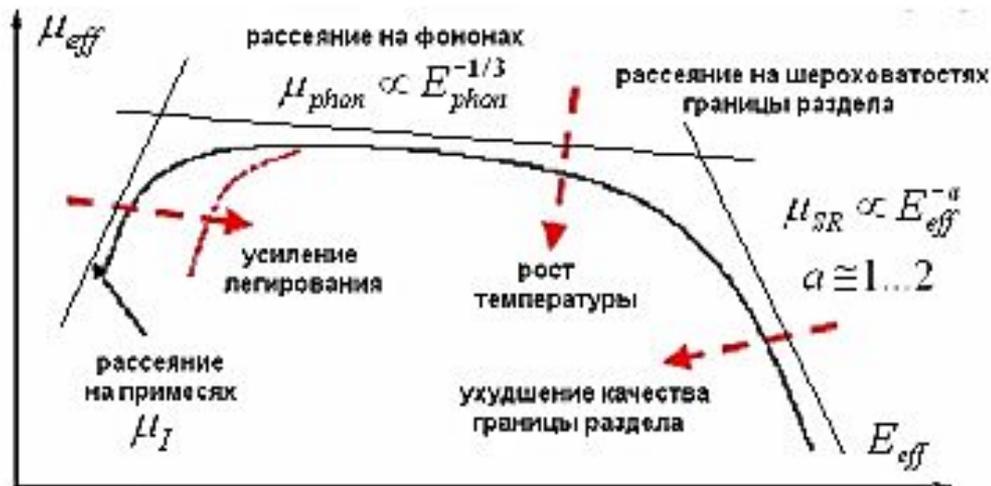
# Влияние температуры и среды на перераспределение примеси при окислении



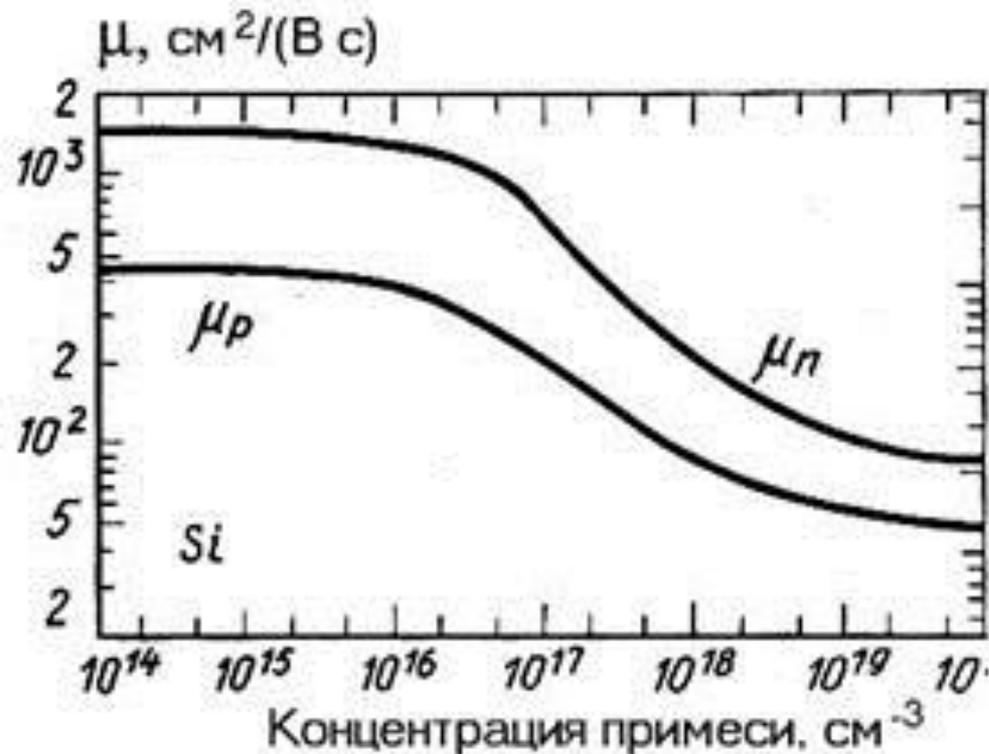
# Инверсионный канал по краю кармана р-типа



# Зависимость подвижности от электрического поля, легирования и температуры



# Зависимость подвижности носителей от концентрации примеси



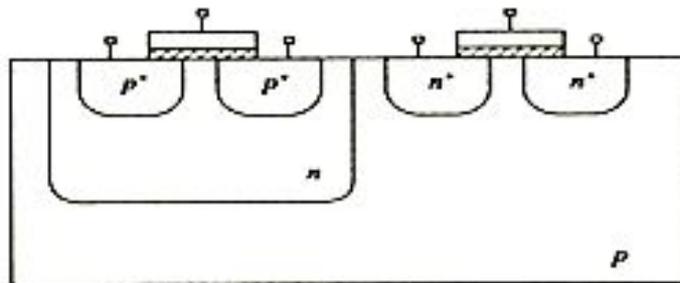
# Пороговое напряжение МОП-транзистора

- 
- $$U_{\Pi} = \varphi_{МП} \quad + \quad Q_{д/с_д} \quad + \quad \boxed{Q_{\Pi/с_д}} \quad + \quad 2\varphi_F$$

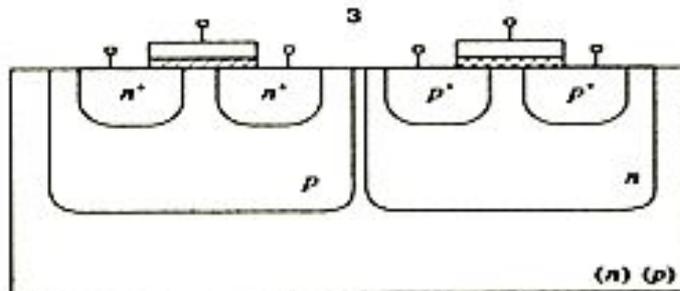
$Q_{\Pi} \sim N_{\Pi}$

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

# Карманы в КМОП структуре



Однокарманный вариант

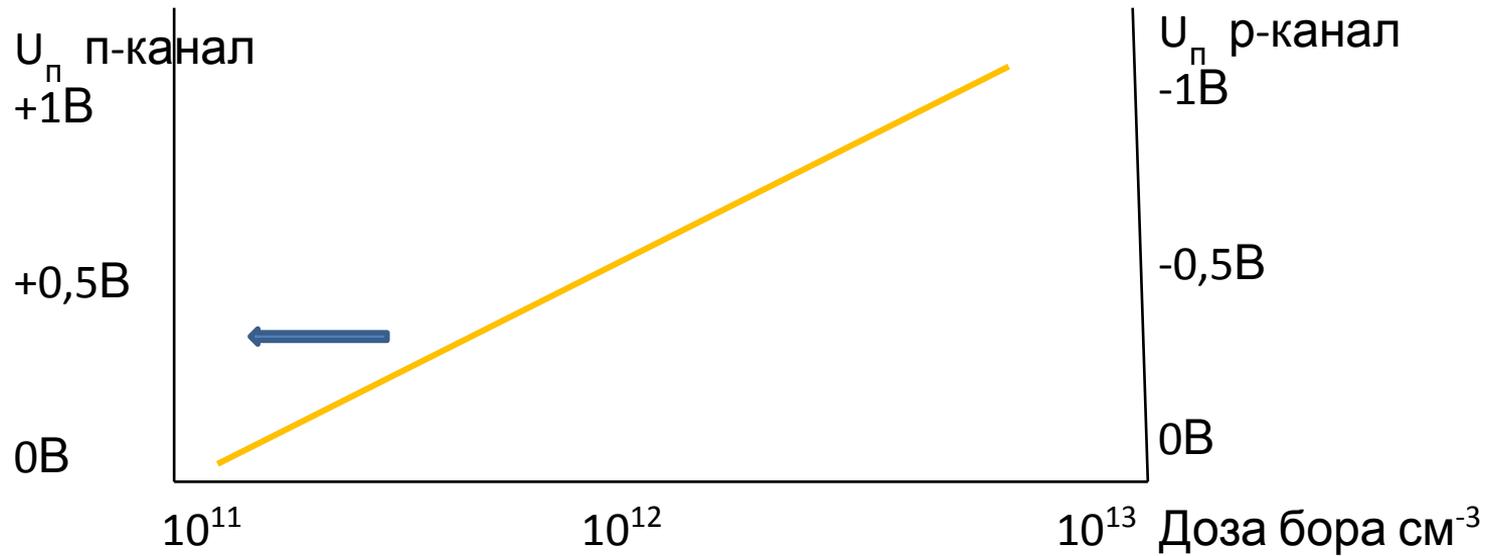


Двухкарманный вариант

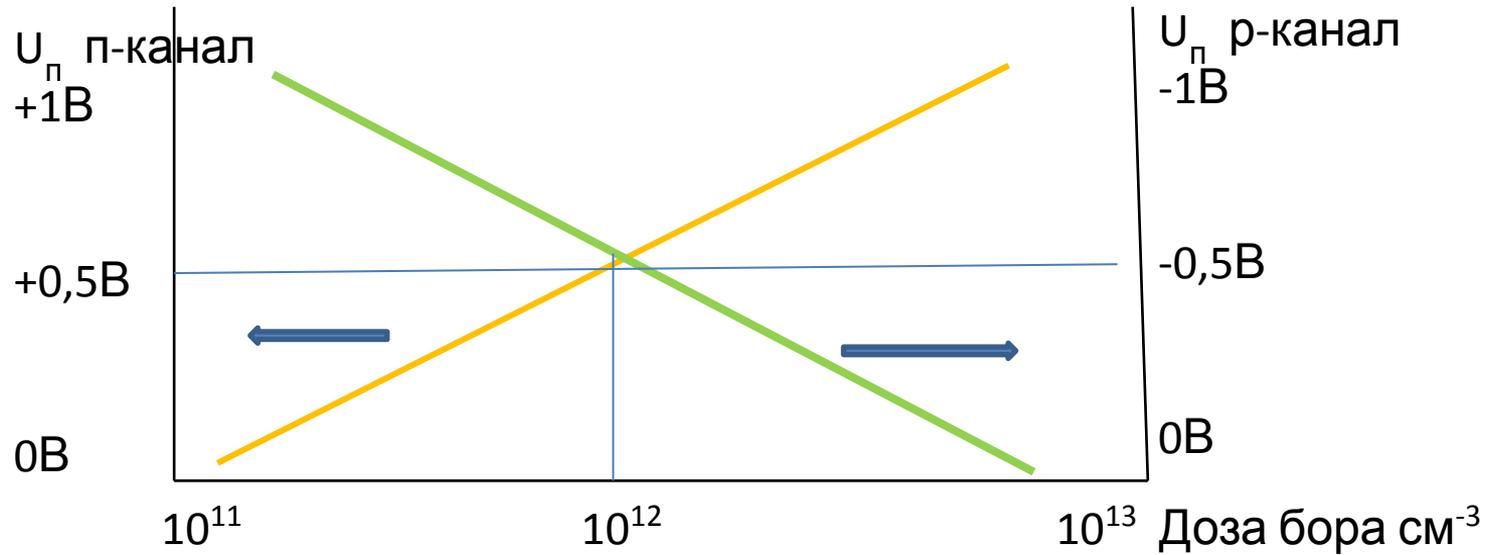
# Выбор кармана КМОП - структуры

Тип кармана	Достоинства	Недгостатки
Карман р-типа	Малая площадь	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Инверсный канал по краям кармана</li><li>2. Ухудшение частотных свойств п-канального МОП – транзистора</li><li>3. Уменьшение подвижности носителей п-канального транзистора</li><li>4. Трудность подгонки пороговых напряжений</li></ol>
Карман п-типа	Сохранение частотных свойств п-канального транзистора Нет инверсии по краям кармана	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Уменьшение подвижности носителей р-канального транзистора</li><li>2. Трудность подгонки пороговых напряжений</li><li>3. Увеличение площади ?</li></ol>
Два кармана	Простота подгонки порогового напряжения	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Усложнение технологии</li><li>2. Токи утечки неосновных носителей через рп- переход кармана</li></ol>

# Подгонка порогового напряжения в двухкарманной КМОП-структуре



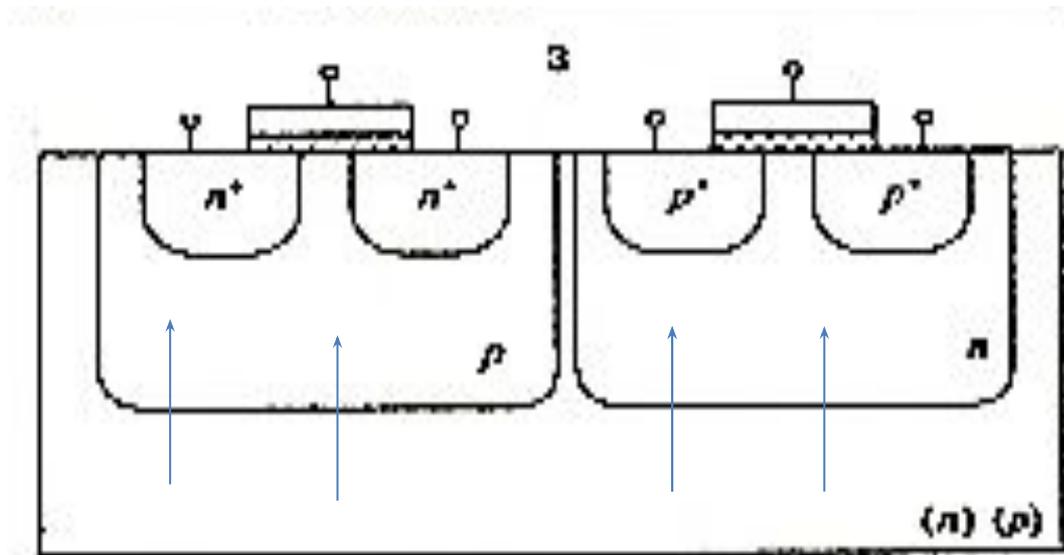
# Подгонка порогового напряжения в двухкарманной КМОП-структуре



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

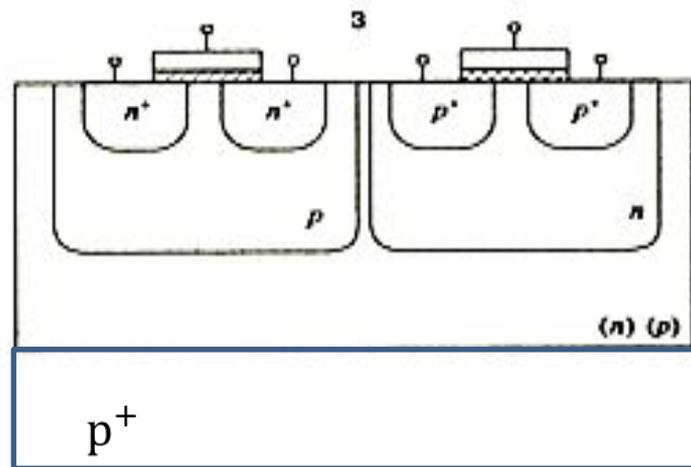


# Токи утечки в двухкарманной КМОП структуре



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

$p^+$   $p$  - подложка в КМОП структуре



# Преимущества $p^+$ - $p$ подложки

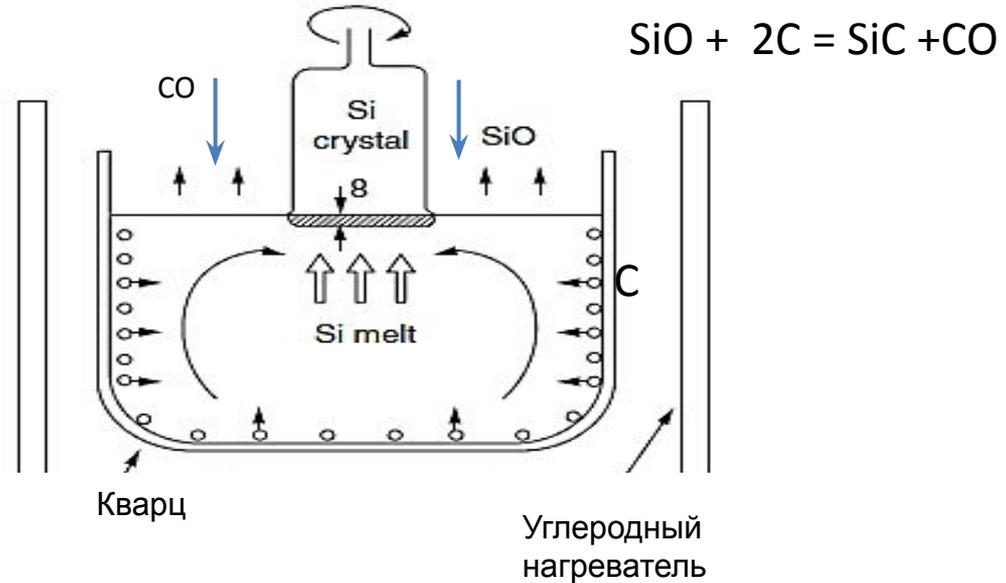
- 1. Улучшение качества полупроводника
- 2. Уменьшение потока неосновных носителей из подложки в  $pn$  – переходы карманов
- 3. Подавление эффекта «защелкивания»
- 4. Геттерирование кислорода из пленки  $p^+$  - подложкой
- 5. Геттерирование металлов из пленки переходом  $p^+p$  пленка-подложка

# Выращивание слитка кремния по методу Чохральского

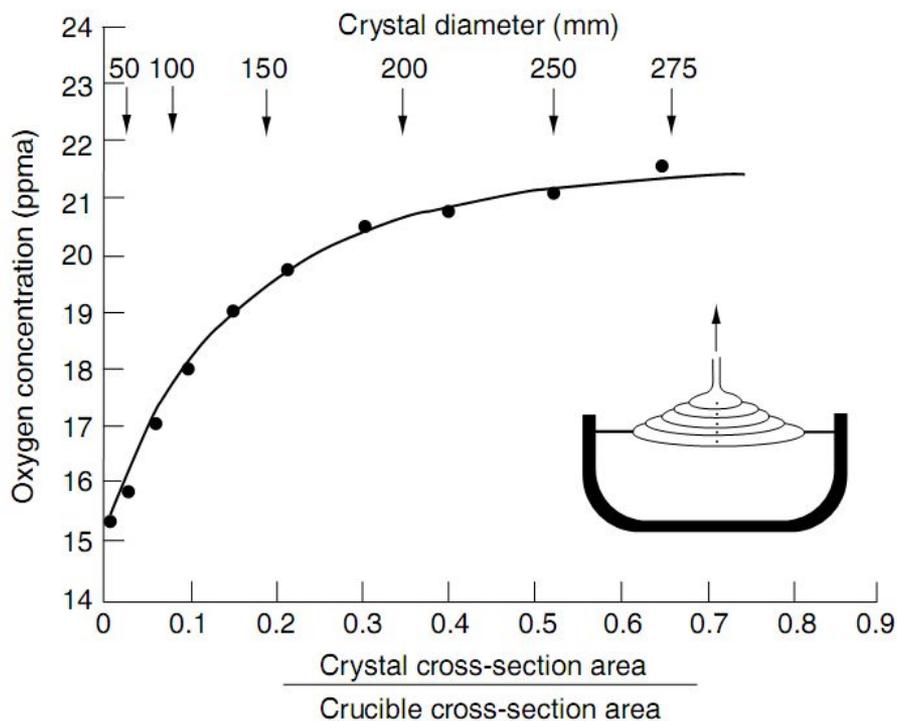
C -  $10^{16} \text{ см}^{-3}$

O -  $10^{18} \text{ см}^{-3}$

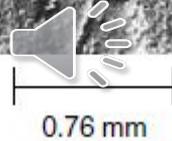
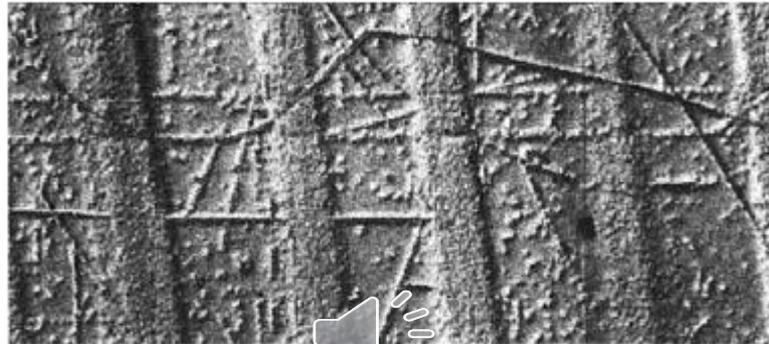
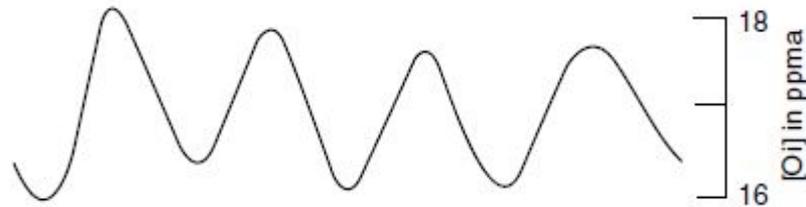
Me



