

# ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ

# Достоинства ионного легирования

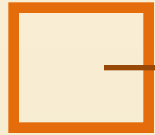
- точная дозировка примеси (теоретически – 1%, практически – 5%);
- высокая чистота;
- расширенная возможность локального легирования (широкий круг маскирующих материалов, меньше боковое легирование);
- можно легировать через покрытие;
- возможность получения управляемого профиля распределения – вплоть 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

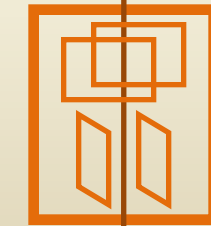


ускоритель

интегратор  
заряда



ОТКЛОНЯЮЩИЕ  
ПЛАСТИНЫ



Энергия ионов

от десятков

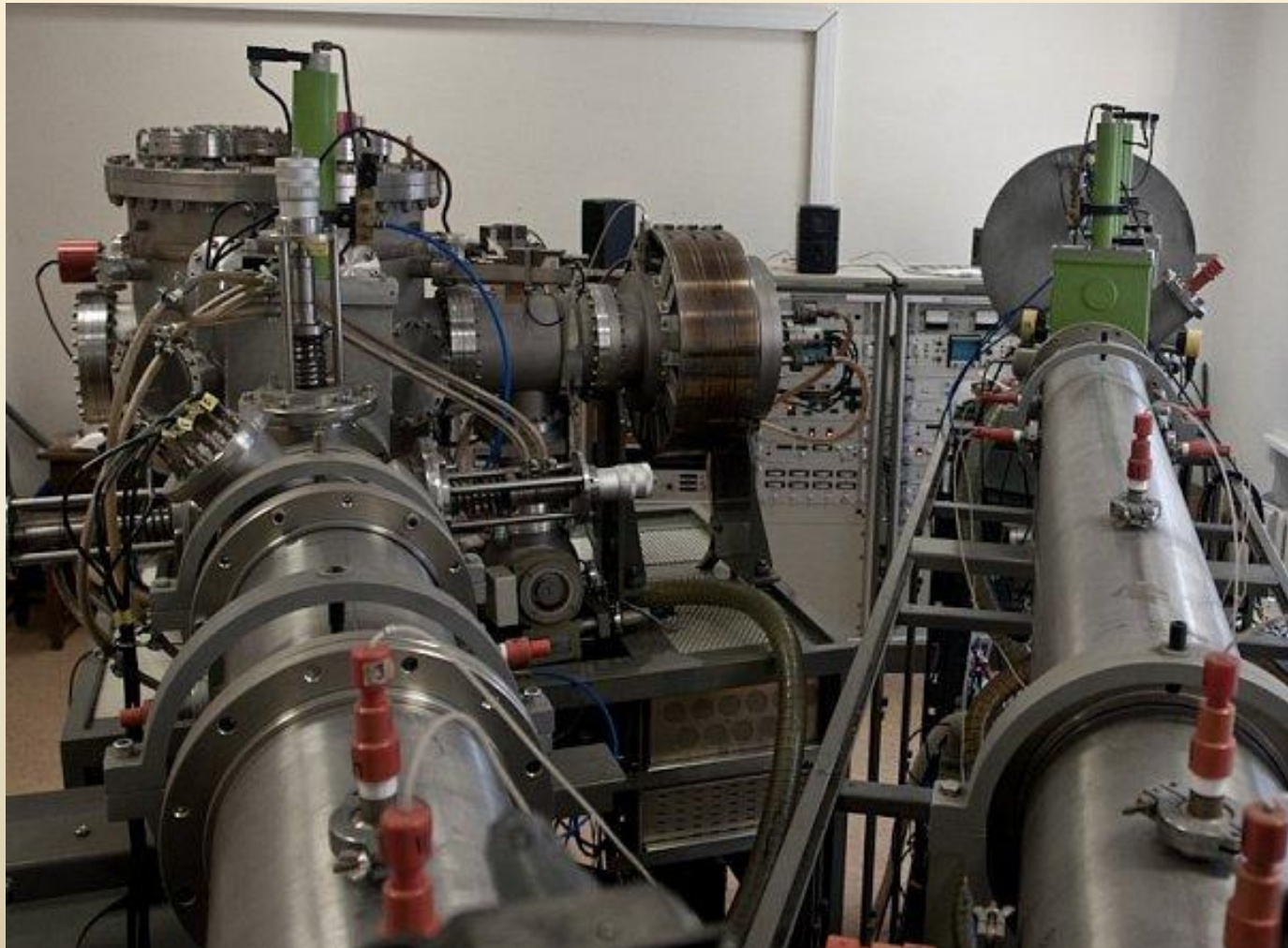
килоэлектронвольт

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]:

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

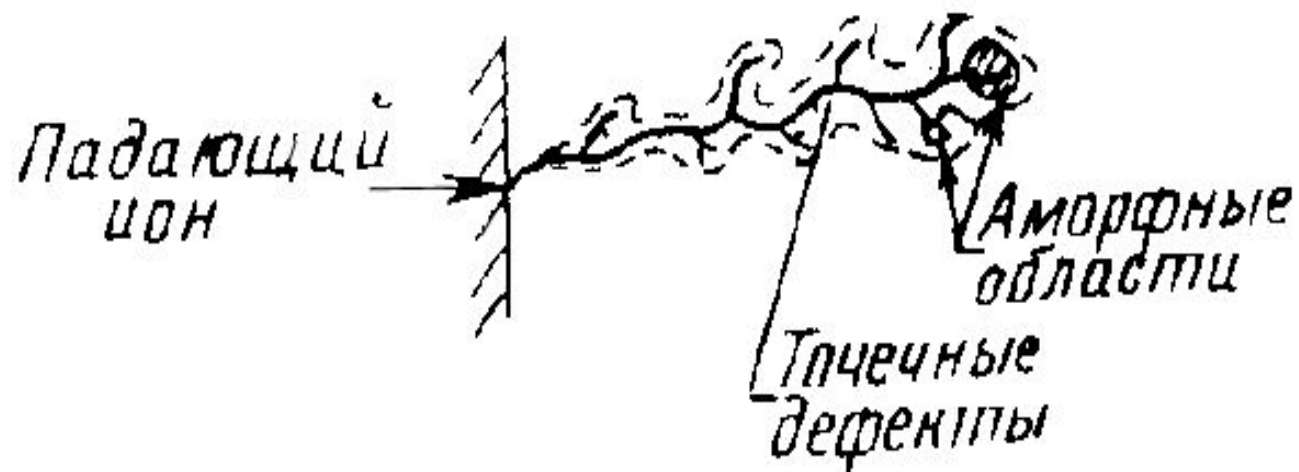
Чтобы выразить дозу в количестве частиц, внедренных на единице поверхности, величину делят на заряд одной частицы:

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

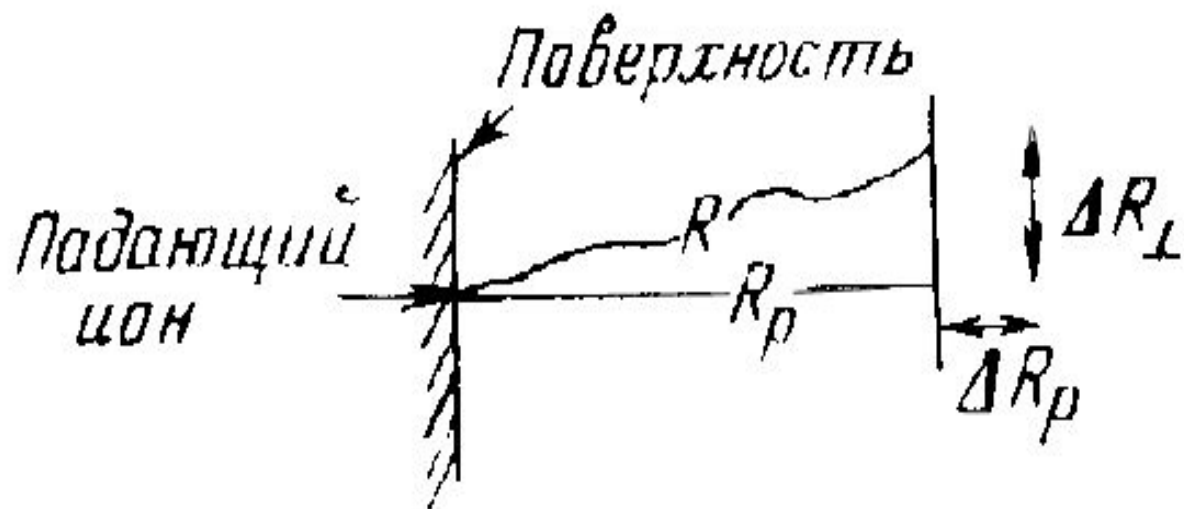
, ИОН/СМ .

