

# **ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ**

# Достоинства ионного легирования

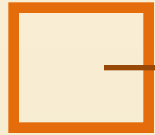
- точная дозировка примеси (теоретически – 1%, практически – 5%);
- высокая чистота;
- расширенная возможность локального легирования (широкий круг маскирующих материалов, меньше боковое легирование);
- можно легировать через покрытие;
- возможность получения управляемого профиля распределения – вплоть до формирования захороненного слоя.
- возможность создания мелких переходов (20 нм, около 40 атомных слоев)
- быстрый процесс;
- можно проводить при комнатной температуре;
- ИЛ легко управлять путем изменения ускоряющего напряжения, плотности ионного пучка, угла наклона пучка, времени облучения пластин, а в случае обработки сфокусированным пучком и скорости его сканирования

# Схема установки ионного

## легирования

$$v = \sqrt{2Z_1U/M_1} \quad r = r_0 \sqrt{2M_1U/Z_+Z_1} \cdot BB$$

ИСТОЧНИК  
ИОНОВ



ускоритель

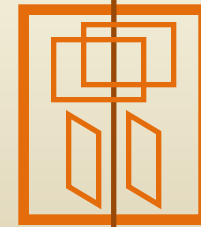


Анализатор  
ионов по  
массе



ускоритель

интегратор  
заряда



ОТКЛОНЯЮЩИЕ  
ПЛАСТИНЫ

ПЛАСТИНЫ

Энергия ионов

от десятков

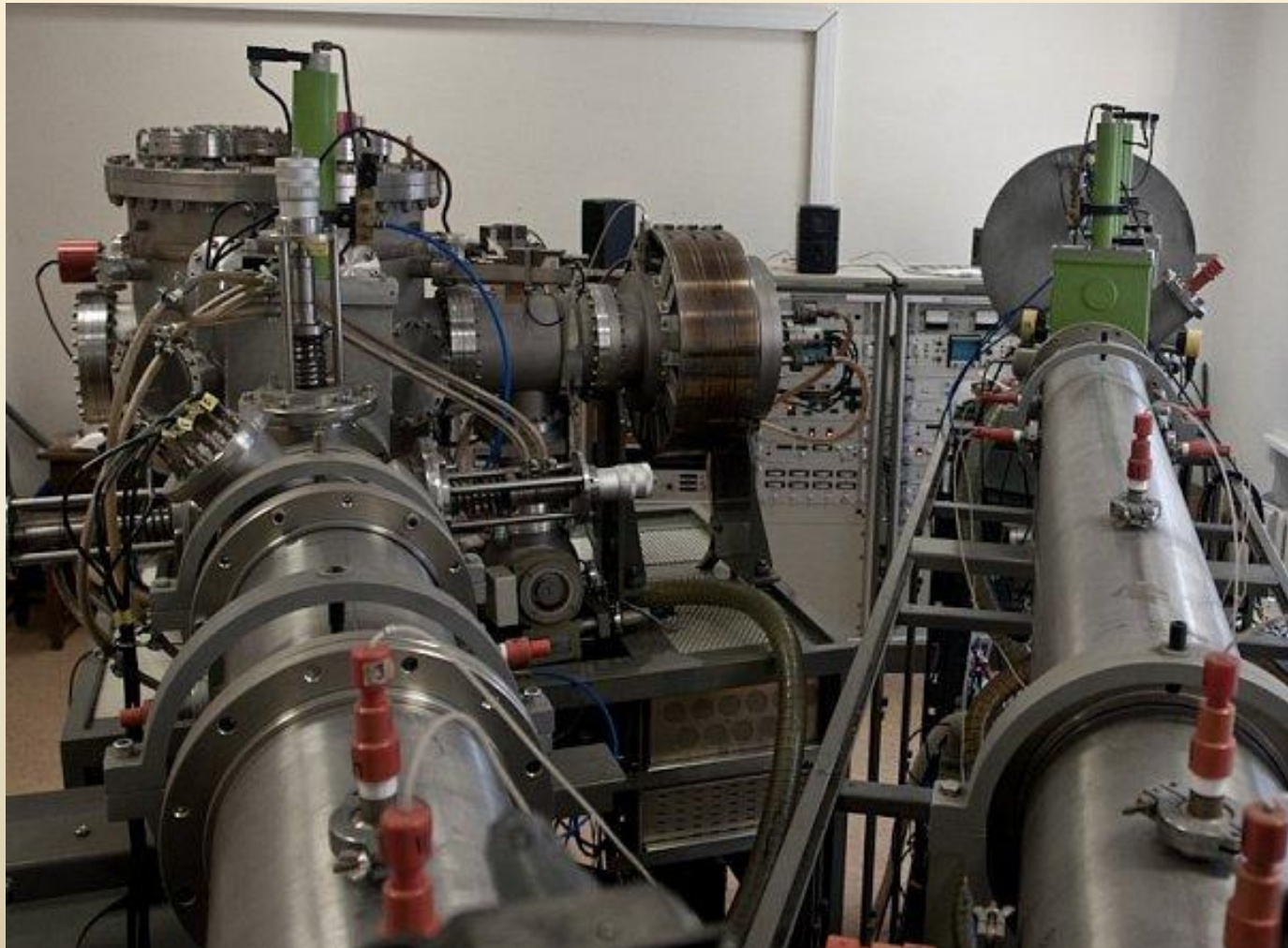
килоэлектронвольт

до единиц

мегаэлектронвольт

вакуум порядка  $10^{-4}$  Па

# Оборудование ионной имплантации



# Основные параметры ионного легирования

**Энергия ускоренных ионов.** Ион с зарядом  $q$  [Кл], под действием разности потенциалов [В], приобретает энергию,  $E_0 = qU$  [Дж].

**Доза облучения** – это количество частиц; бомбардирующих единицу поверхности за данное время. Доза облучения определяется плотностью ионного тока  $j$  [А/м<sup>2</sup>] и длительностью облучения  $t$  [с]:

$$D = q \int_0^{\infty} N(x) dx = \int_0^{\infty} \frac{I}{S} dt \approx jt \text{ [мкКл/ см}^2\text{]}.$$

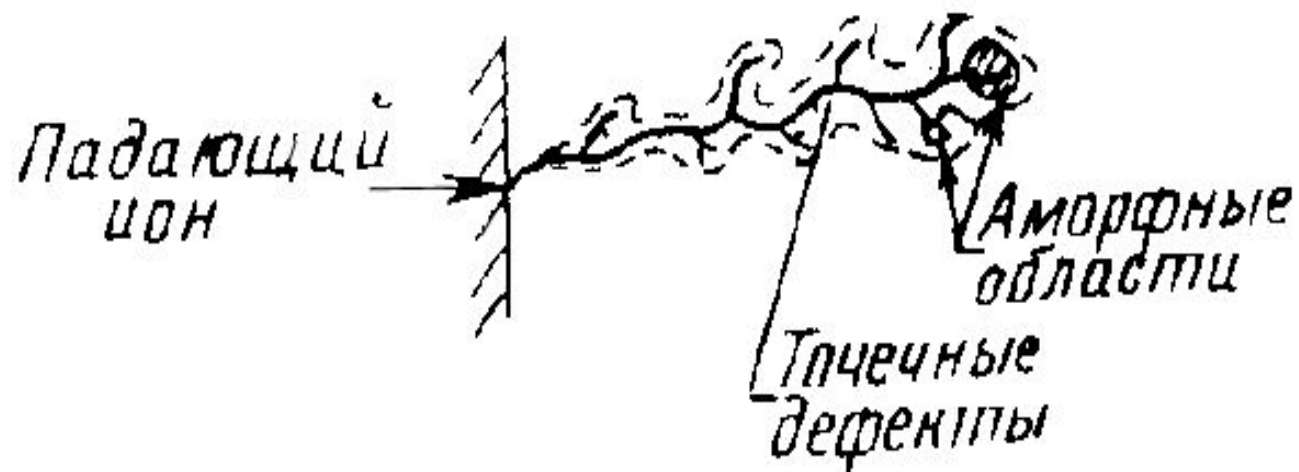
Чтобы выразить дозу в количестве частиц, внедренных на единице поверхности, величину делят на заряд одной частицы:

