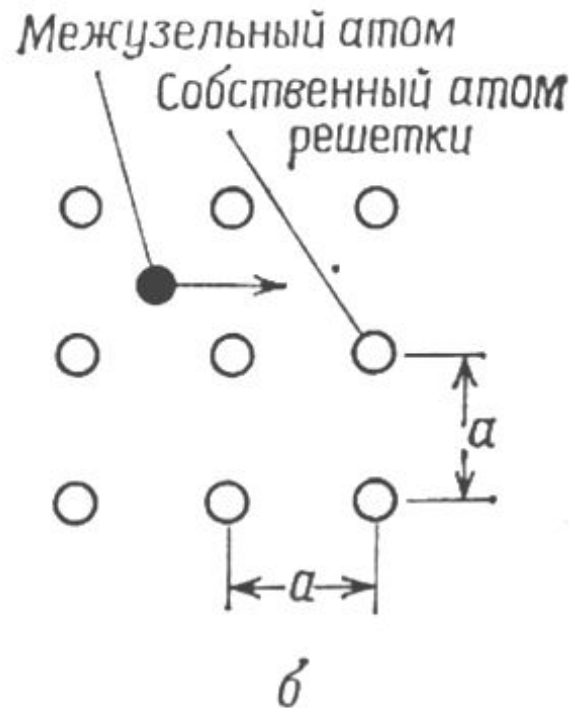
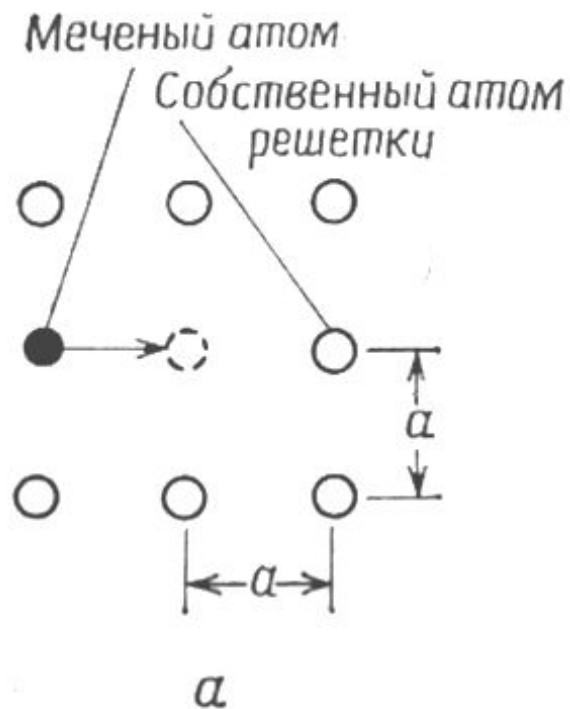


Диффузия



В твердом теле диффузия – процесс активируемого температурой перескока атома из одной потенциальной ямы в другую.

Законы Фика

$$j \text{ [cm}^{-2}\text{/c]}$$

$$D(T) = D_0 \exp(-E/kT)$$

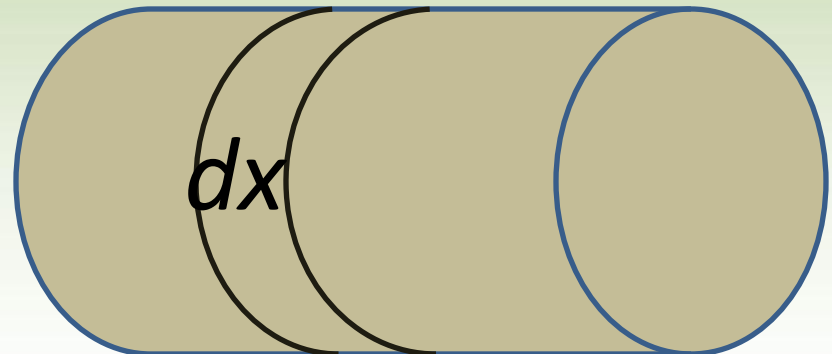
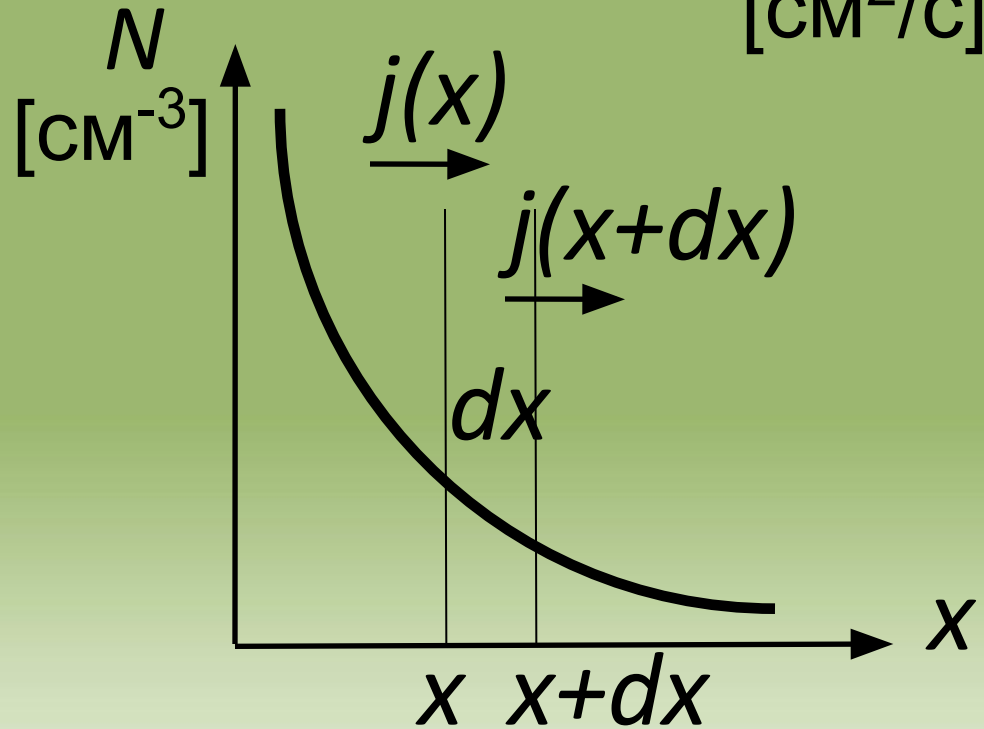
$$D \text{ [cm}^2\text{/c]}$$