# 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)

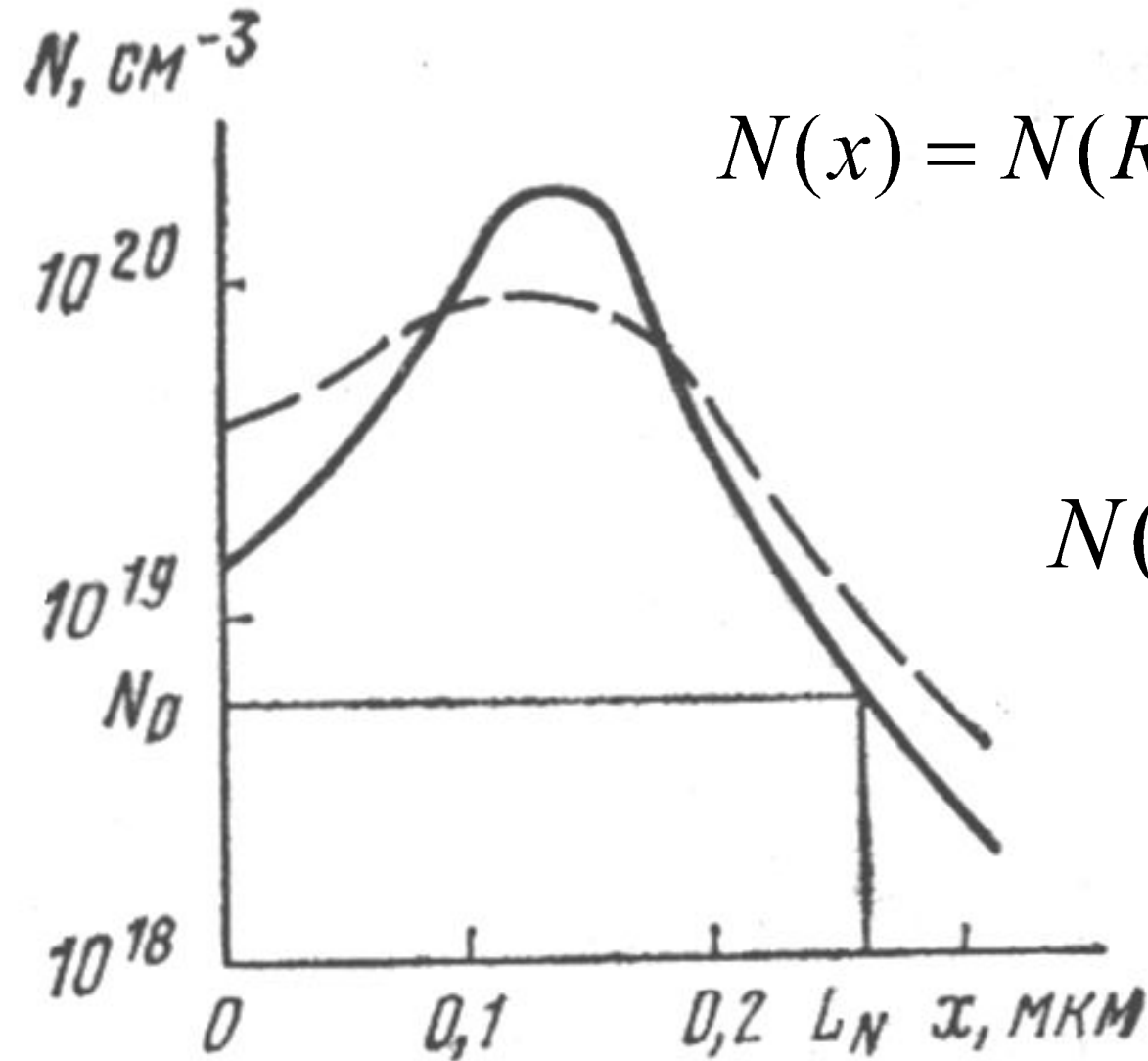


б)

# 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

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

$$S_n = \sigma NE$$

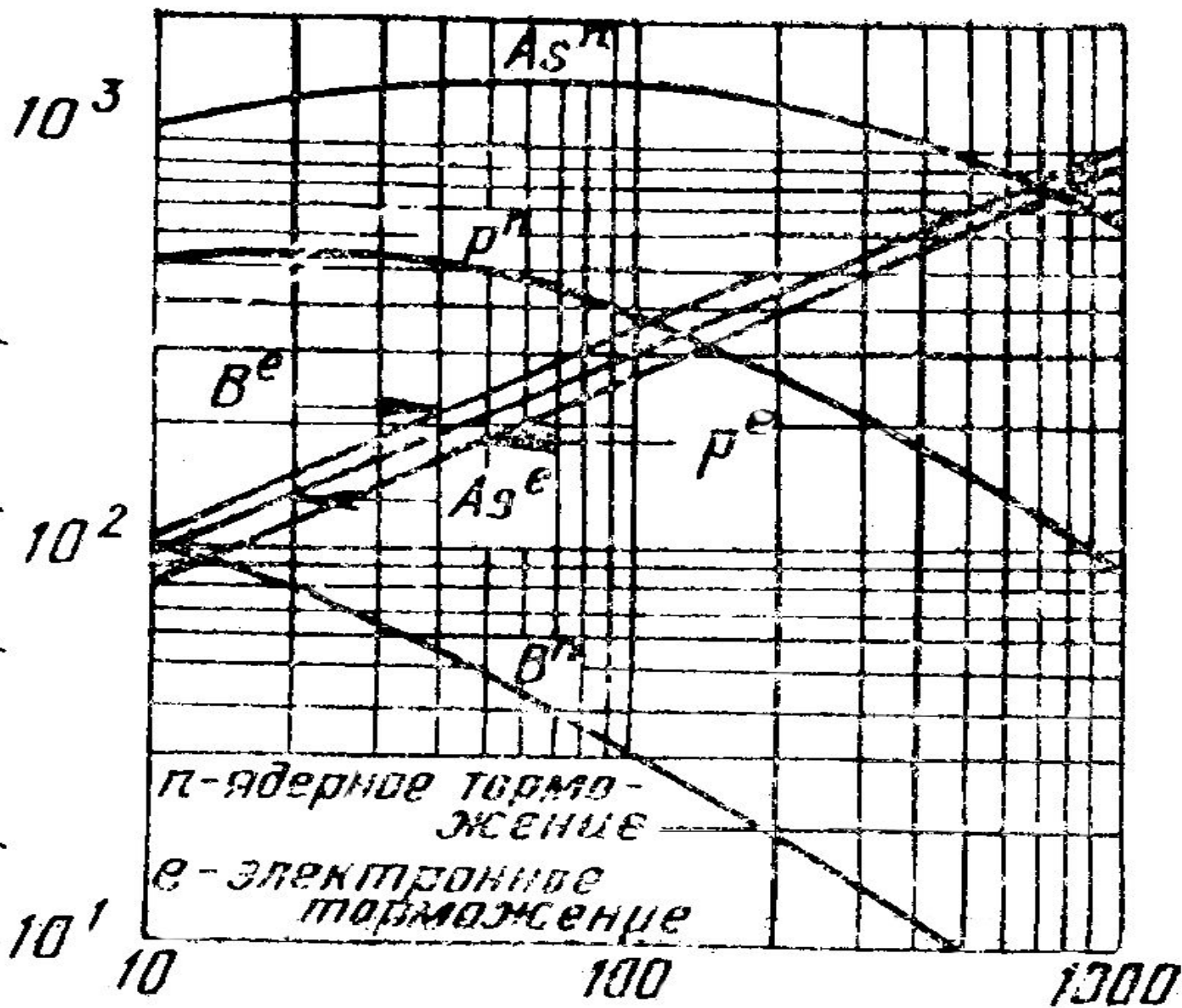
$$E_{\max} = E_0 \frac{4M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2}$$