$$Q = D/q = jt/q$$

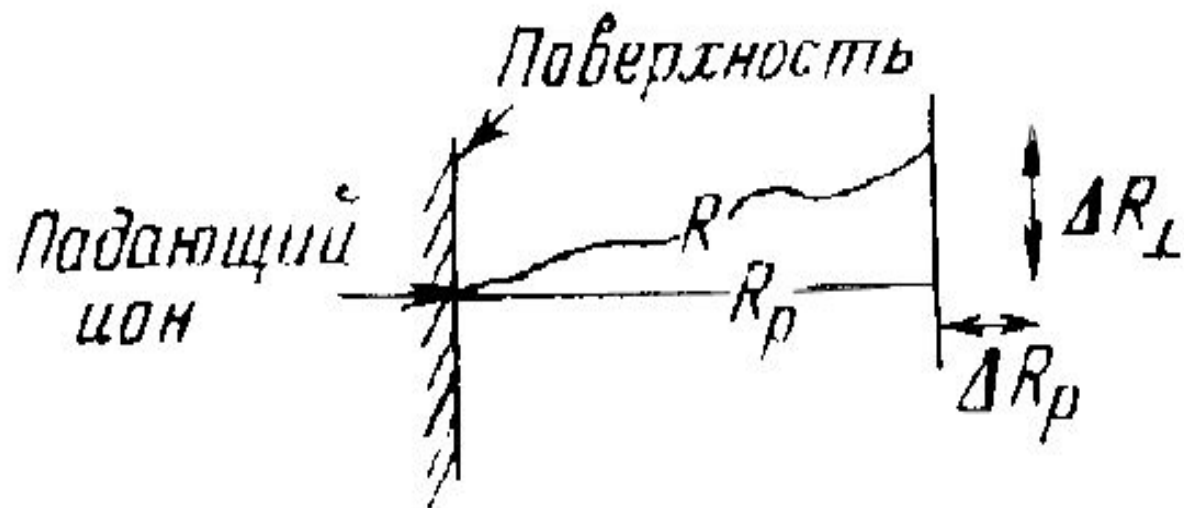
, ИОН/СМ .

# ИСТОЧНИКИ

- **с поверхностной термической ионизацией** – нагреватель (вольфрамовая лента) на него насыпается соль металла – KJ, NaCl, CaCl<sub>2</sub> т.д., получают ионы Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup>, Cs<sup>+</sup>, Rb<sup>+</sup>, J<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>;
- **с ионизацией электронным ударом**: электроны создаются термоэмиссией или в газовом разряде, ускоряются электростатическим или высокочастотным полем, удерживаются в ограниченном объеме магнитным полем и направляются на столкновение с молекулами газа или пара рабочего вещества, ионизируя их;  
высокочастотные – плазма ВЧ-разряда (при давлении 10-10<sup>-2</sup> Па), магнитное поле увеличивает эффективность; на анод подается 2-10 кВ;  
на основе дугового разряда в парах рабочего вещества (BF<sub>3</sub>, AsH<sub>3</sub>, PCl<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) при низких давлениях (порядка 1 Па).



а)

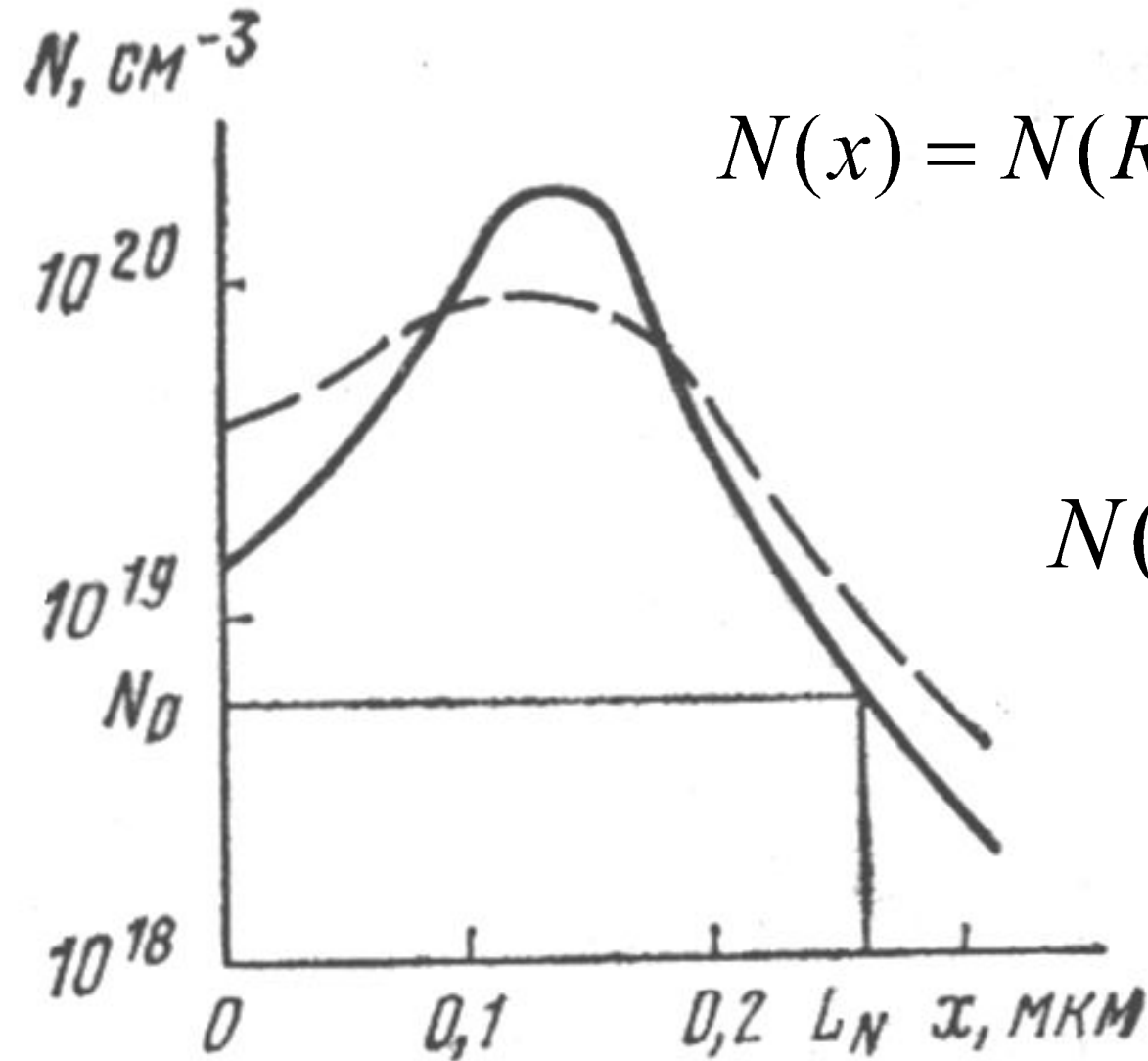


б)

**Пробеги и дисперсии и пробегов ионов**

# Распределение пробегов

МОЩНОСТИ



$$N(x) = N(R_p) \exp \left[ -\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2} \right]$$

$$N(R_p) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_p}$$



# Теория Линдхарда, Шарфа и Шиотта

Механизмы потерь энергии иона при его торможении в мишени

независимы друг от друга и

аддитивны

$$\bullet \frac{dE}{dx} = S_n + S_e$$

$$S_n = \sigma NE$$

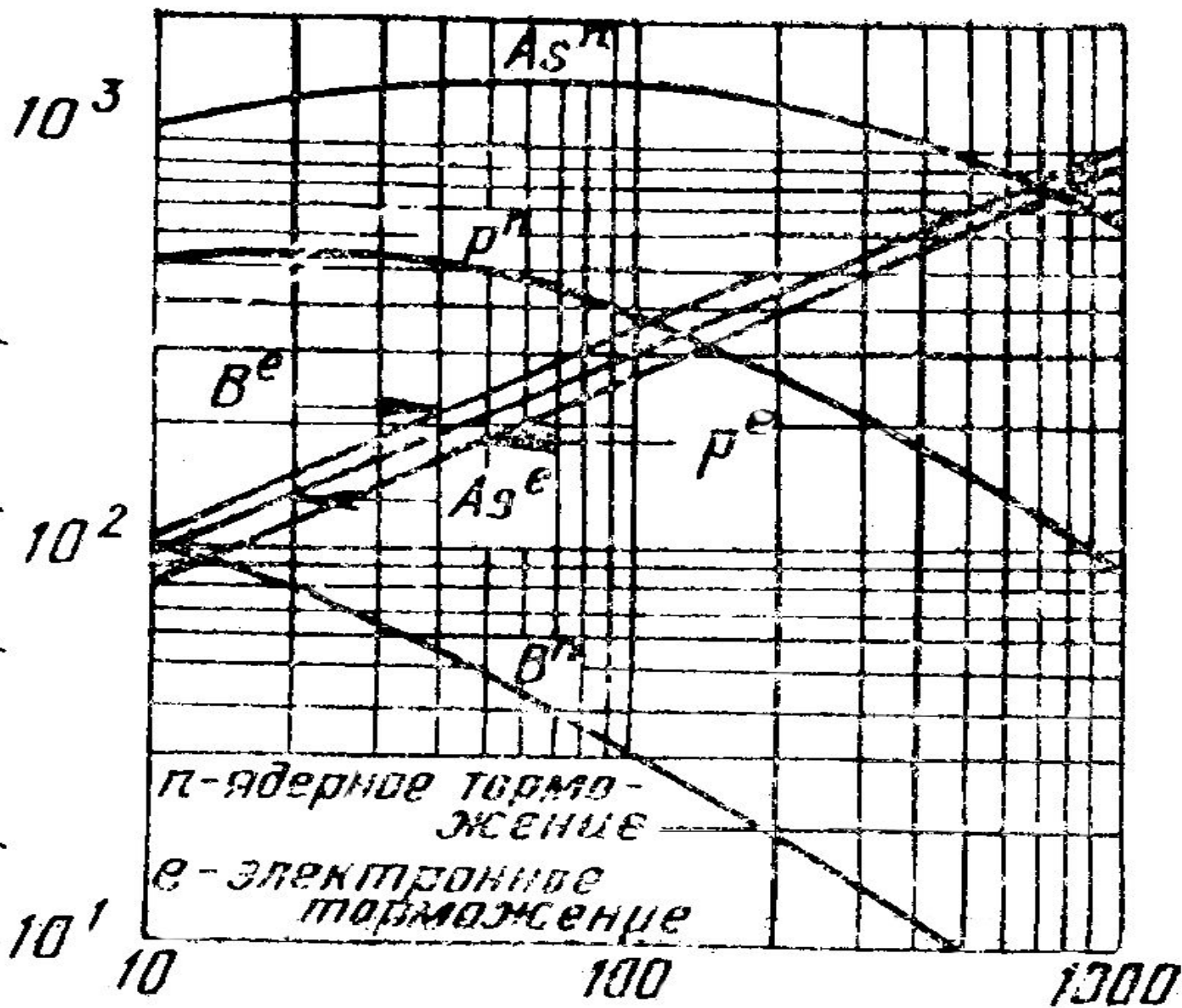
$$E_{\max} = E_0 \frac{4M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2}$$