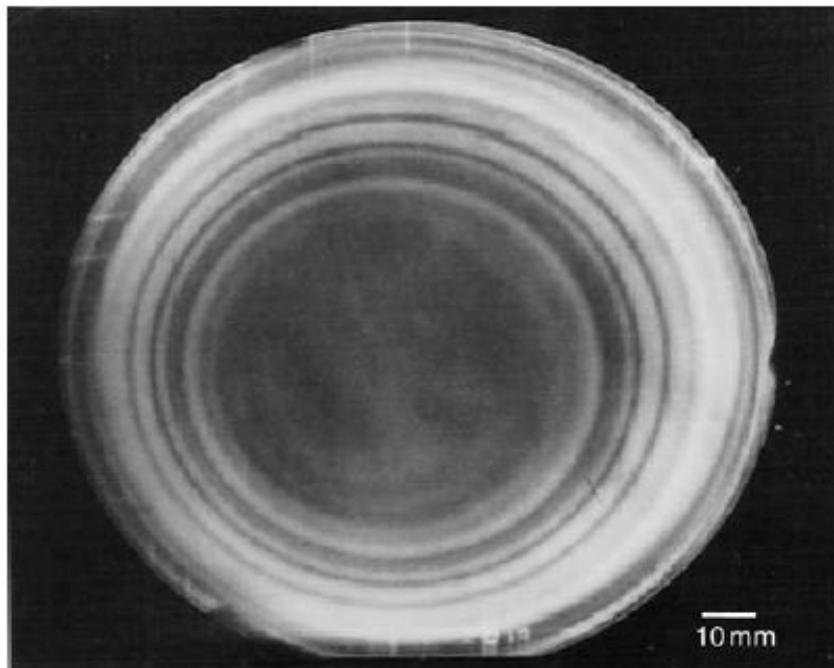
# Зависимость концентрации кислорода в кремнии от диаметра слитка



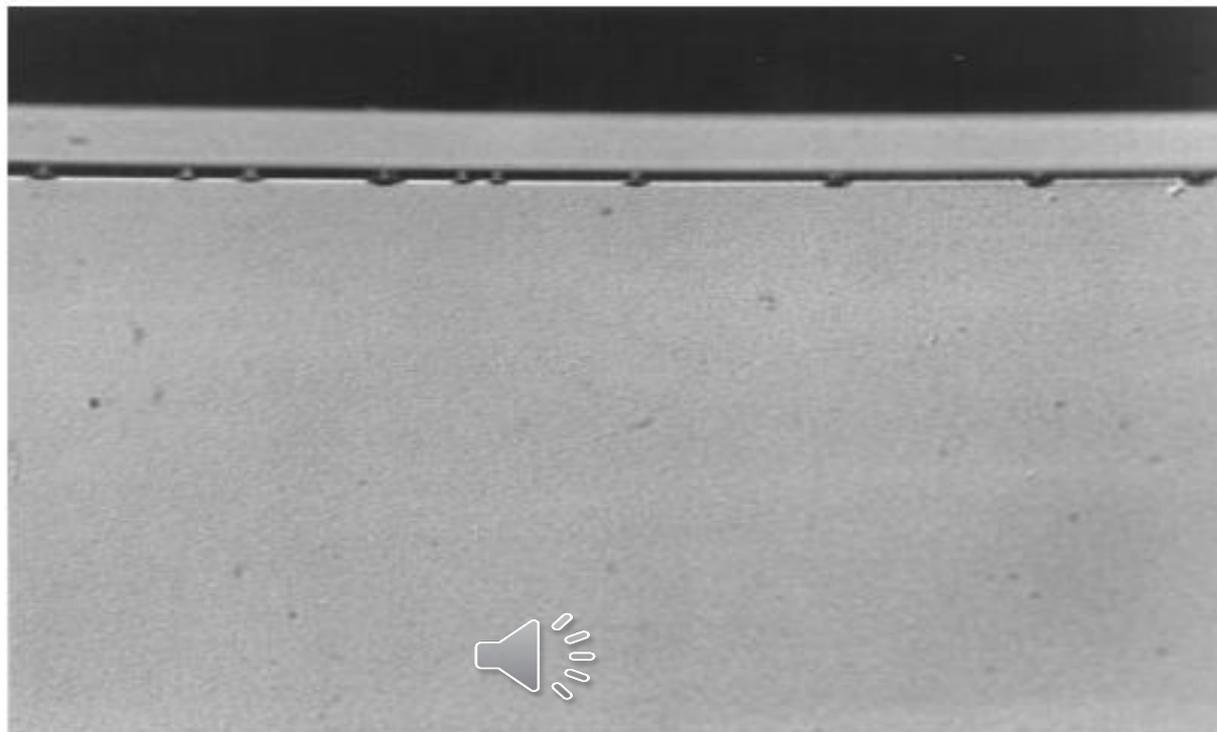
# Дефекты кремния, вызванные преципитацией кислорода



# Дефекты слитка кремния, вызванные преципитацией кислорода

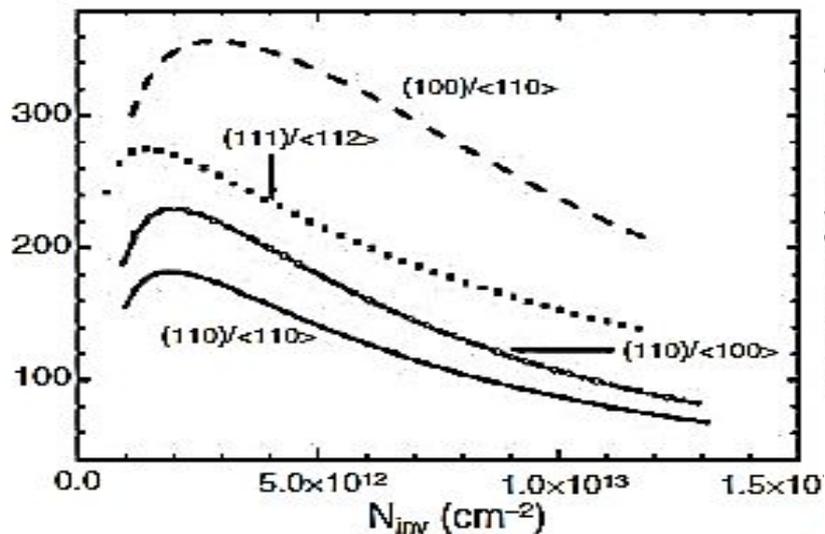


# Геттерирование примесей на границе раздела пленка-подложка

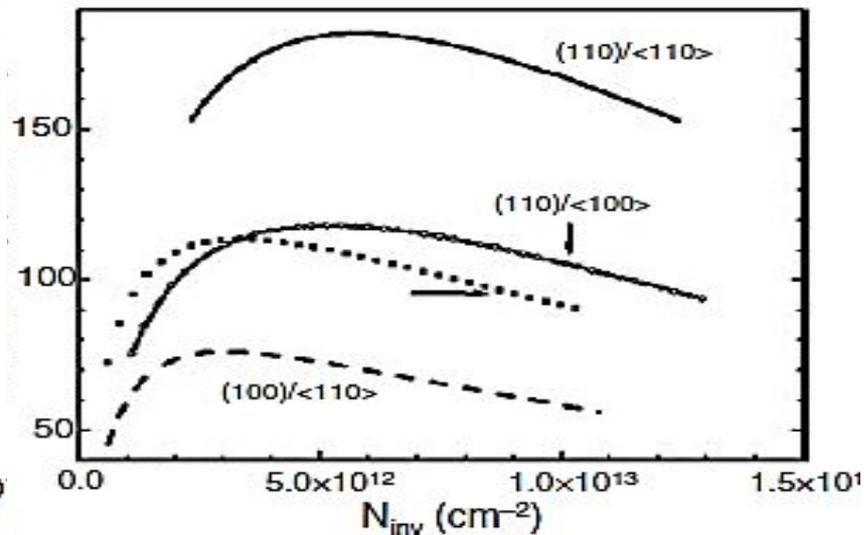


# Зависимость подвижности носителей от концентрации носителей и ориентации подложки

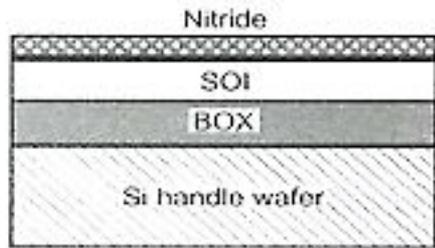
Подвижность электронов,  
 $\text{cm}^2/\text{Vs}$



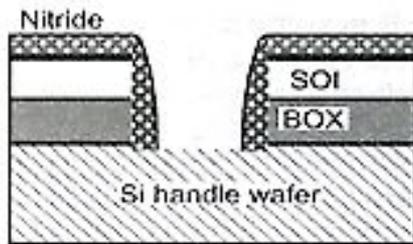
Подвижность дырок,  
 $\text{cm}^2/\text{Vs}$



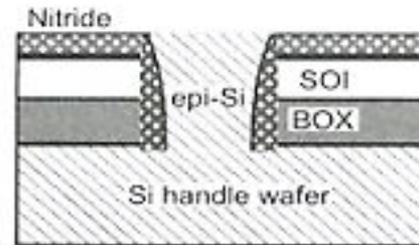
# Создание КМОП структуры на гибридно-ориентированной подложке



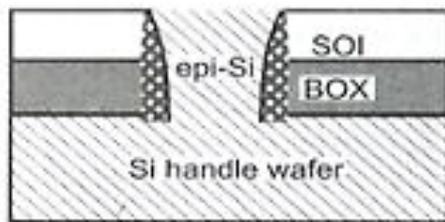
**Стадия 1.** Окисление рабочего слоя монокремния на КНИ-платине осаднение слоя нитрида кремния (nitride)



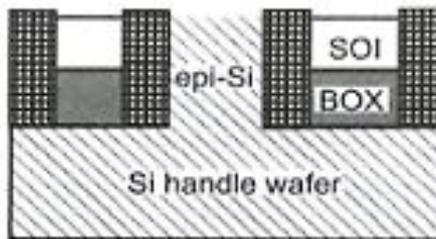
**Стадия 2.** Реактивное ионное травление структуры до слоя монокремния подложки (Si handle wafer) и осаднение спейсера из нитрида кремния



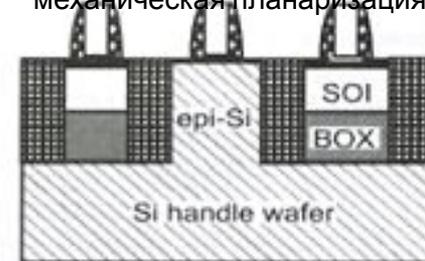
**Стадия 3.** Эпитаксиальное осаднение монокремния (epi-Si) и его химико-механическая планаризация



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

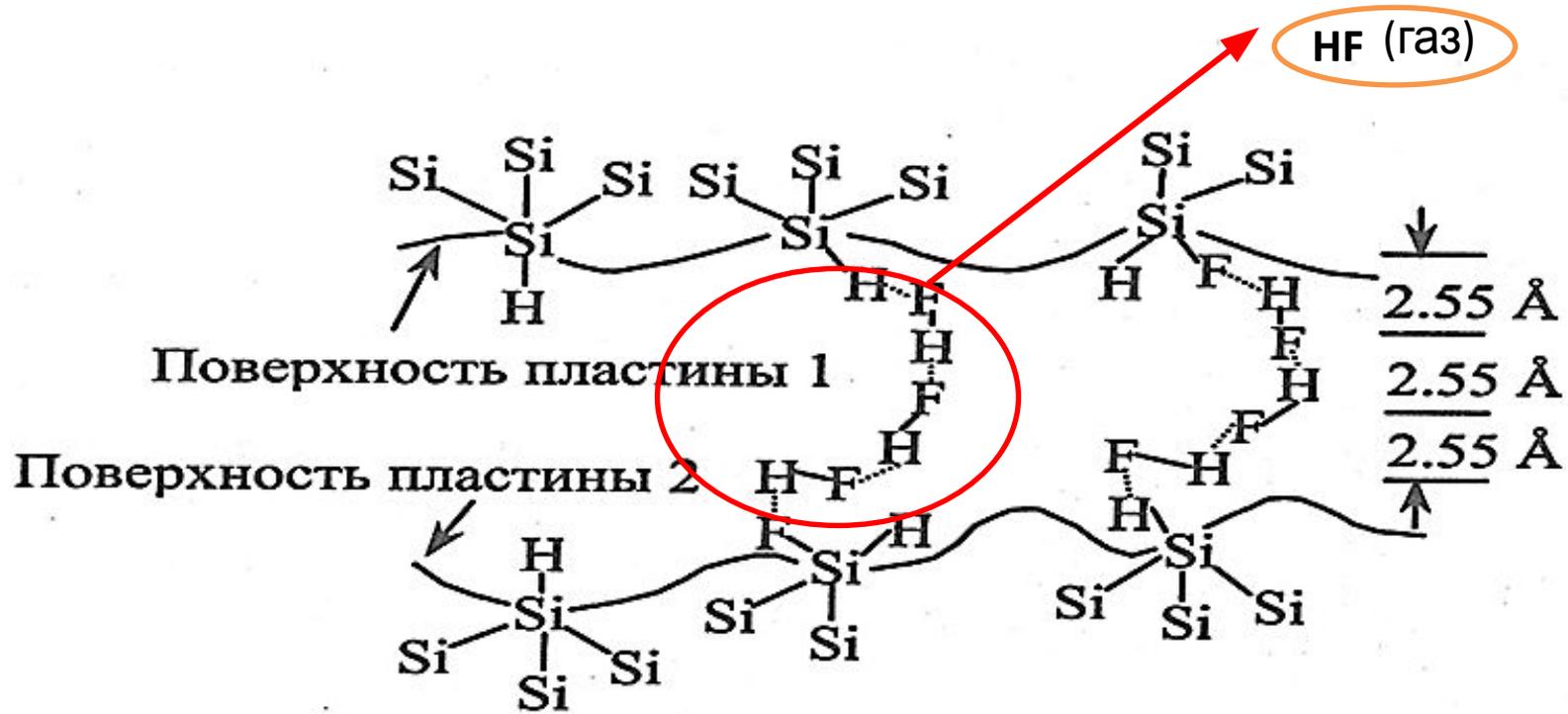


**Стадия 5.** Формирование щелевой изоляции между КМОП-транзисторами



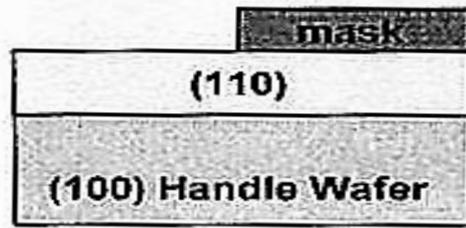
**Стадия 6.** Формирование транзисторных КМОП-структур

# Механизм гидрофобного срачивания

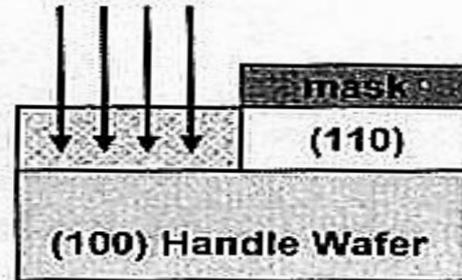


# Формирование гибридно-ориентированной подложки методом аморфизации и рекристаллизации кремния

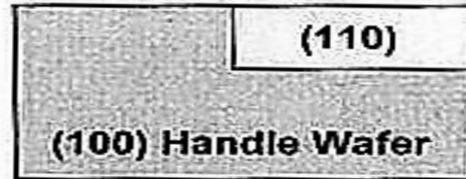
Эпитаксия кремния + осаждение нитрида + фотолитография



(a)



(b)



(c)



(d)

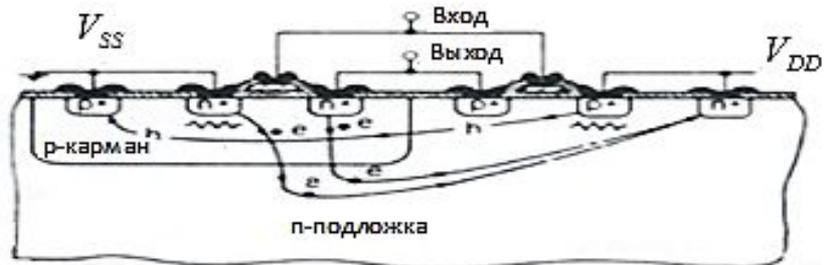
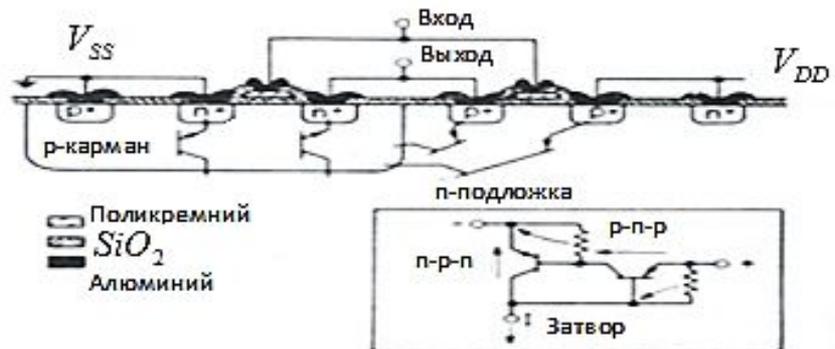
Аморфизация (ионная имплантация кремния)