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

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

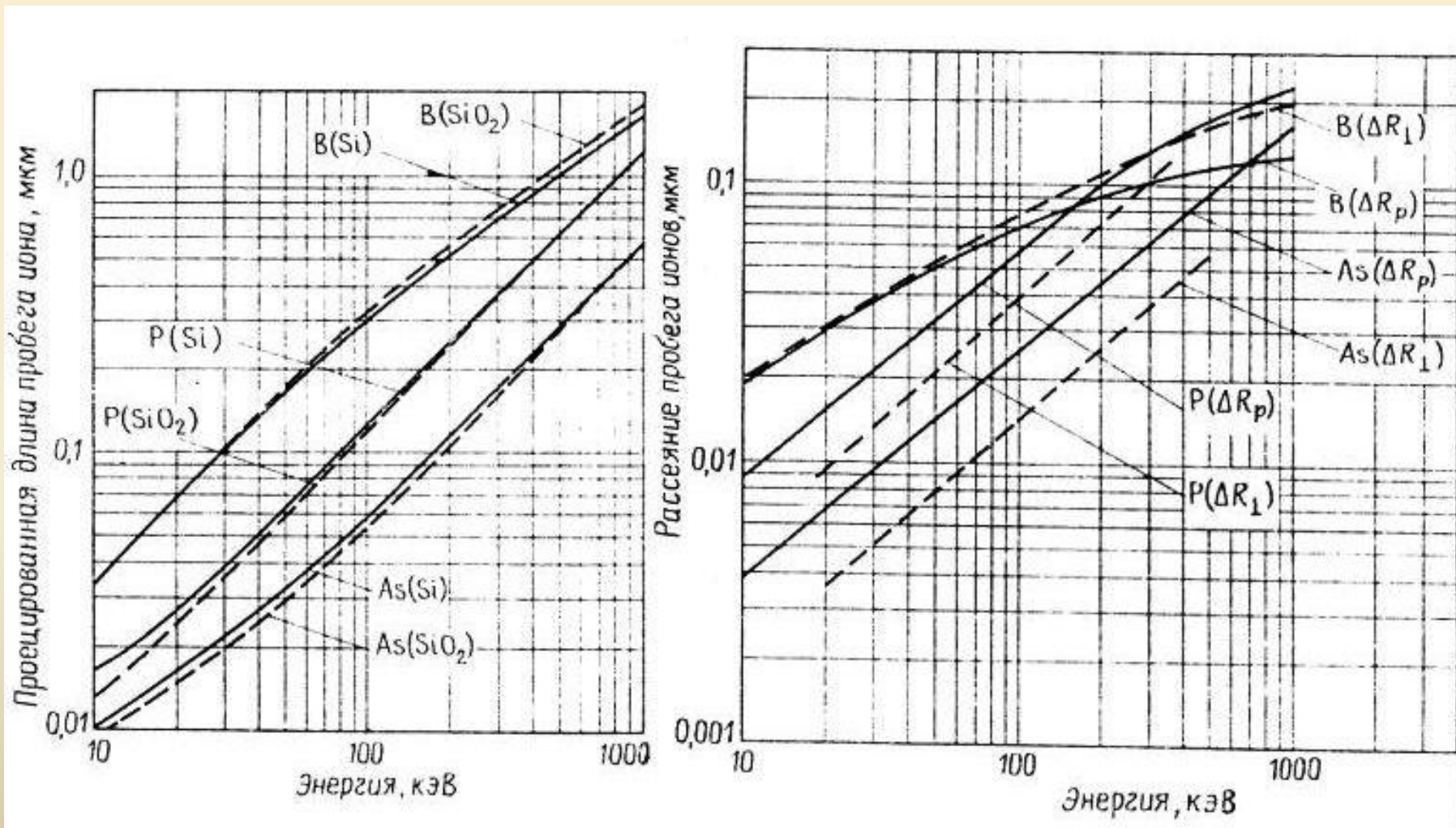
Sp,

Потери энергии, кэВ/мм



Энергия, кэВ

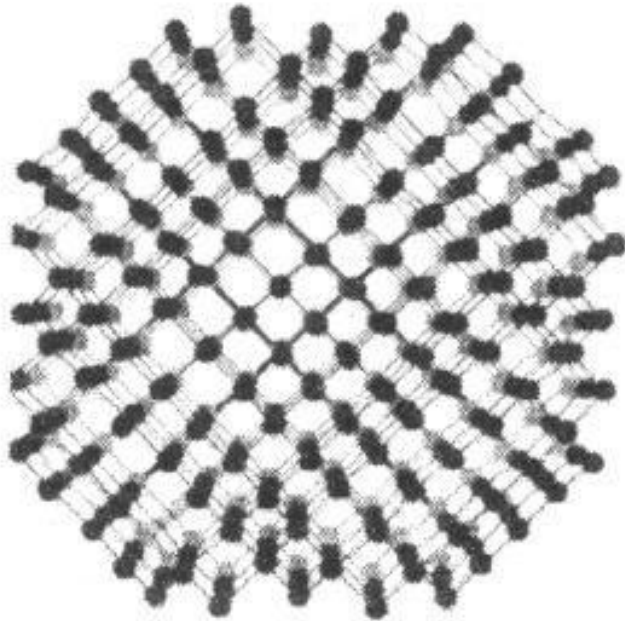
# Проецированная длина (а) и рассеяние (б) пробега ионов



