

Двух- и трехмерные точечные источники

$$N(r, t) = \frac{Q}{(4\pi Dt)^m} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) = \frac{Q}{(4\pi Dt)^m} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{L^2}\right)$$

r - расстояние от источника диффузанта

$m = 1/2, 1$ и $3/2$, соответственно, для одно-, двух- и трехмерного источников

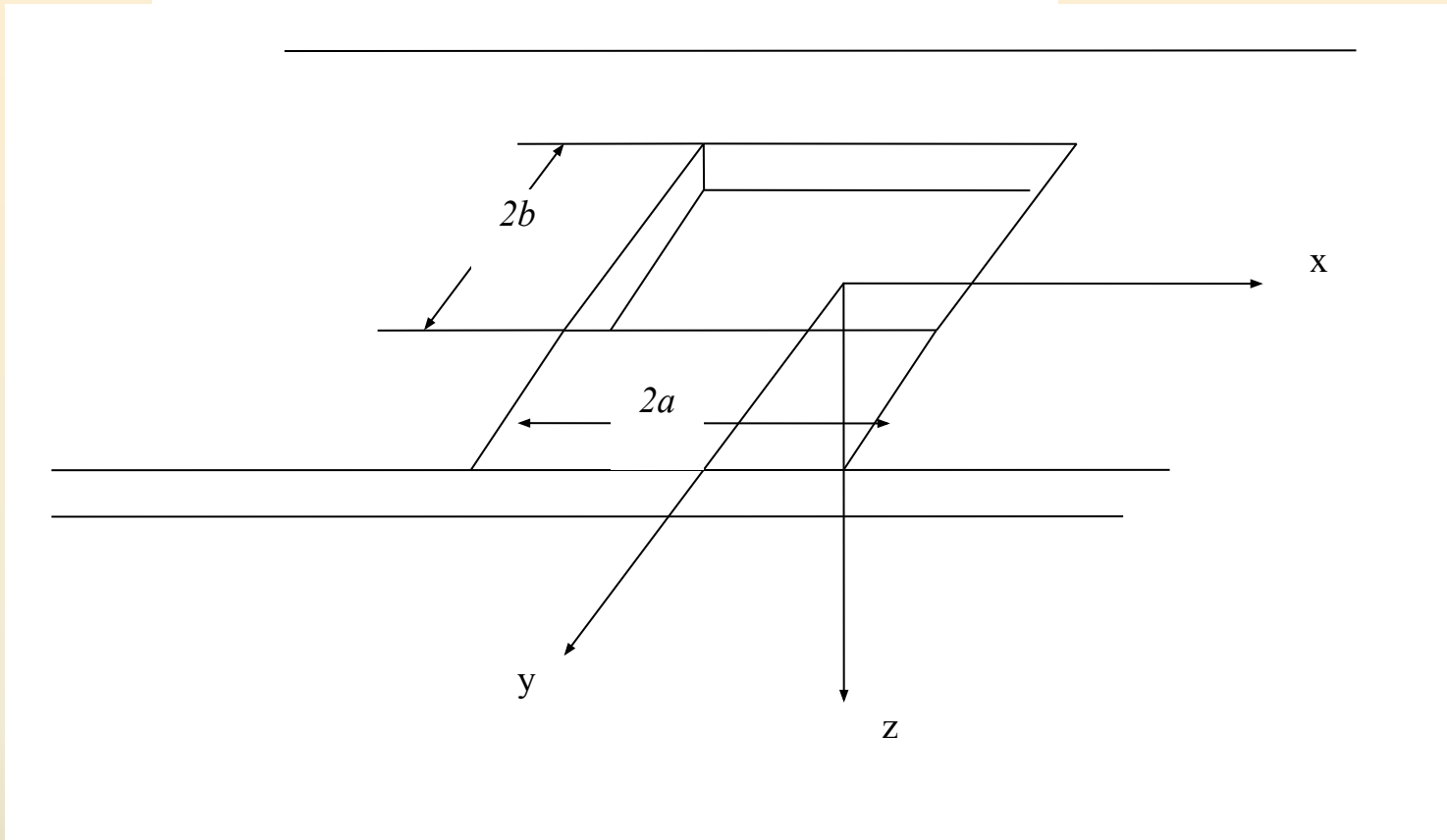
Формула Пуассона

$$N(x, y, z, t) = \iiint_{\infty} \frac{F(\chi, \eta, \zeta)}{(4\pi Dt)^{3/2}} \exp\left[-\frac{(x-\chi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}{4 \cdot D \cdot t}\right] d\chi d\eta d\zeta$$

$$N(x, t) = \int_{\infty} \frac{F(\chi)}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left[-\frac{(x-\chi)^2}{4 \cdot D \cdot t}\right] d\chi$$

$$F(N(x, y, z, t)) = FN(x, t) \cdot FN(y, t) \cdot FN(z, t)$$

Диффузия в прямоугольное окно



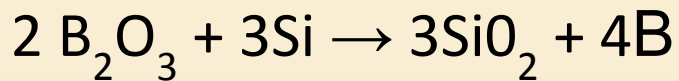
$$N(x, y, z, t) = \frac{N_S}{4} \cdot \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x-a}{L}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{x+a}{L}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{y-b}{L}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{y+b}{L}\right) \right] \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{L}\right)$$

Источники диффузанта

- **Бор (В)**

B_2H_6 (диборан); смесь (порядка 5%) с Ar

БСС ($nB_2O_3 \cdot mSiO_2$), B_2O_3



ТПИ – BN (нитрид бора)

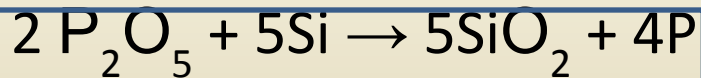
BCl_3 и BBr_3

- **Фосфор (P), мышьяк (As) и сурьма (Sb)**

PCl_3 , оксихлорид фосфора $POCl_3$

PH_3 (фосфин); $2 PH_3 \rightarrow 3H_2 + 2P$

P_2O_5 , ФСС ($nP_2O_5 \cdot mSiO_2$)



Поверхностные источники: ортофосфаты кремния, $(NH_4)_2HPO_4$,

ФСС

ТПИ: нитрид фосфора, фосфид кремния, ФСС, метафосфат алюминия, пирофосфат кремния

Выбор легирующей примеси

- **Система энергетических уровней, создаваемых данной группой примесей в запрещенной зоне полупроводника.**

Все основные донорные и акцепторные примеси в кремнии (элементы V и III групп) имеют $E_a \approx 0.06$ эВ. Исключением является In: $E_a \approx 0.16$ эВ от E_v (используется при создании фотоприемных устройств).

Примеси, имеющие энергетические уровни, расположенные вблизи середины ЗЗ, например, Au, применяются для снижения времени жизни ННЗ.

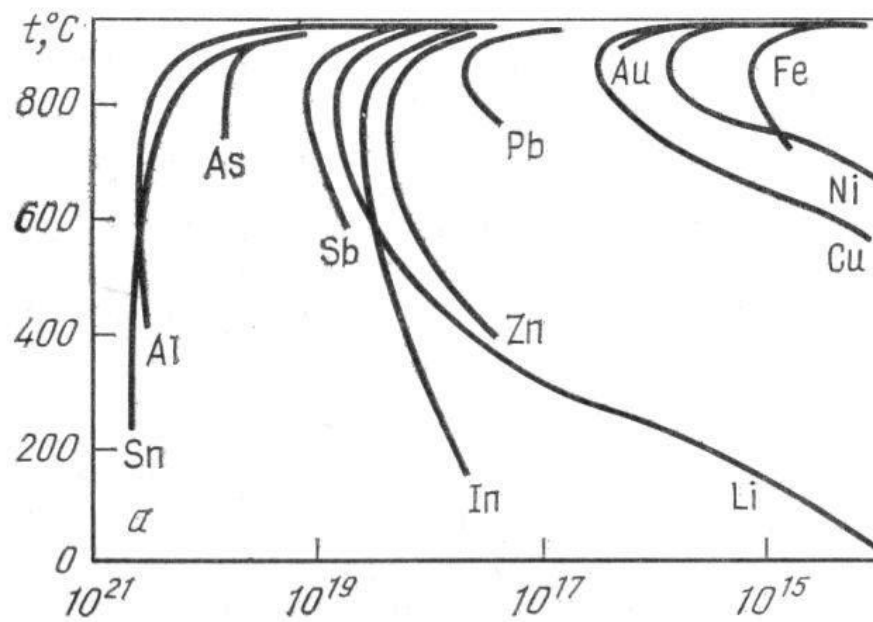
- **Предельная растворимость примеси.**

P ($1,5 \cdot 10^{21}$ см⁻³), As ($2 \cdot 10^{21}$ см⁻³), Sb ($5 \cdot 10^{19}$ см⁻³),
В ($5 \cdot 10^{20}$ см⁻³), Al ($2 \cdot 10^{19}$ см⁻³).