$$S_e = k\sqrt{E}$$

$$R = \frac{1}{N} \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_n + S_e}$$

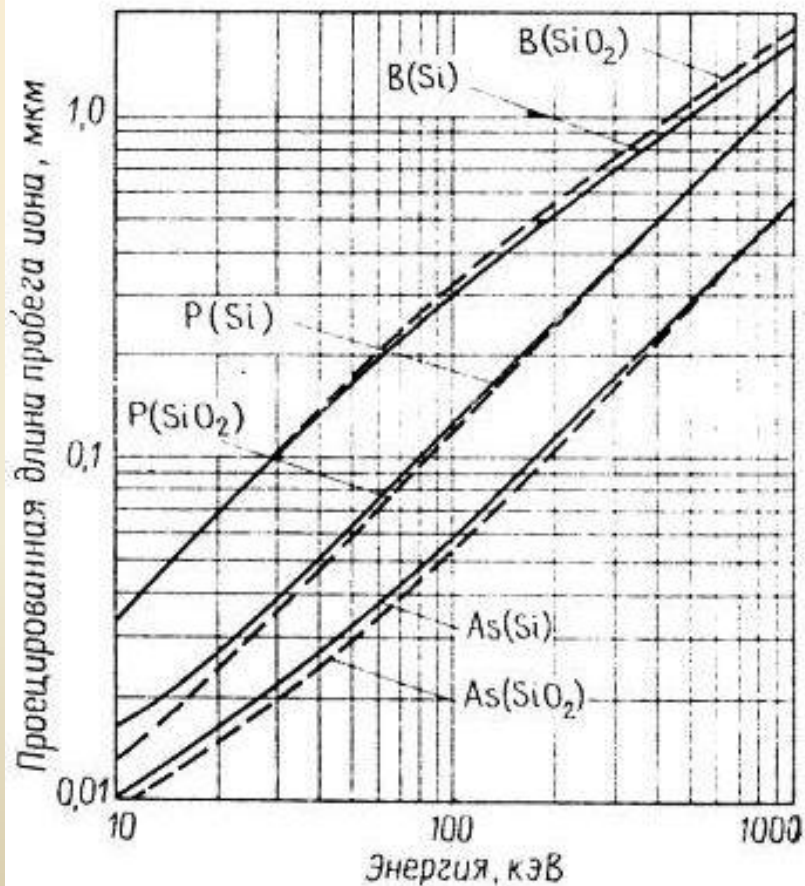
Sp,

Потери энергии, кэВ/мм

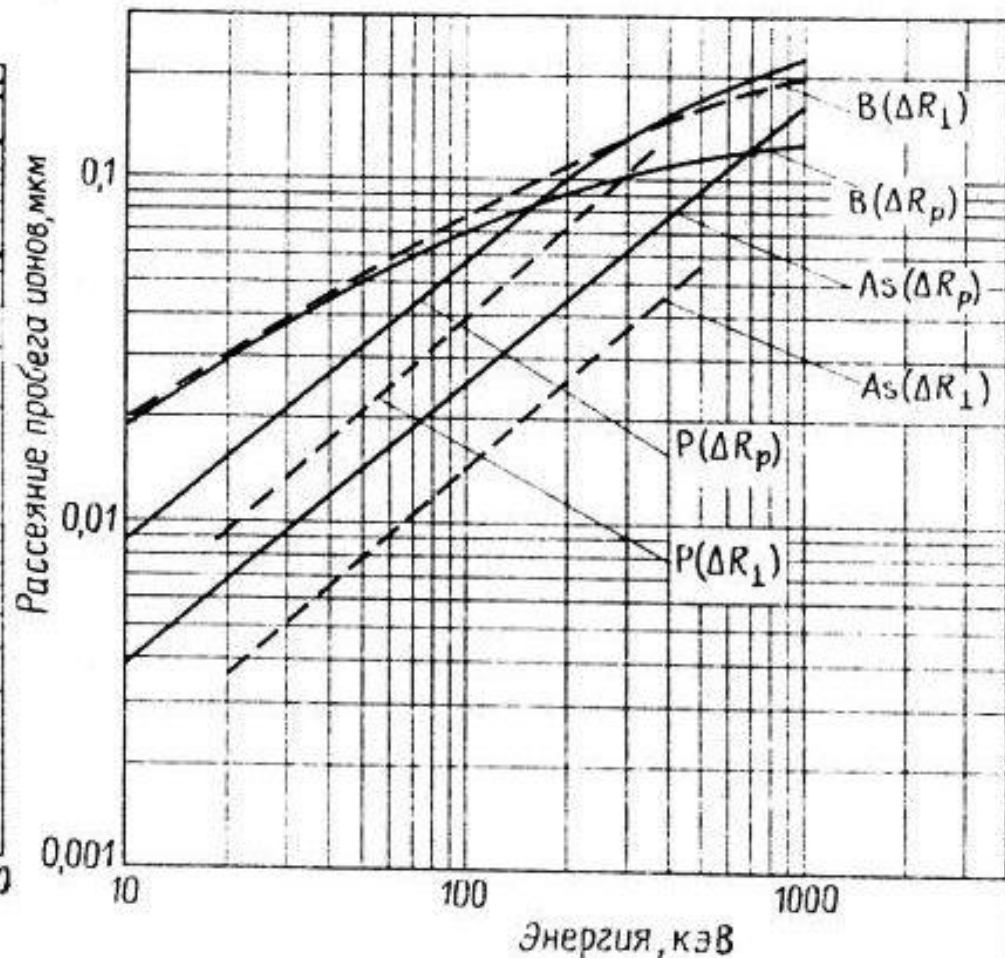


Энергия, кэВ

# Проецированная длина (а) и рассеяние (б) пробега ионов

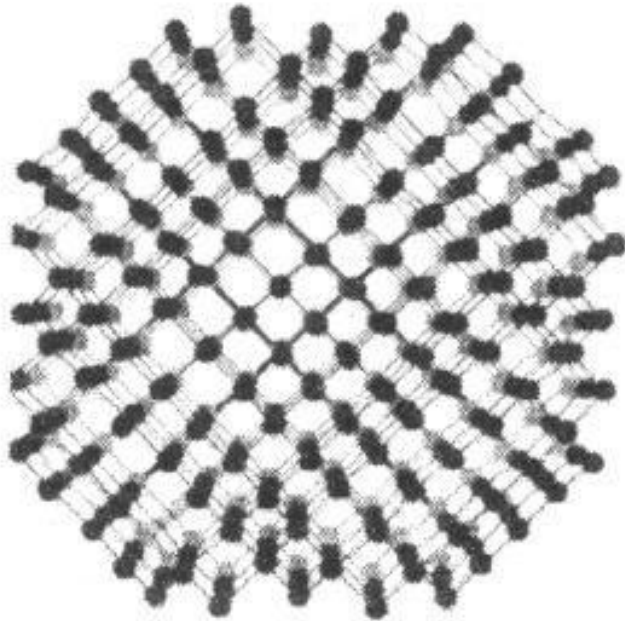


а

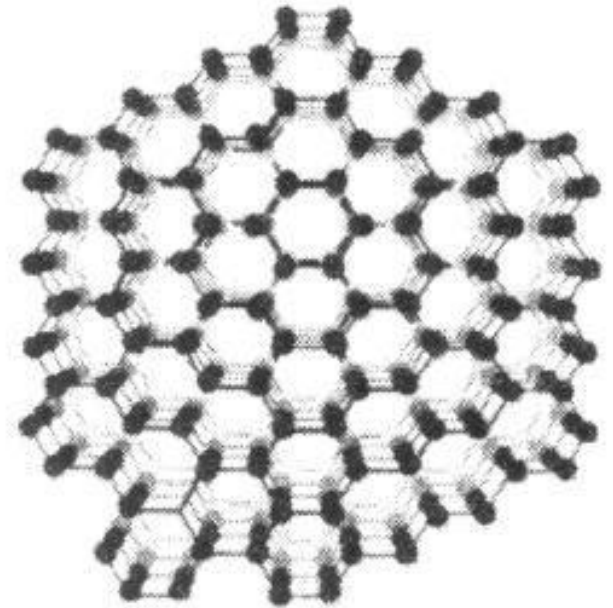


б

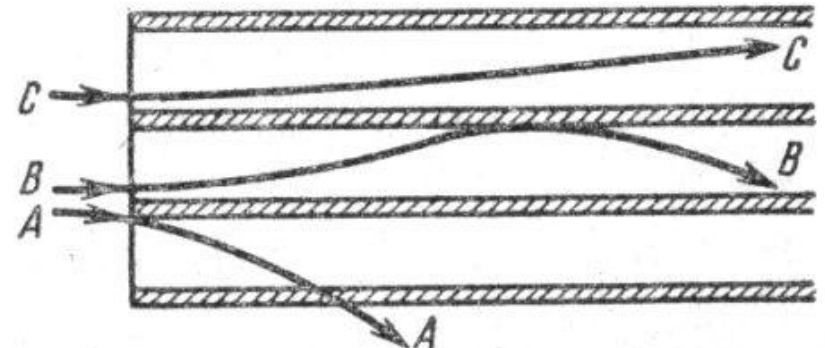
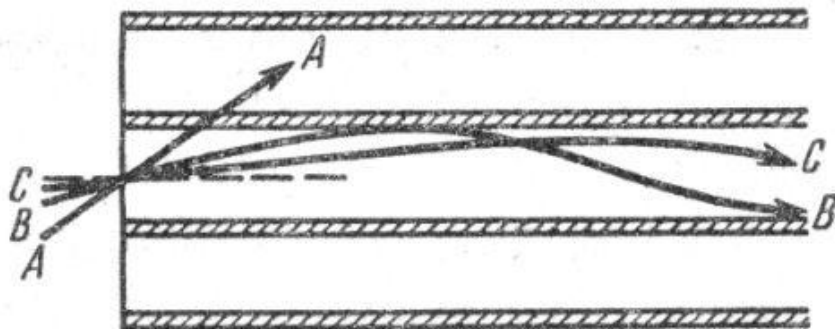
# Канализирование ионов