- $j = -D \text{ grad } N,$

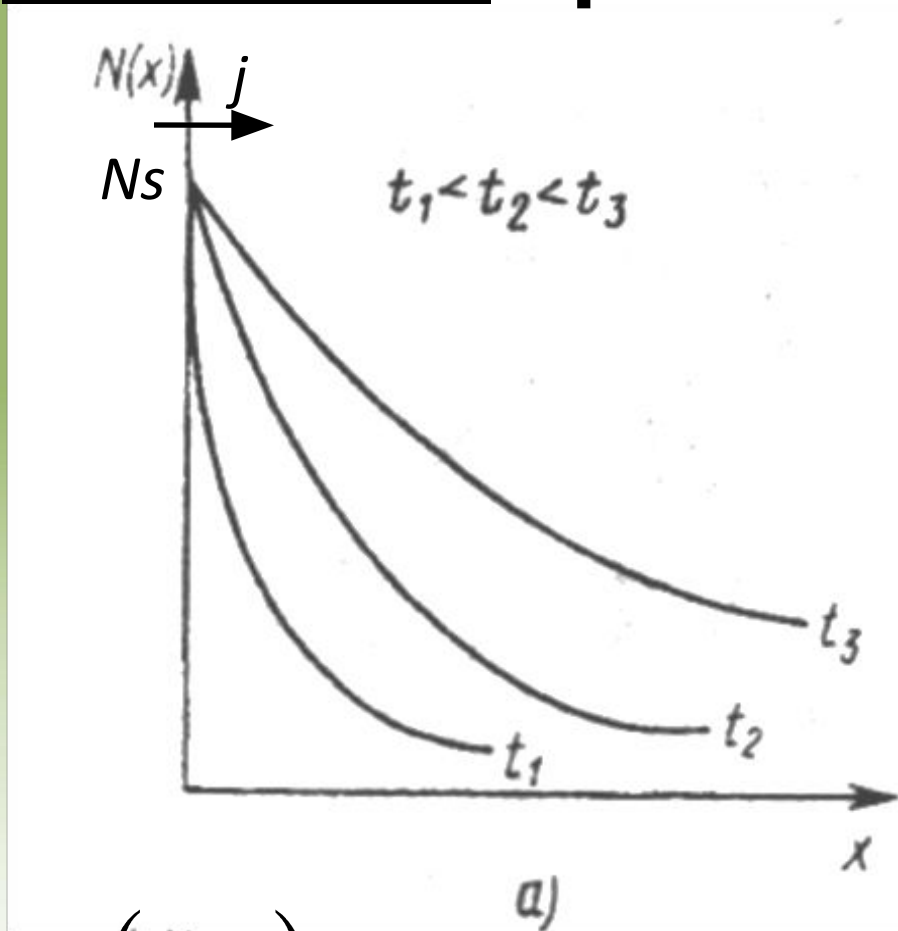
$$\frac{dj}{dx} = - \frac{d}{dx} \left[D \frac{dN}{dx} \right]$$

$$\frac{\bar{d}j}{dx} = \frac{dN}{dt}$$

- $\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D \frac{\partial N}{\partial x} \right]$