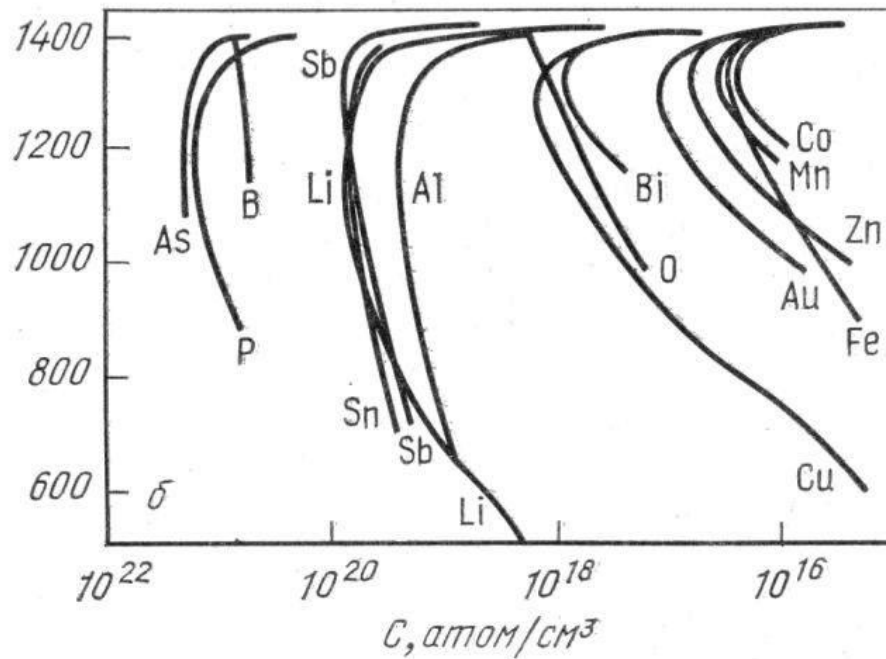
- **Величина коэффициента диффузии.**

Наибольший коэффициент диффузии D имеет Al. Заметно уступают ему В и Р. Очень велики D у Au и O₂.

- **Технологичность.** В первую очередь D в Si и SiO₂.



Ge



Si

Ретроградная растворимость примесей в германии (а) и кремнии (б)

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

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

ИСТОЧНИК
ИОНОВ



ускоритель

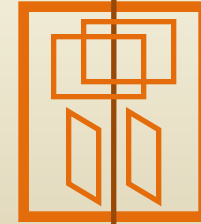


Анализатор
ионов по
массе



ускоритель

интегратор
заряда



ОТКЛОНЯЮЩИЕ
ПЛАСТИНЫ

Энергия ионов

от десятков

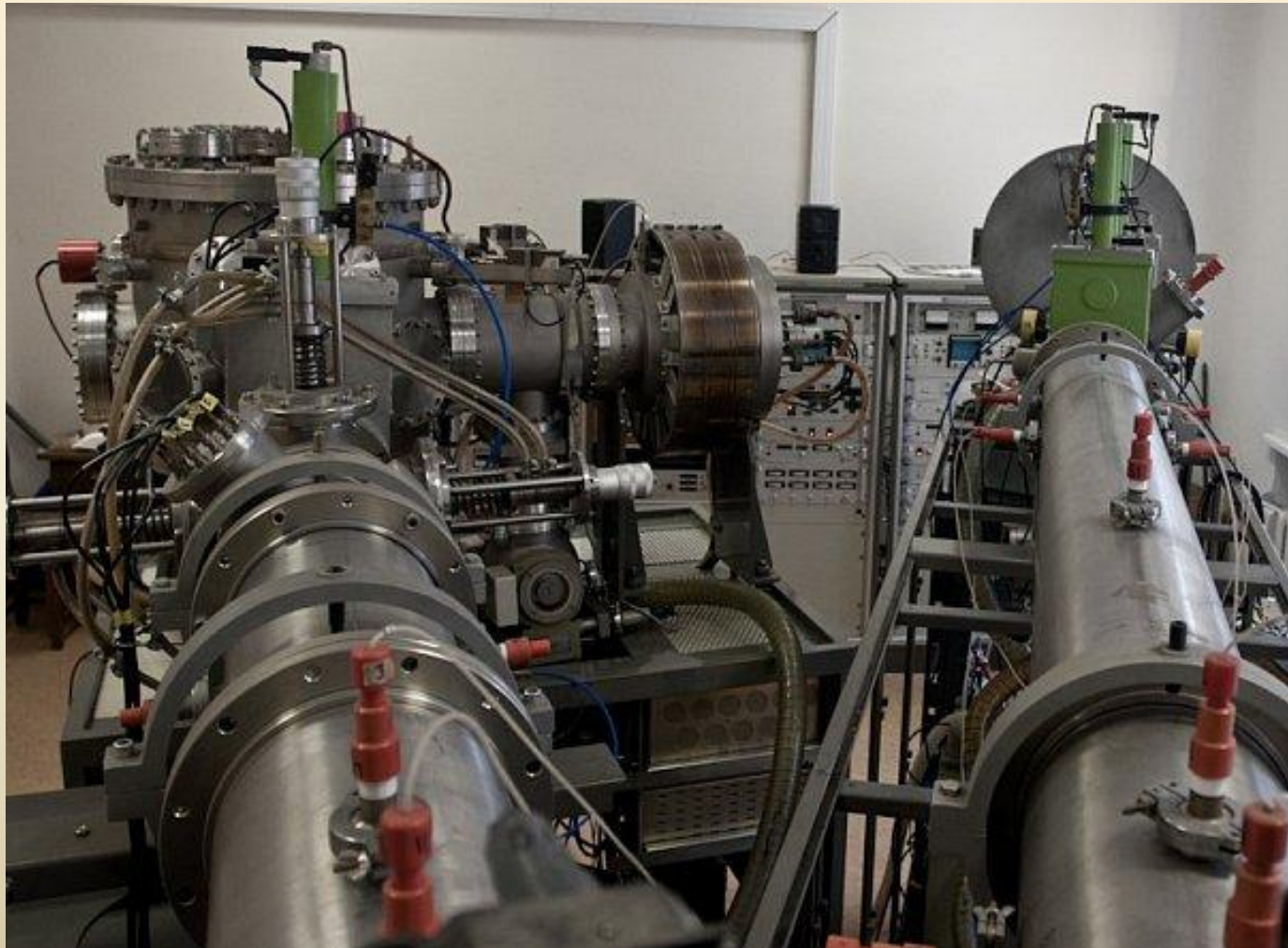
килоэлектронвольт

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/м²] и длительностью облучения t [с]:

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

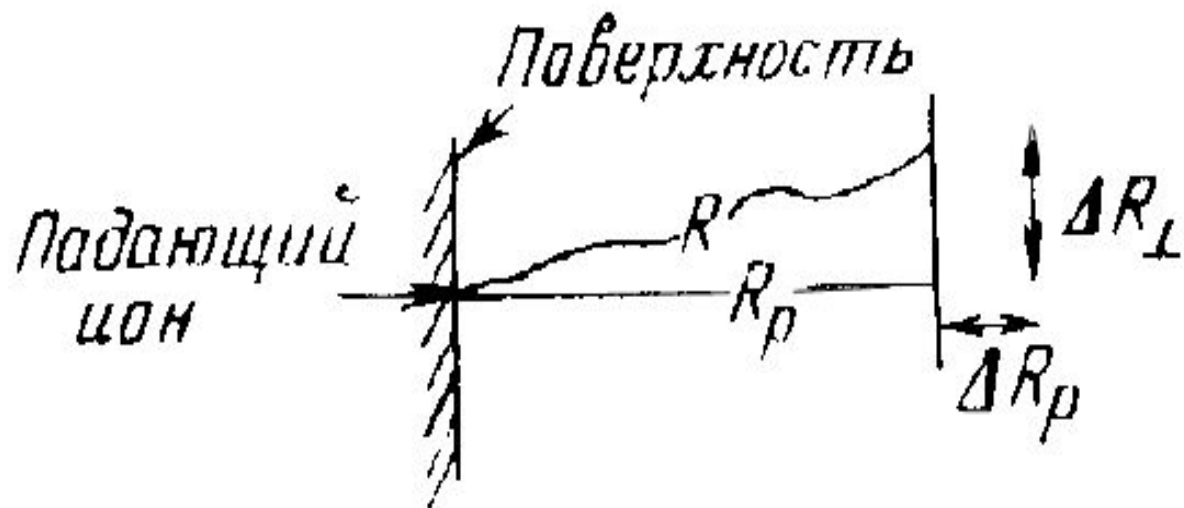
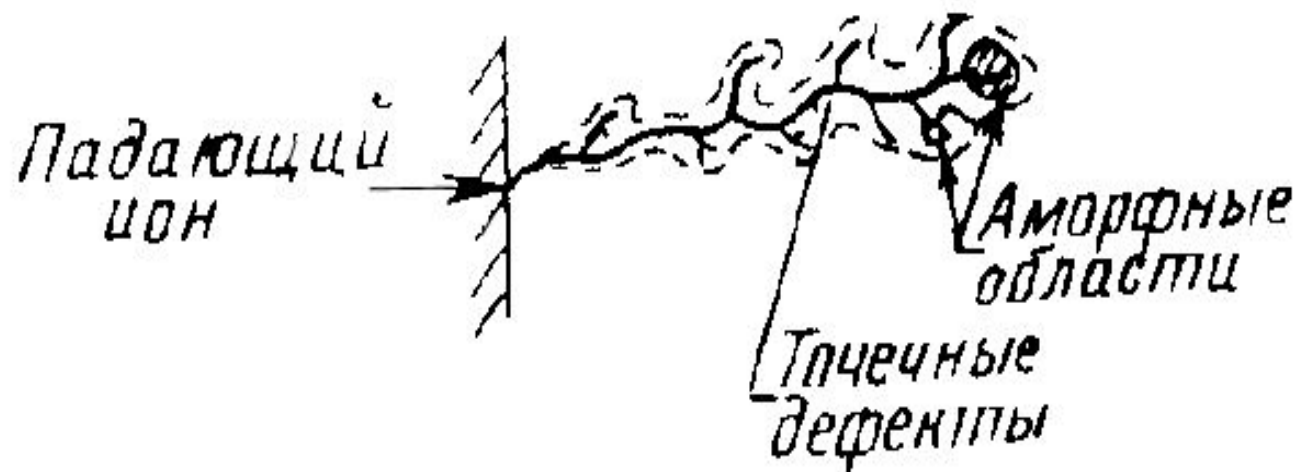
Чтобы выразить дозу в количестве частиц, внедренных на единице поверхности, величину делят на заряд одной частицы:

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

, ИОН/СМ .

ИСТОЧНИКИ

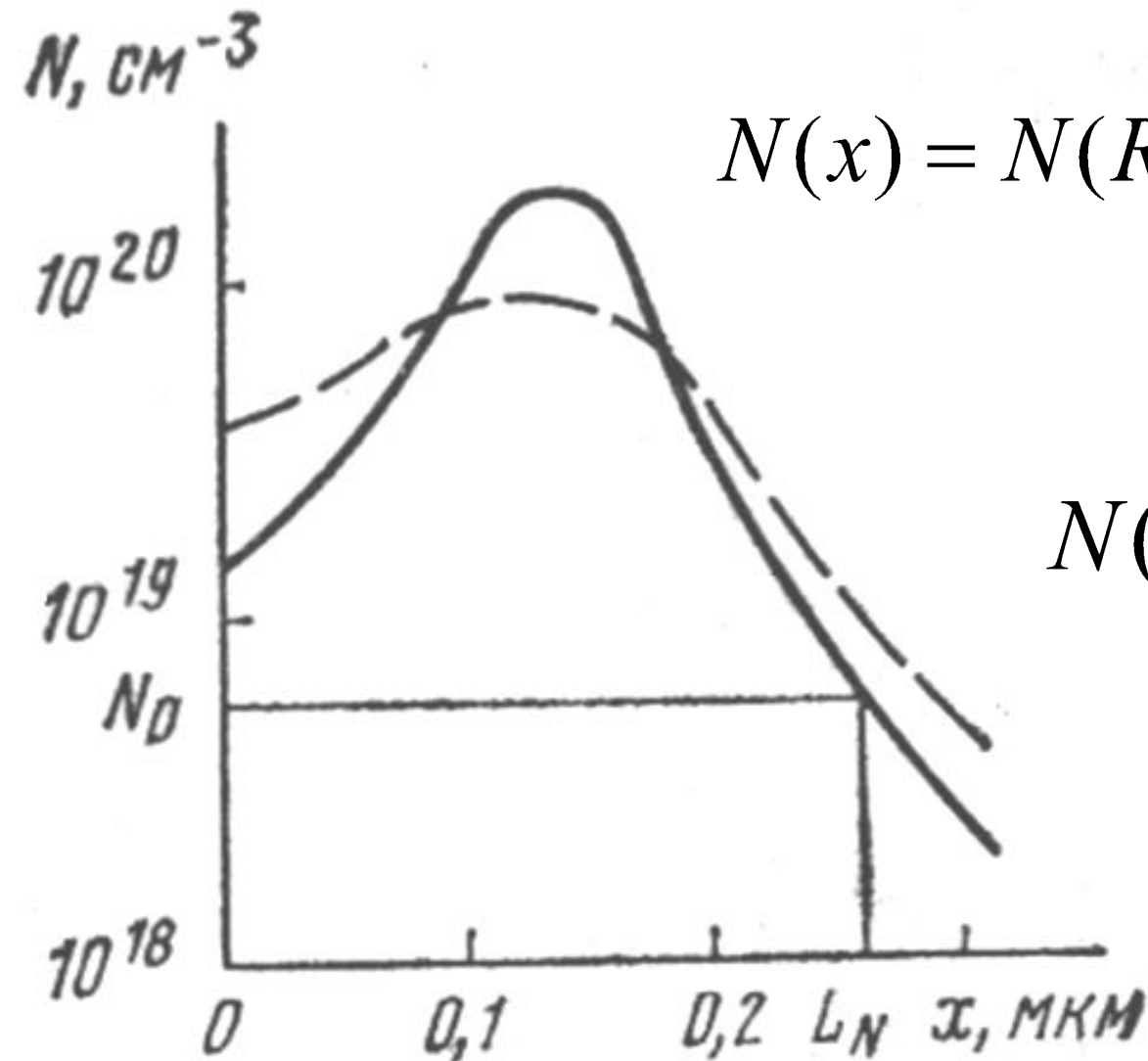
- **с поверхностной термической ионизацией** – нагреватель (вольфрамовая лента) на него насыпается соль металла – KJ , $NaCl$, $CaCl_2$ т.д., получают ионы Na^+ , K^+ , Li^+ , Cs^+ , Rb^+ , J^- , F^- , Br^- , Cl^- ;
- **с ионизацией электронным ударом**: электроны создаются термоэмиссией или в газовом 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 $10 \cdot 10^{-2}$ Па), магнитное поле увеличивает эффективность; на анод подается 2-10 кВ;
на основе дугового разряда в парах рабочего вещества (BF_3 , AsH_3 , PCl_3 , B_2H_6) при низких давлениях (порядка 1 Па).



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

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

$$S_n = \sigma NE$$

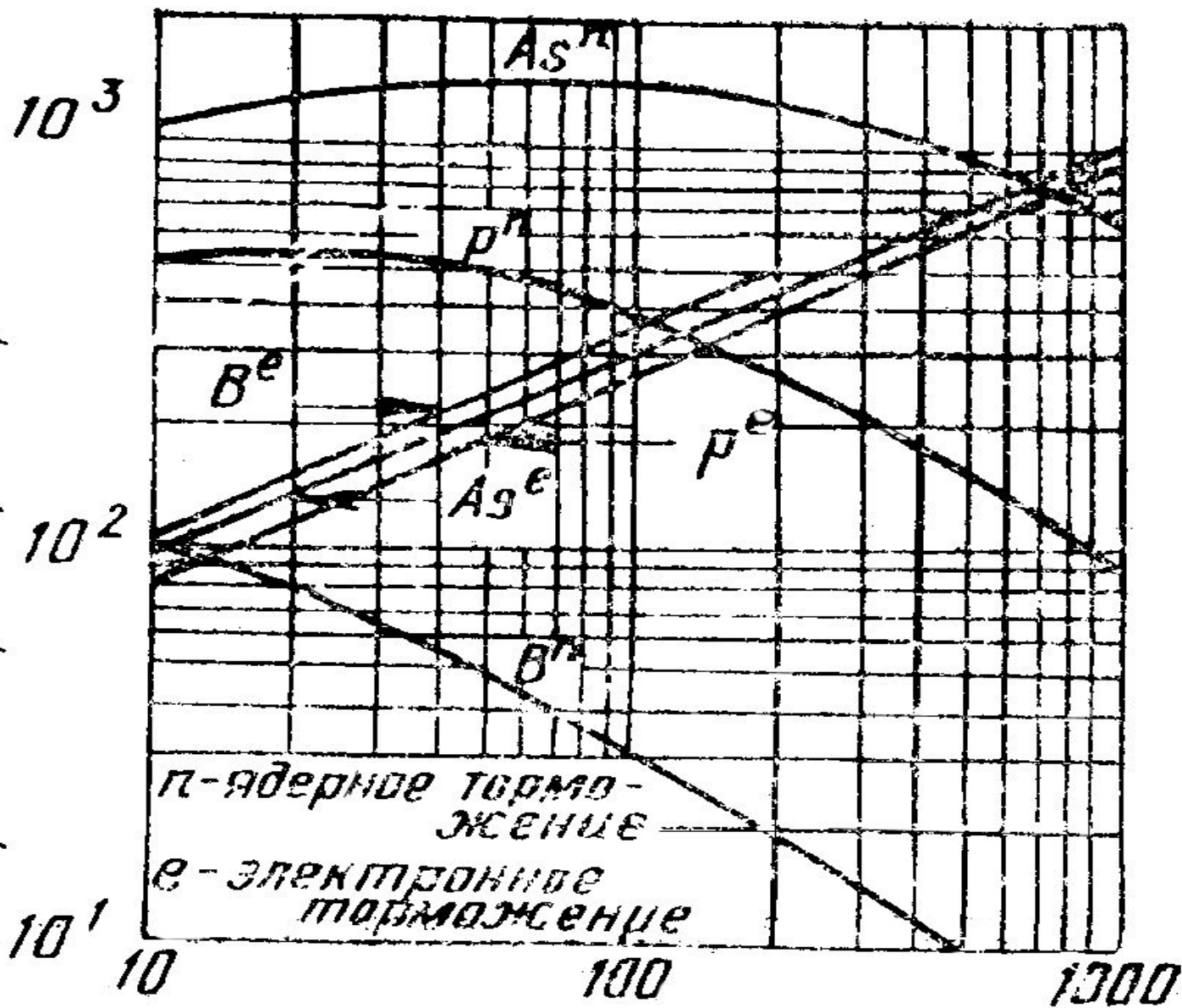
$$E_{\max} = E_0 \frac{4M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2}$$