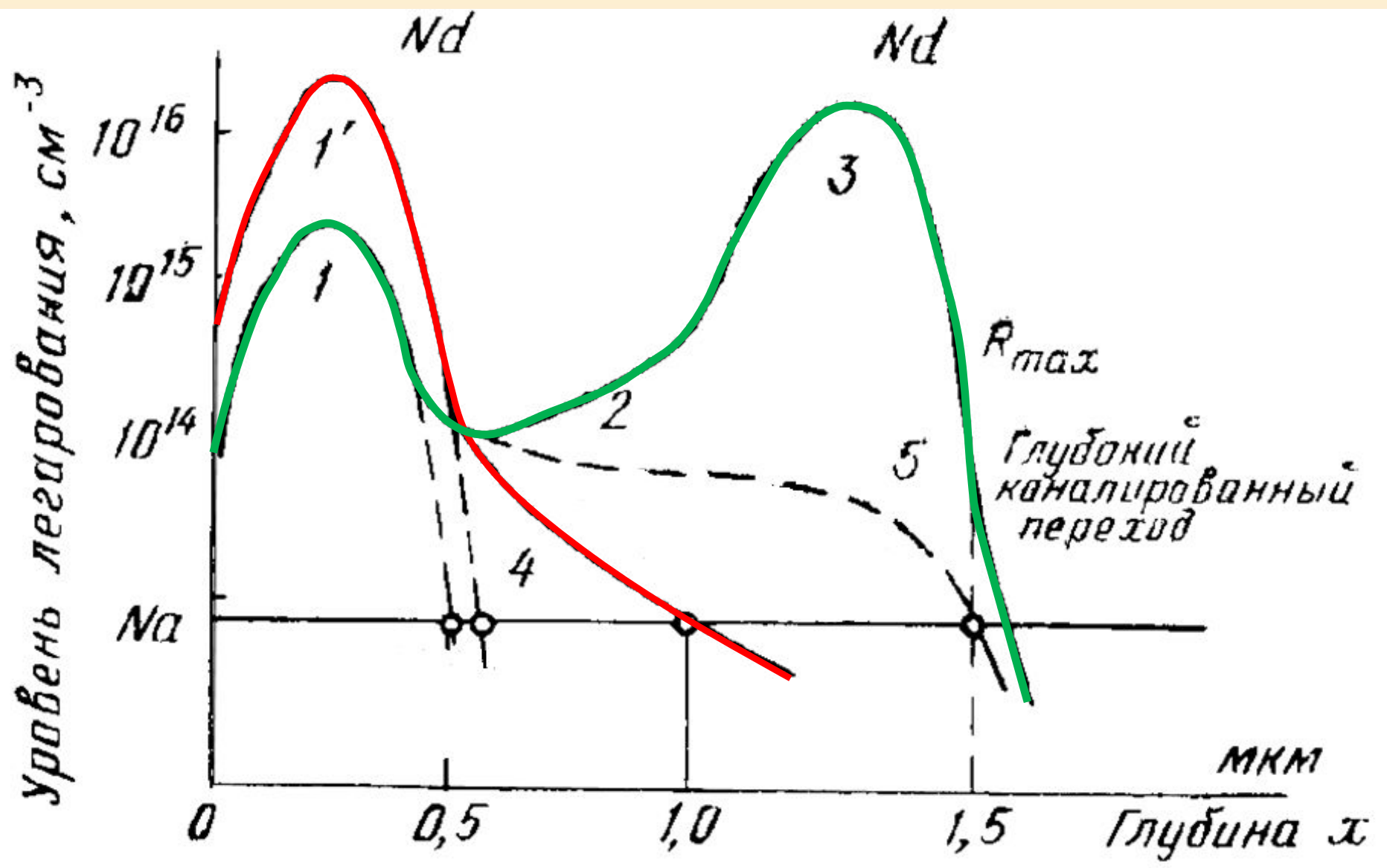


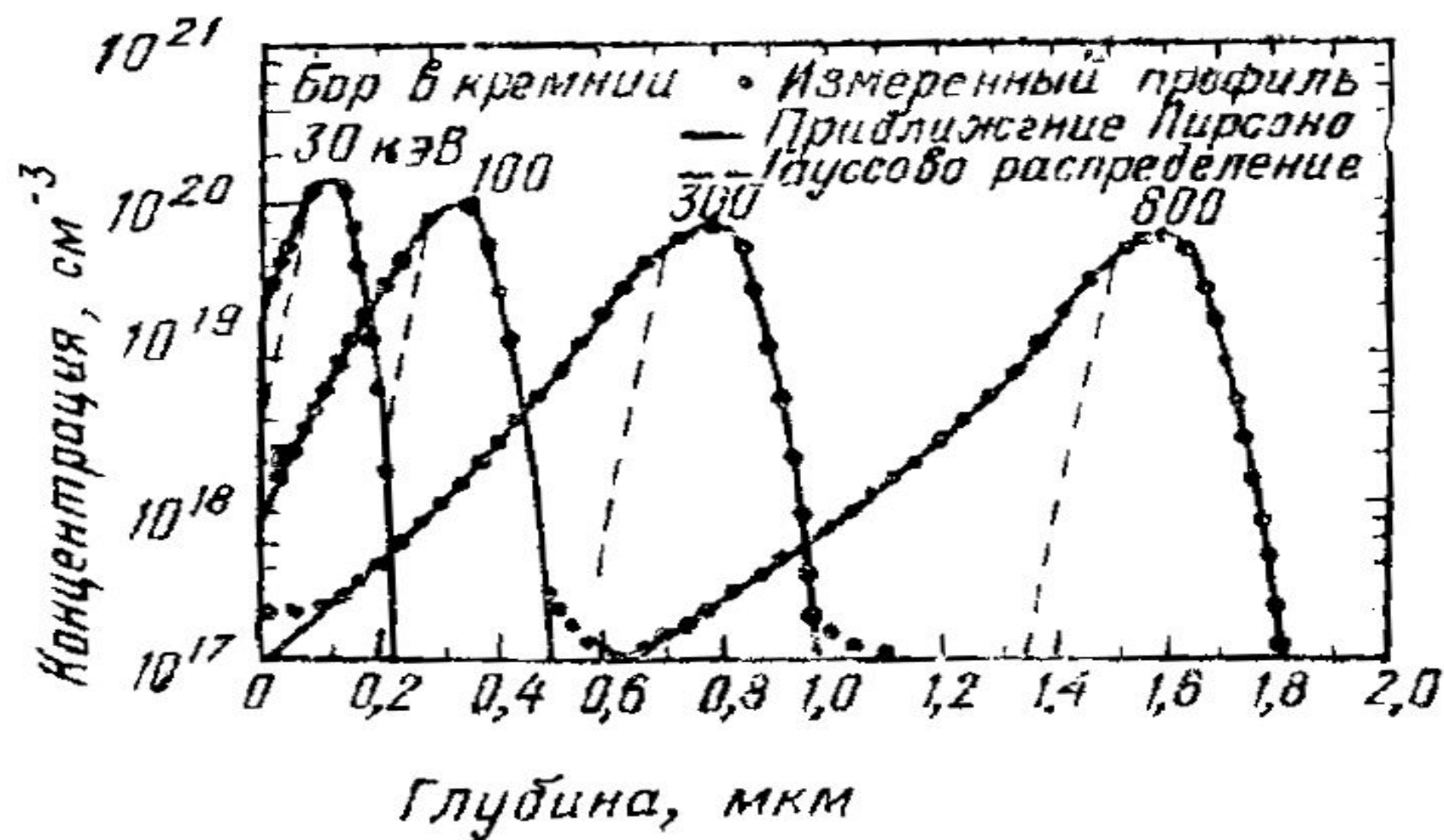
$\langle 100 \rangle$



$\langle 110 \rangle$







# Приближение Пирсона

$$\frac{dh(x)}{dx} = \frac{(x' - a)h(x')}{b_2x'^2 + b_1x' + b_0}, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} h(x)dx = 1; \quad x' \equiv x - R_p.$$

$$a = -\gamma_1\mu_2(\beta + 3)/A, \quad \mu_1 \text{ (средний пробег)} = R_p = \int_{-\infty}^{+\infty} xh(x)dx,$$

$$b_0 = -\mu_2^2(4\beta - 3\gamma_1^2)/A, \quad \mu_2 \text{ (рассеяние)} = \Delta R_p = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - R_p)^2 h(x)dx,$$

$$b_1 = a, \quad \gamma_1 \text{ (нормированная несимметричность)} =$$