Термообработка (рекристаллизация кремния) +

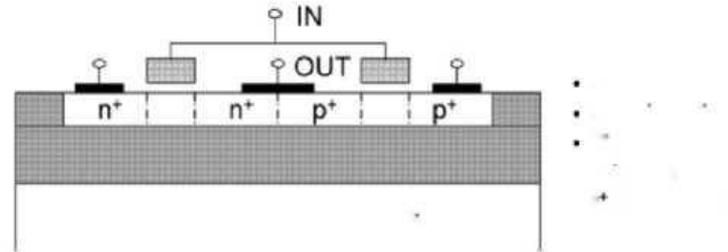
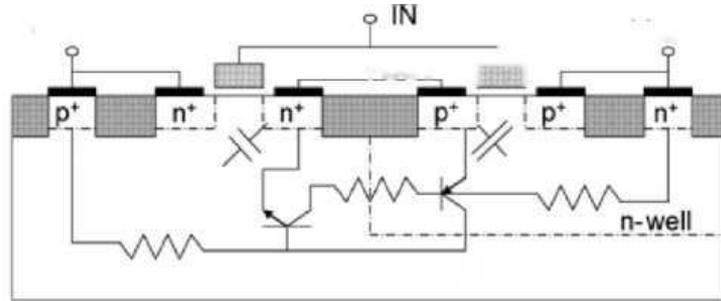
Формирование щелевой изоляции



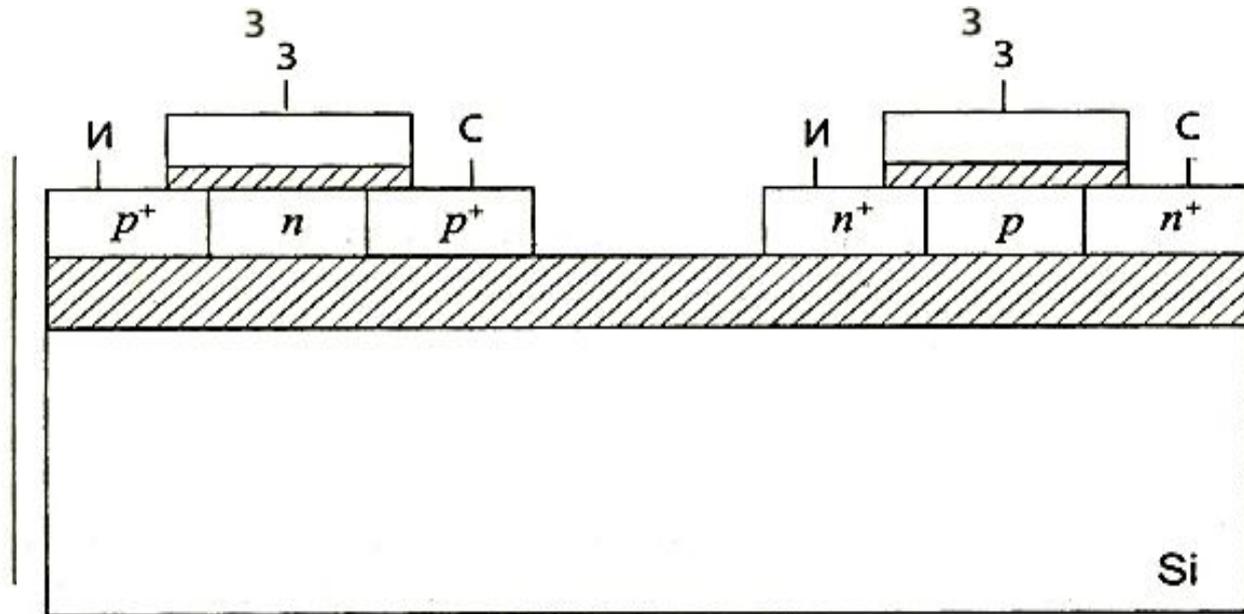
# Эффект защелкивания в КМОП структуре



# Эффект защелкивания в КМОП структуре

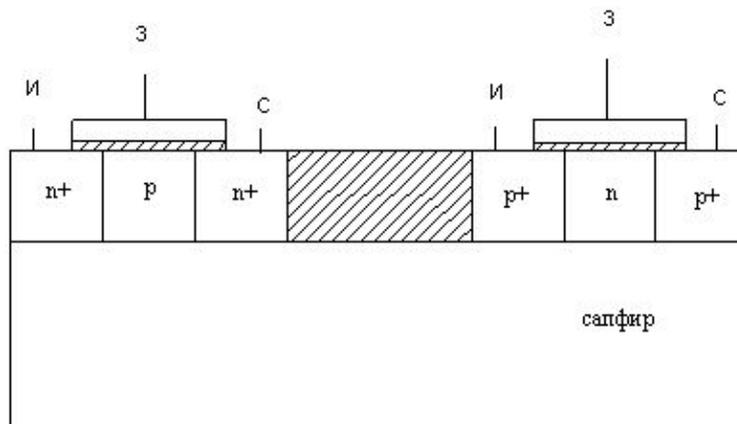


# КНИ КМОП структура



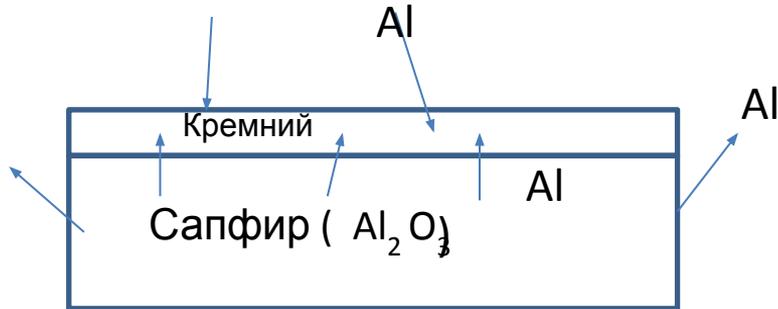
[2]

# КМОП-структура на основе КНС



# Недостатки КНС - структуры

Подлегирование алюминием!



# Улучшение КНС - структуры

Ориентированная имплантация по каналам!

*Ионы кремния*



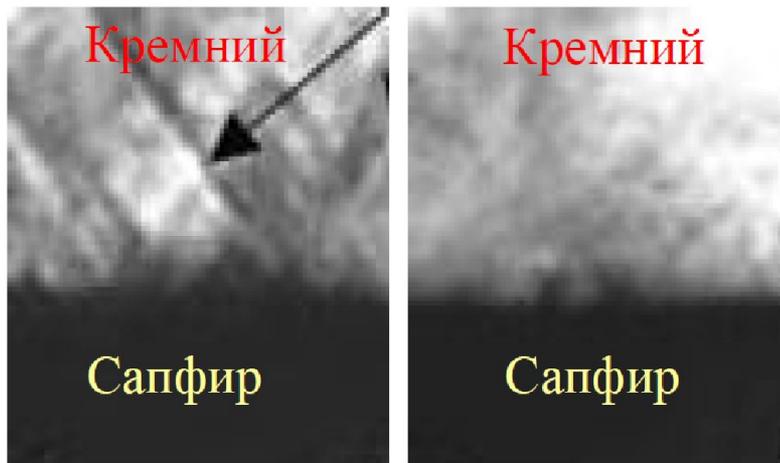
а)  
Гетероэпитаксия  
рекристаллизация

б)  
Аморфизация  
Аморфизация лишь  
дефектного слоя!

в)  
ТО (1100<sup>0</sup>С) -  
и окисление кремния

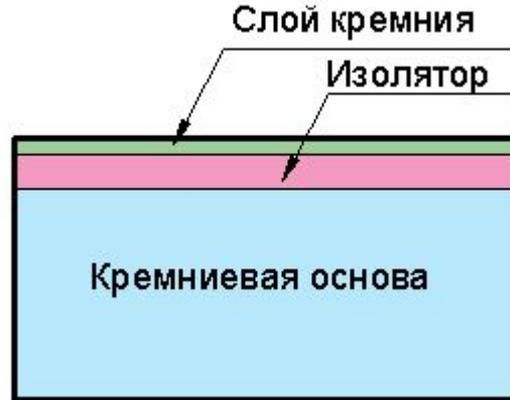
# РЭМ - фото границы раздела КНС - структуры до и после рекристаллизации

Дефекты



До рекристаллизации    После рекоисталлизации

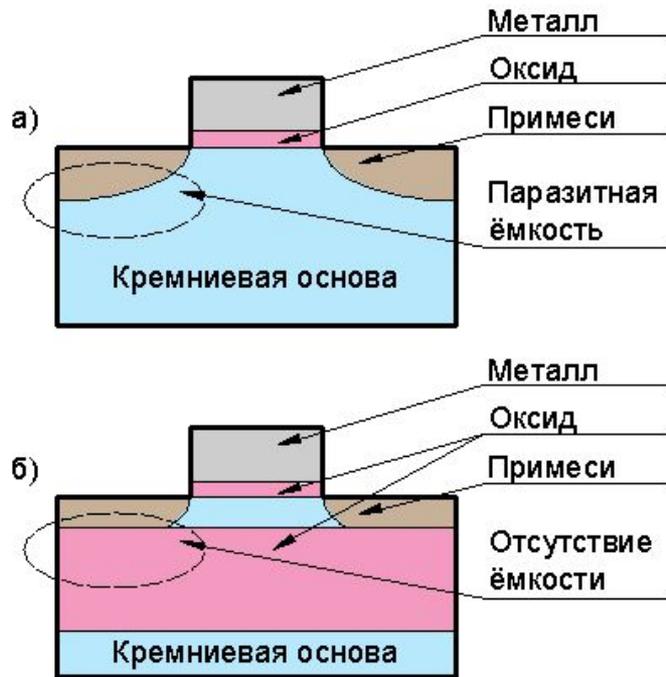
# КНИ -структура



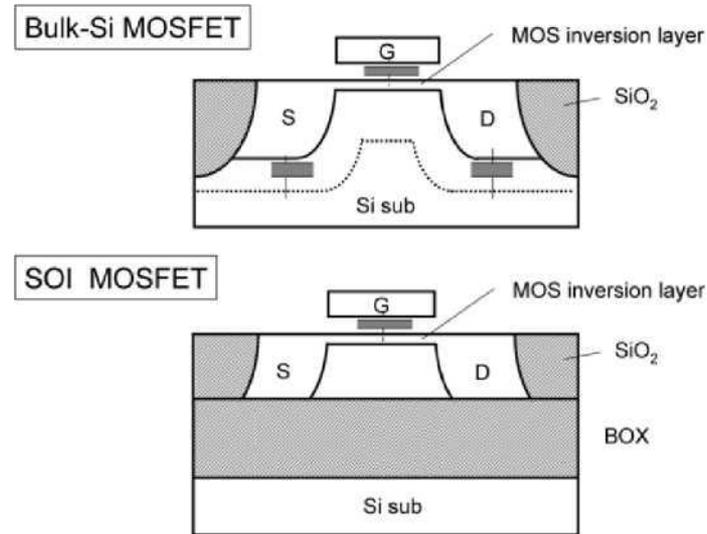
# Преимущества КНИ КМОП структуры

- 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

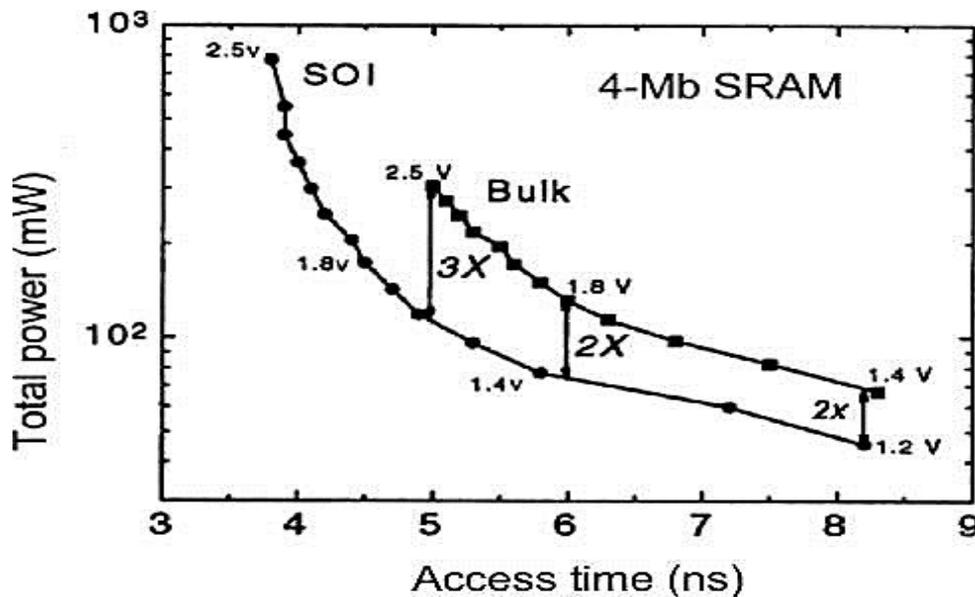
# Уменьшение емкости сток/исток - подложка



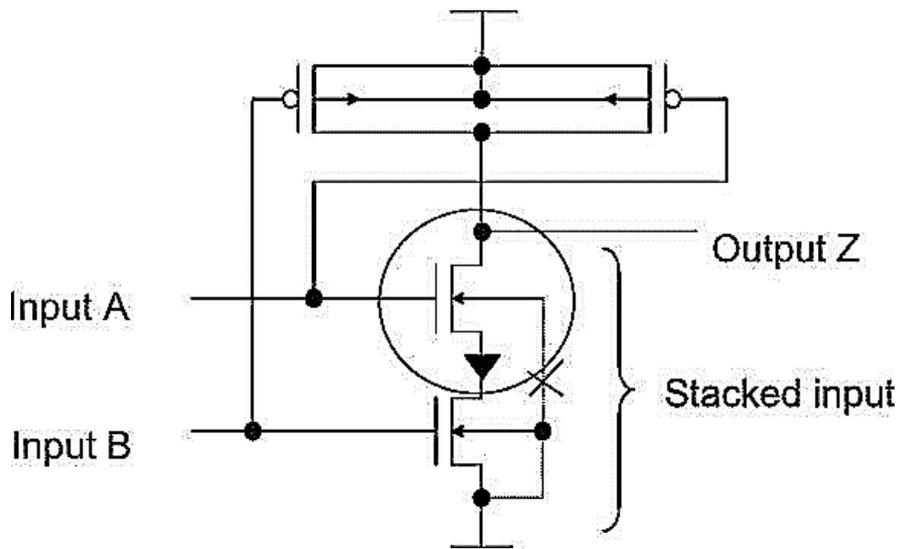
# Уменьшение емкости сток/исток - подложка



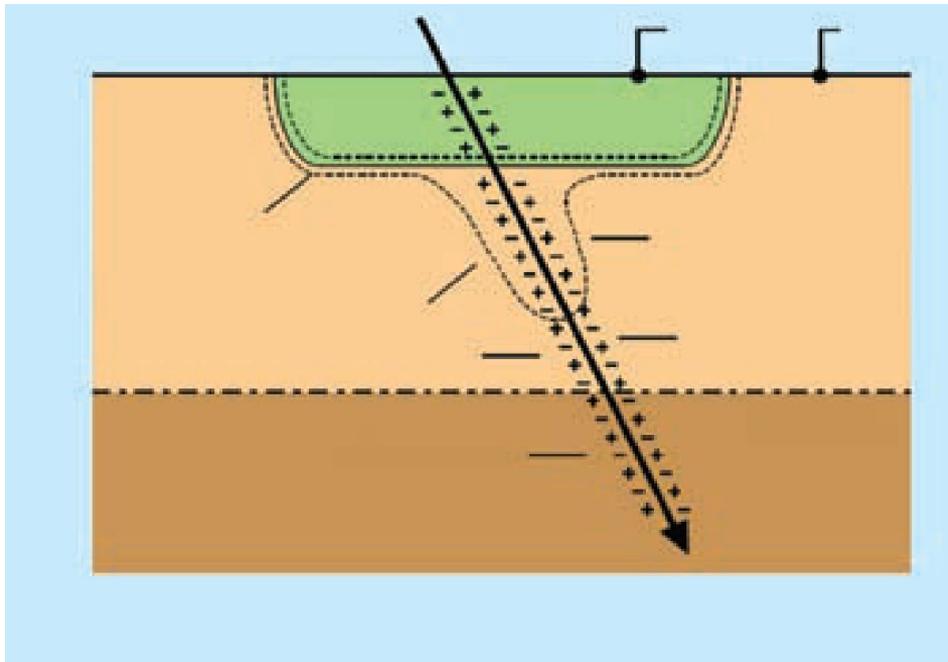
# Увеличение быстродействия и уменьшение потребляемой мощности ИС ЗУ в случае КНИ структуры



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

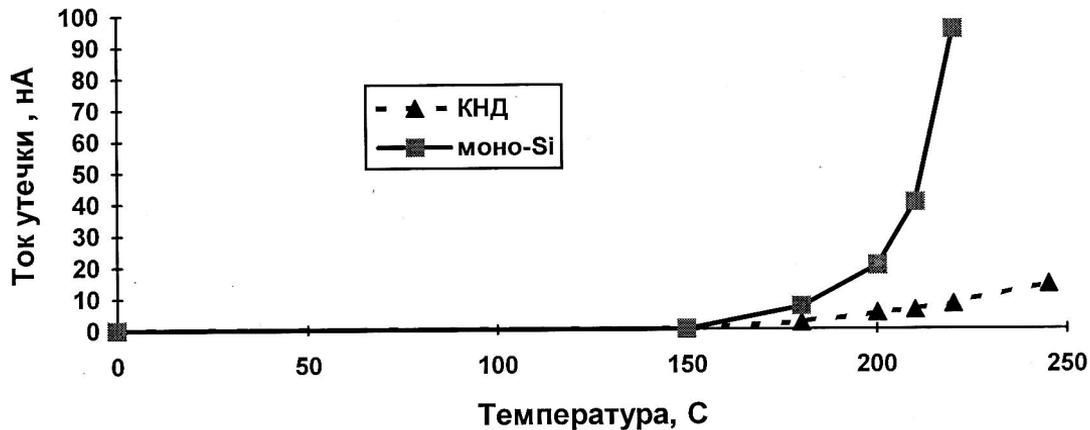


# Образование электрон-дырочных пар при облучении полупроводниковой структуры



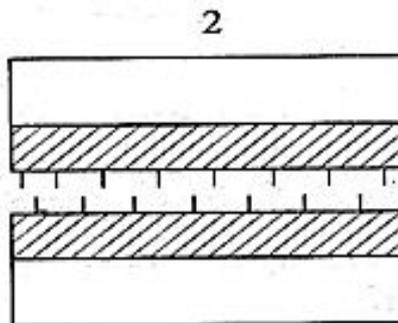
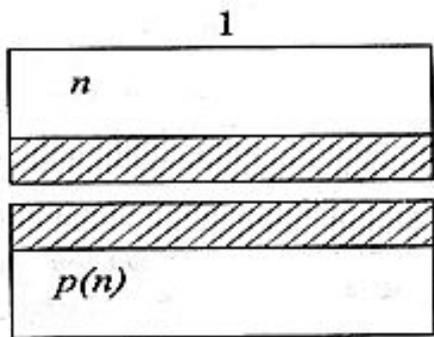