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

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

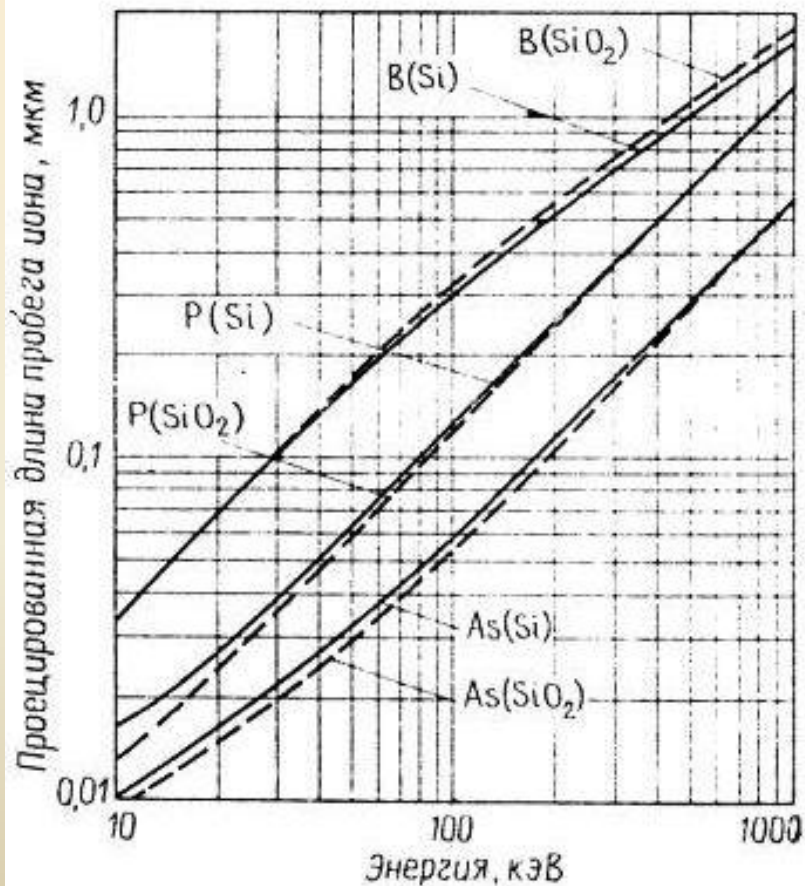
Sp,

Потери энергии, кэВ/мм

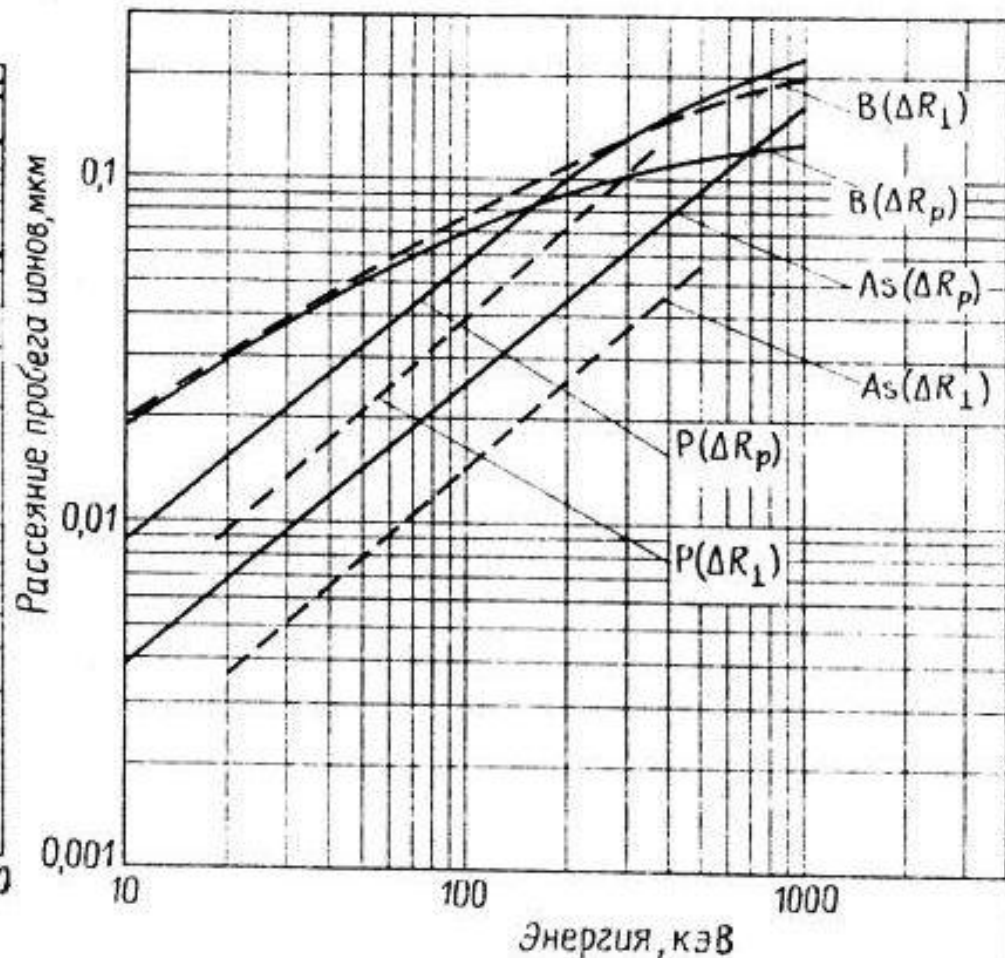


Энергия, кэВ

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

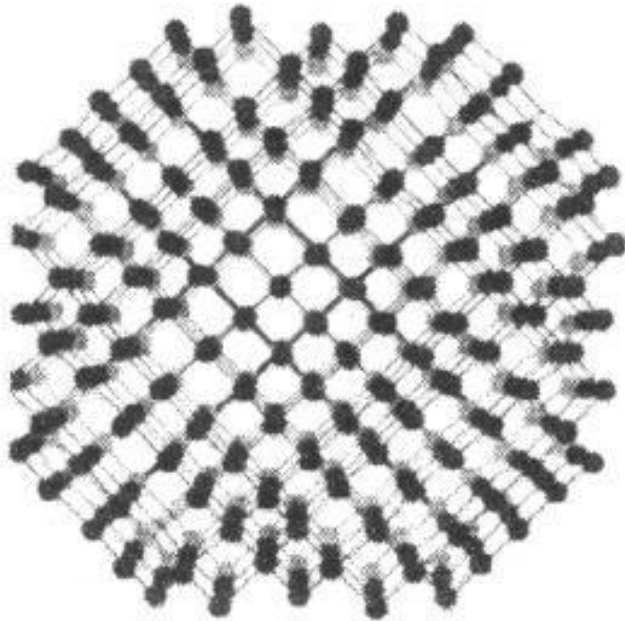


а

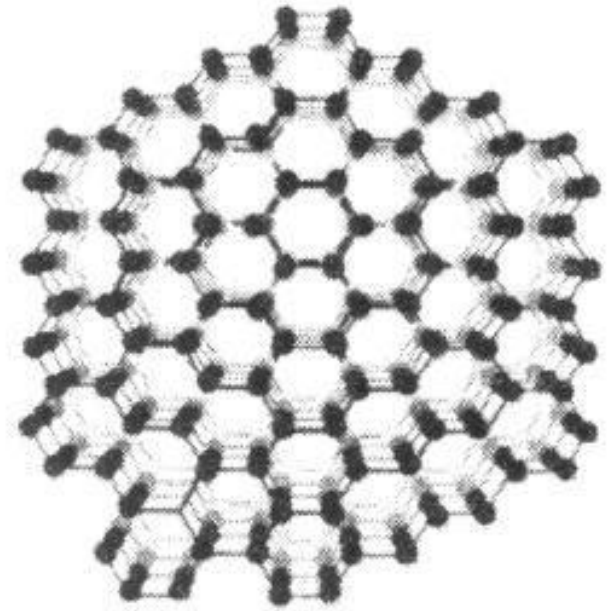


б

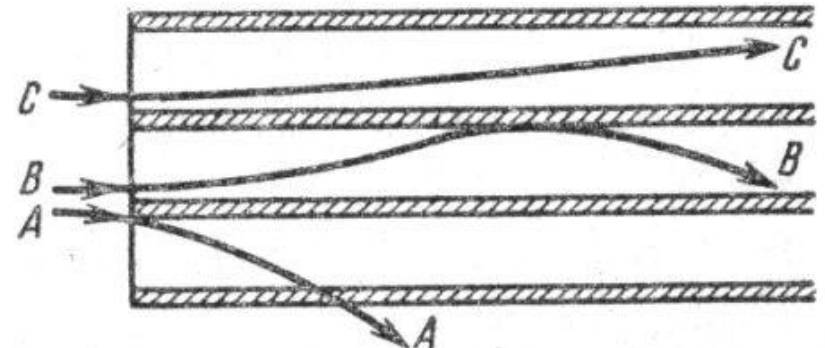
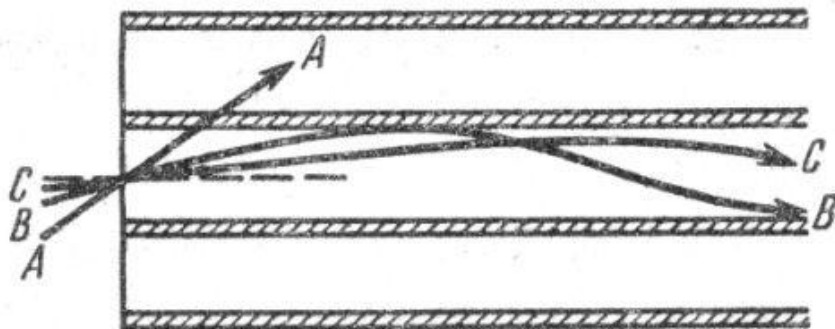
Канализирование ионов