$$b_2 = -(2\beta - 3\gamma_1^2 - 6)/A,$$

где  $A = 10\beta - 12\gamma_1^2 - 18$

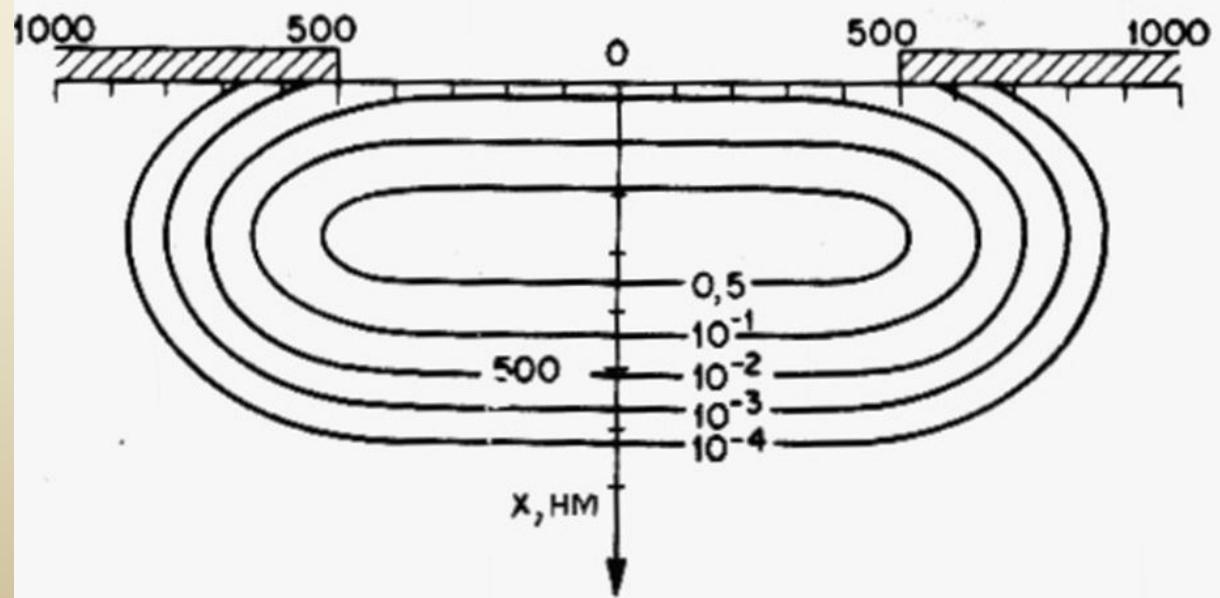
$$= \int_{-\infty}^{+\infty} (x - R_p)^3 h(x) dx / \Delta R_p^3,$$

$$\beta \text{ (нормированное затухание)} = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - R_p)^4 h(x) dx / \Delta R_p^4.$$



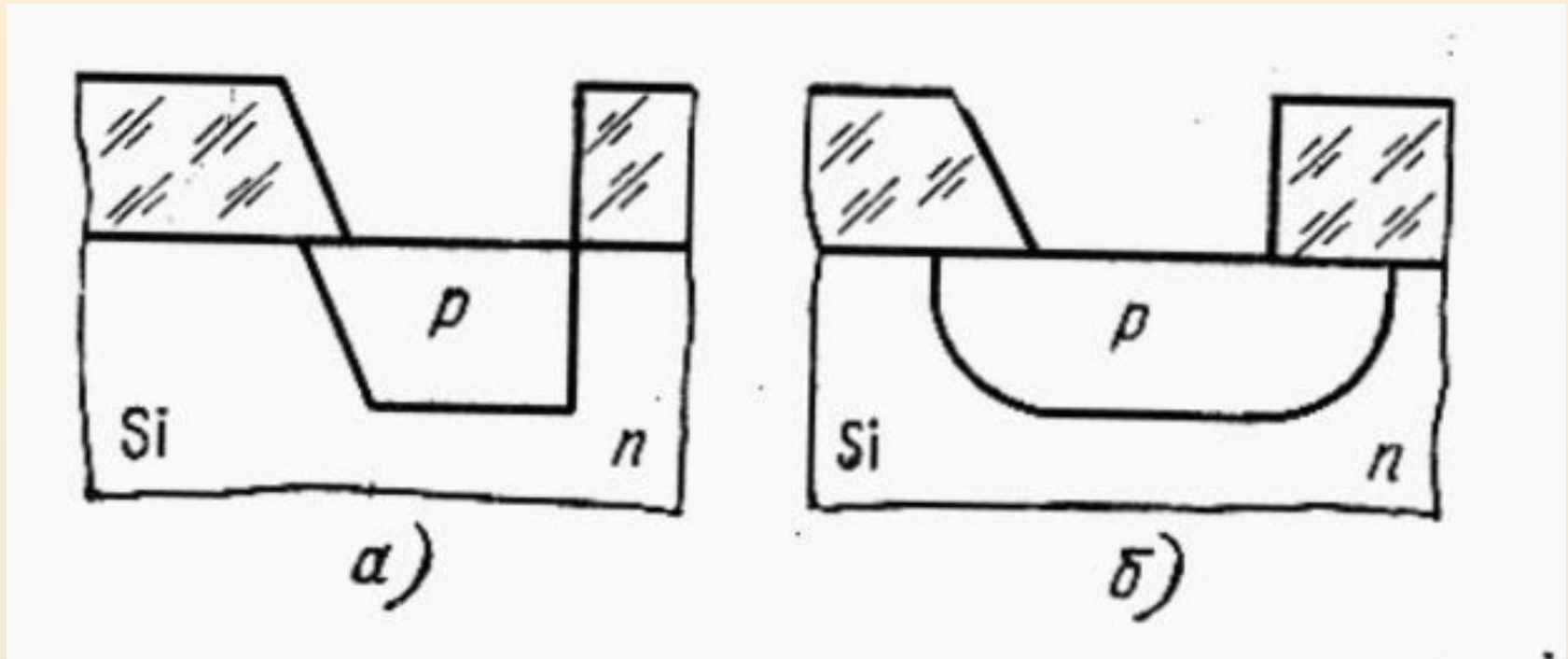
$$N(x, y) = \frac{N(x)}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{y-a}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{\perp}} \right) - \operatorname{erfc} \left( \frac{y+a}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{\perp}} \right) \right]$$