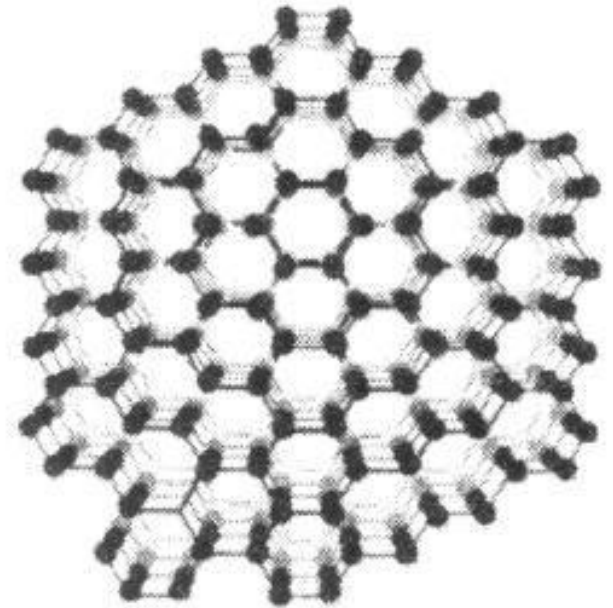
а

б

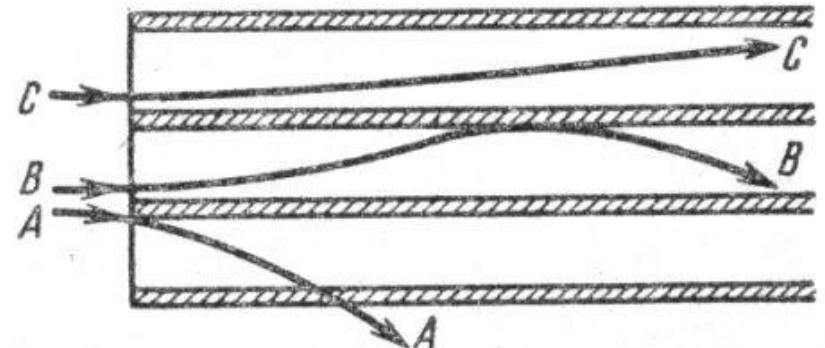
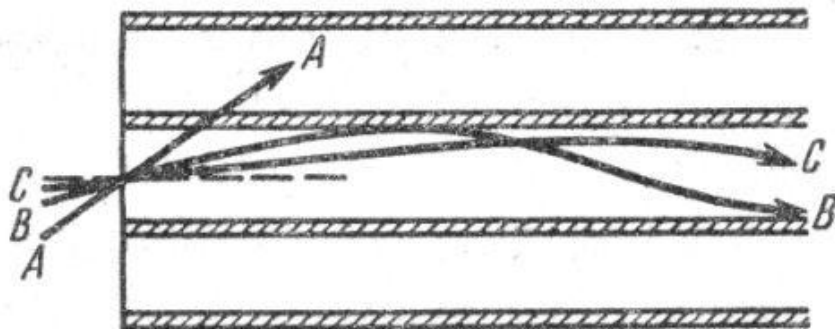
# Канализирование ионов