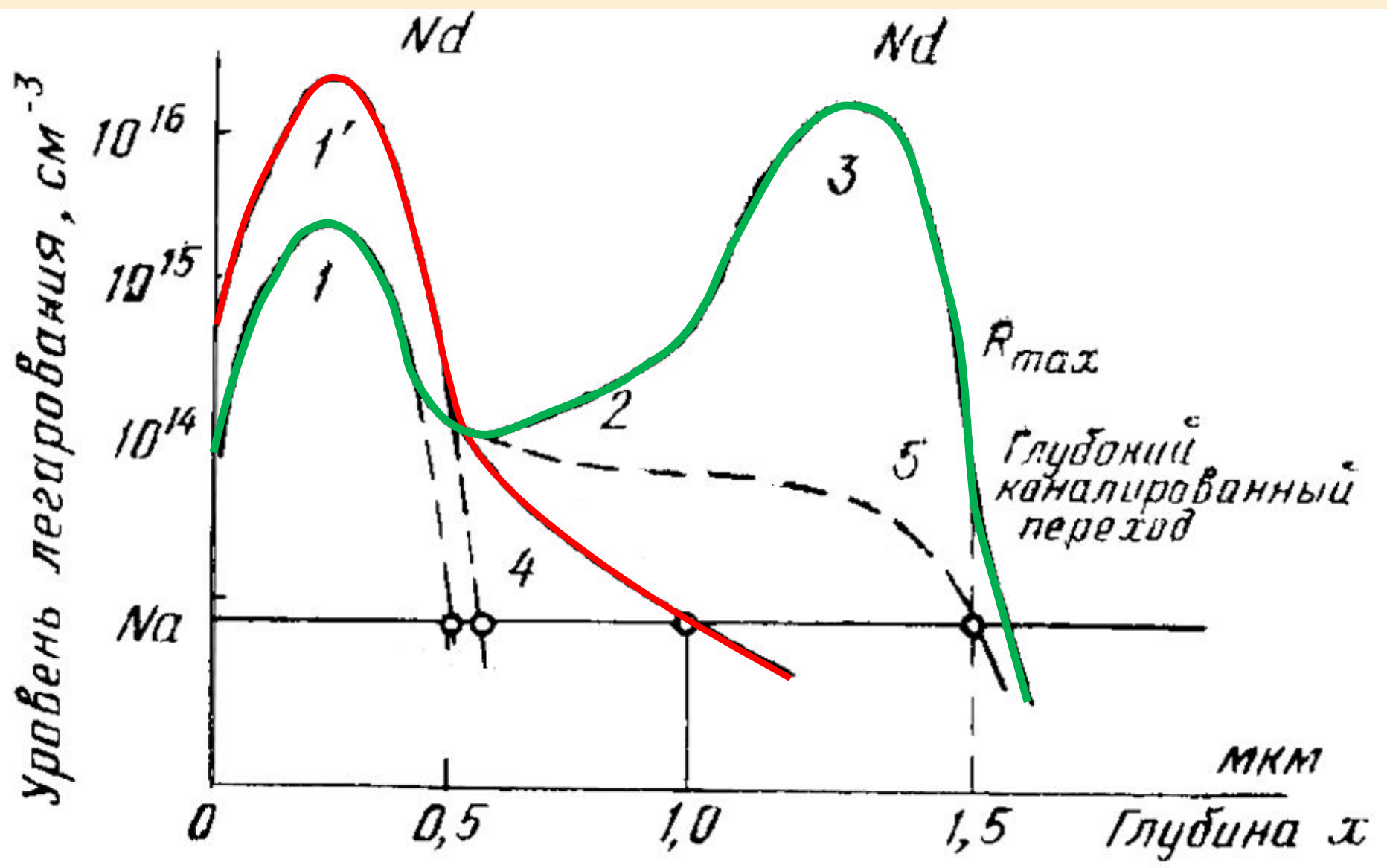


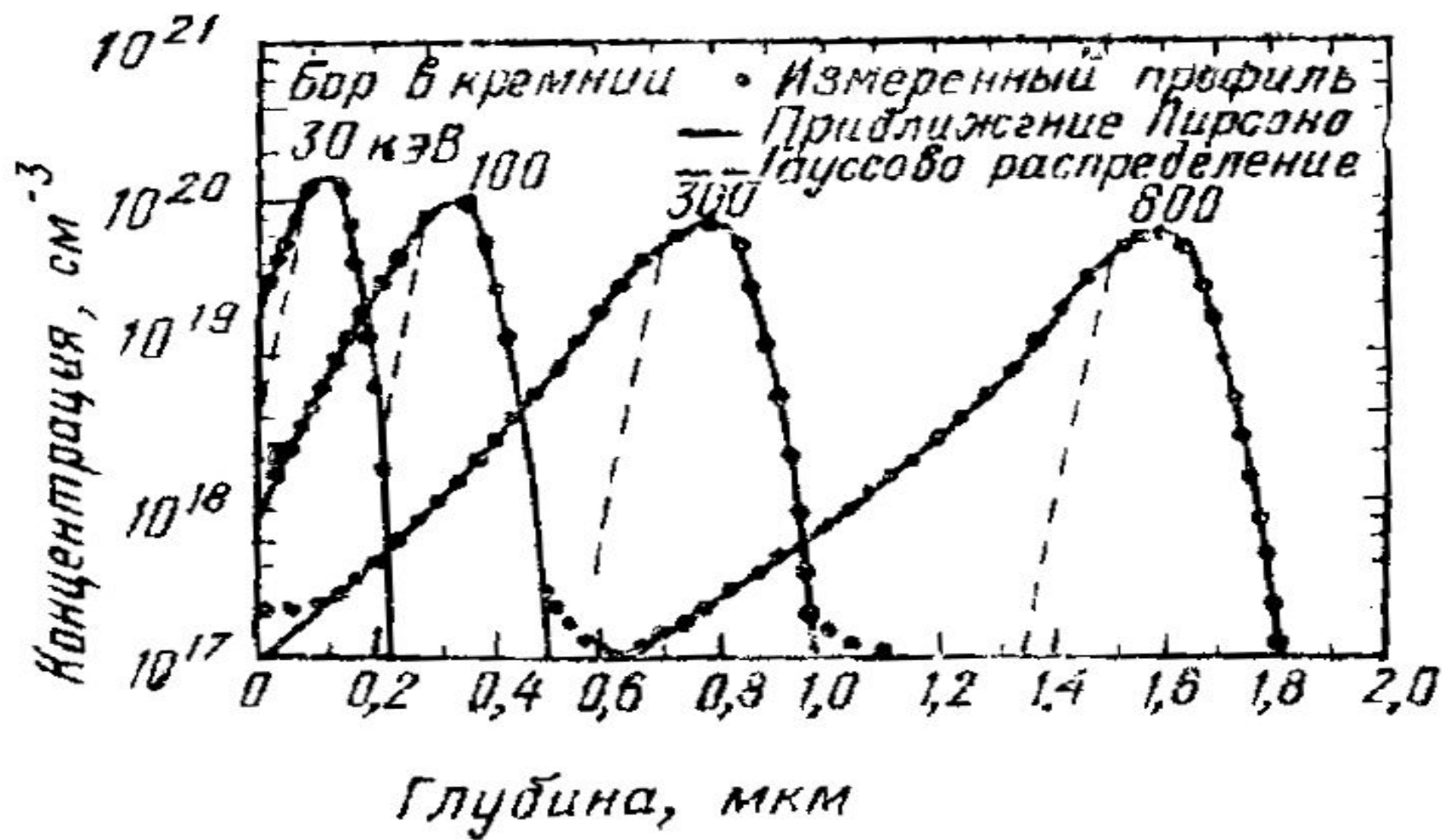
$\langle 100 \rangle$



$\langle 110 \rangle$



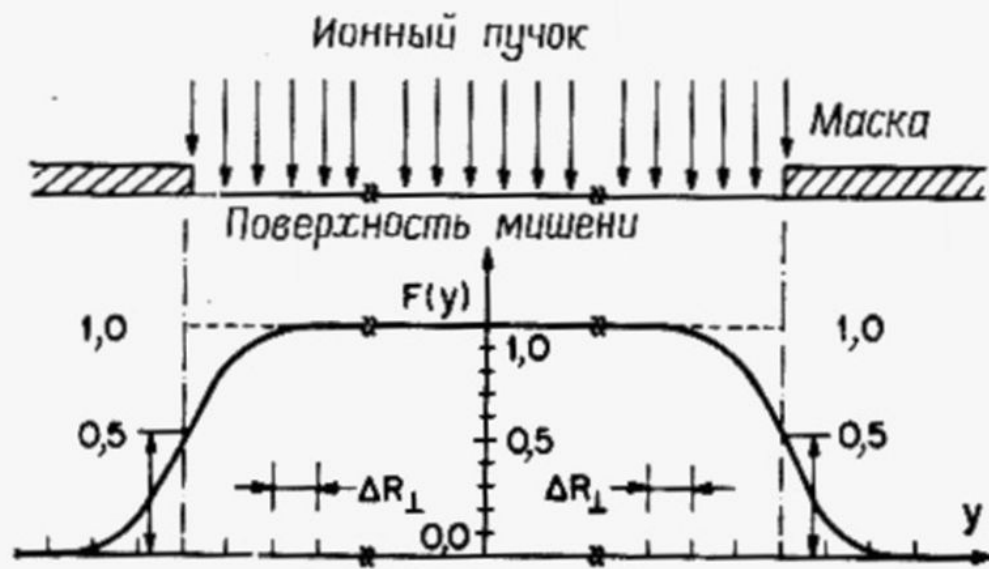




Приближение Пирсона

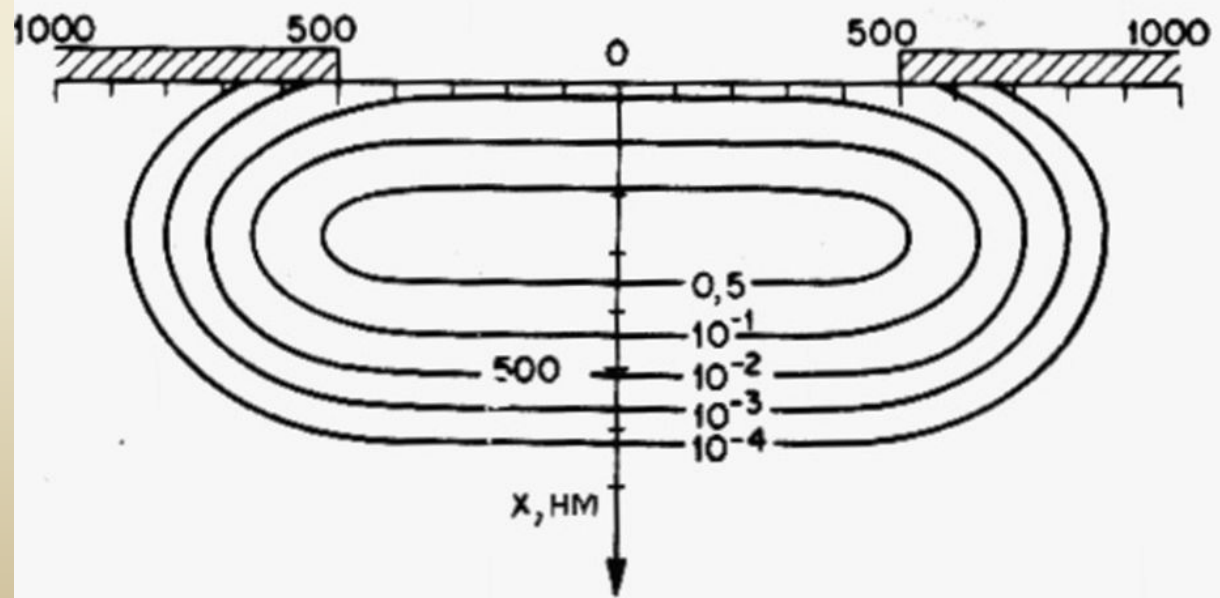
$$\frac{dh(x)}{dx} = \frac{(x' - a)h(x')}{b_2x'^2 + b_1x' + b_0}, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} h(x)dx = 1; \quad x' \equiv x - R_p.$$