$y, \text{нм}$





## Фронт $p$ - $n$ перехода при ионном (а) и диффузионном (б) локальном легировании

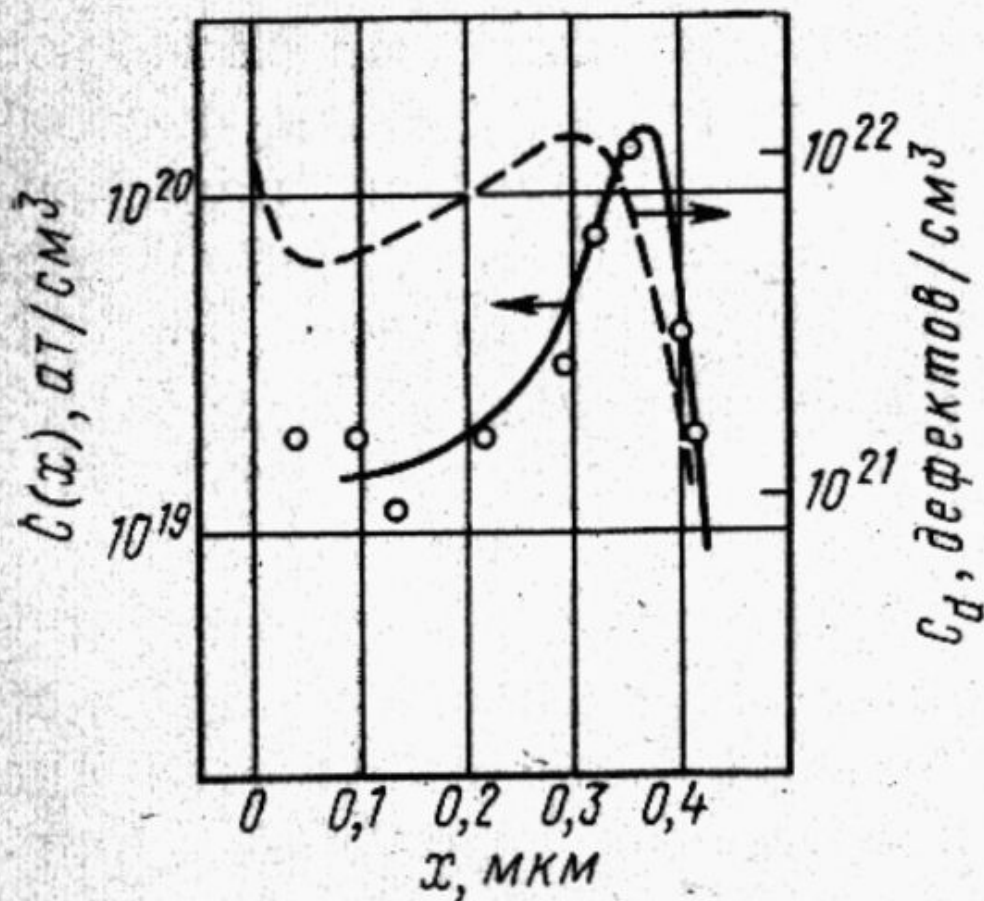


Маскирование производится пленками окиси кремния; или  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , фоторезистами, поликремнием или пленками металлов

Требования: должны быть достаточно толстыми для полного торможения бомбардирующих ионов,

иметь низкий коэффициент распыления ионным пучком и хорошо растворяться после облучения

# Профили распределения дефектов и атомов бора



**дефекты Френкеля** – вакансии и атомы в междуузлиях

**дефекты смещений** сливаются в зоны размером 5... 10 нм

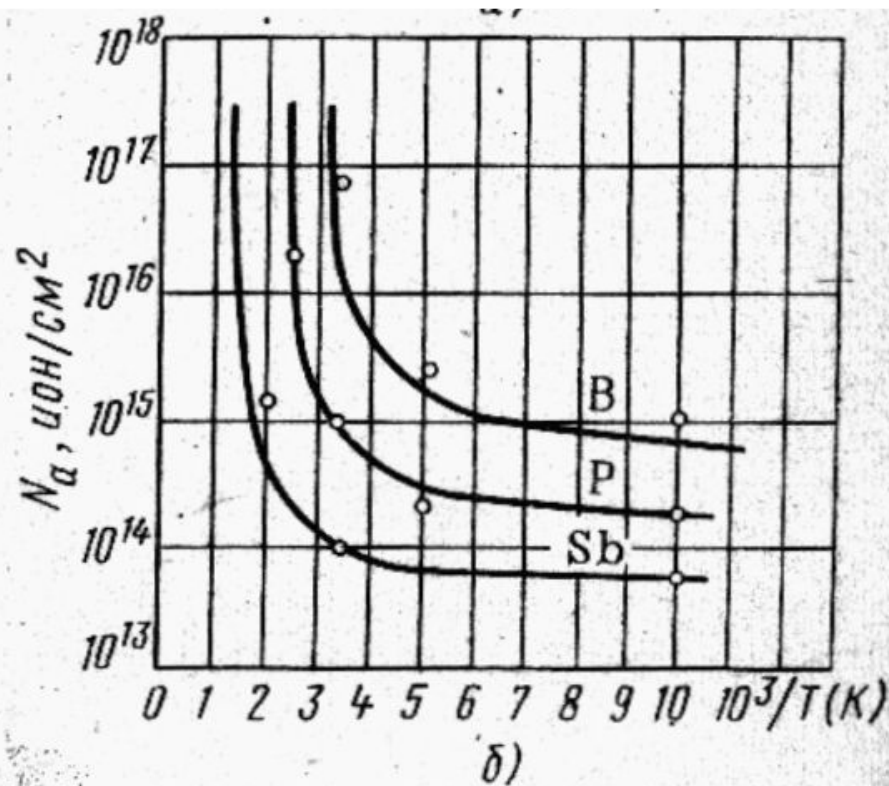
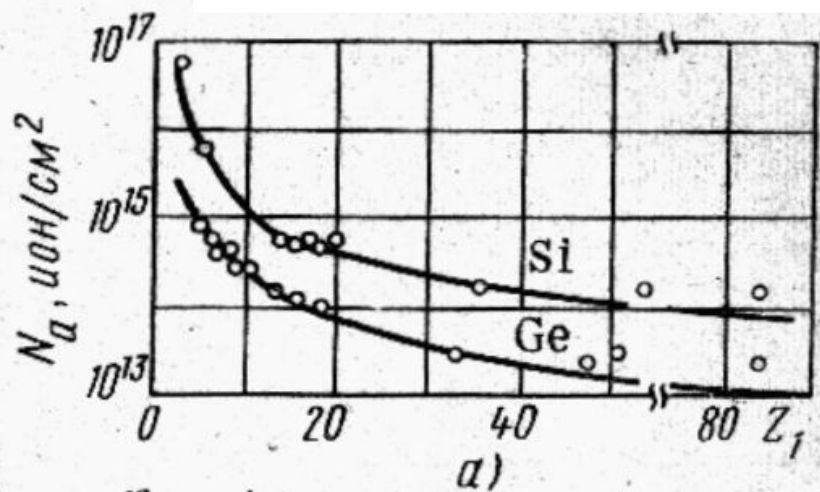
**кластер радиационных нарушений** - скопление простых дефектов

**доза аморфизации** - критическая доза ионного облучения, при которой полупроводник переходит из кристаллического состояния в аморфное