# Температурная зависимость тока утечки КНИ и объемного МОП-транзисторов

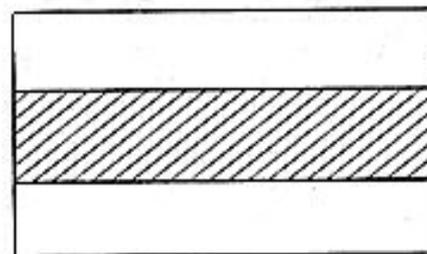


# Сращивание окисленных кремниевых пластин

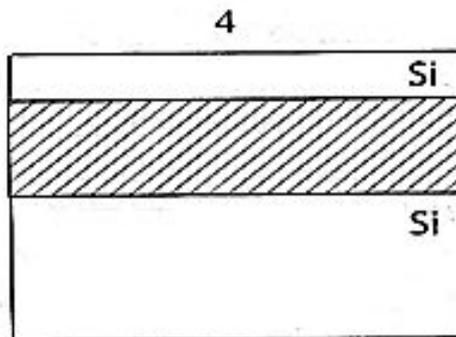
Исходные структуры



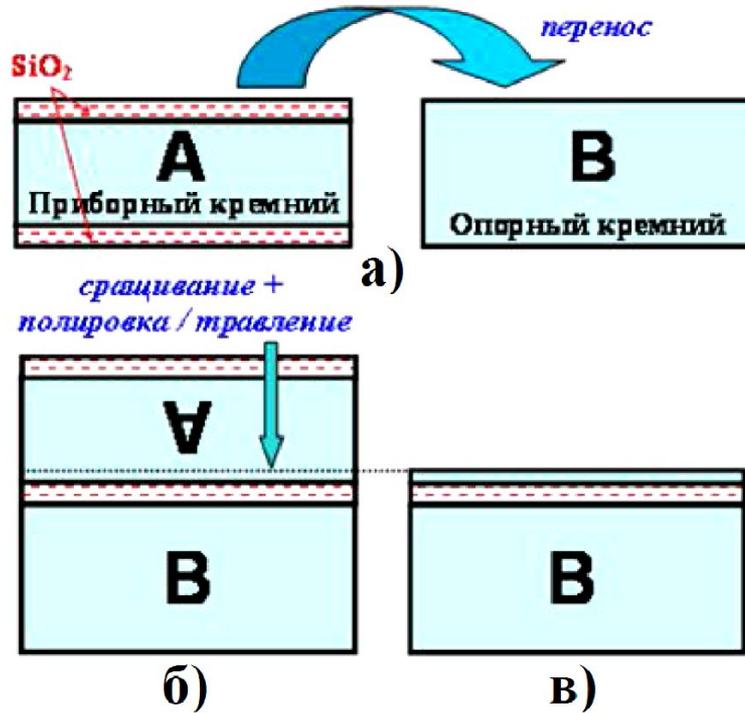
Термокомпрессия  
(бондинг)



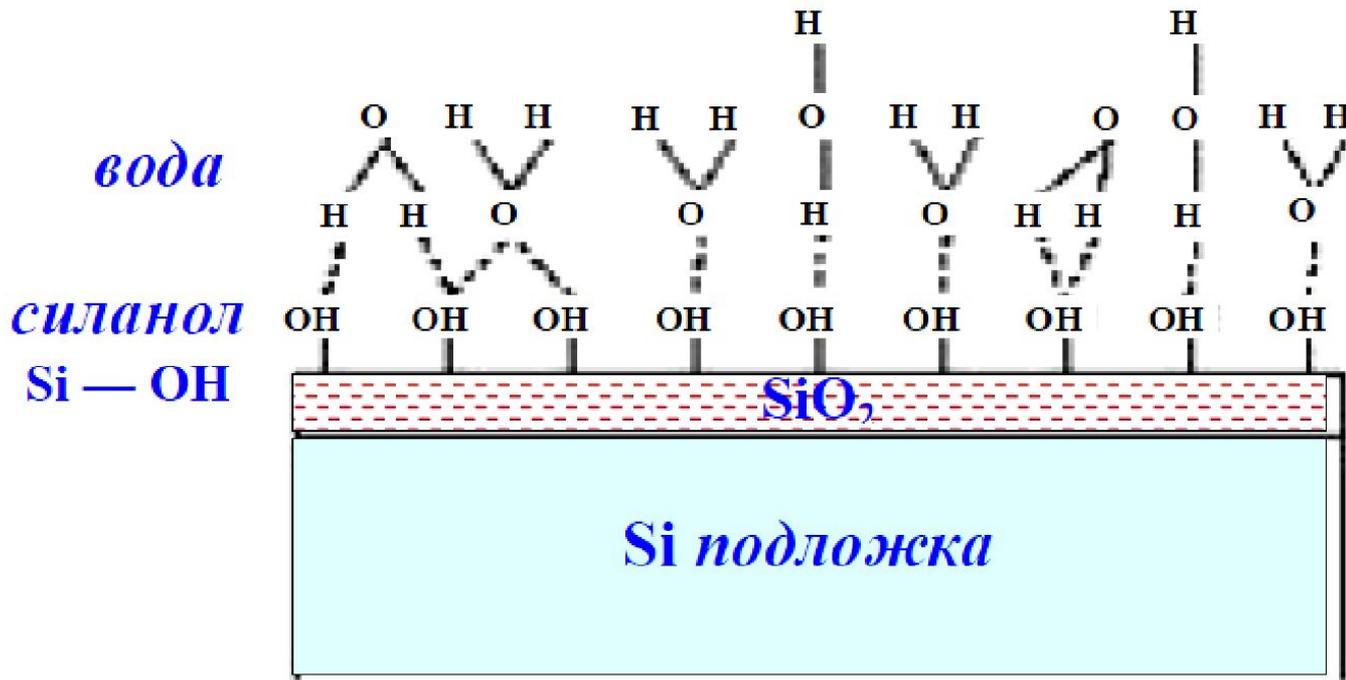
Утонение  
рабочего слоя



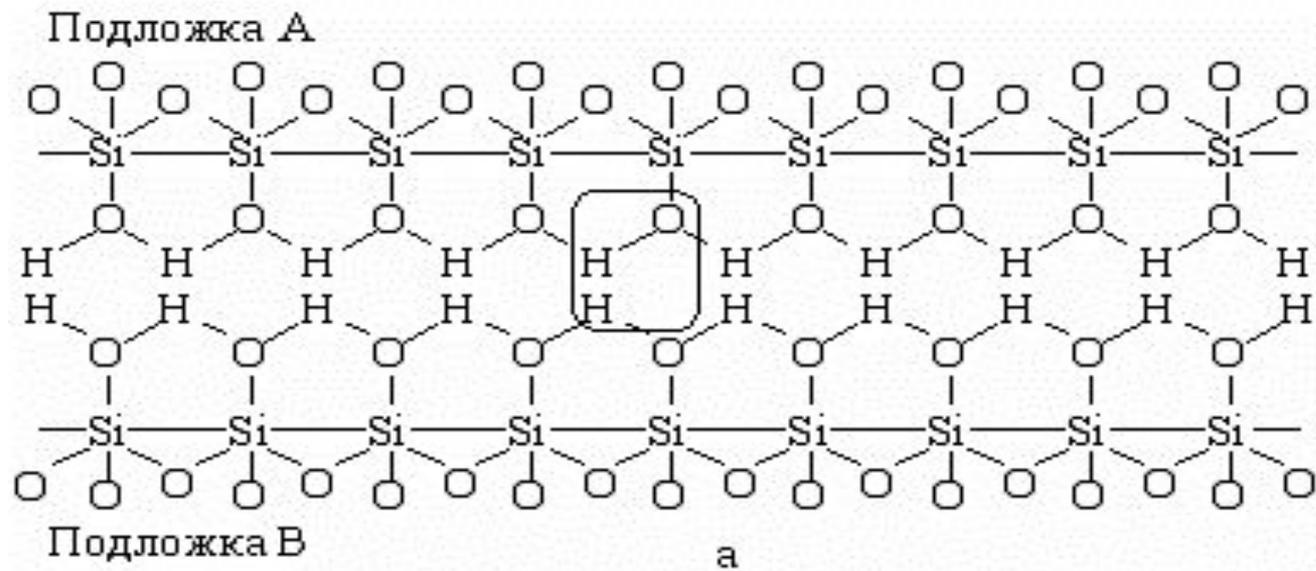
# Бондинг-метод



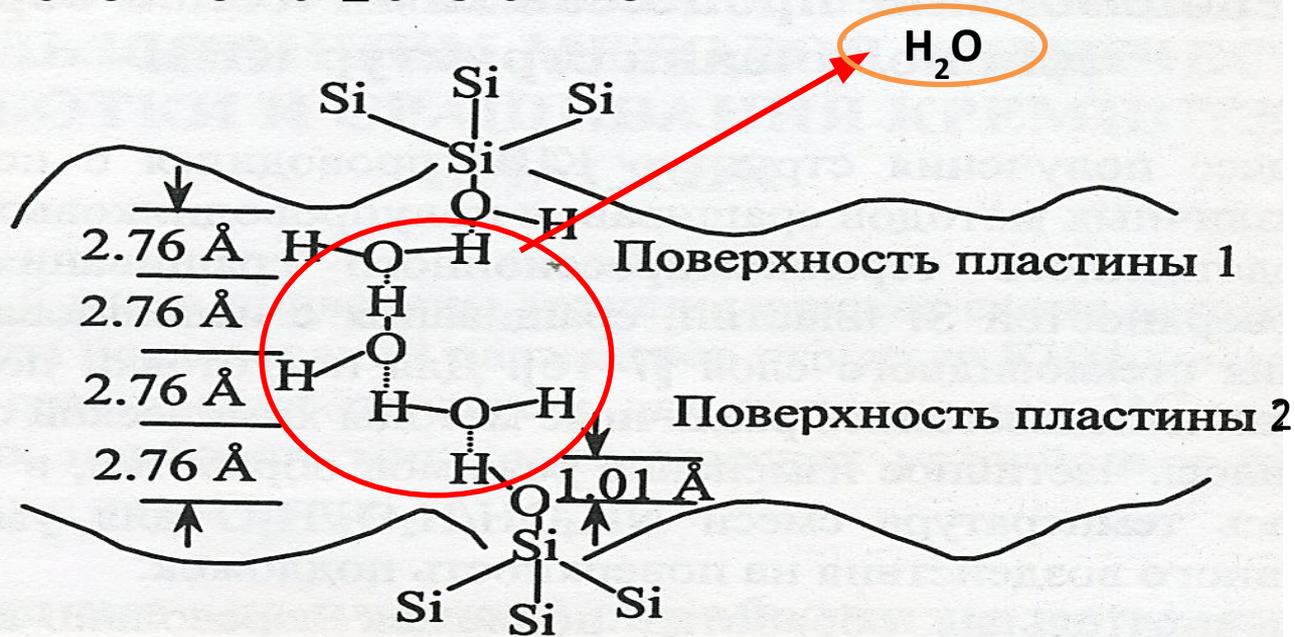
# Поверхность окисленной пластины кремния



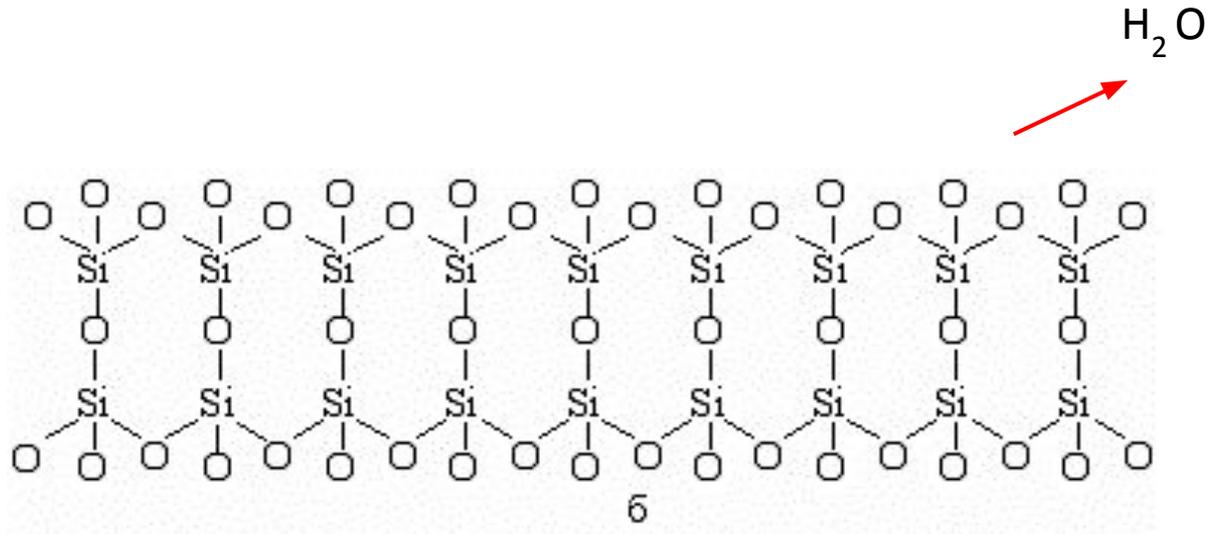
# Механизм гидрофильного бондинга



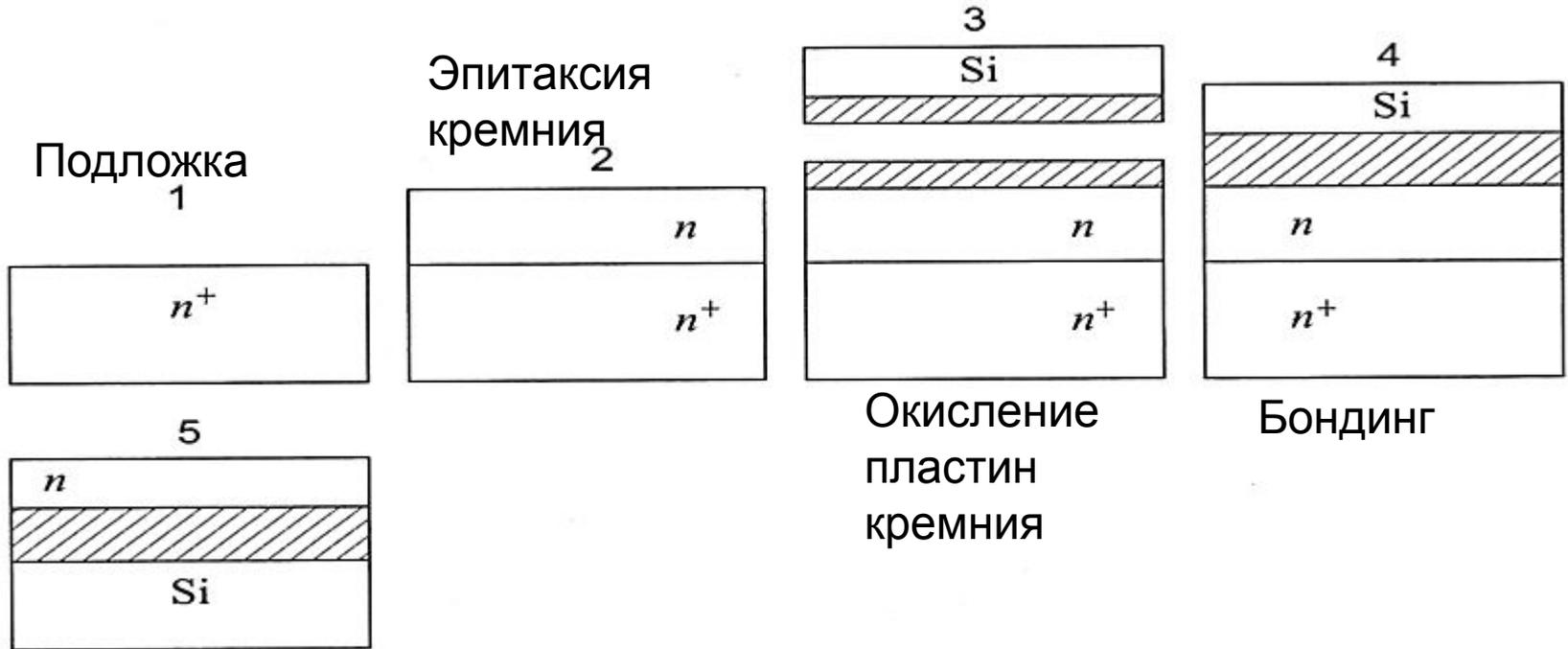
# Механизм гидрофильного сращивания



# Механизм гидрофильного сращивания



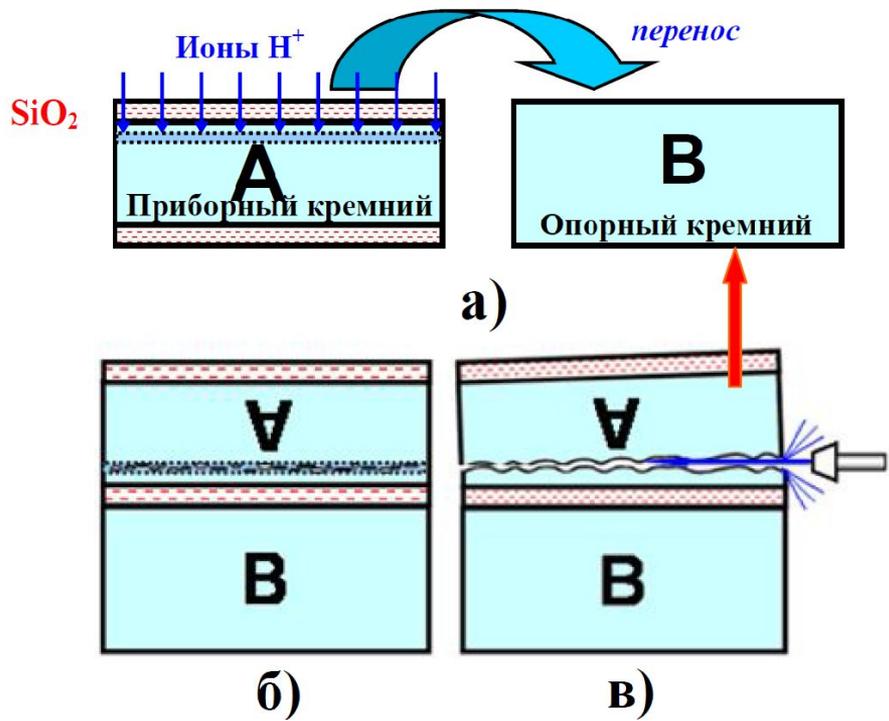
# Метод сращивания со стоп-слоем



Обработка в селективном травителе

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

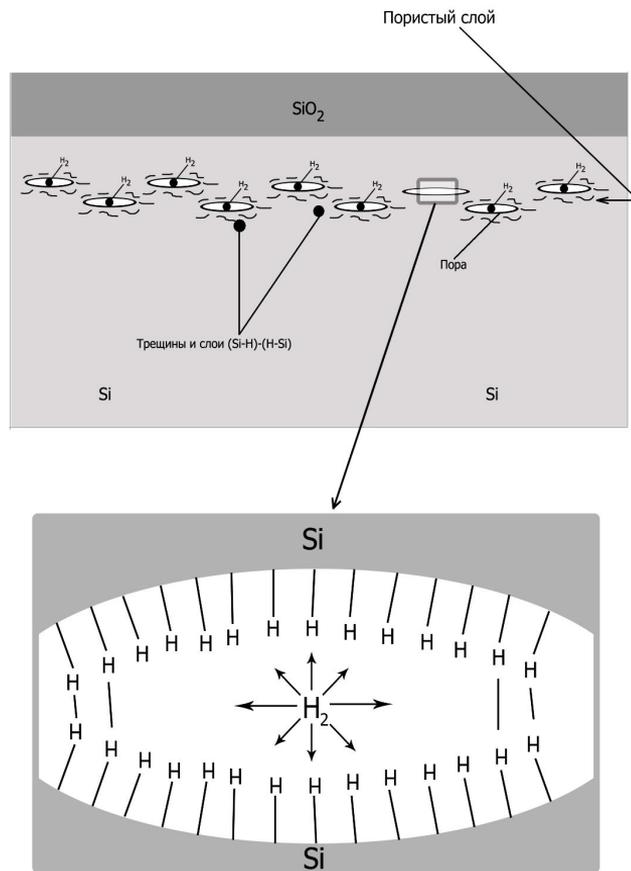
# Smart-cut - метод сращивания пластин кремния