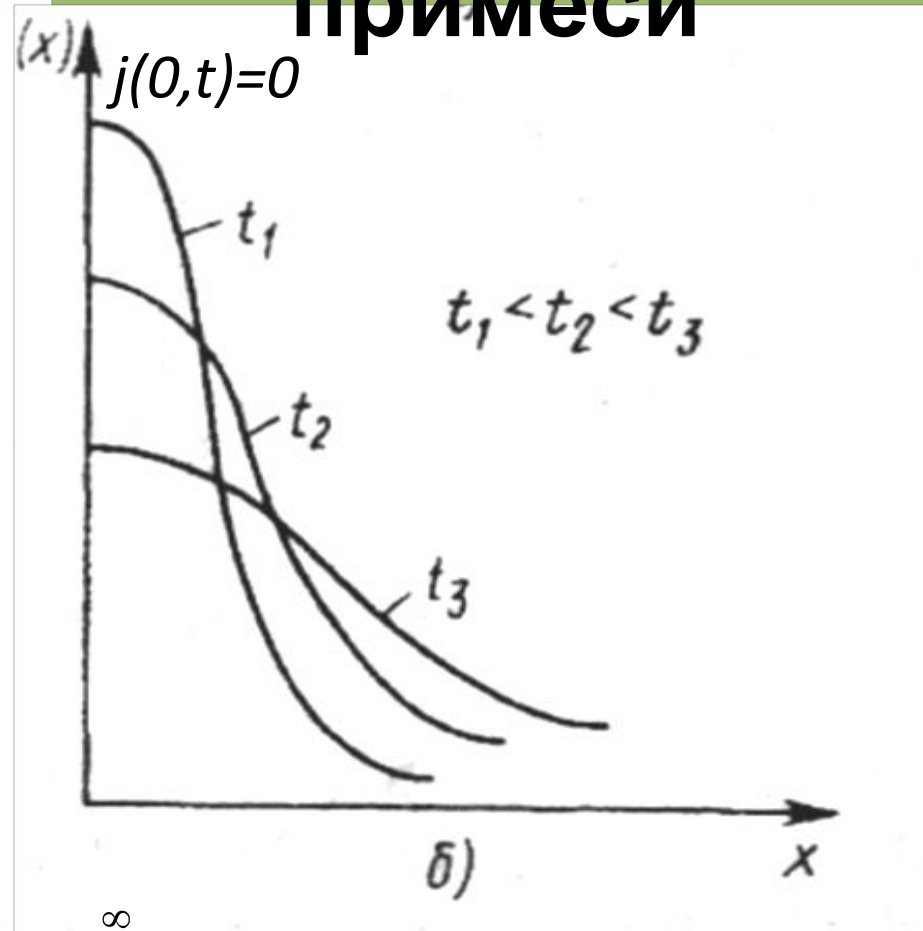


Диффузия из неограниченного источника примеси



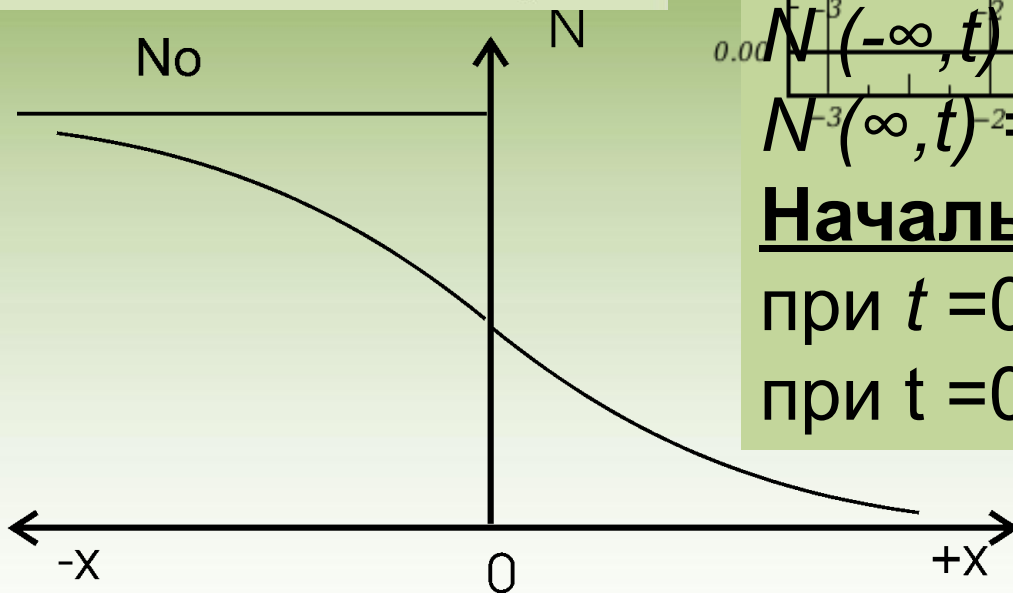
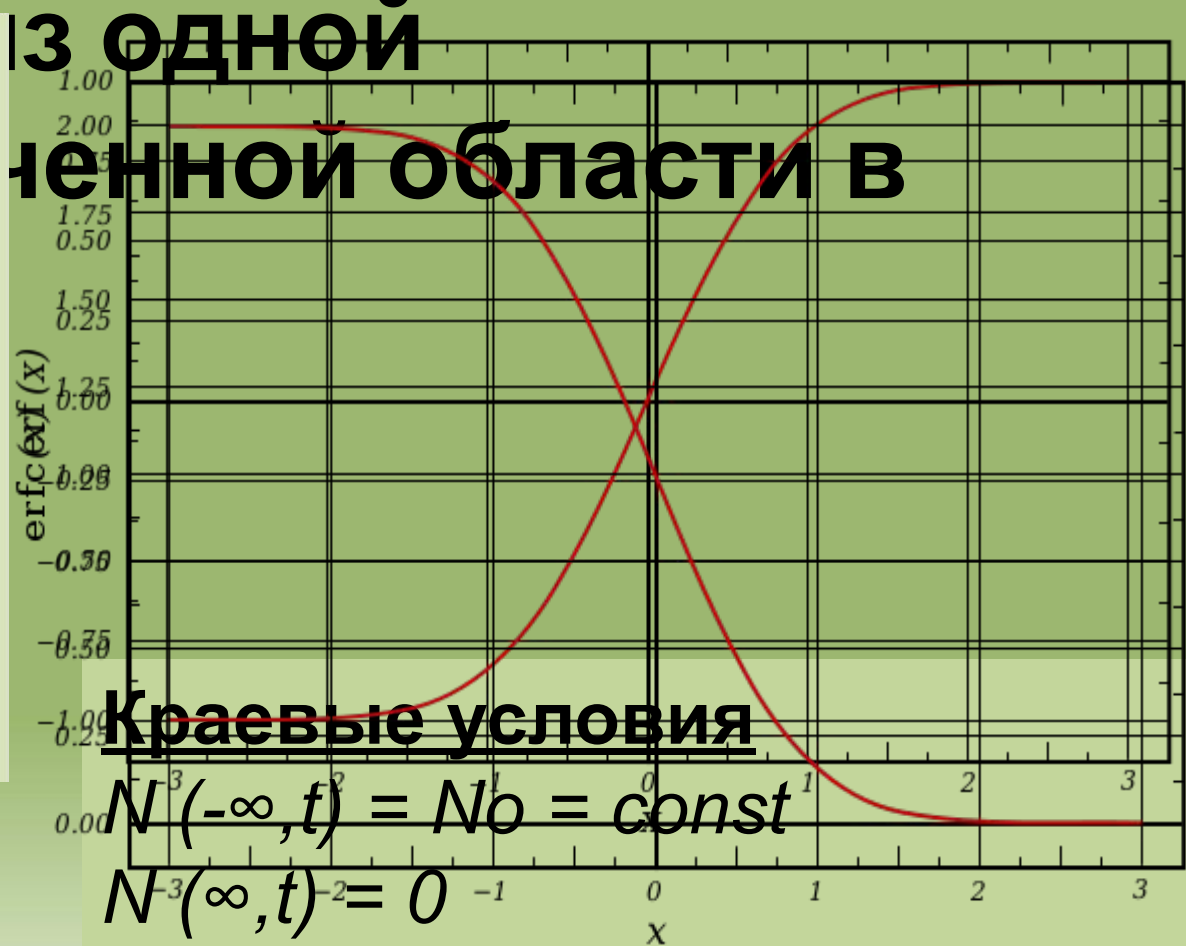
$$N(0, t) = N_s = \text{const}$$

Диффузия из ограниченного источника примеси



$$\int_0^{\infty} N(x) dx = Q = \text{const}$$

Если набор случайных величин подчиняется нормальному распределению со стандартным отклонением σ , то вероятность, что величина отклонится от среднего не более чем на α , равна $\text{erf} \frac{\alpha}{\sigma\sqrt{2}}$