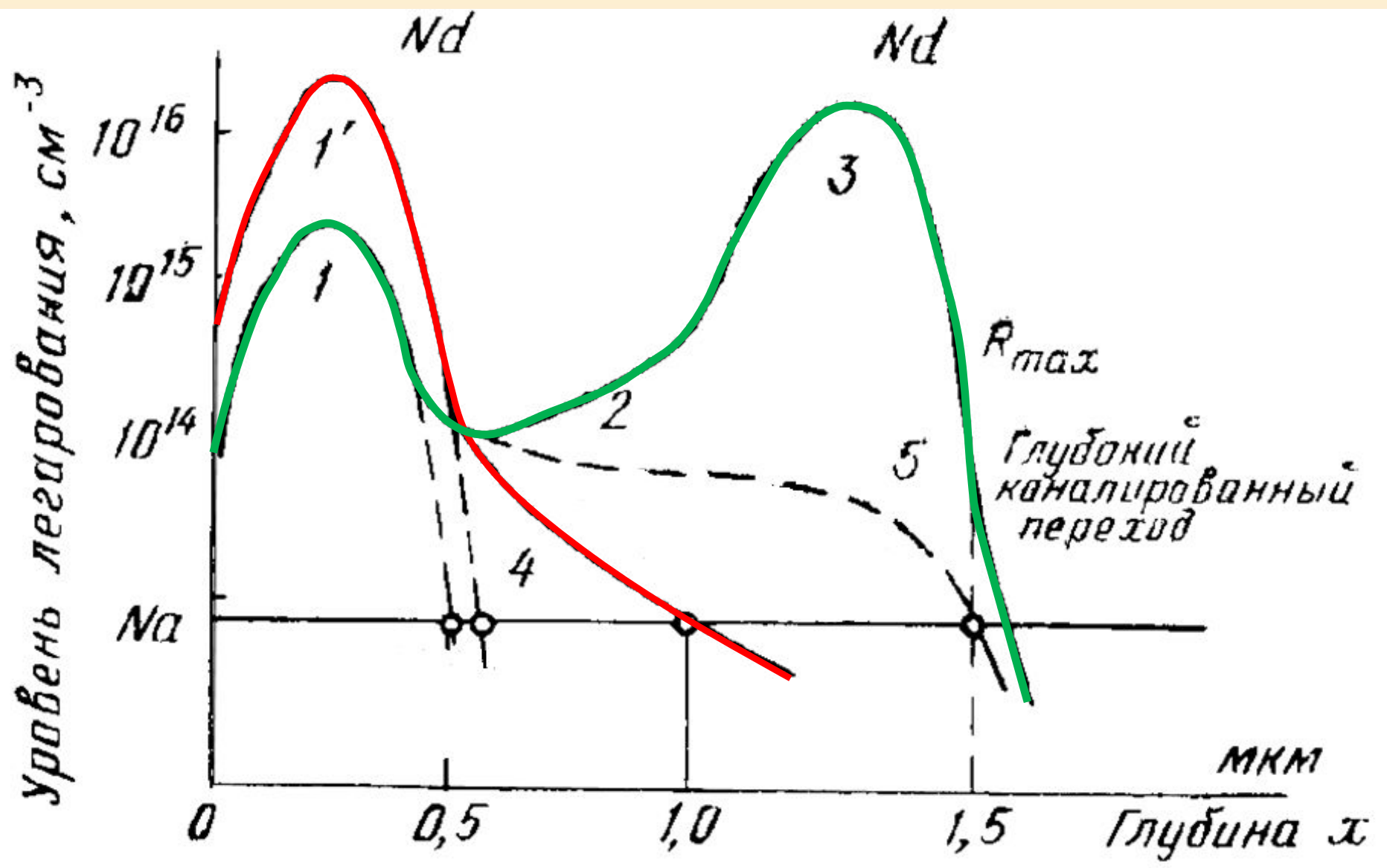


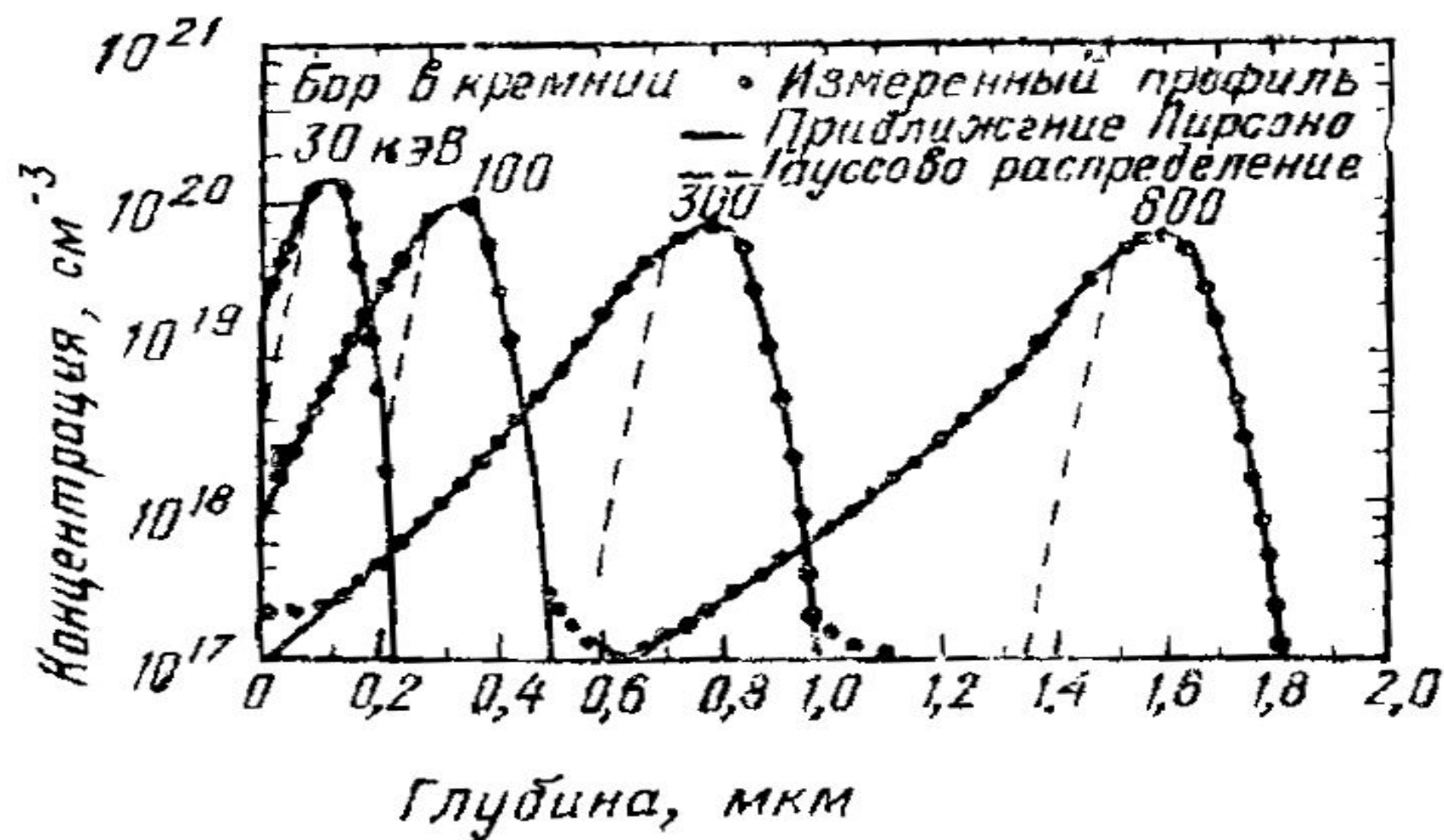
$\langle 100 \rangle$



$\langle 110 \rangle$







# Приближение Пирсона

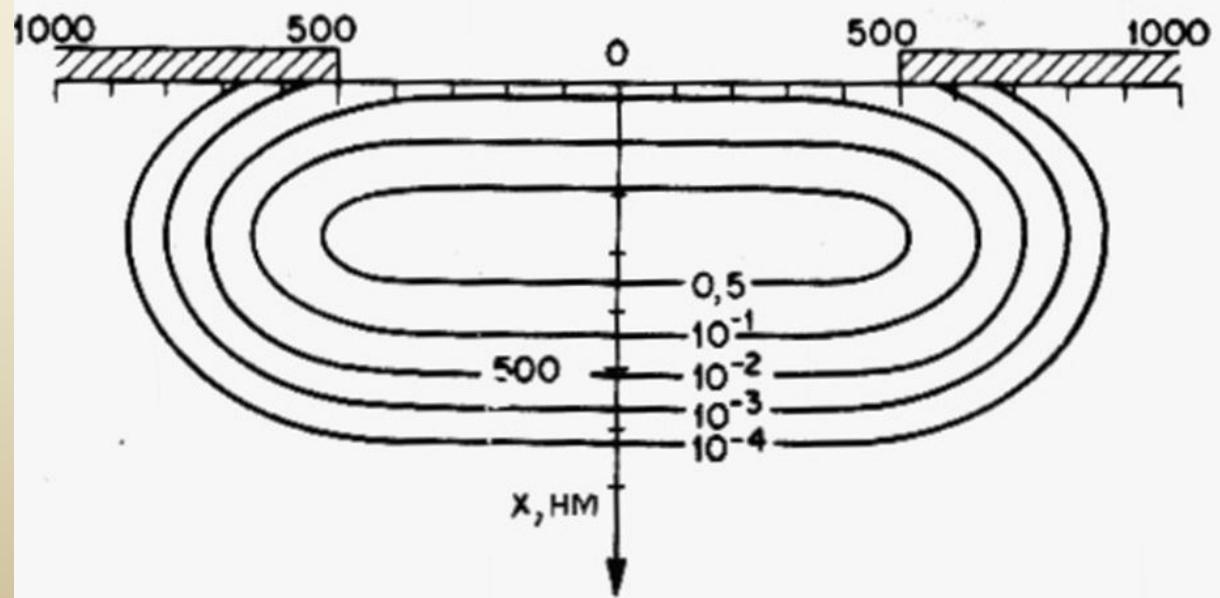
$$\frac{dh(x)}{dx} = \frac{(x' - a)h(x')}{b_2x'^2 + b_1x' + b_0}, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} h(x)dx = 1; \quad x' \equiv x - R_p.$$

$$\begin{aligned} a &= -\gamma_1\mu_2(\beta + 3)/A, & \mu_1 \text{ (средний пробег)} &= R_p = \int_{-\infty}^{+\infty} xh(x)dx, \\ b_0 &= -\mu_2^2(4\beta - 3\gamma_1^2)/A, & \mu_2 \text{ (рассеяние)} &= \Delta R_p = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - R_p)^2 h(x)dx, \\ b_1 &= a, & \gamma_1 \text{ (нормированная несимметричность)} &= \\ b_2 &= -(2\beta - 3\gamma_1^2 - 6)/A, & &= \int_{-\infty}^{+\infty} (x - R_p)^3 h(x)dx / \Delta R_p^3, \\ \text{где } A &= 10\beta - 12\gamma_1^2 - 18 & \beta \text{ (нормированное затухание)} &= \int_{-\infty}^{+\infty} (x - R_p)^4 h(x)dx / \Delta R_p^4. \end{aligned}$$



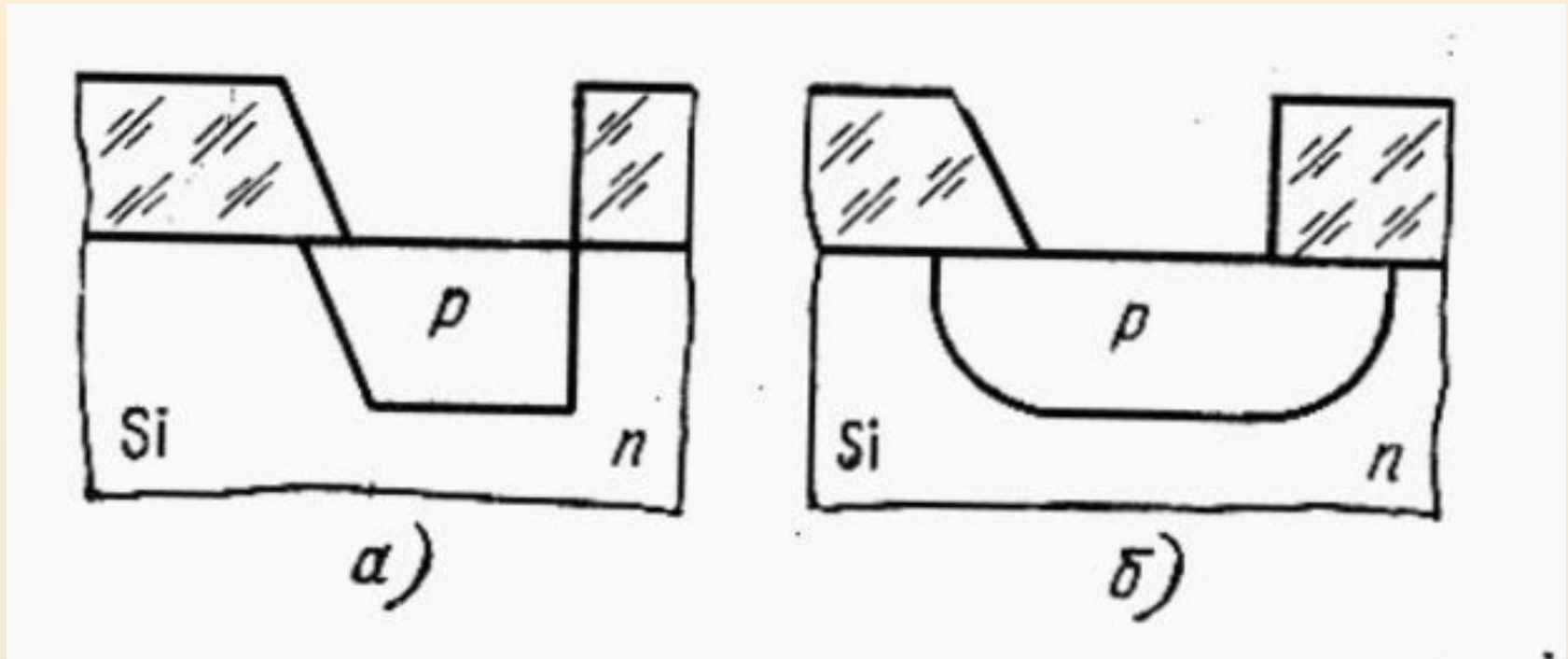
$$N(x, y) = \frac{N(x)}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{y-a}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{\perp}} \right) - \operatorname{erfc} \left( \frac{y+a}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{\perp}} \right) \right]$$