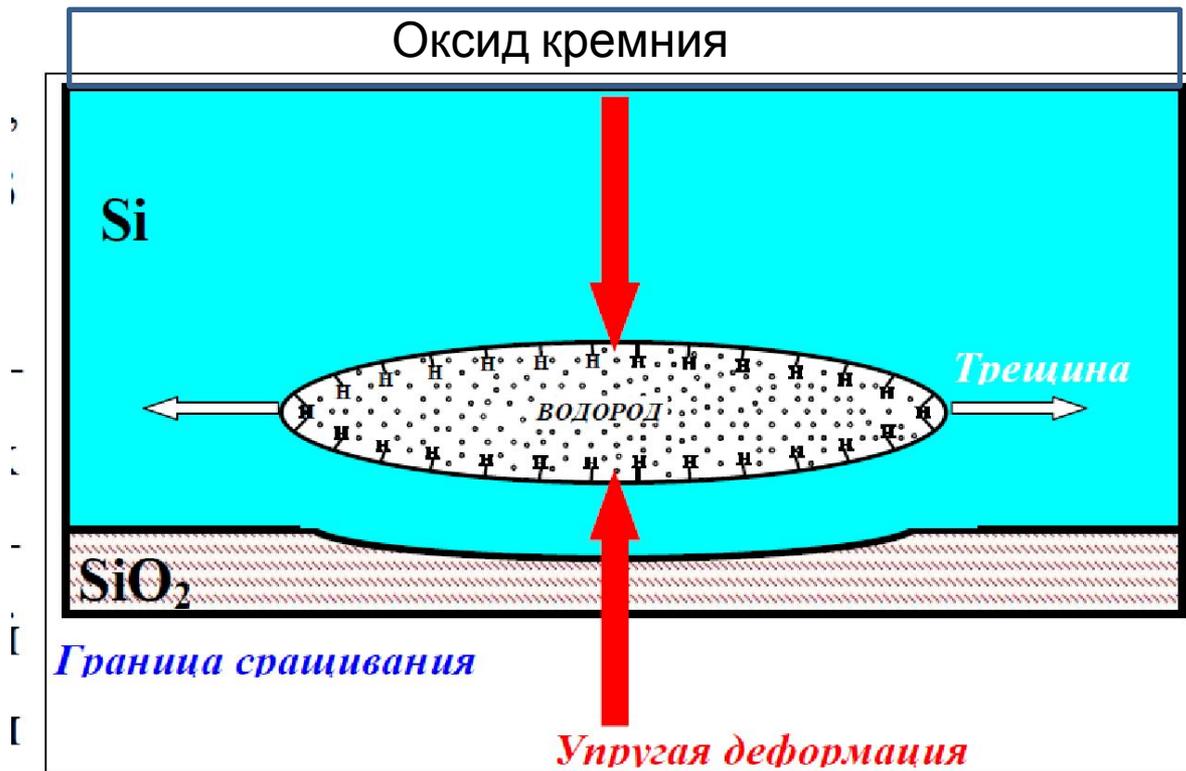
# Smart-cut - метод сращивания пластин кремния



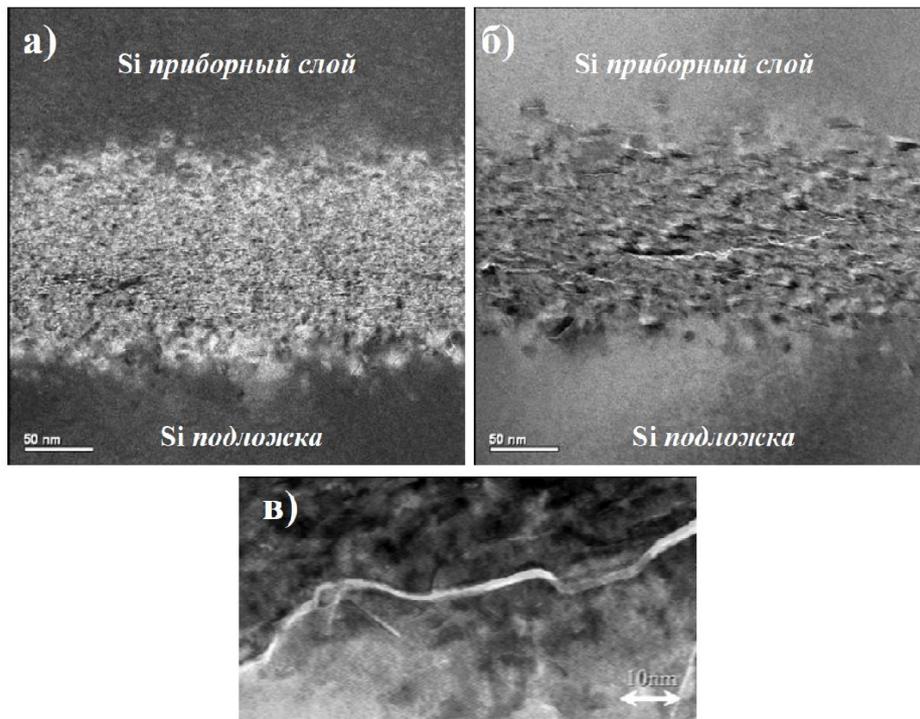
# Образование пузырьков водорода



# Механизм газового расщепления

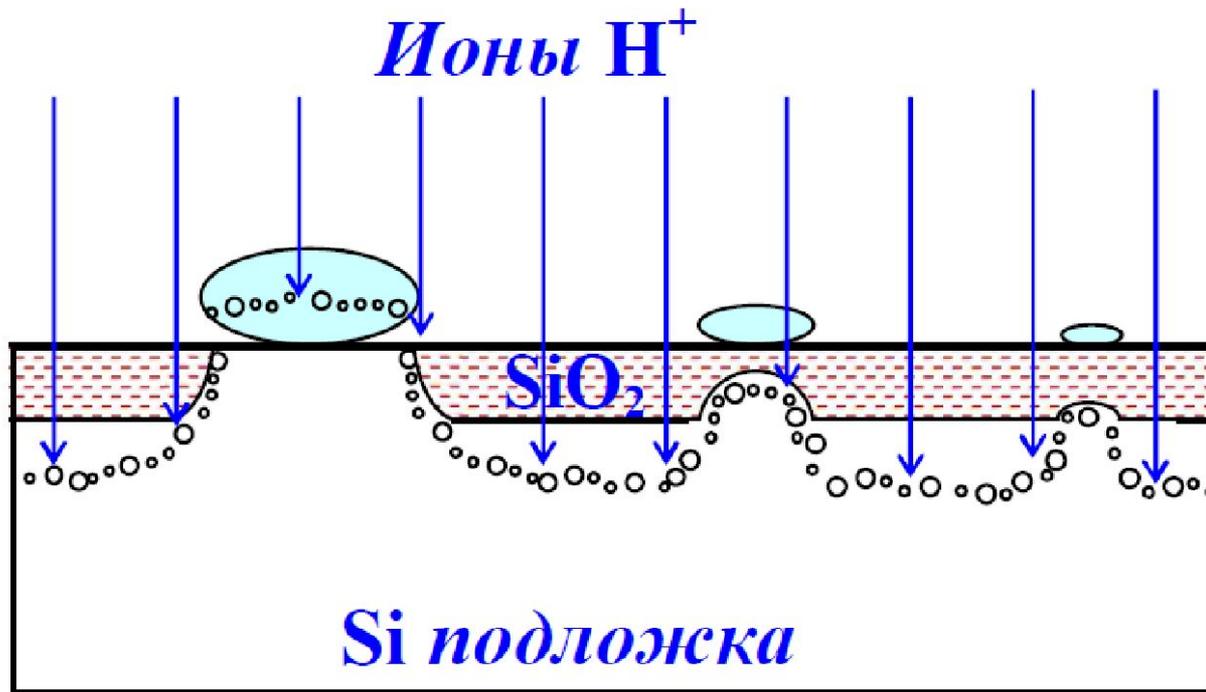


# ПЭМ изображение скрытого дефектного слоя

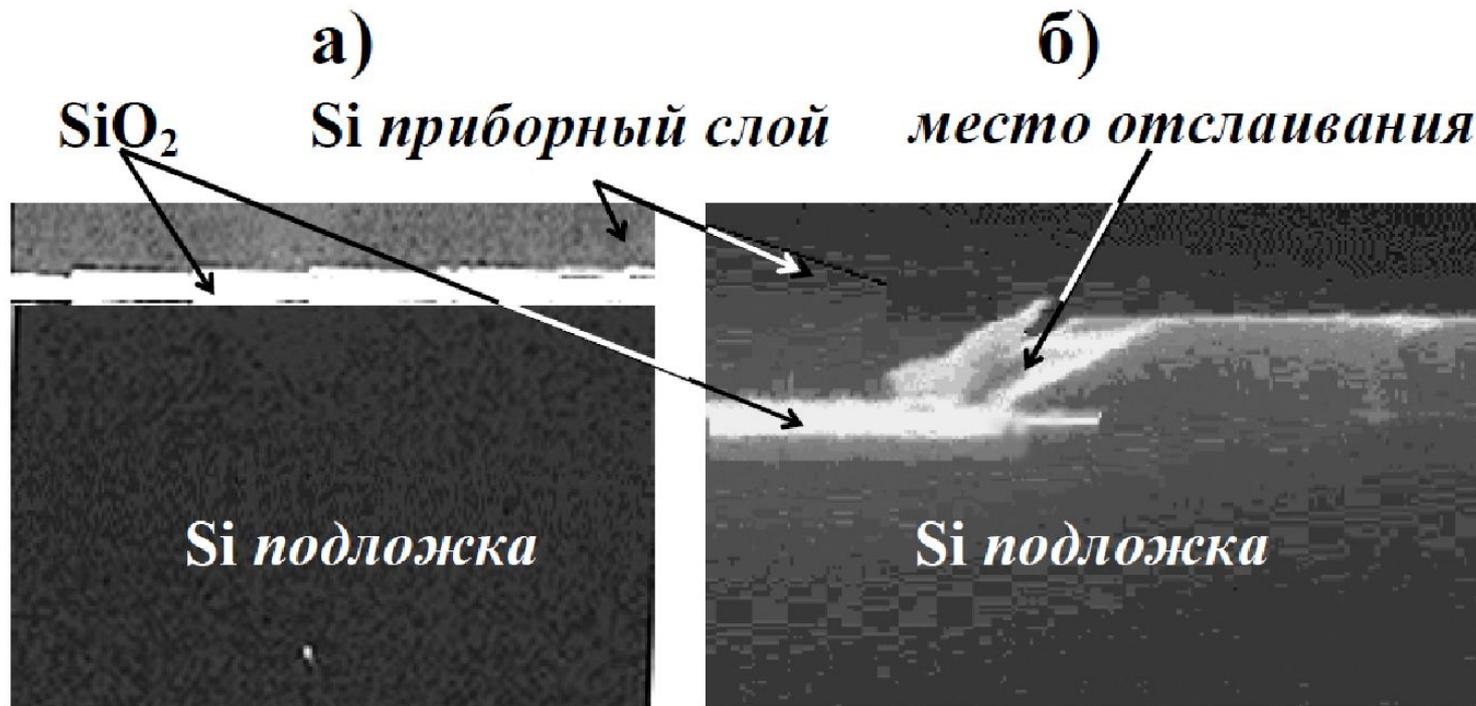


(а) после облучения, (б); после предварительного отжига при 350 °C ;  
( в ) увеличенное изображение микротрещины.

# 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

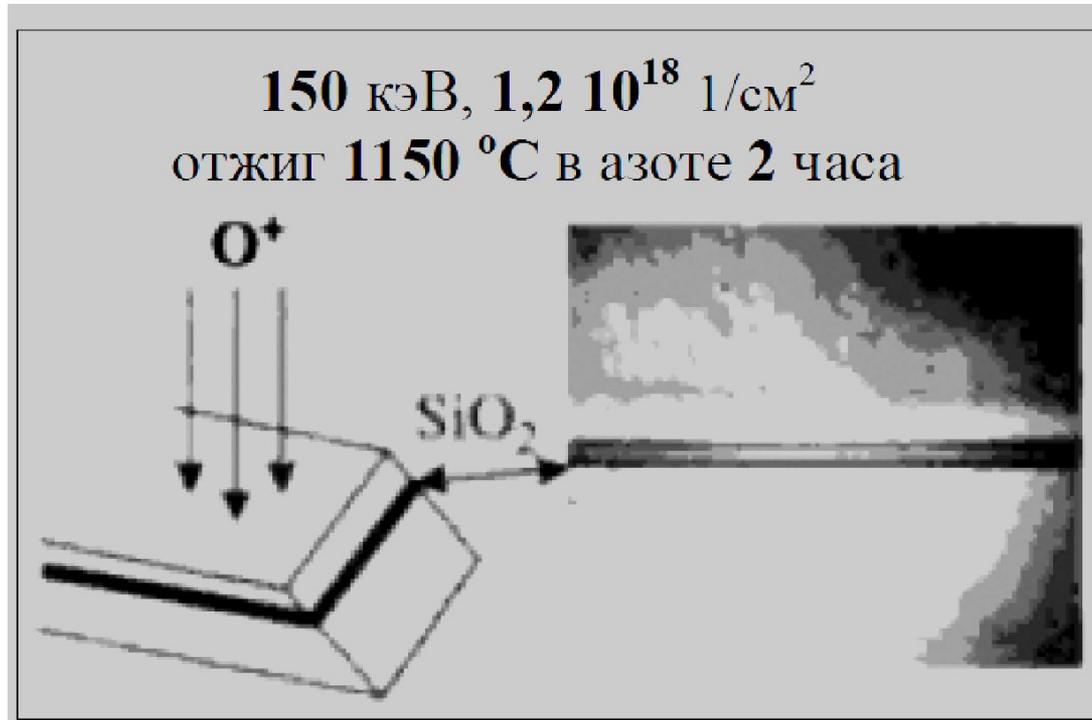
2 – шероховатость поверхностей  $\sim 2 \text{ \AA}$  и гидроксильные группы занимают менее 10% поверхностей

3 – гидроксильные группы покрывают около 100% поверхностей

# Формирование КНИ структуры методом имплантации кислорода ( SIMOX)



# Микрофотография косого шлифа первой SIMOX структуры (1976 год)



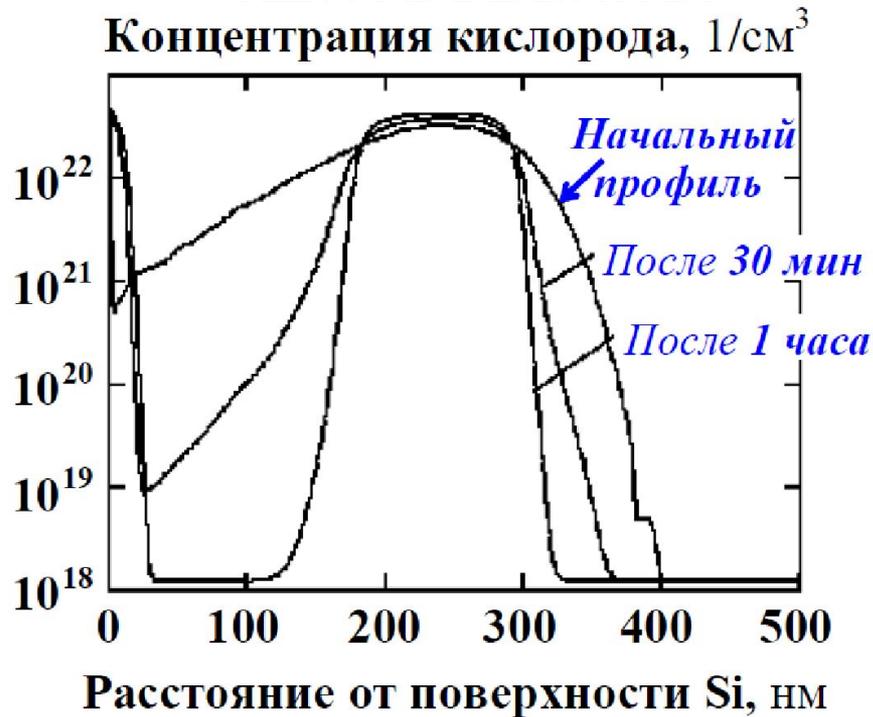
Ток ионного пучка - 100 мкА, для облучения кремниевой пластины диаметром 100 мм дозой  $1,2 \cdot 10^{18}$  O<sup>+</sup>/см<sup>2</sup> потребовалось 65 часов.