Начальные условия

при $t = 0$ и $x \rightarrow +0$, $N(x, 0) \rightarrow 0$

при $t = 0$ и $x \rightarrow -0$, $N(x, 0) \rightarrow N_0$

Краевые условия

$$N(-\infty, t) = N_0 = \text{const}$$

$$N(\infty, t) = 0$$

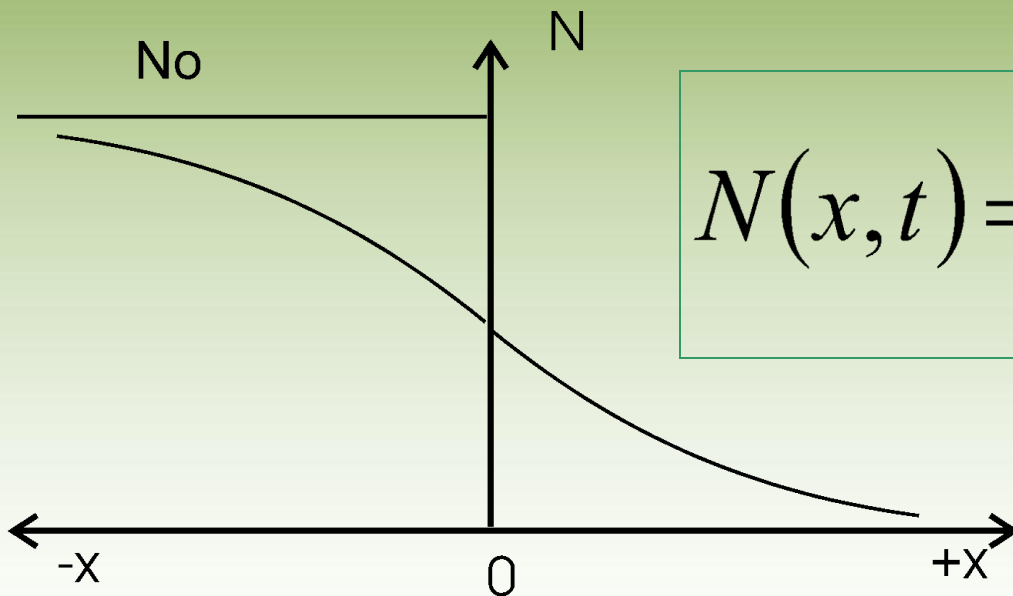
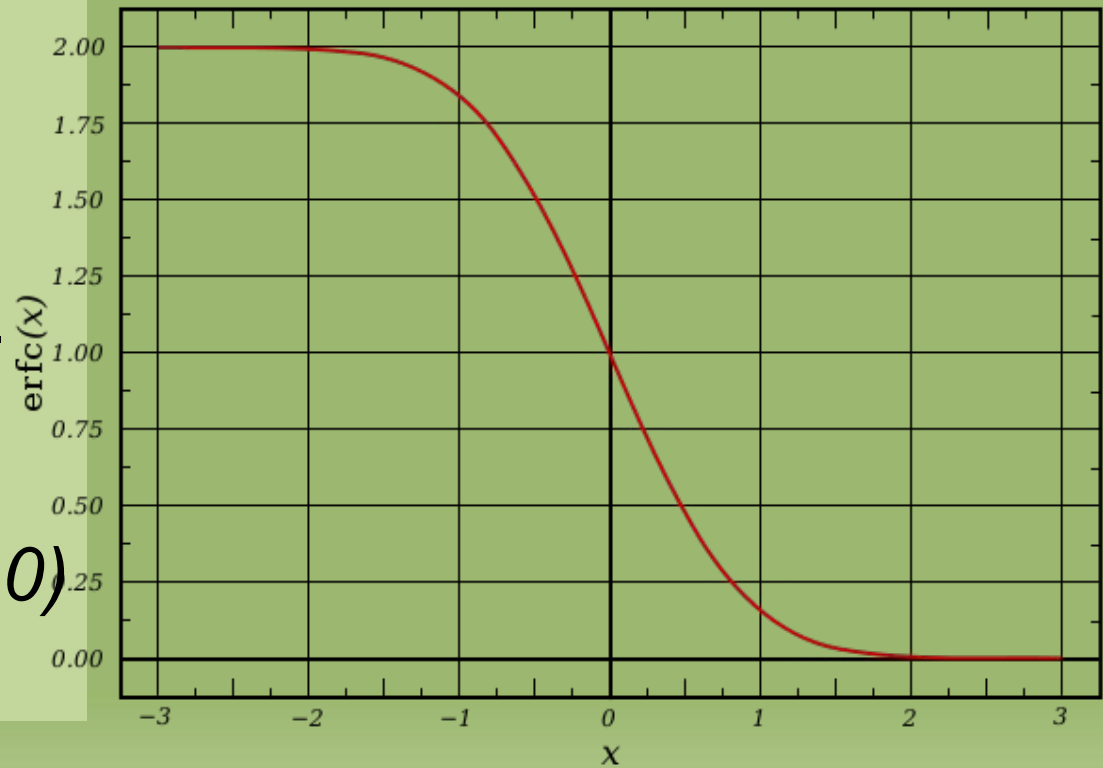
Начальные условия

при $t = 0$ и $x \rightarrow +0$,

$$N(x, 0) \rightarrow 0$$

при $t = 0$ и $x \rightarrow -0$, $N(x, 0)$

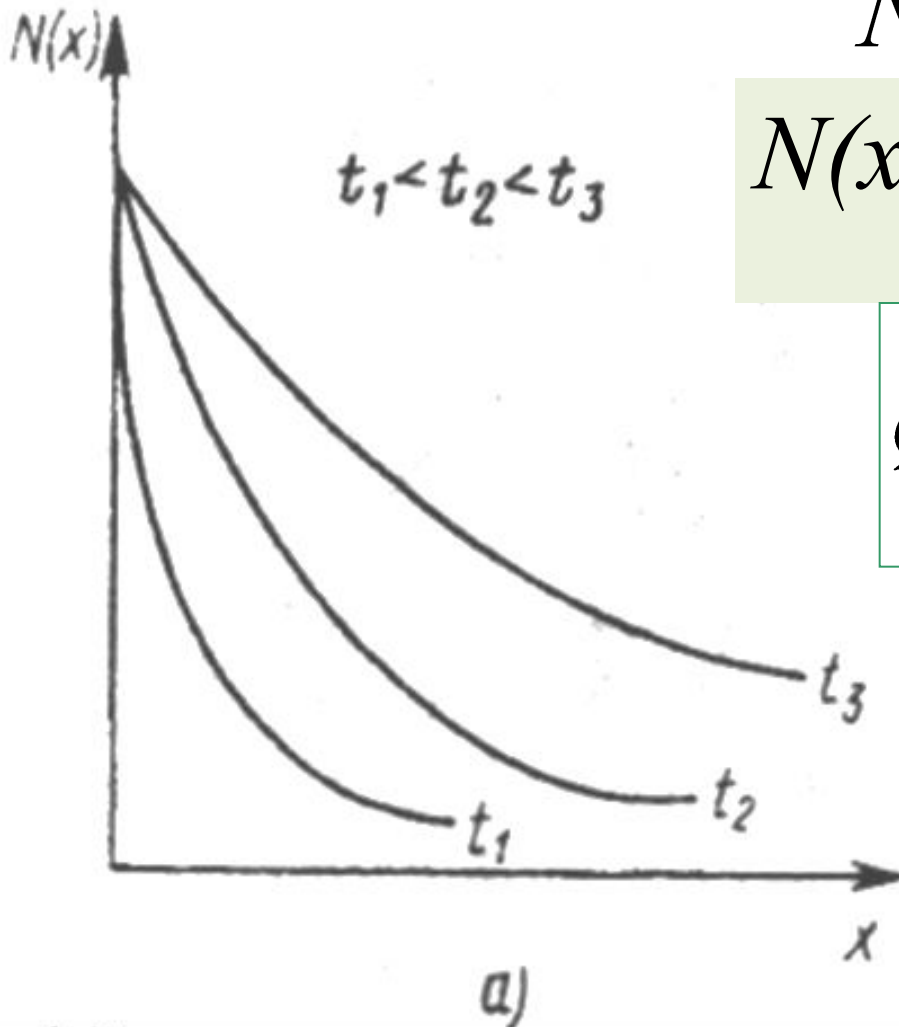
$$\rightarrow N_0$$



$$N(x, t) = \frac{N_0}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right)$$