# Структура нарушенных слоев



# Дозы аморфизации кремния и германия (а) и температурные зависимости доз аморфизации кремния (б)



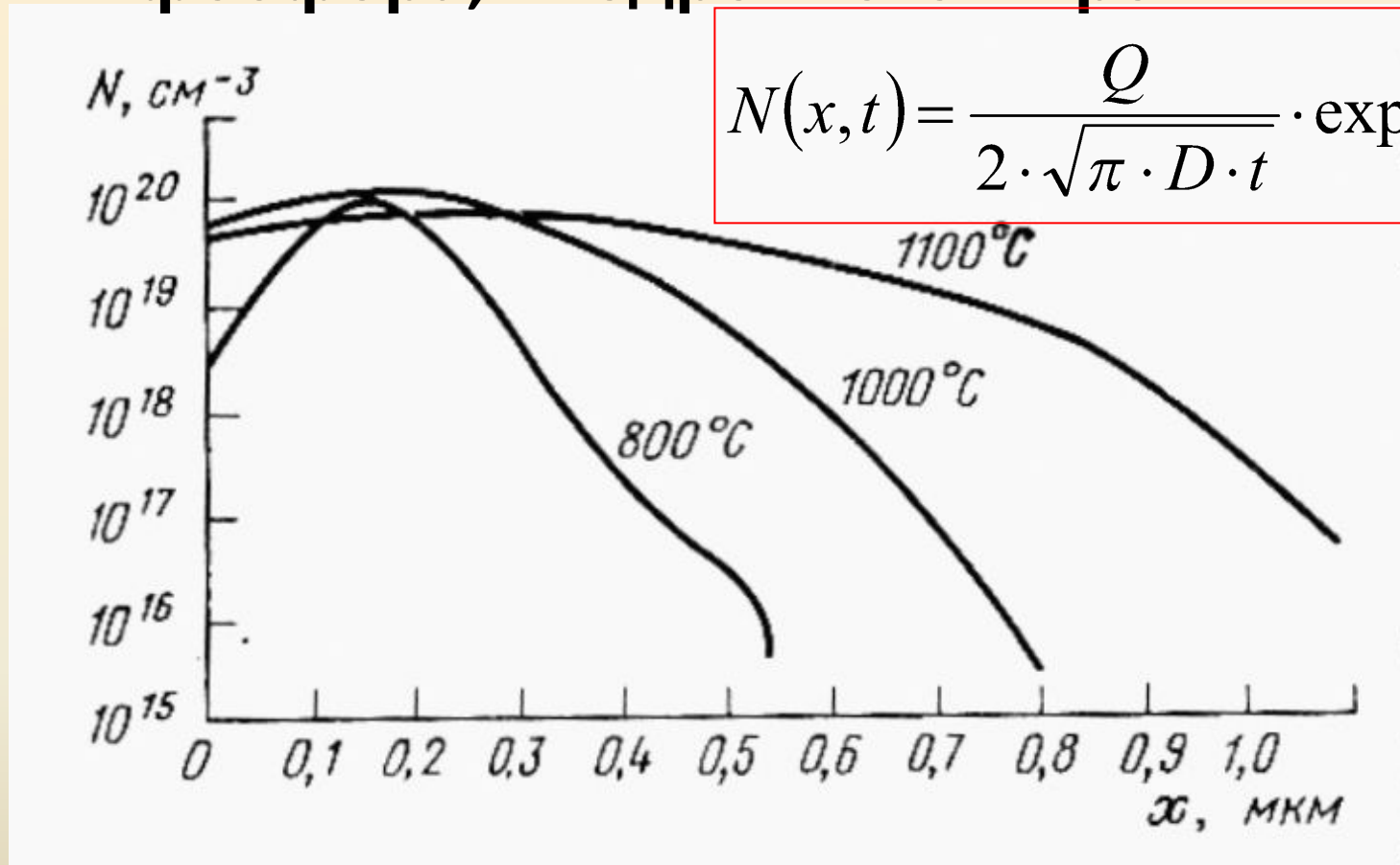
**критическая температура  
аморфизации  $T_{кр}$**

для бора 24 °С,

для фосфора 175 °С,

для сурьмы 460 °С

# Влияние термообработки на распределение фосфора, внедренного в кремний



$$N(x, t) = \frac{Q}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{4D \cdot t}\right)$$

$$n(x, t) = \frac{Q_n}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\Delta R_p^2 + 2Dt}} \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2(\Delta R_p^2 + 2Dt)}\right]$$

# Импульсная термообработка

**Восстановление кристаллической структуры слоев практически без изменения профиля распределения примеси.**

Такая возможность обеспечивается за счет разницы в энергиях активации процессов диффузии примесей и процессов самодиффузии, ответственных за восстановление кристаллической структуры (в Si 3.5 и 5 эВ). Поэтому при температурах, приближающихся к температуре плавления, процессы восстановления кристаллической структуры ускоряются в значительно большей степени, нежели процессы

# ИМПУЛЬСНАЯ

Оказывает возможность  
**ТЕРМООБРАБОТКА**  
рекристаллизация полностью  
аморфизированных и даже  
поликристаллических слоев.

Может проводиться как при  
однородном нагреве всей  
поверхности пластины, так и с  
использованием техники  
сканирования лучом, при этом  
может потребоваться несколько  
циклов нагрева – охлаждения.

# Импульсная термообработка

1. Восстановление кристаллической структуры после ионной имплантации.
2. Снижение плотности дислокаций на 2-3 порядка величины и концентрации кислородных кластеров по крайней мере на порядок величины при воздействии импульсов длительностью менее 0.05 с, разогревающих поверхностные слои до 1350 – 1400°C.
3. Уменьшение величины сопротивления контакта металл-кремний приблизительно на порядок величины при воздействии импульсов порядка 1 с, нагревающих поверхность пластин до температуры, меньшей температуры плавления металла. При этом используется однородный нагрев всей площади пластины.
4. Создание приповерхностных слоев с большой концентрацией дефектов, которые впоследствии могут использоваться для геттерирования легко диффундирующих примесей (играют роль центров рекомбинации).
5. “Резка” пластин.



# Применение ионного легирования

## 1. Введение примеси

- Загонка примеси с точной дозировкой
- Создание профиля с максимумом на глубине
- Создание мелких p-n-переходов

## 2. Модификация химических свойств материала

- Создание захороненного слоя оксида
- Аморфизация слоя для уменьшения растворимости
- Геттерирование примесей тяжелых металлов

Внедрение в пластину ионов газов приводит к формированию при отжиге пузырьков газа, ограниченных кристаллографическими поверхностями.

# Геттерирование -

удаление нежелательных примесей и дефектов.

1. Высвобождение примесей или разложение протяженных дефектов на составные части.
2. Диффузия к зонам захвата (стокам).
3. Поглощение примесей или междоузельных атомов стоком.

Сток должен находиться за пределами рабочей области интегральной схемы

# Геттерирование -

- Диффузия фосфора - метод геттерирования Si. Атомы Si в Si находятся в междоузлиях, они переходят в состояние  $Si^{3-}$  и образуют пары  $P^+Si^{3-}$ .
- Внедрение в кремниевую пластину ионов инертных газов. Стоком является поверхность пузырьков газа.
- Создание развитой поверхности механической обработкой.
- Использование в качестве стоков для кислорода кластеров кислорода.

# Три стадии преципитации кислорода в кремнии.



(a)

В обедненном слое зародыши новой фазы не образуются

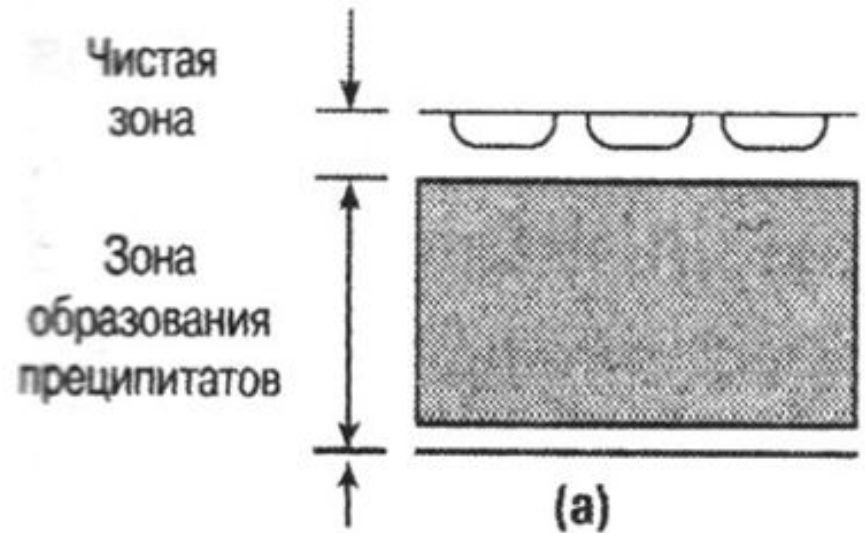


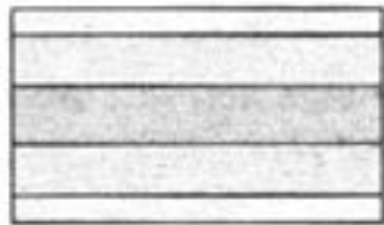
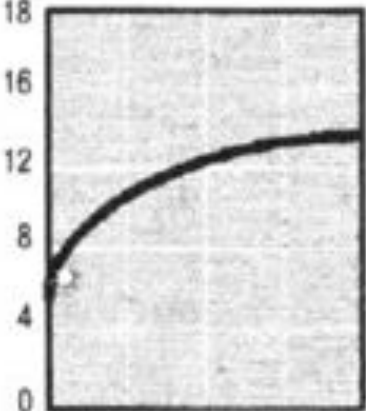
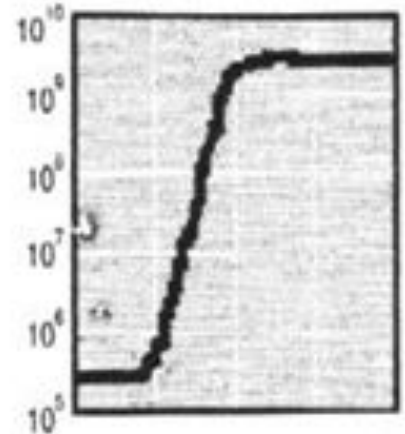
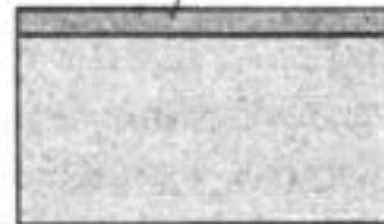
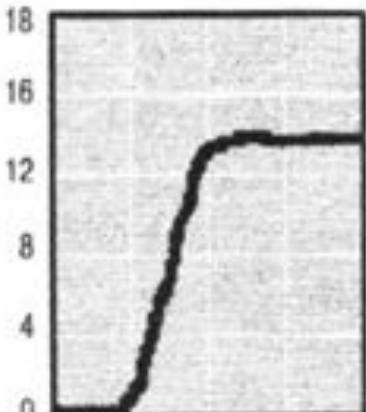
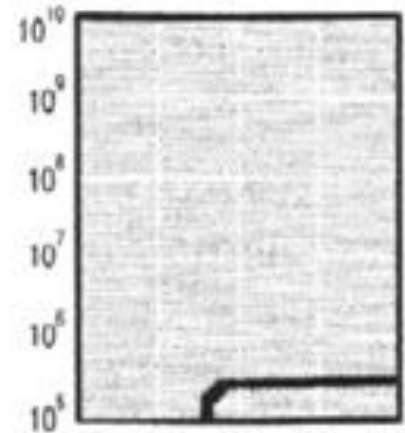
(б)