y, нм





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

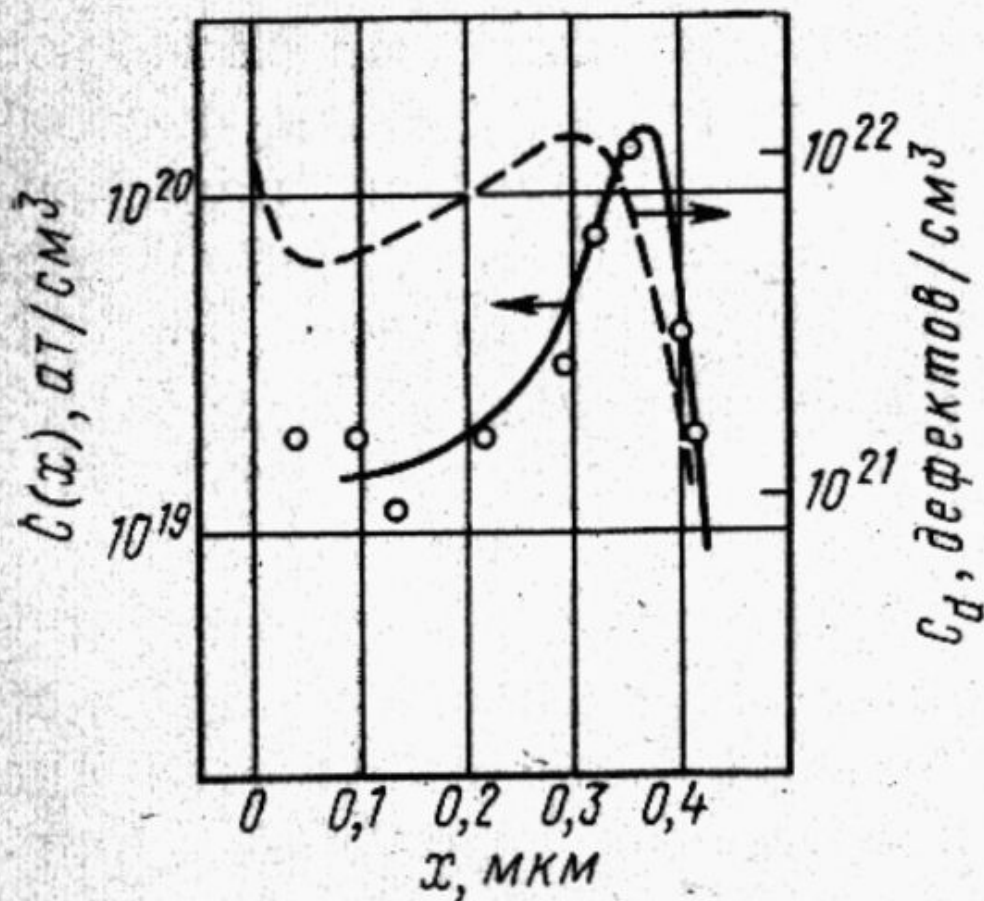


Маскирование производится пленками окиси кремния; или  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , фоторезистами, поликремнием или пленками металлов

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

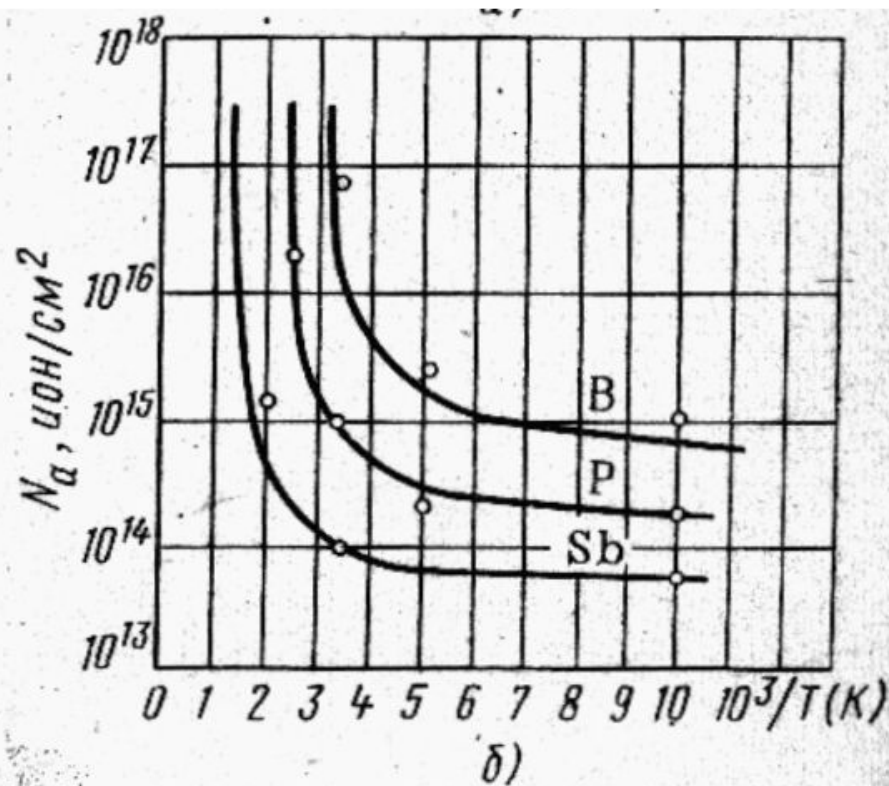
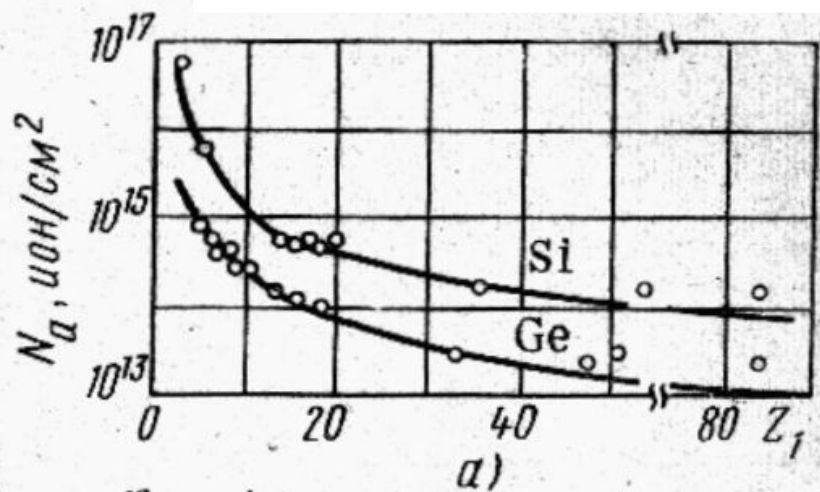
**кластер радиационных нарушений** - скопление простых дефектов