$$L = 2 \cdot \sqrt{D \cdot t}$$

Диффузия из неограниченного источника примеси



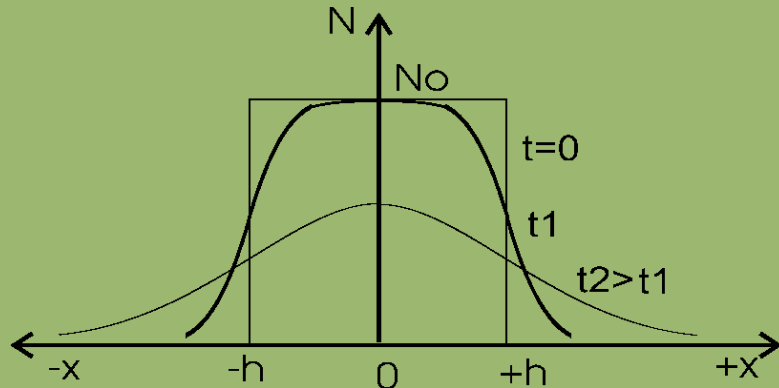
$$N(0, t) = N_s = \text{const}$$

$$N(x, t) = N_s \operatorname{erfc}(x/L)$$

$$Q = \int_0^t j(t) dt = 2N_s \cdot \frac{\sqrt{D \cdot t}}{\sqrt{\pi}}$$

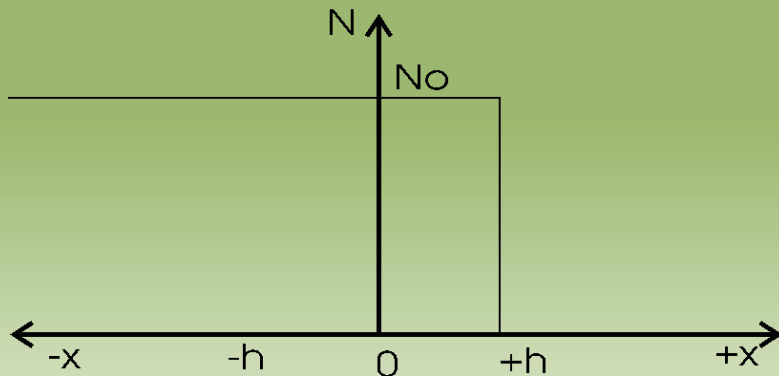
$$j(0, t) = N_s \cdot \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{\pi \cdot t}}$$

Диффузия из слоя конечной толщины

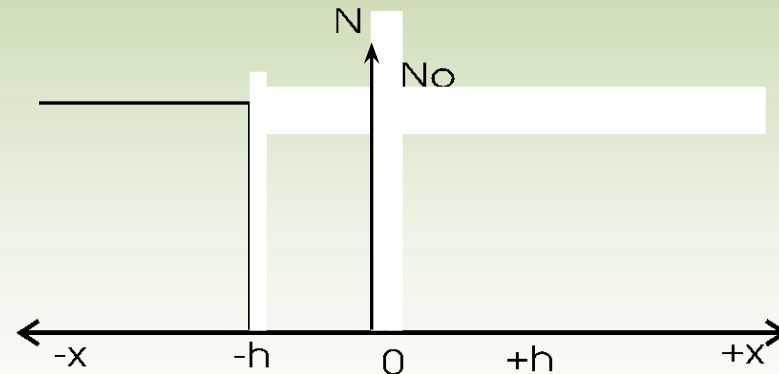


суперпозиция двух профилей N_1-N_2

$$N(x,t) = \frac{N_0}{2} \cdot \left\{ \operatorname{erfc}\left(\frac{x-h}{L}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{x+h}{L}\right) \right\}$$



$$N_1(x,t) = \frac{N_0}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x-h}{L}\right)$$



$$N_2(x,t) = \frac{N_0}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x+h}{L}\right)$$

Диффузия из бесконечно тонкого слоя (точечный источник)

$$N(x, t) = \frac{N_0}{2} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left\{ \int_{(x-h)/L}^{\infty} \exp(-u^2) du - \int_{(x+h)/L}^{\infty} \exp(-u^2) du \right\} =$$
$$= \frac{N_0}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_{(x-h)/L}^{(x+h)/L} \exp(-u^2) du$$

При $h \rightarrow 0$ интеграл стремится к $\frac{2 \cdot h}{L} \cdot \exp(-x^2/L^2)$

$$2h \cdot N_0 = Q = \text{const}$$

$$L^2 = 4 \cdot D \cdot t$$

$$N(x, t) = \frac{N_0}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{2h}{L} \cdot \exp(-x^2/L^2) = \frac{Q}{2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot D \cdot t} \cdot \exp(-x^2/(4D \cdot t))$$

Понятие тонкого и толстого слоя

$h > 4L$ – слой толстый

$h < L/4$ – слой тонкий

Отражающая и связывающая границы

Граница, поток примеси через которую равен 0 –
отражающая.