# Факторы, влияющие на параметры КНИ-структуры

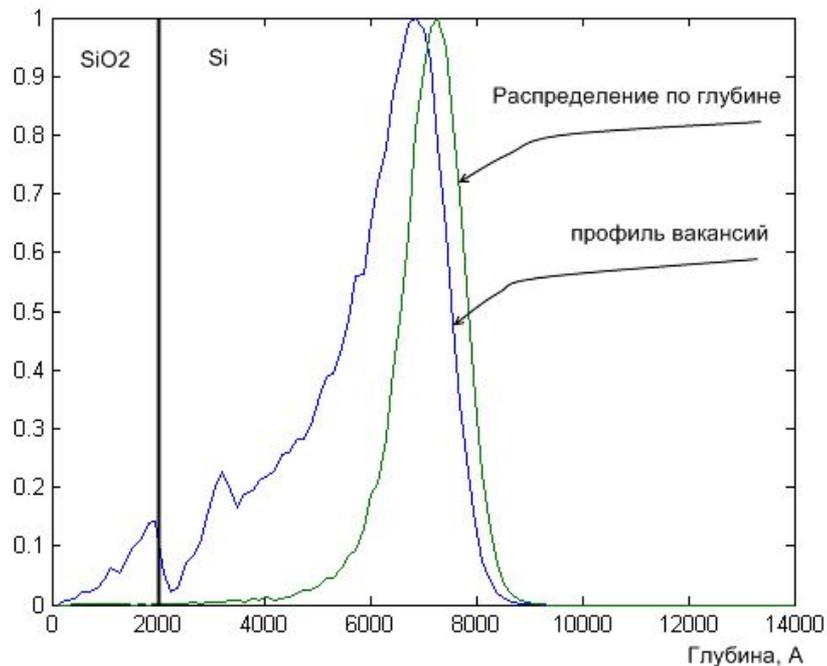
- Доза ионов более  $10^{18}$  см<sup>-2</sup>
- Температура при облучении более 400<sup>0</sup>С
- Плотность ионного тока разогрев, диффузия
- Энергия ионов глубина слоя изолятора
- Постимплантационный отжиг 1300<sup>0</sup>С, часы
- Слой искусственных центров преципитации В, С, Н. N



# Изменение распределения кислорода в процессе термообработки после имплантации (шнурование)

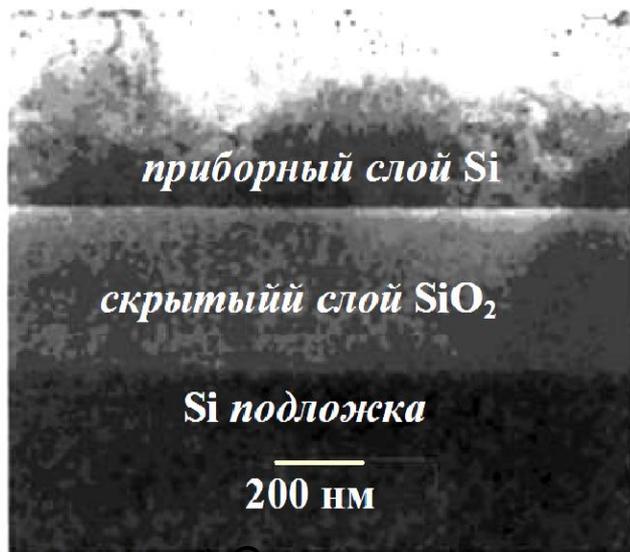


# Влияние искусственных центров преципитации на распределение кислорода – «шнурование»

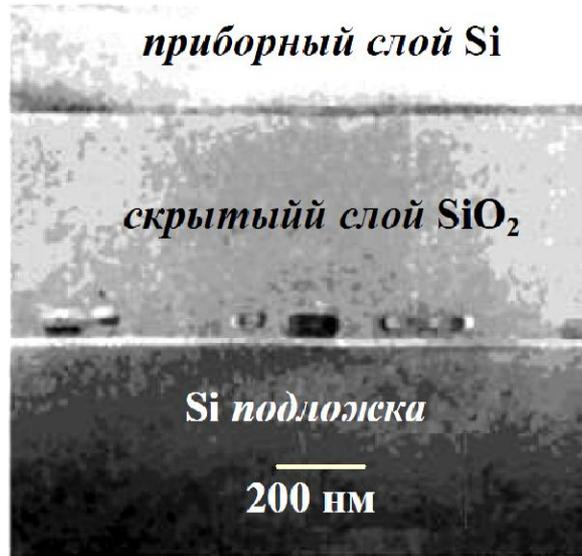


# Поперечное сечение структур КНИ SIMOX, полученное с помощью ПЭМ

а)



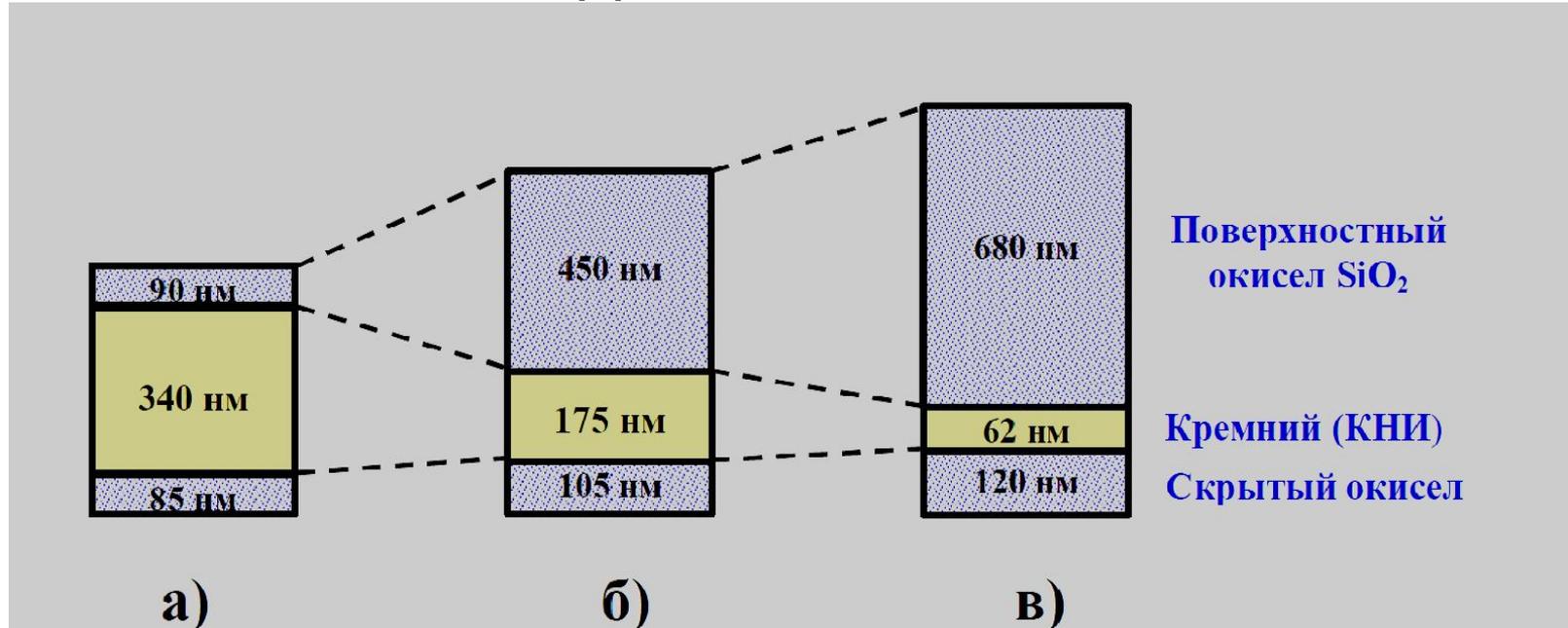
б)



а) Сразу же после имплантации;

б) после высокотемпературного отжига.

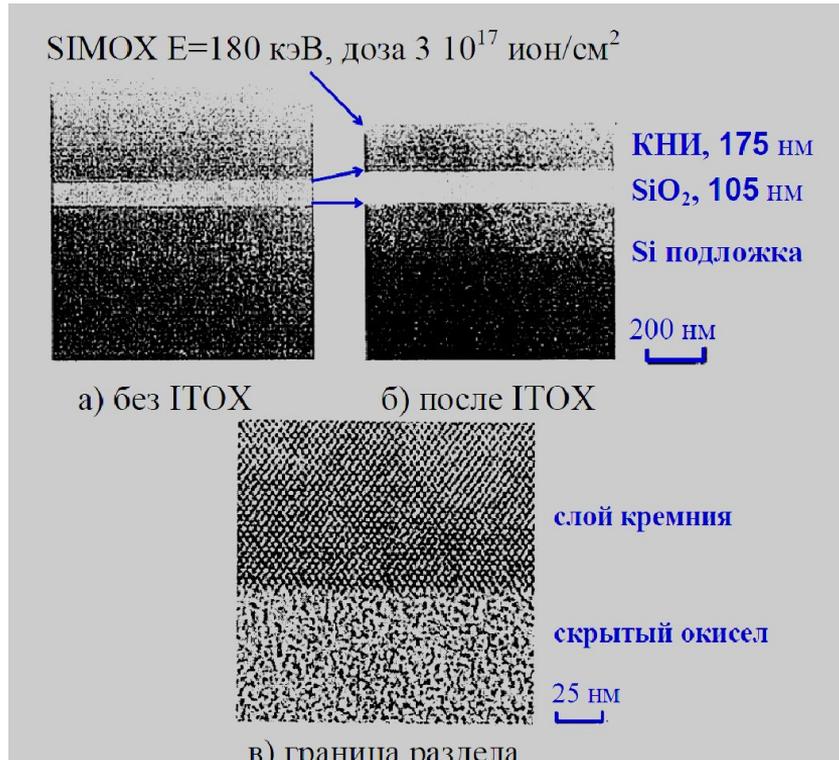
# Структура ITOX–SIMOX подложки на различных стадиях технологии



а) ИИ кислорода: 180 кэВ,  $3-4,5 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>, 550–650 °С

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

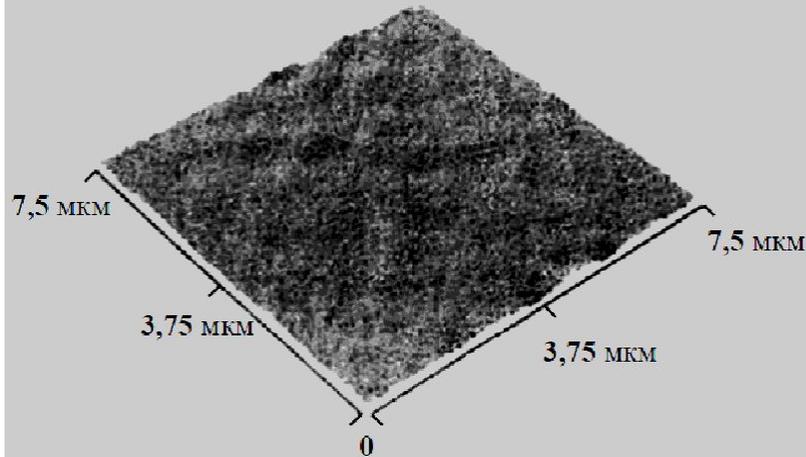
# ПЭМ–изображения поперечного сечения КНИ ITOX–SIMOX - структуры



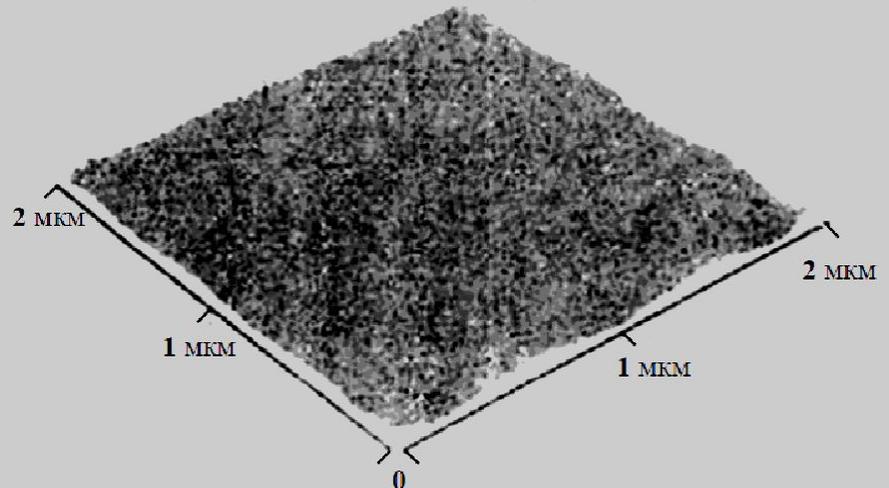
- а) сразу после имплантации;
- б) после отжига при  $1350^{\circ}\text{C}$ ;
- в) увеличенное изображение границы раздела КНИ/SiO<sub>2</sub>

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

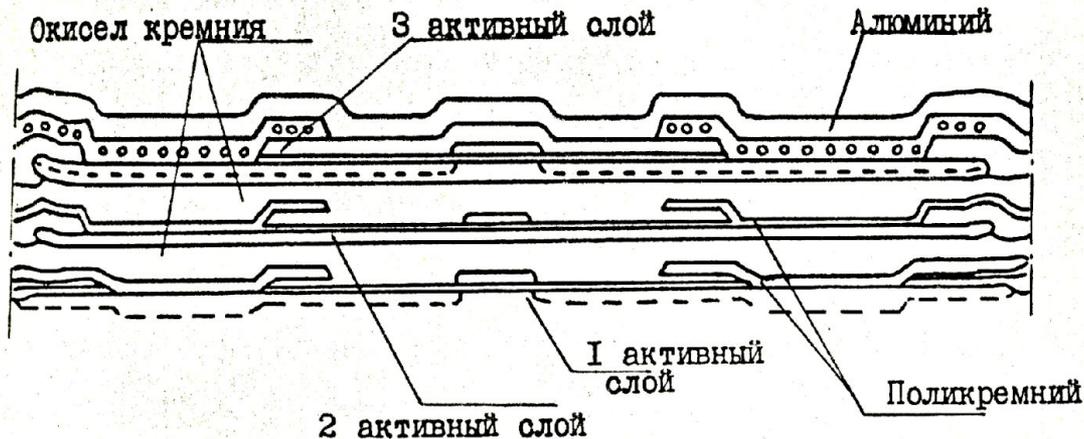
а) ПОВЕРХНОСТЬ КРЕМНИЯ  
среднеквадратичный разброс 0,25 нм



б) ГРАНИЦА РАЗДЕЛА Si/SiO<sub>2</sub>  
среднеквадратичный разброс 0,1 нм

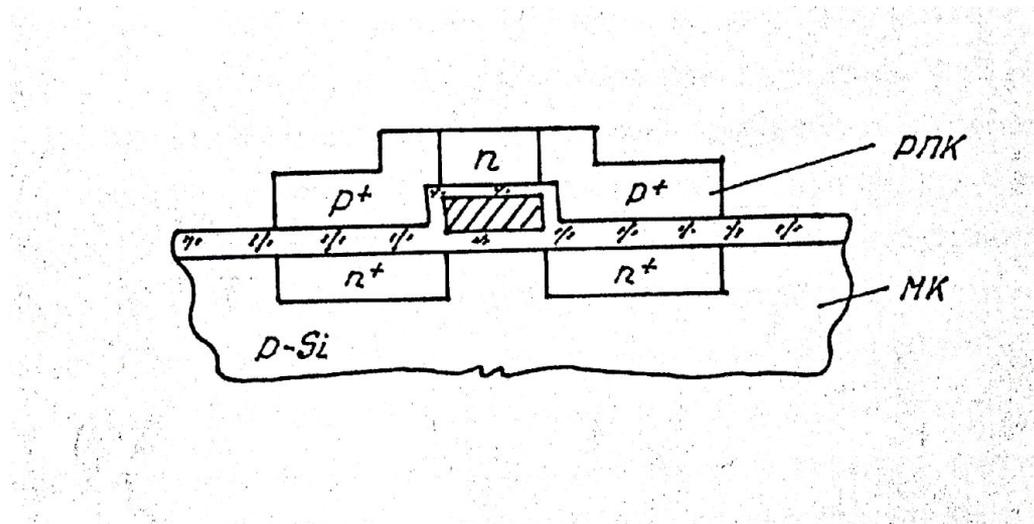


# Трехмерная интегральная схема на основе КНИ - структуры

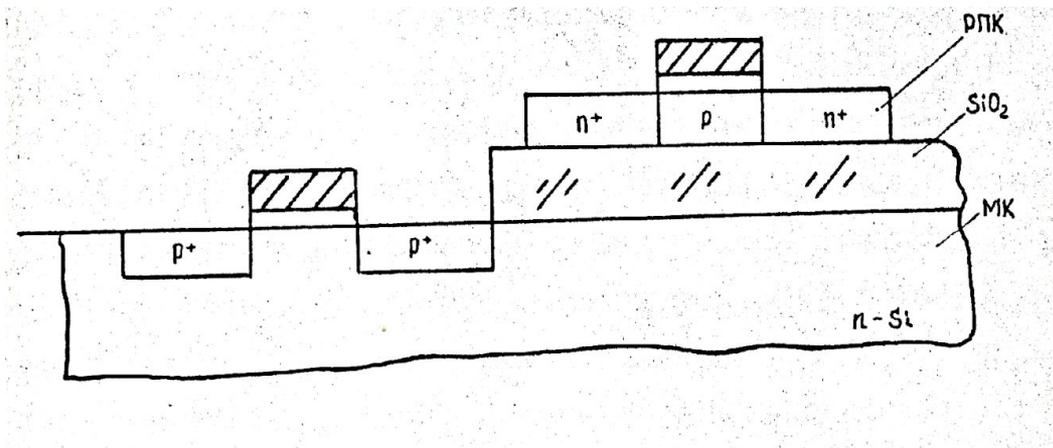


Бондинг и SIMOX не применимы из-за высокотемпературных обработок!

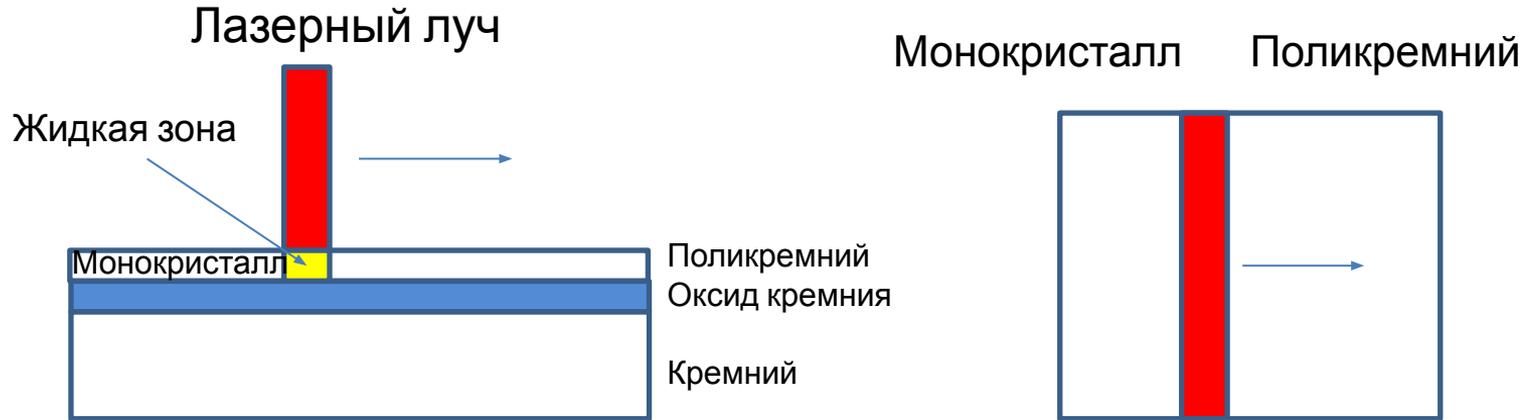
# Трехмерная КМОП –структура этажерочного типа



# 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/см<sup>2</sup>

Длина волны излучения - менее 0,8 мкм

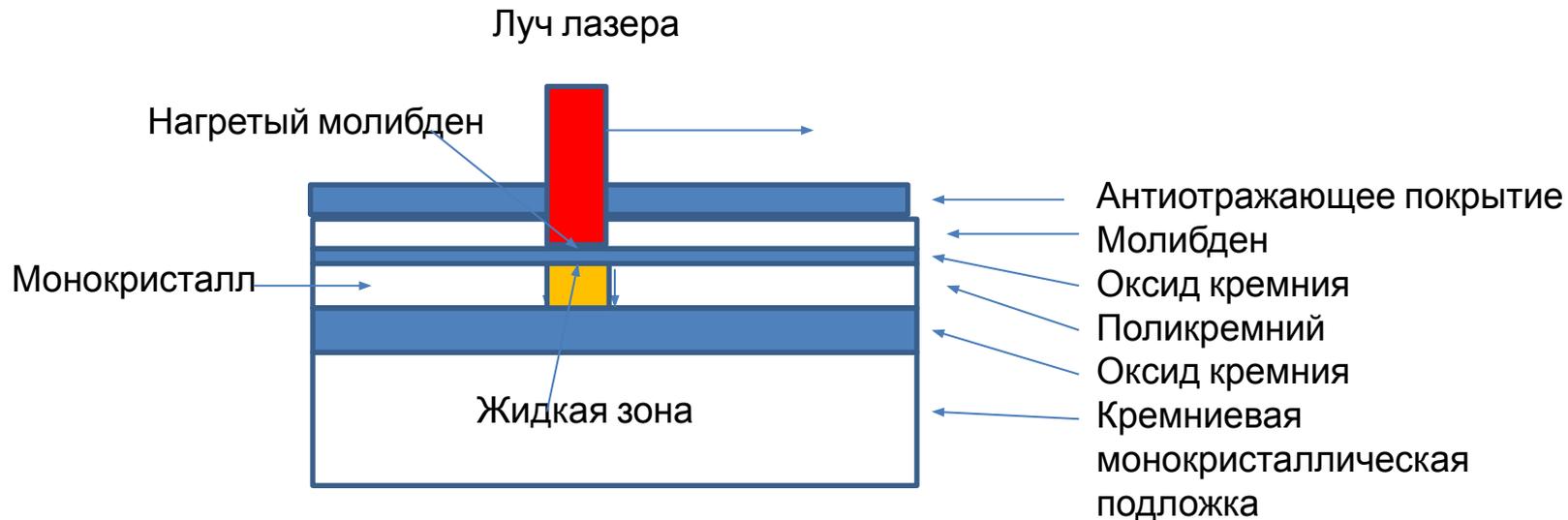
Непрерывное действие

Высокая стабильность величины мощности излучения при обработке пленки поликремния