**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)



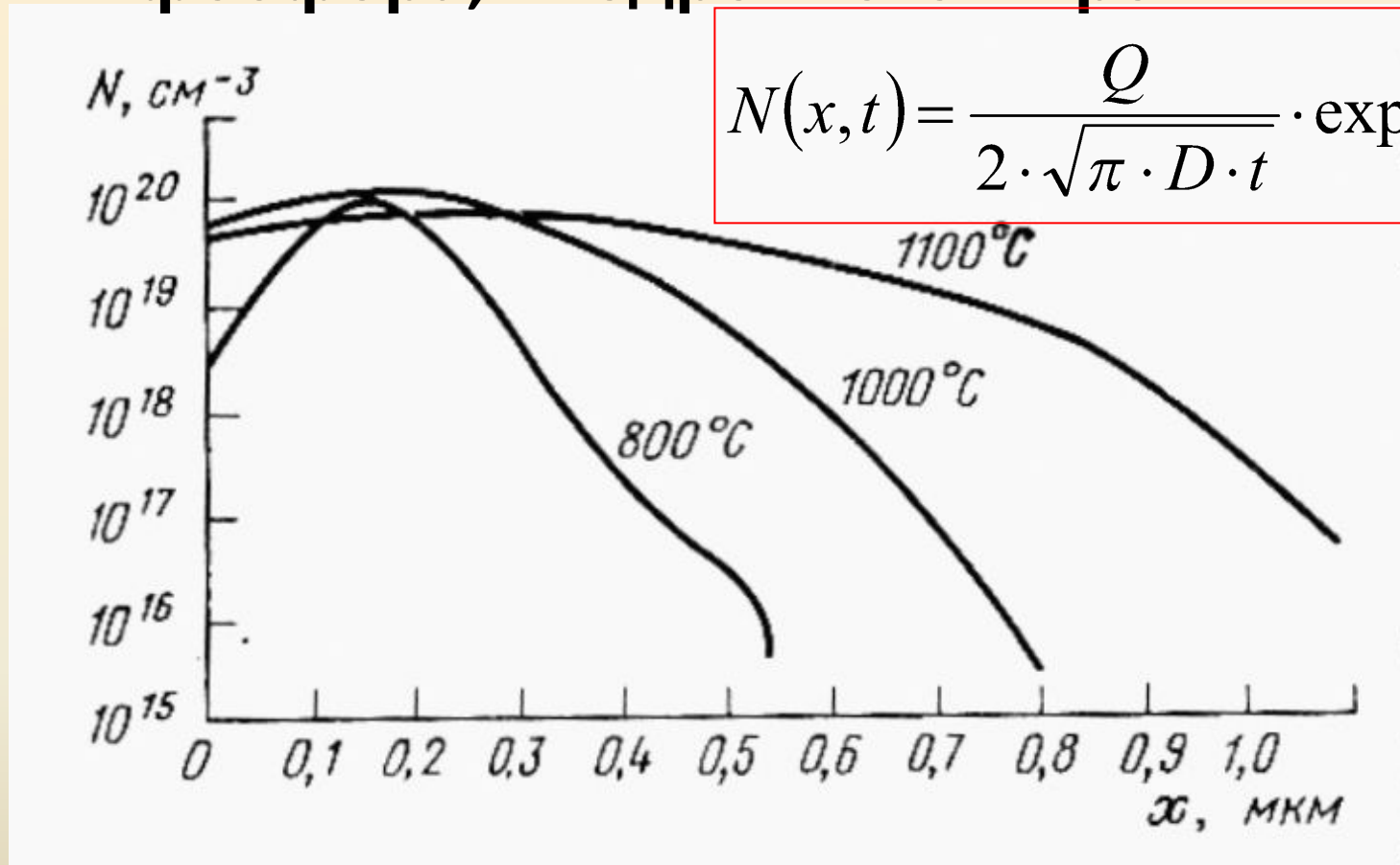
**критическая температура  
аморфизации  $T_{кр}$**

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

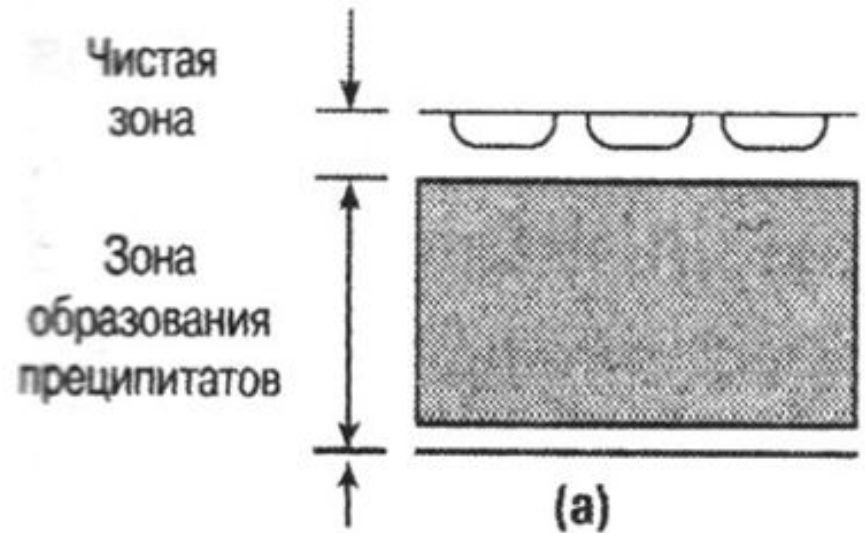


(б)

Новые зародыши не образуются, имеющиеся растут



(д)

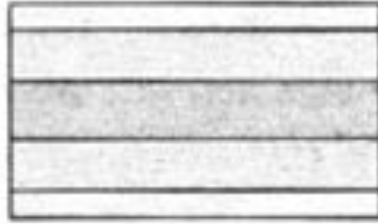


Поперечное сечение

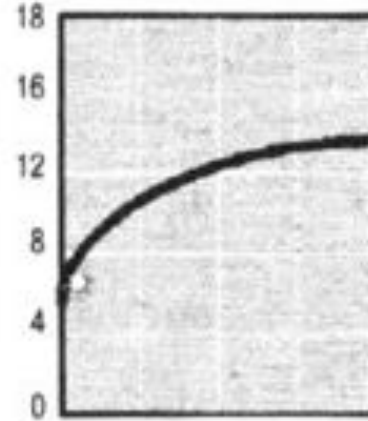
Профиль распределения атомов кислорода

Профиль распределения дефектов, экстрагирующих атомы кислорода

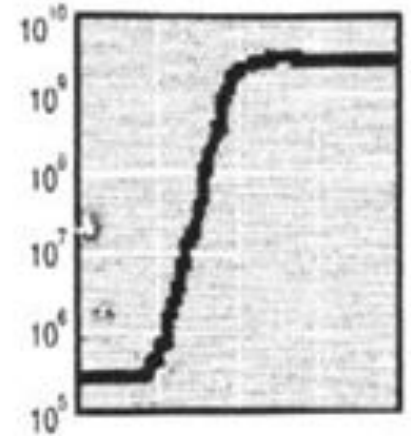
Бездефектные пластины кремния, выращенные по методу Чохральского



Концентрация атомов кислорода ( $\times 10^{17}$  атом/см<sup>3</sup>)

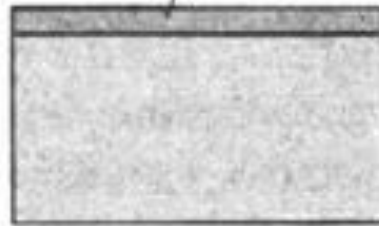


Плотность дефектов, экстрагирующих атомы кислорода (рост)