Граница, концентрация примеси на которой равна 0 –
связывающая (поглощающая).

$$N(x,t) = N_0 \cdot \left[1 - \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{L}\right) \right] = N_0 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{L}\right)$$

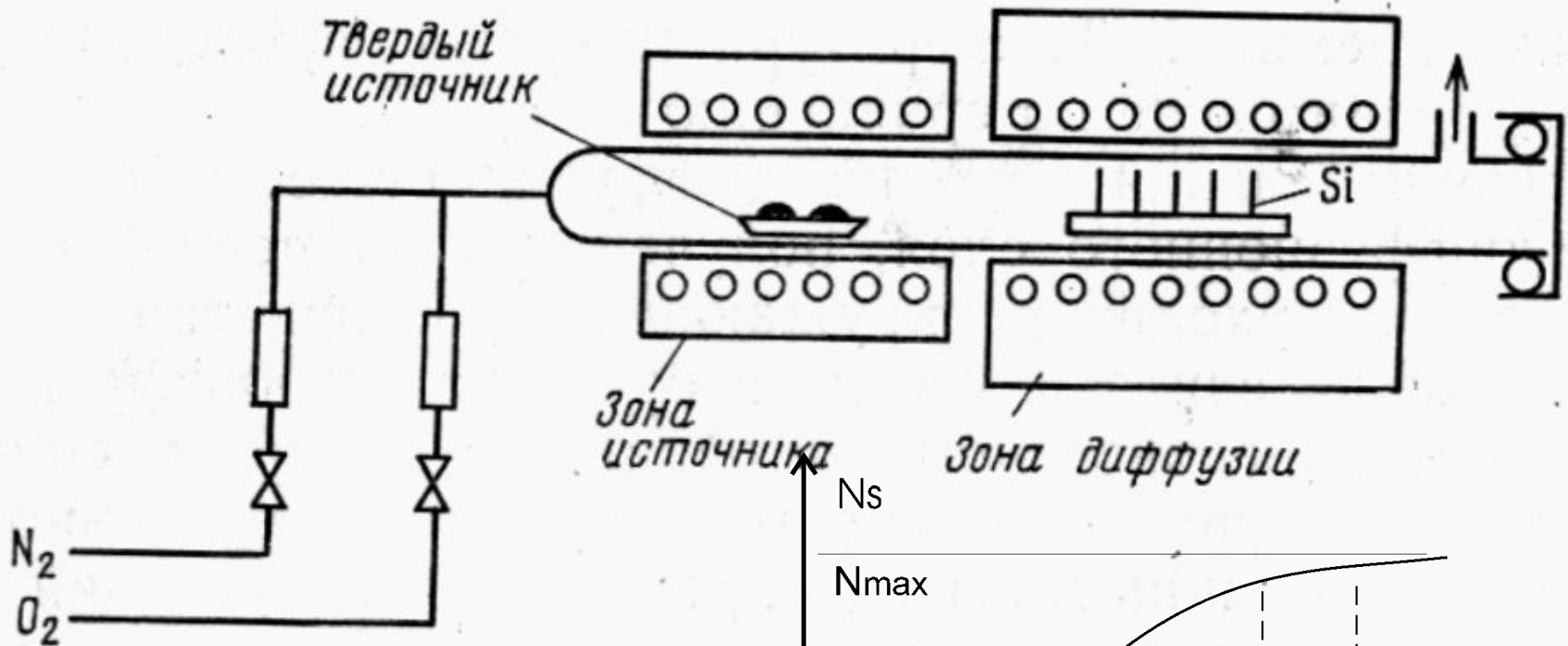
Факторы, влияющие на величину коэффициента диффузии

- Температура процесса.
 $D(T) = D_0 \exp(-E/kT)$
- Механические напряжения и сопутствующая им **повышенная концентрация дислокаций**. Вдоль дислокаций диффузия примеси идет во много раз быстрее, чем в бездефектном материале.
- Концентрация диффундирующей примеси.
- Концентрация фоновой примеси.
- Атмосфера, в которой ведется диффузия примеси.
- Ориентация кристалла.

Диффузия из пленок, наносимых на поверхность полупроводника

- Пленки металлов, например, Au или Al, нанесенные методом термического испарения. Толщина пленок определяется требуемым количеством примеси, которое должно быть введено в полупроводник.
- Слои легированного оксида кремния или легированного поликремния.
- Пленки фоторезистов- диффузантов. В этих пленках обычными методами фотолитографии можно сформировать рисунок областей, подлежащих