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

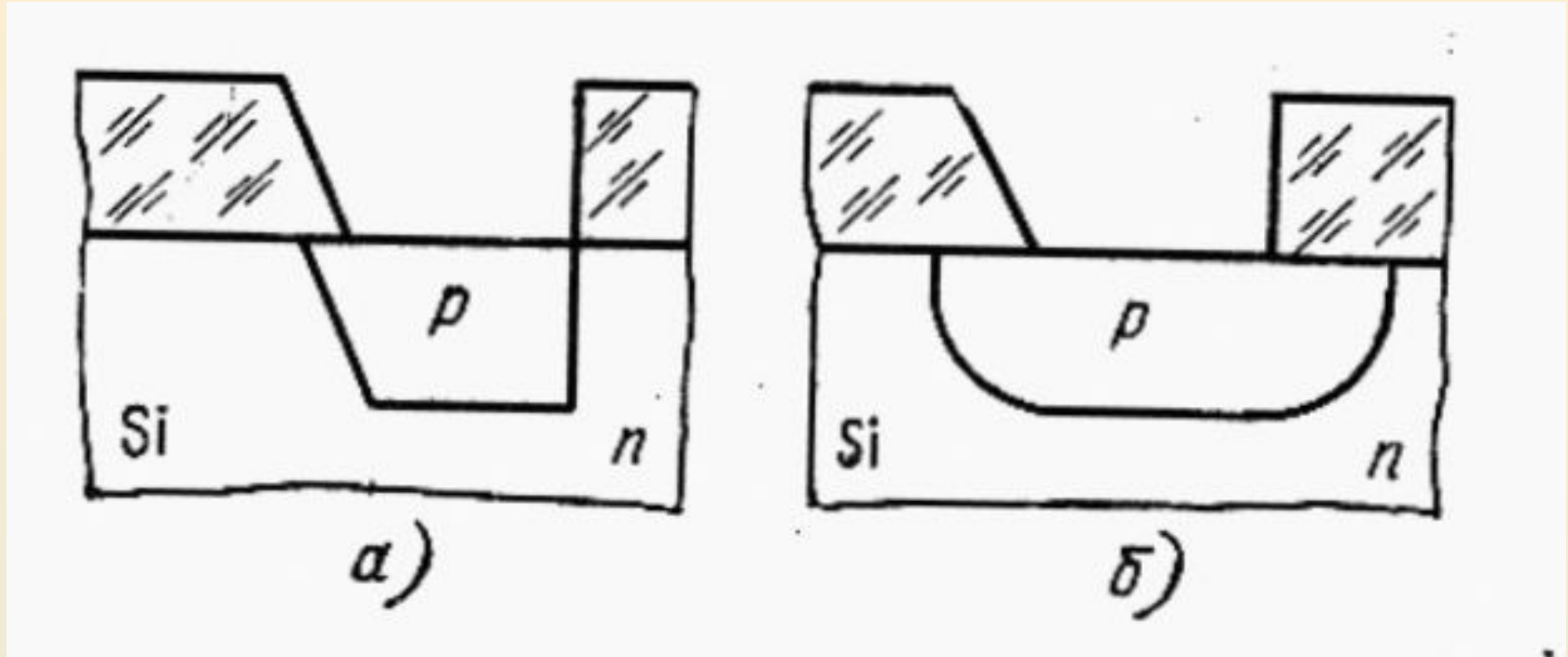


$$N(x, y) = \frac{N(x)}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{y-a}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{\perp}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{y+a}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{\perp}} \right) \right]$$