## **Промышленные лазеры непрерывного действия:**

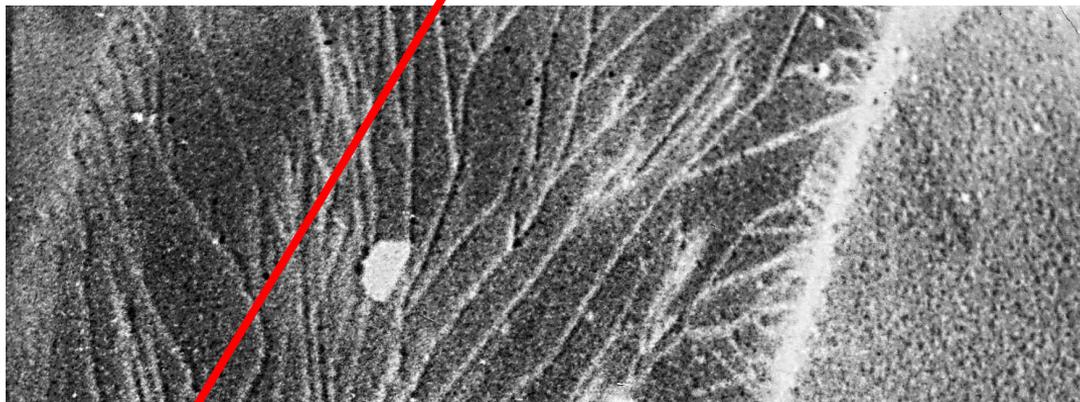
1. Аргонный газовый лазер ( 0,5 мкм, 250 Вт, **невысокая стабильность**)
2. Твердотельный на основе иттрий-алюминиевого граната ( **1,06 мкм**, высокая стабильность , до 250 Вт )

# Косвенный лазерный нагрев (КЛН)



# Структура пленки кремния после рекристаллизации

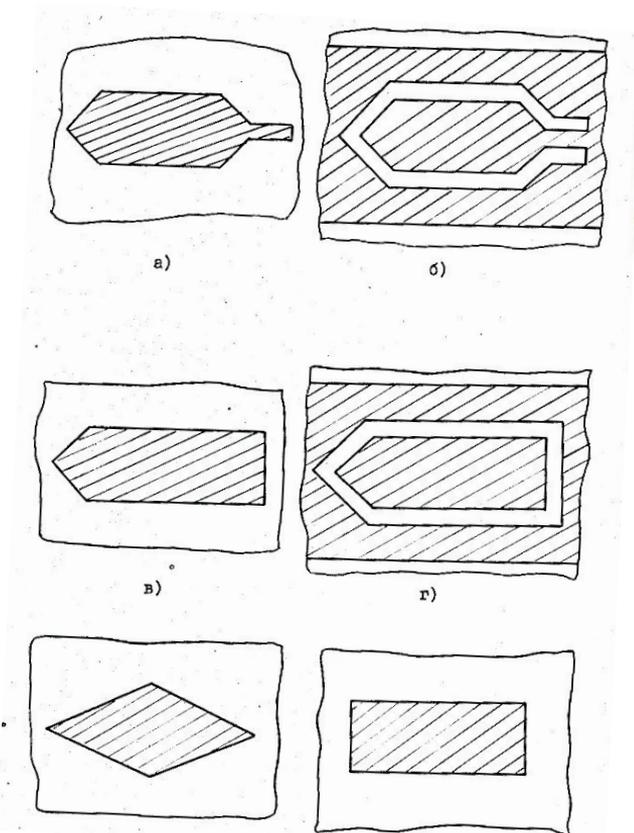
Направление движения луча лазера



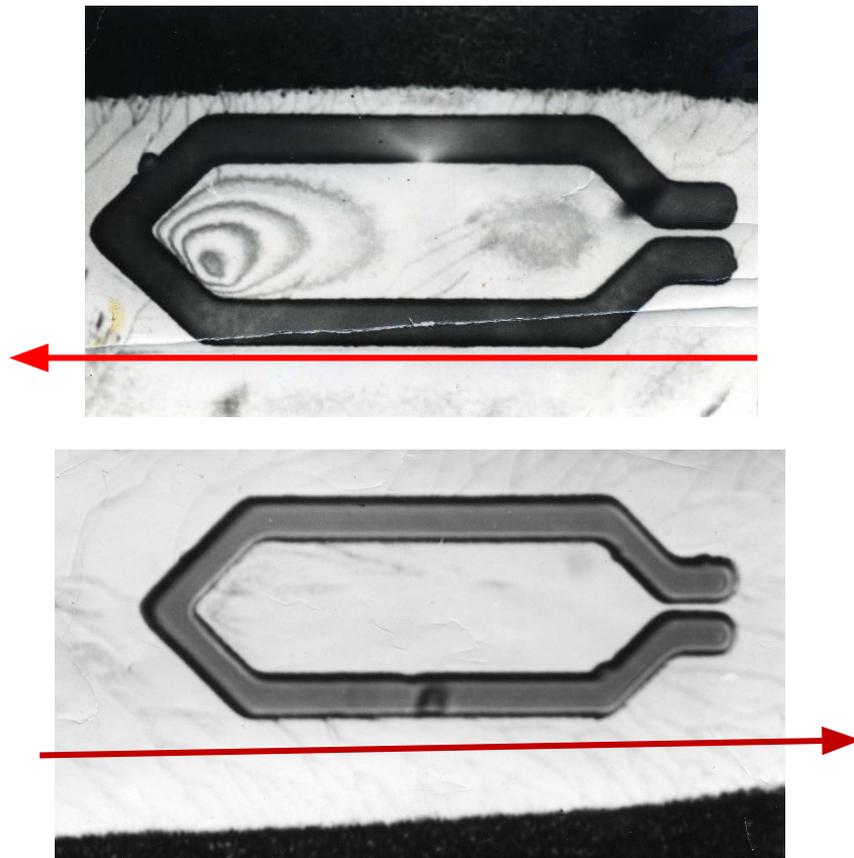
Крупноблочная структура

Поликремний

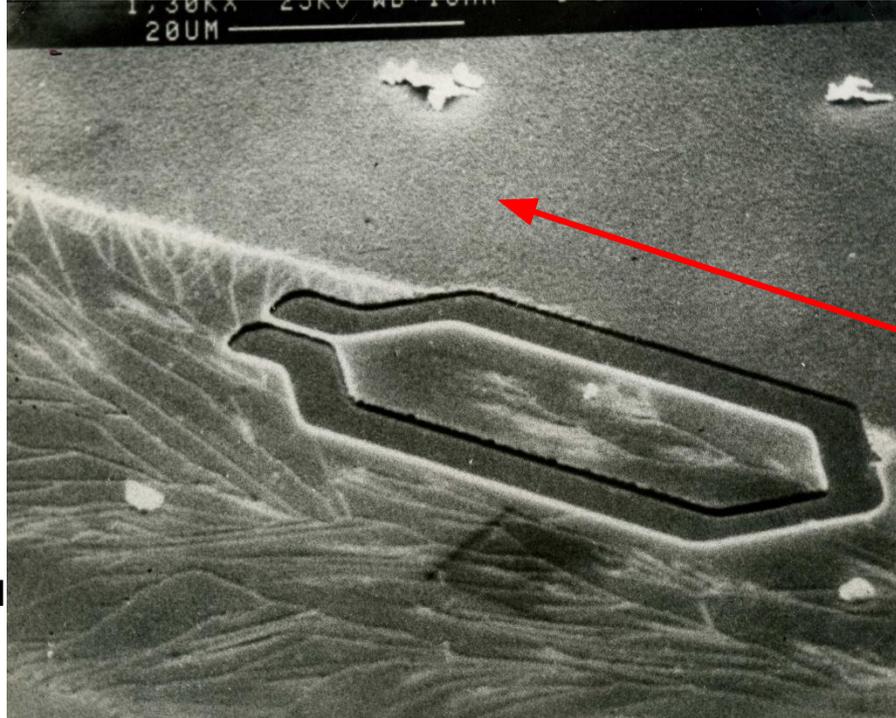
# Конфигурации островков из поликремния



# Влияние направления движения лазера на равномерность толщины пленки кремния



# Результат ZMR обработки пленки поликремния



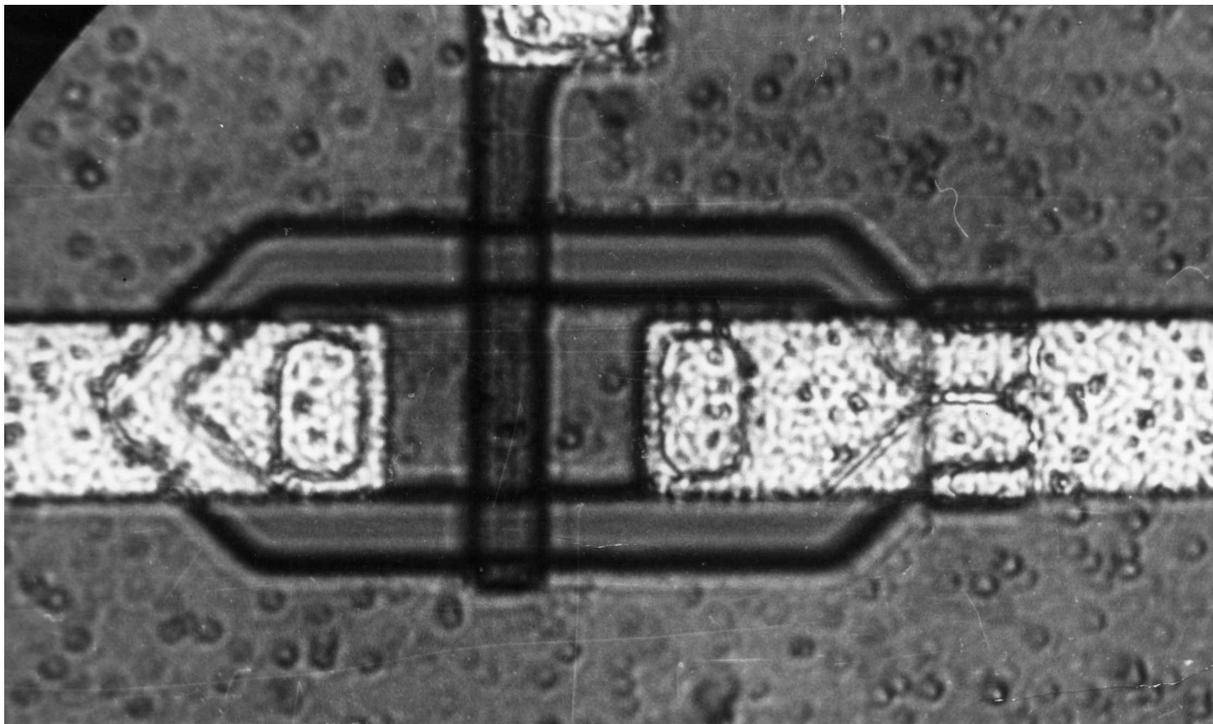
Поликремний

Направление  
движения луча  
лазера

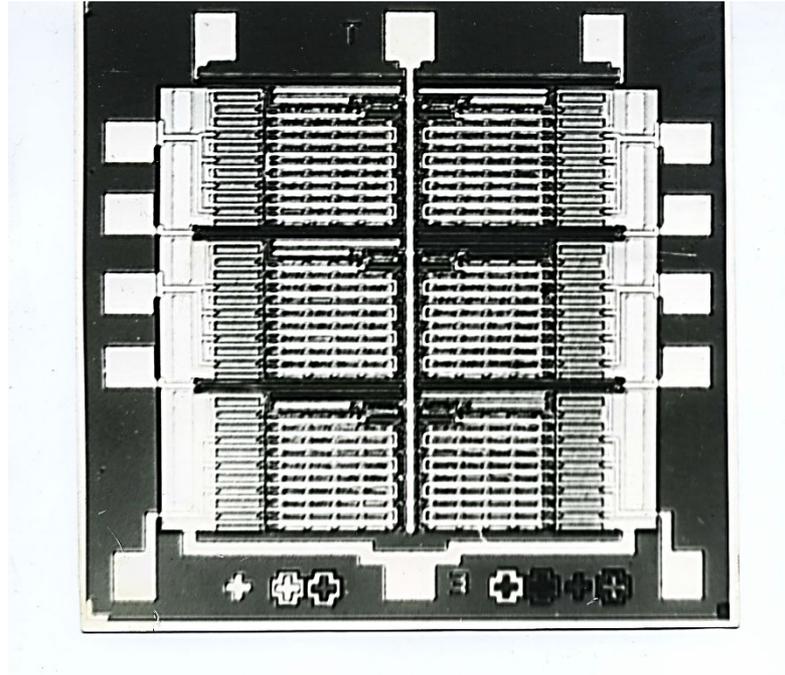
Островок  
монокристалл  
кремния

Крупноблочная  
структура

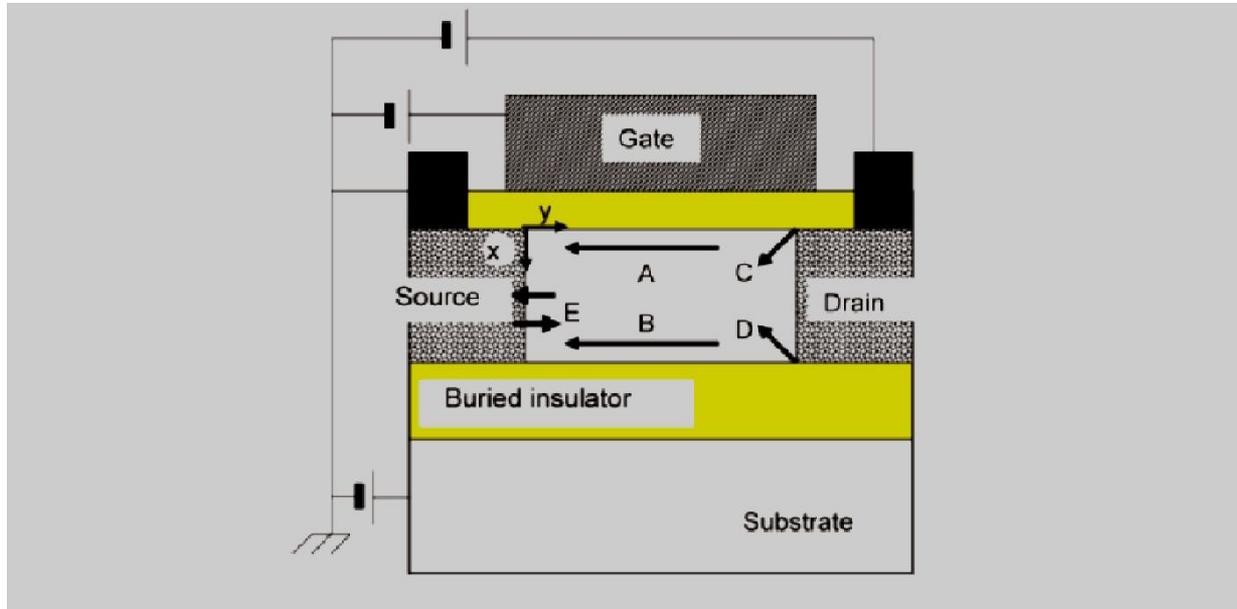
# КНИ МОП - транзистор, сформированный ZMR - процессом



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

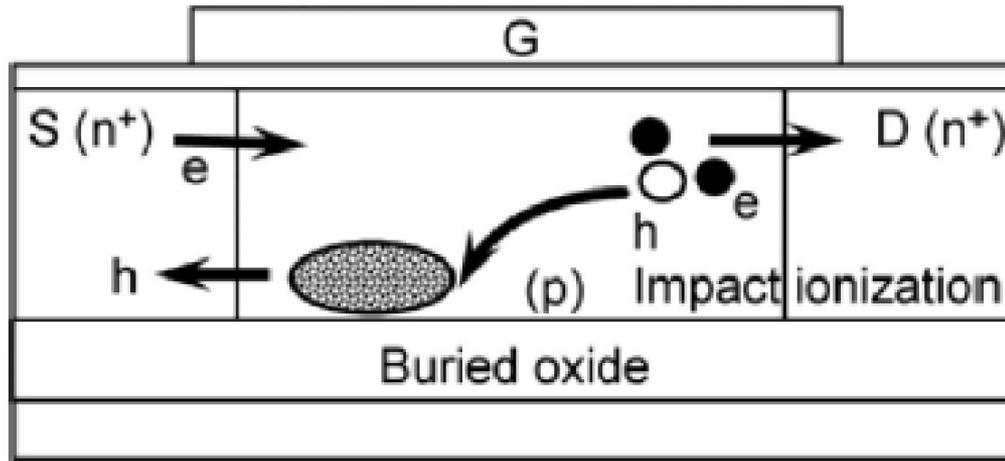


# Токовые потоки в КНИ МОП транзисторе

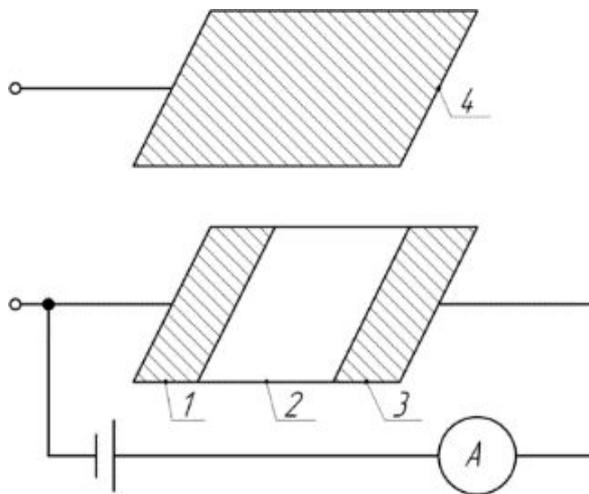


A- нормальный верхний кана,, B – нижний канал C - туннельный ток сверху, D - туннельный ток снизу, E - инжекция паразитного биполярного транзистора..