Диффузия в потоке газа-носителя



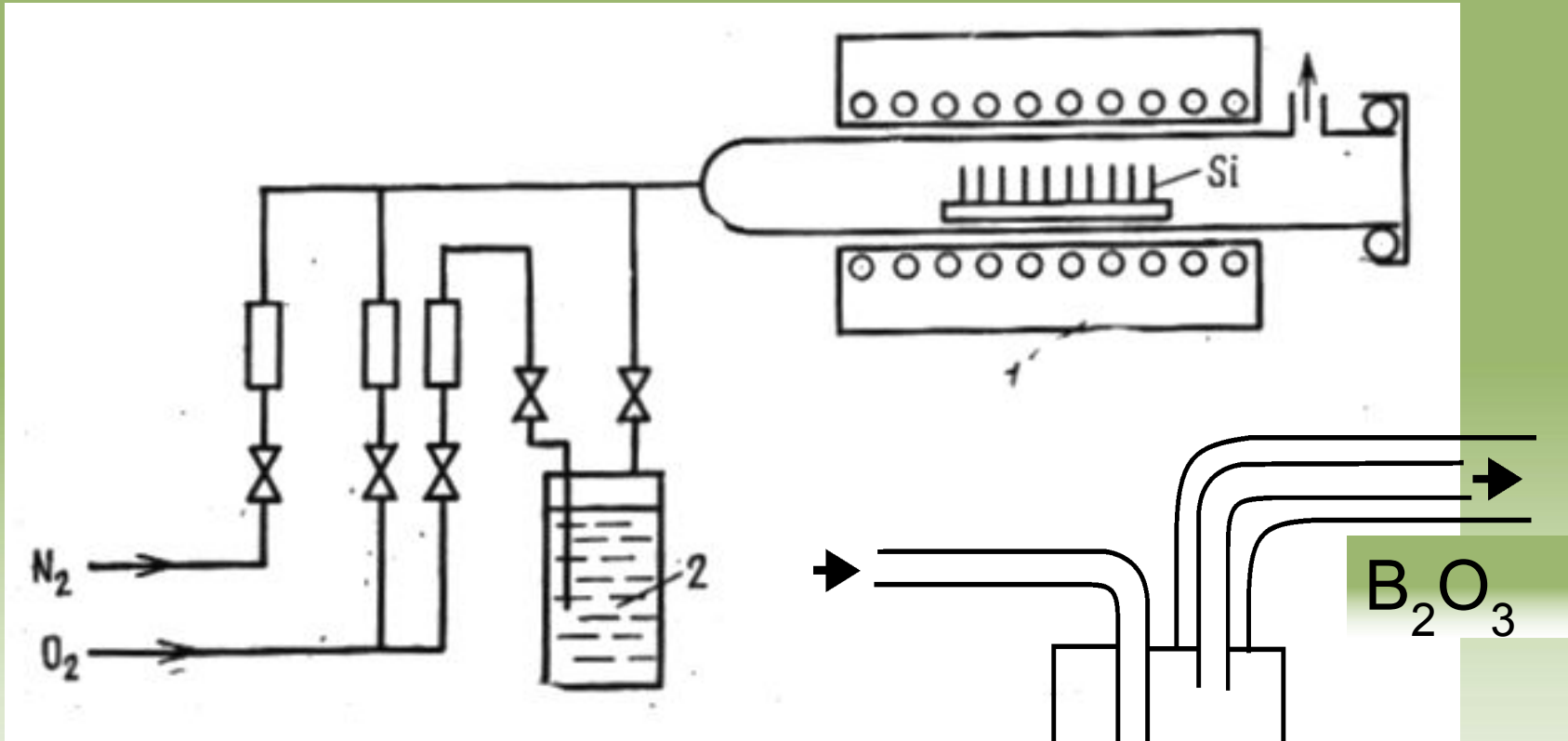
Твердые источники

- БСС ($nB_2O_3 \cdot mSiO_2$),
 B_2O_3
- ФСС ($nP_2O_5 \cdot mSiO_2$)

Газообразные источники

- B_2H_6 (диборан)
- PH_3 (фосфин)

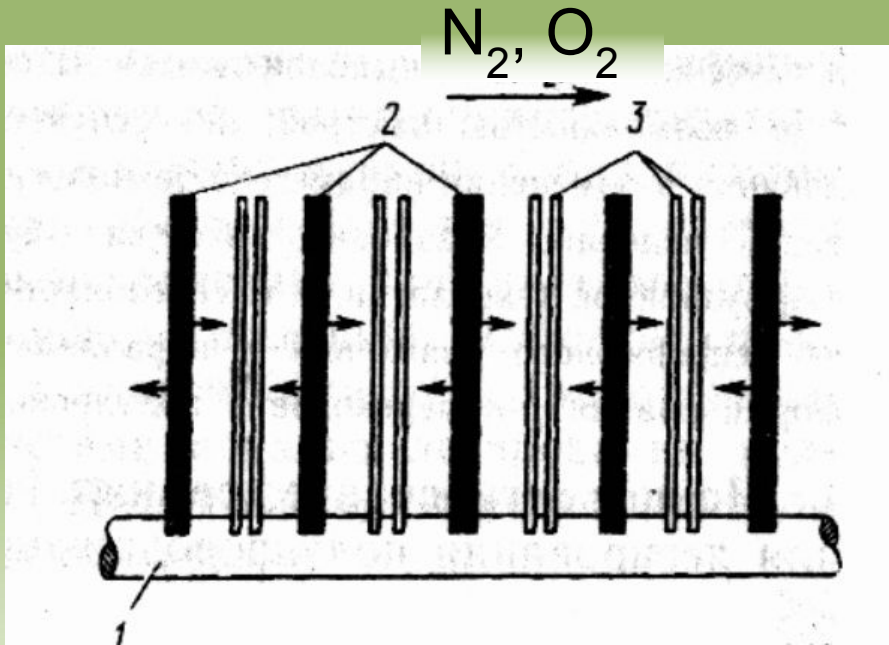
Диффузия в потоке газа-носителя из жидкого источника



- BCl_3 и BBr_3 ; PCl_3

Барботер

Метод параллельного источника



BN (нитрид
бора) B_2O_3

Установка твердых
планарных
источников и
пластин кремния –
в кварцевой
кассете:

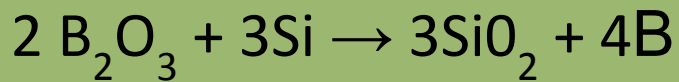
- 1 – кварцевая кассета;
- 2 – твердые планарные источники;
- 3 – пластины

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)

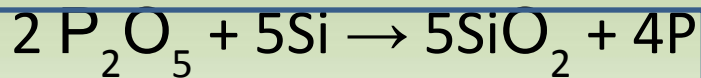
BCl_3 и BBr_3

- **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.**

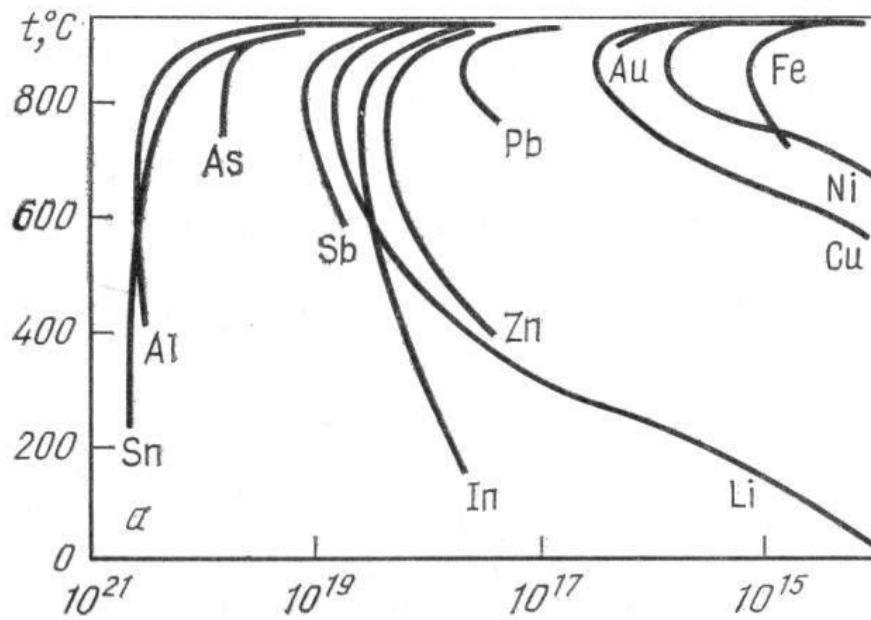
P ($1,5 \cdot 10^{21}$ см⁻³), As ($2 \cdot 10^{21}$ см⁻³), Sb ($5 \cdot 10^{19}$ см⁻³).

B ($5 \cdot 10^{20}$ см⁻³), Al ($2 \cdot 10^{19}$ см⁻³).