y, нм



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

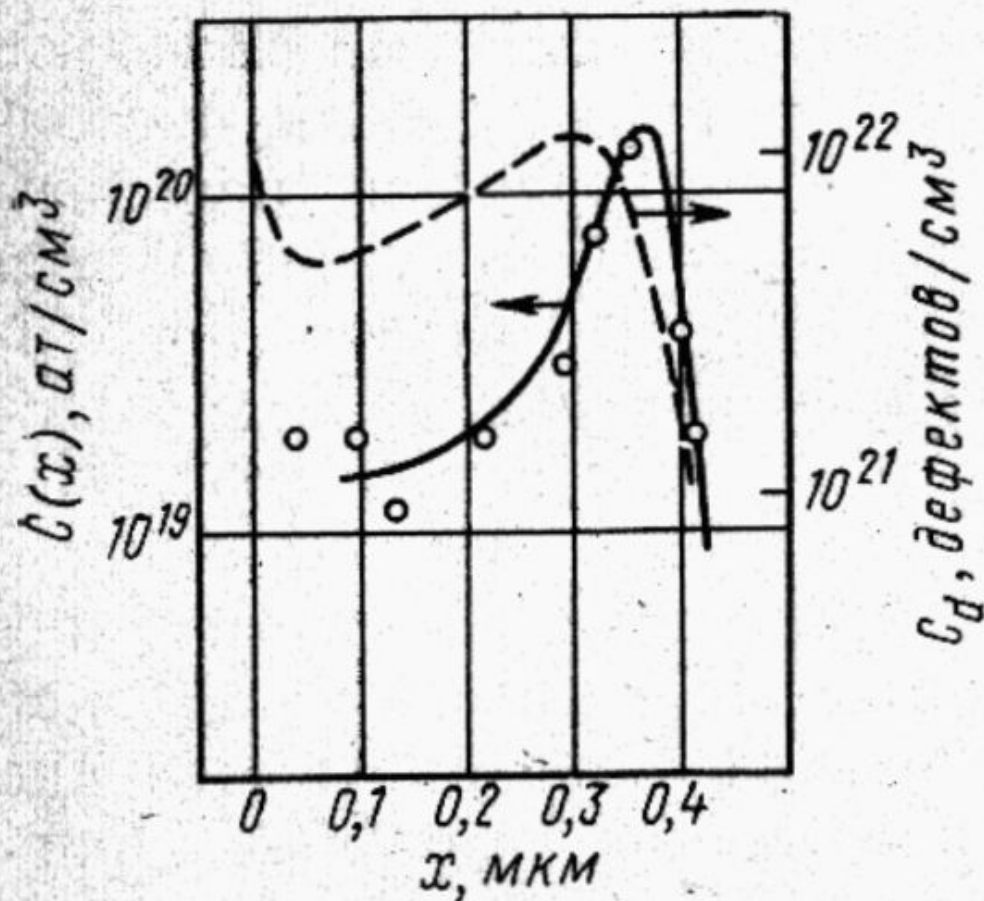


Маскирование производится пленками окиси кремния; или Si_3N_4 , фоторезистами, поликремнием или пленками металлов

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

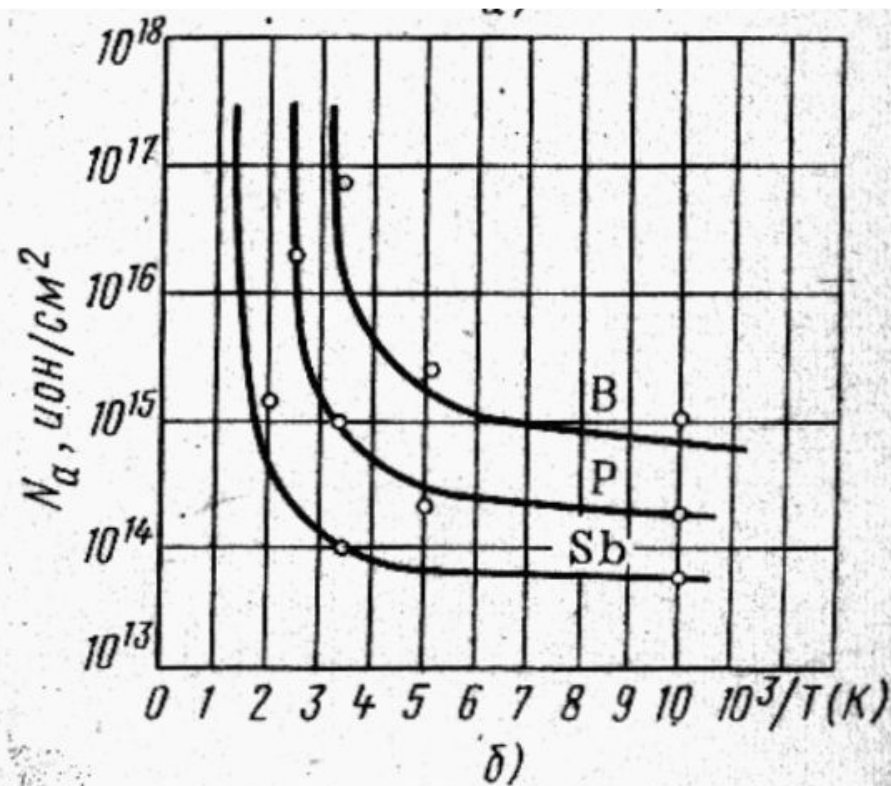
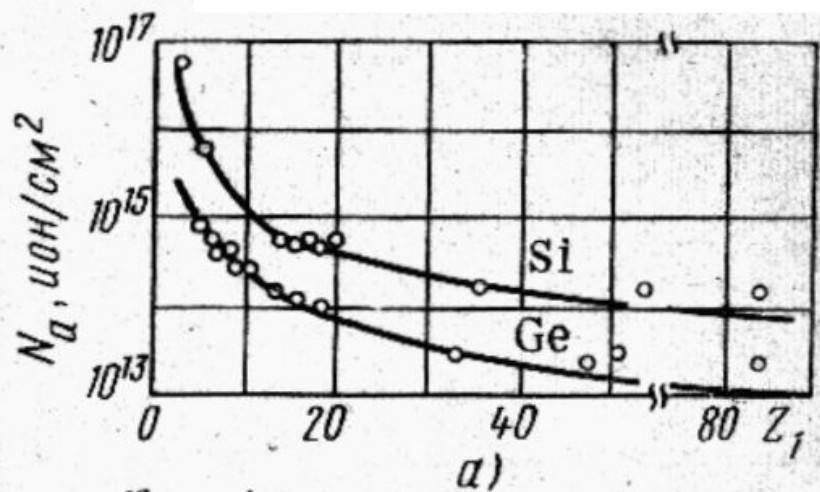
кластер радиационных нарушений - скопление простых дефектов

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)



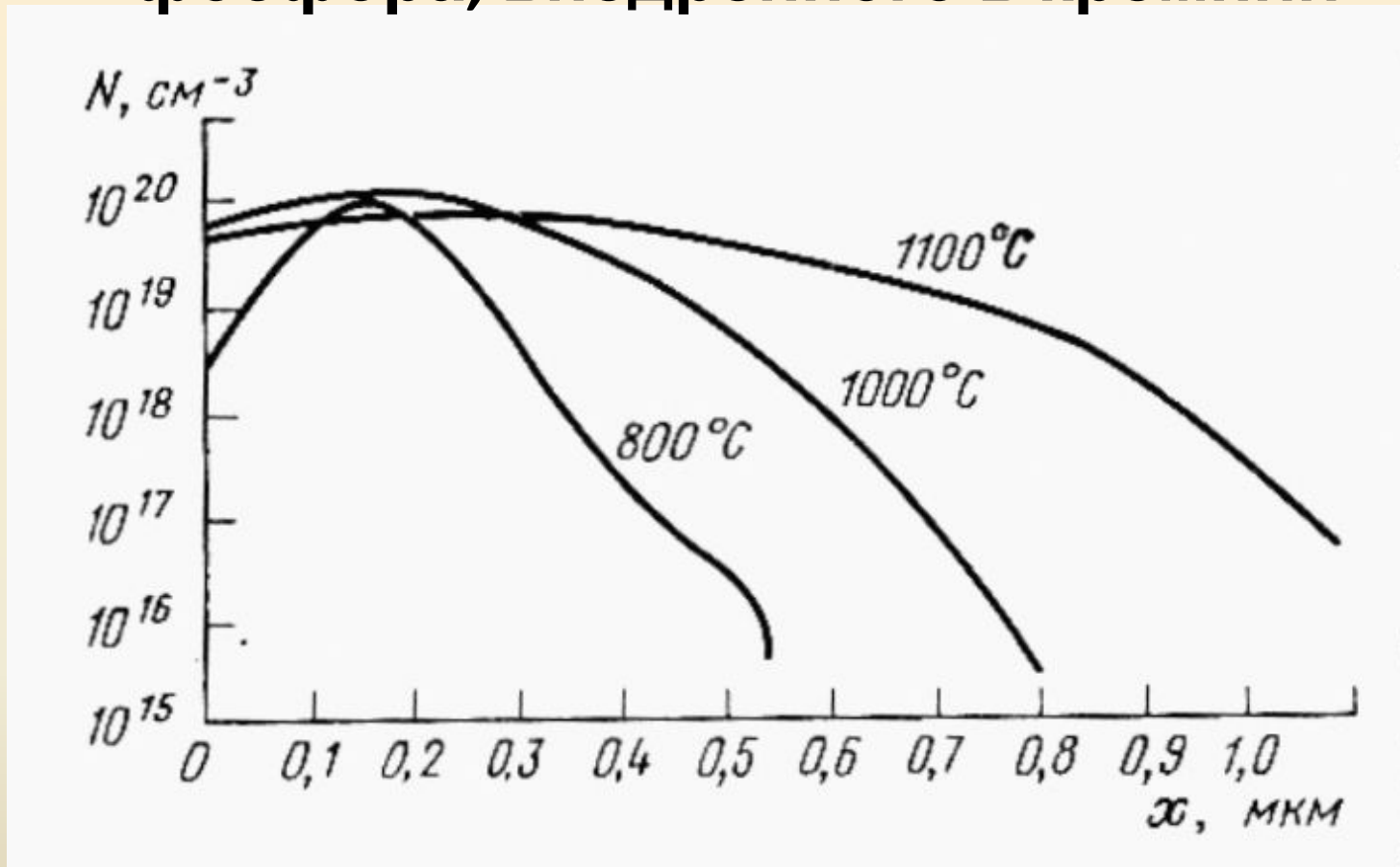
**критическая температура
аморфизации $T_{кр}$**