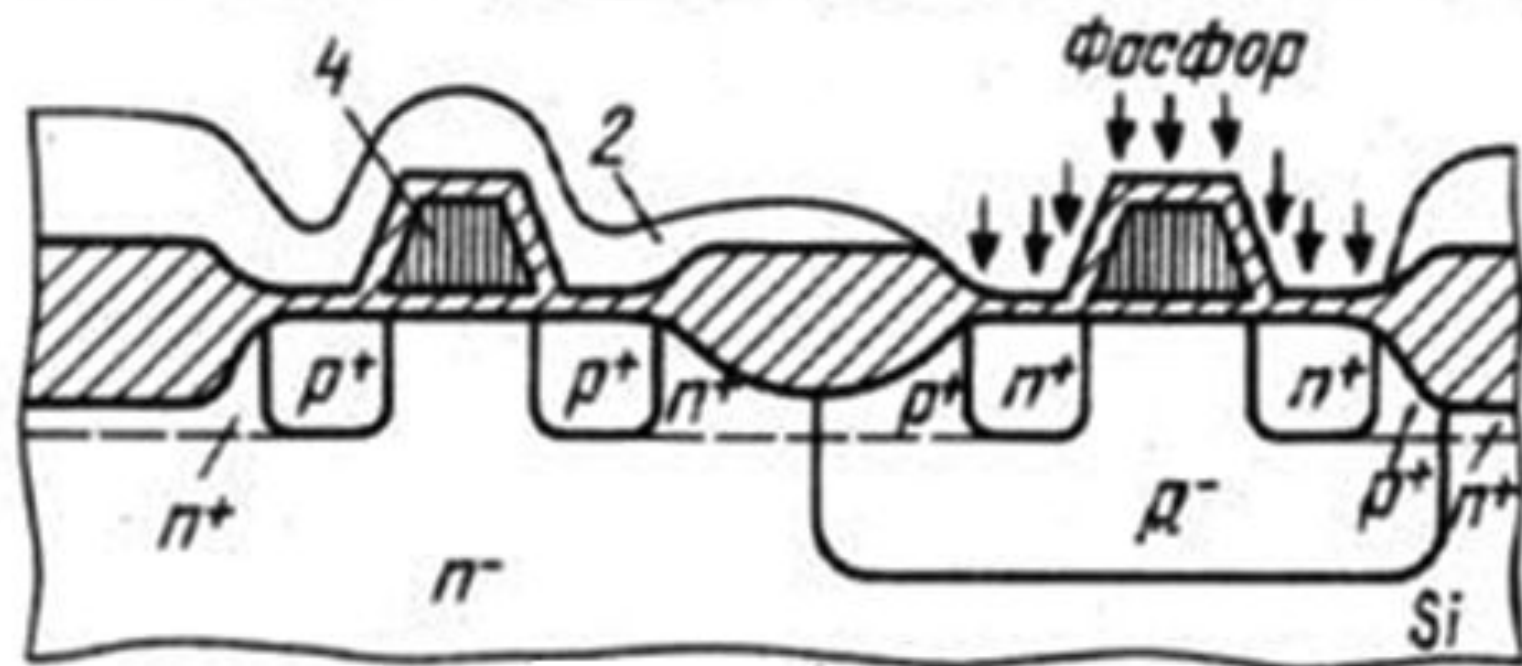
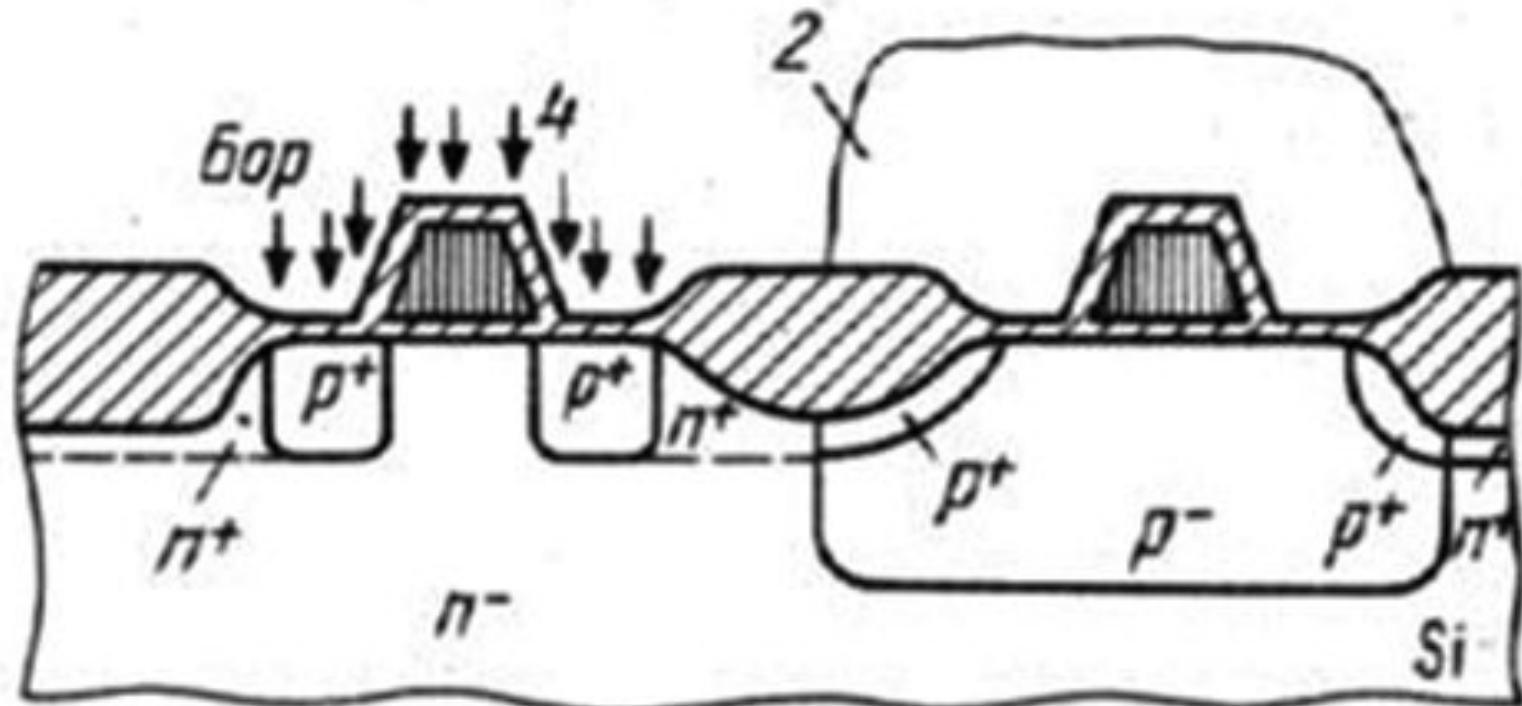
Новые зародыши не образуются, имеющиеся растут



(д)



|   | Поперечное сечение  | Профиль распределения атомов кислорода  | Профиль распределения дефектов, экстрагирующих атомы кислорода  |
|---|---|---|---|
| <p>Бездефектные пластины кремния, выращенные по методу Чохральского</p> |                                | <p>Концентрация атомов кислорода (<math>\times 10^{17}</math> д/см<sup>3</sup>)</p>   | <p>Плотность дефектов, экстрагирующих атомы кислорода (рост)</p>   |
| <p>Пластины кремния, содержащие эпитаксиальный слой</p>                 | <p>Эпитаксиальная пленка</p>  | <p>Концентрация атомов кислорода (<math>\times 10^{17}</math> д/см<sup>3</sup>)</p>  <p>Глубина от поверхности Si пластины, см</p> | <p>Плотность дефектов, экстрагирующих атомы кислорода (рост)</p>  <p>Глубина от поверхности Si пластины, см</p> |



# Косой шлиф