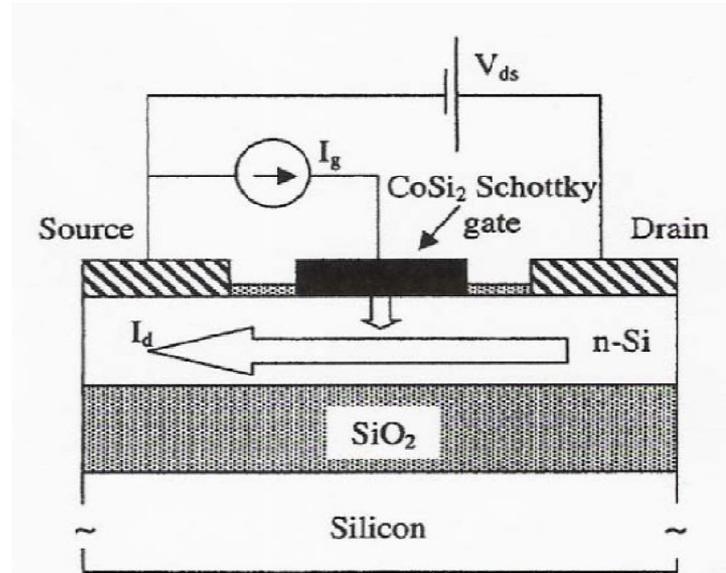
# Биполярный эффект в КНИ МОП транзисторе



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

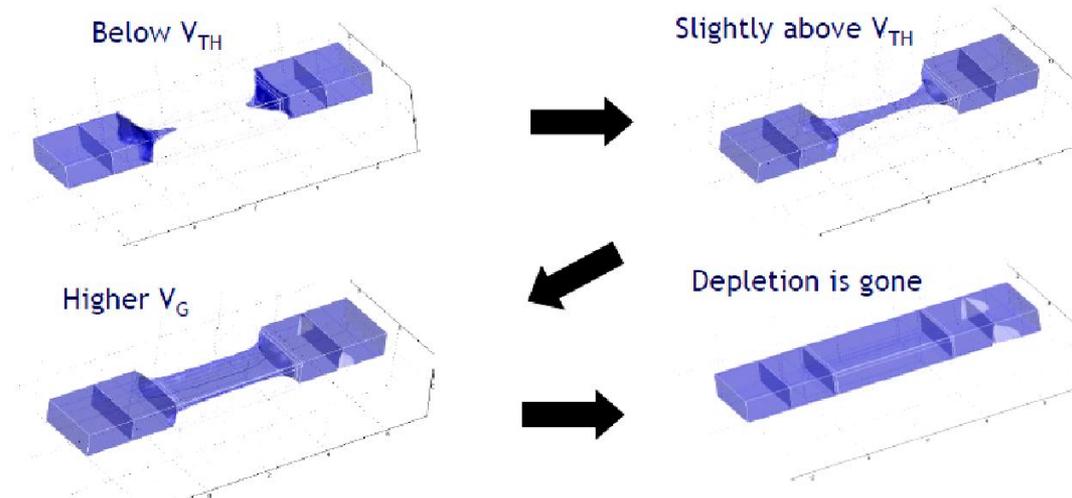


# Принцип работы беспереходного ( БПТ) КНИ МОП - транзистора

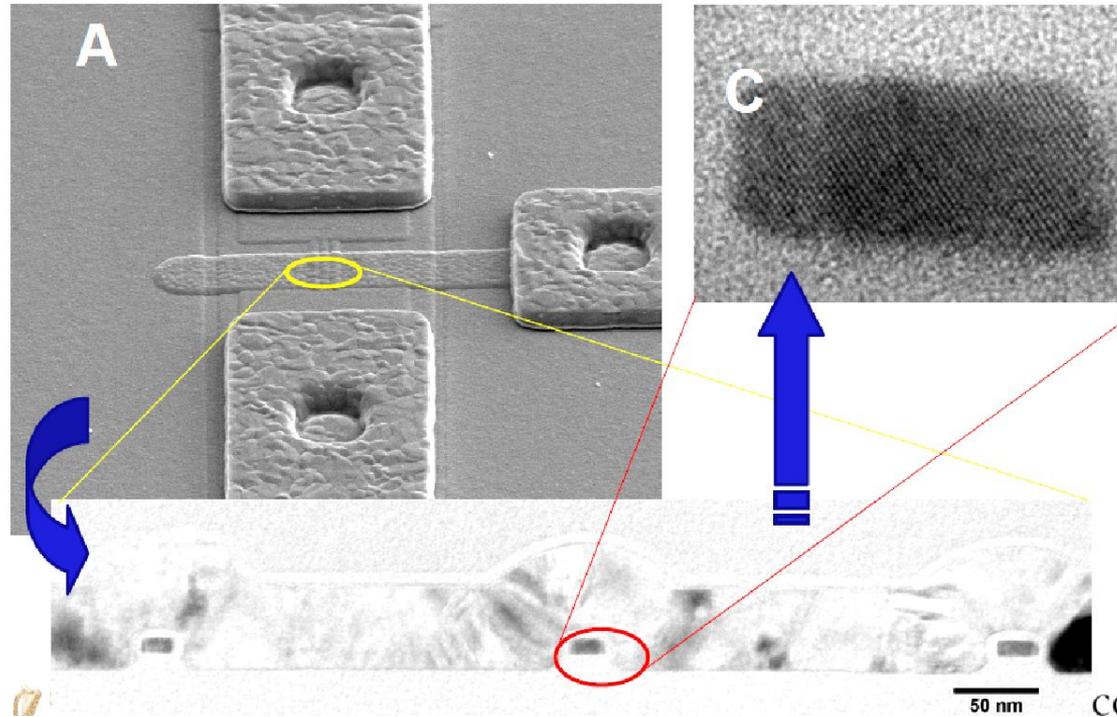


# Изменение области обеднения в БПТ

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

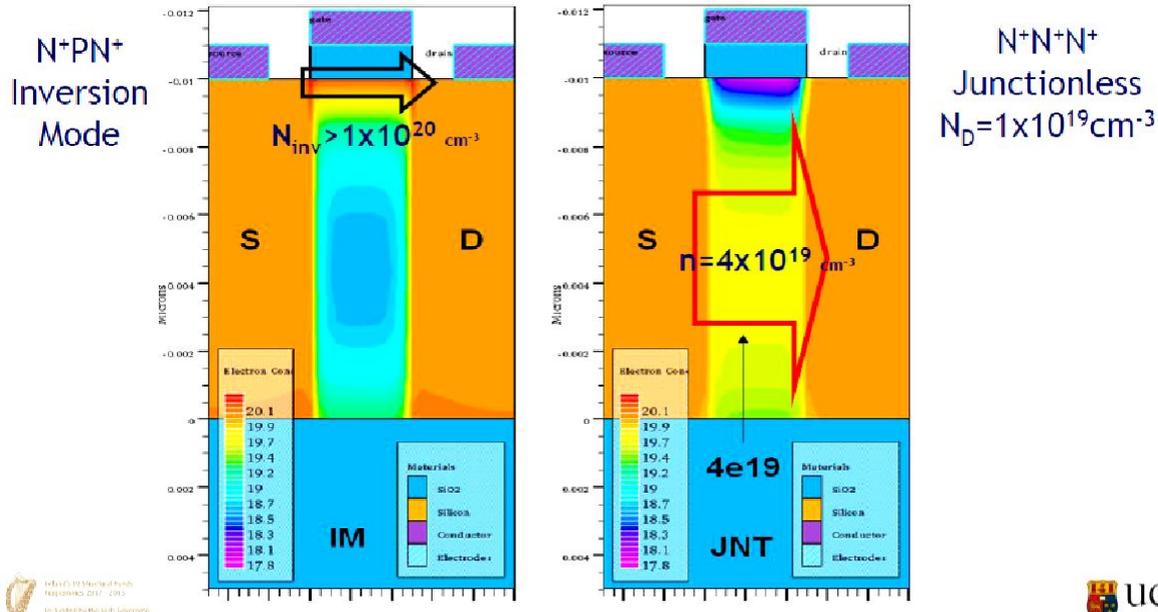


# Микрофотографии КНИ МОП БПТ

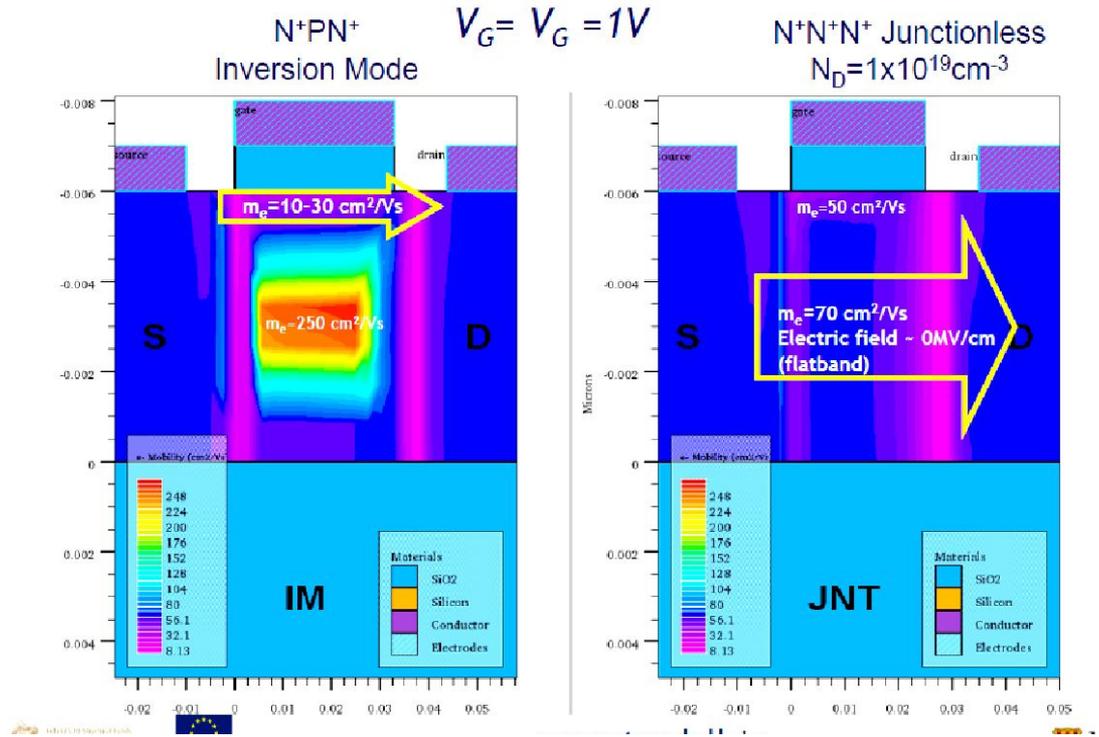


# Области канала в инверсионном и БП транзисторах

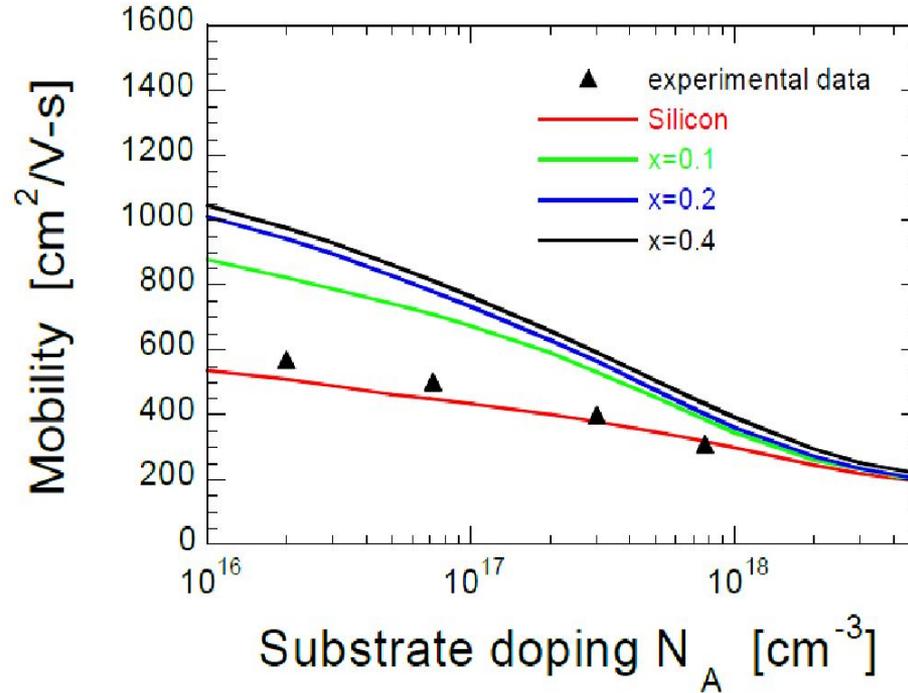
Channel in Multigate FETs @  $V_G = V_G = 1V$



# Подвижность носителей в разных областях инверсионного и БП транзисторов

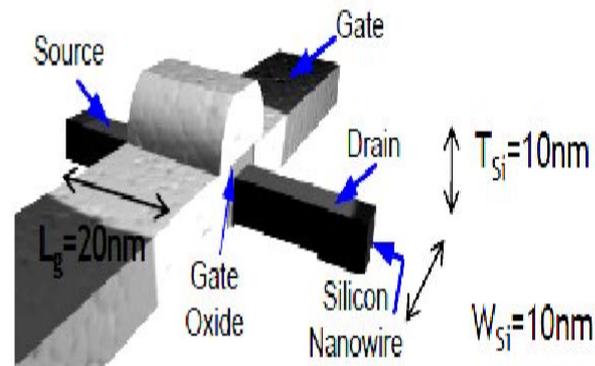


# Зависимость подвижности электронов от концентрации примеси в кремнии



# «Нанопроволочный» КНИ МОП БПТ

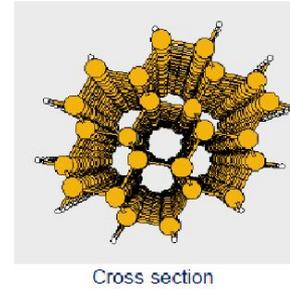
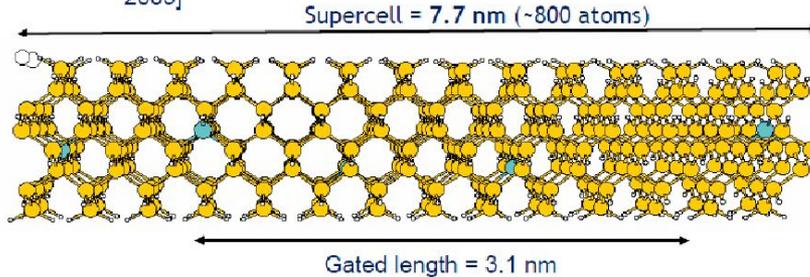
Doping concentration [ $\text{cm}^{-3}$ ]	Statistical number of doping atoms in the channel
$1\text{e}15$	0.002
$1\text{e}18$	2
$1\text{e}19$	20



# «Нанопроволочный» КНИ МОП БПТ

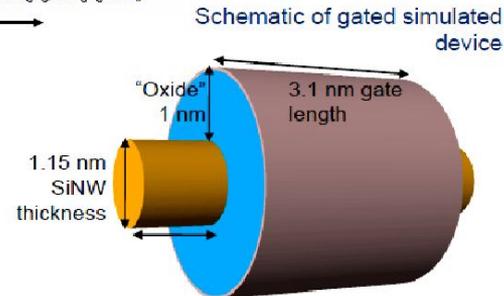
- Relaxed H-saturated [110] SiNW (below & right)

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



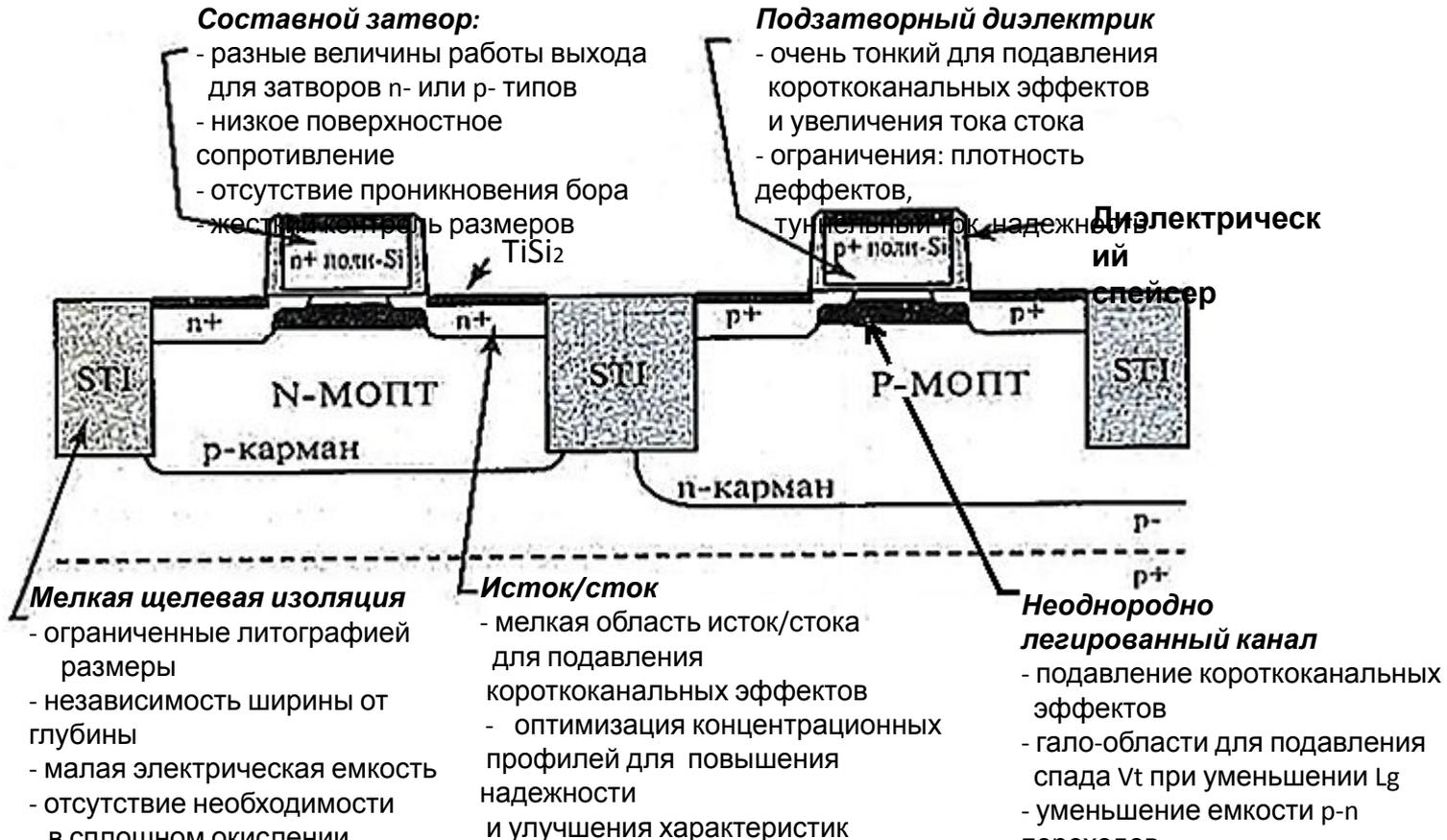
- Simulated GAA junctionless transistor (right):

- "Oxide" thickness 1 nm – continuum dielectric,  $\kappa$
- 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 p-n 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