для бора 24°C ,

для фосфора 175°C ,

для сурьмы 460°C

Влияние термообработки на распределение фосфора, внедренного в кремний



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

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

Гетерирование -

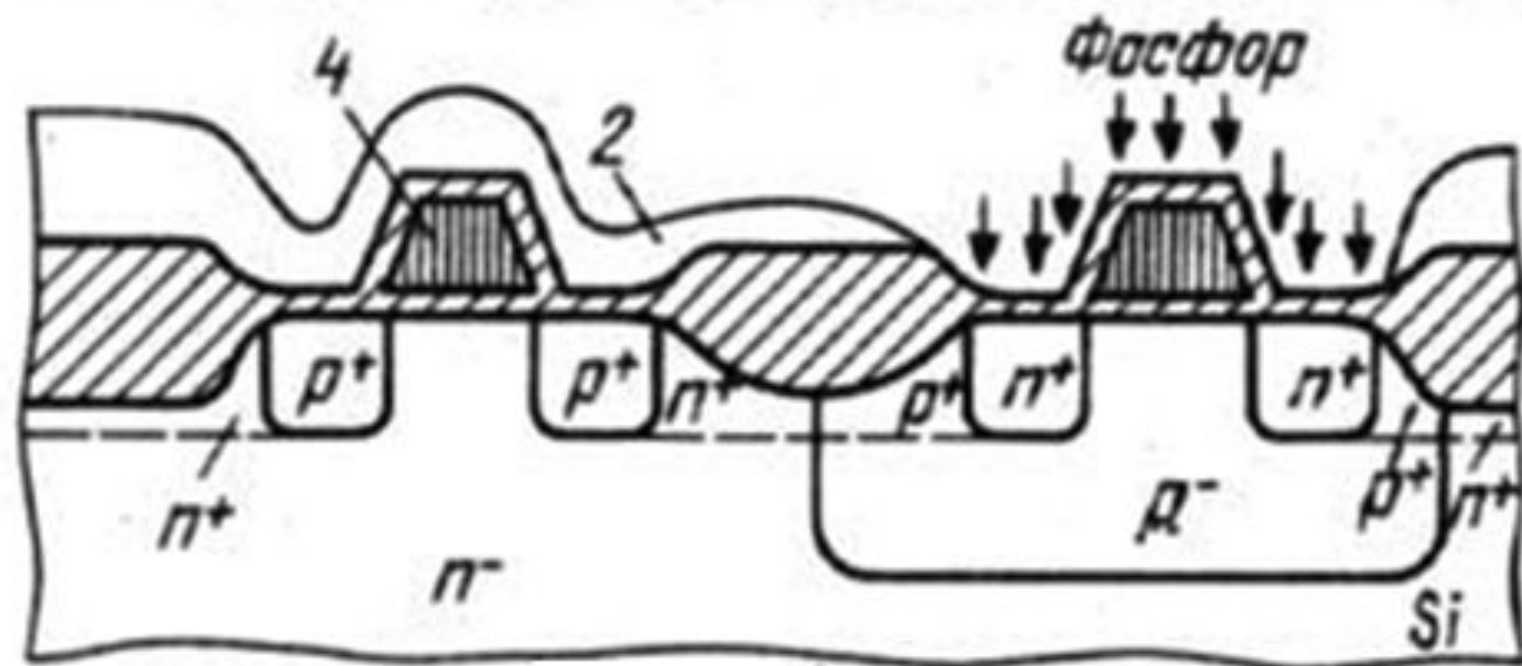
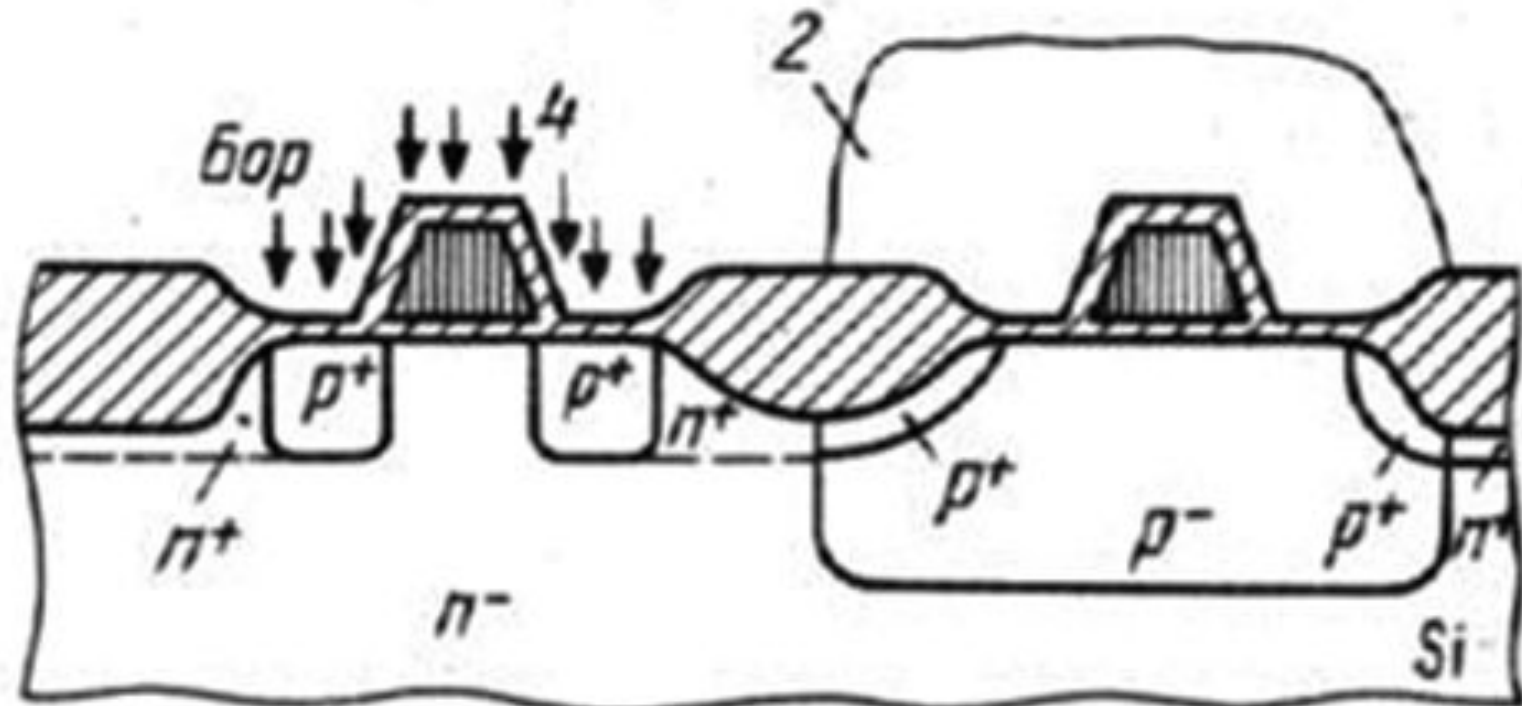
удаление нежелательных примесей и дефектов.

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

Диффузия фосфора - метод гетерирования 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 приводит к формированию при отжиге пузырьков газа, ограниченных



Косой шлиф