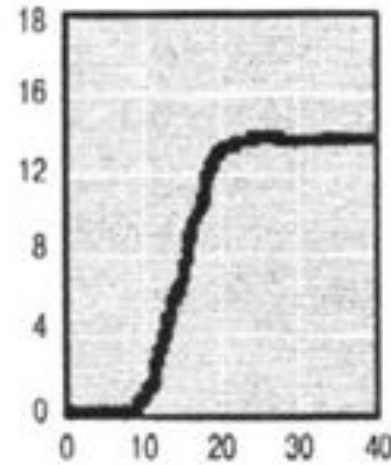


Пластины кремния, содержащие эпитаксиальный слой

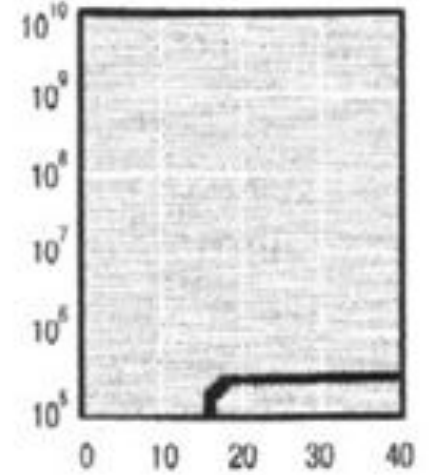
Эпитаксиальная пленка



Концентрация атомов кислорода ( $\times 10^{17}$  атом/см<sup>3</sup>)

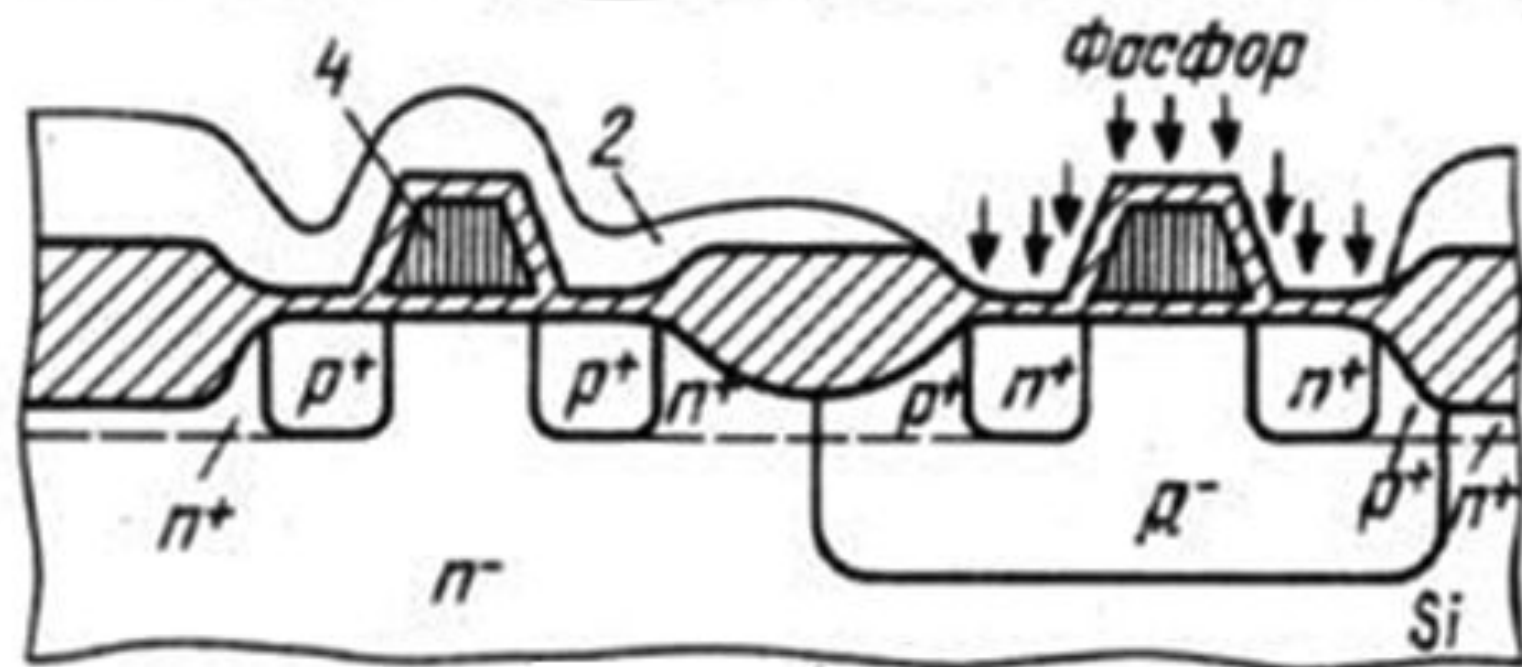
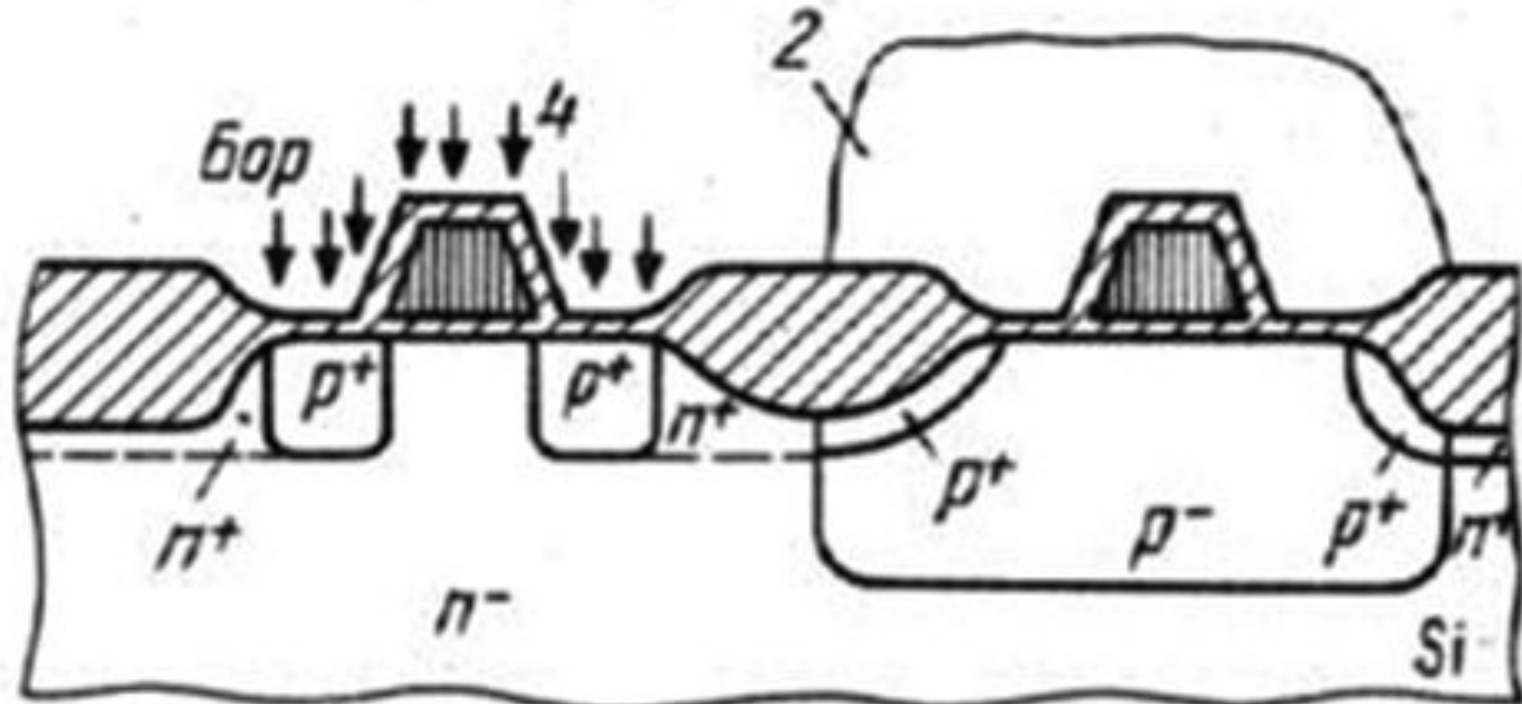


Плотность дефектов, экстрагирующих атомы кислорода (рост)



Глубина от поверхности Si пластины, мкм

Глубина от поверхности Si пластины, мкм



# Косой шлиф