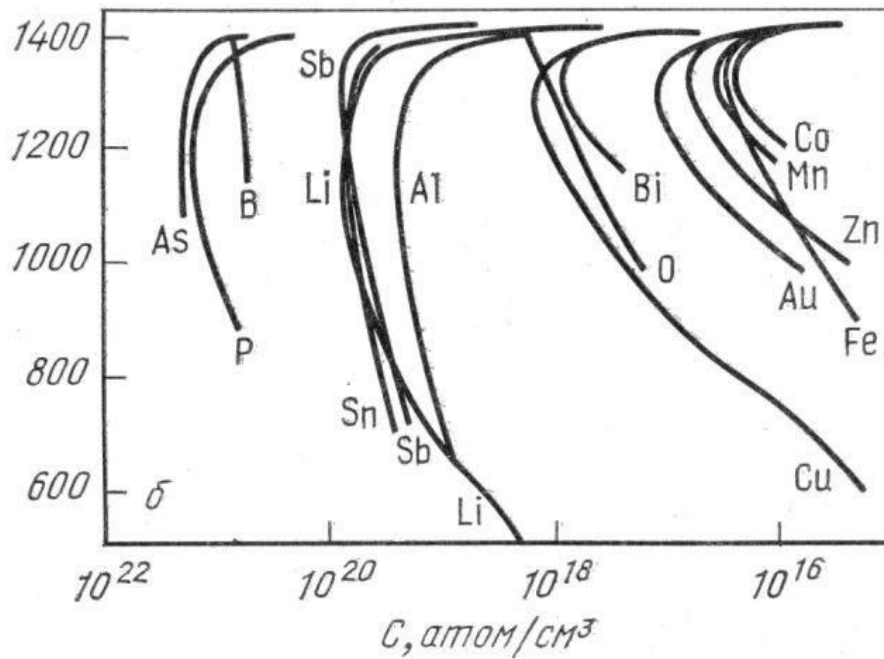
- **Величина коэффициента диффузии.**

Наибольший коэффициент диффузии D имеет Al. Заметно уступают ему B и P. 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)

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

В трехмерном случае количество примеси в источнике Q безразмерно,

в двухмерном случае Q [см⁻¹]

$$N(x, y, z, t) = \frac{Q}{(4\pi Dt)^{3/2}} \exp\left[-\frac{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2}{4 \cdot D \cdot t}\right]$$

(x_1, y_1, z_1) – координаты источника примеси

Формула Пуассона

$$N(x, y, z, t) = \frac{Q}{(4\pi Dt)^{3/2}} \exp\left[-\frac{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2}{4 \cdot D \cdot t}\right]$$

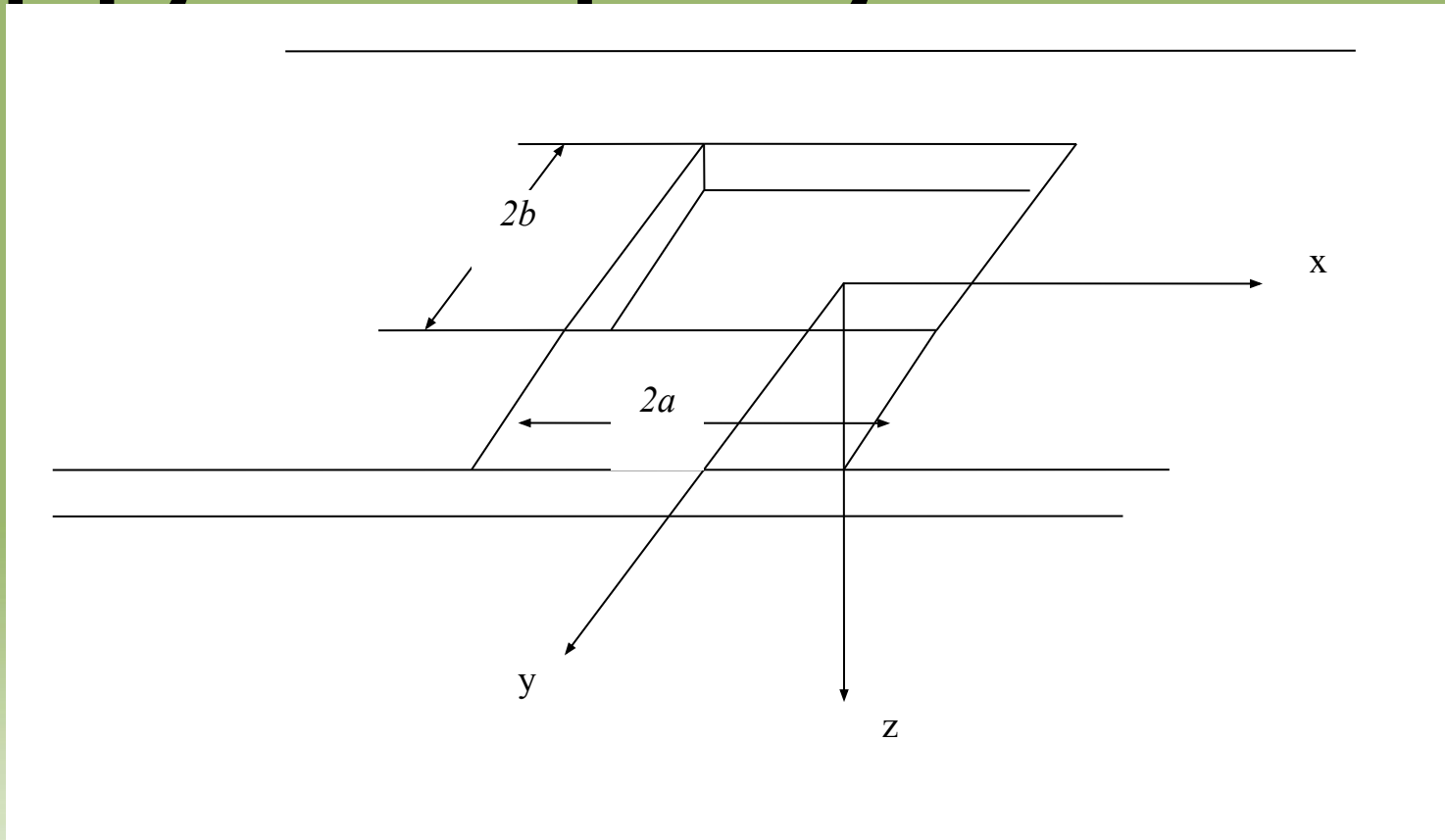
$$N(x, y, z, t) = \iiint_{\infty} \frac{F(\chi, \eta, \zeta)}{(4\pi Dt)^{3/2}} \exp\left[-\frac{(x-\chi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}{4 \cdot D \cdot t}\right] d\chi d\eta d\zeta$$

$$F(\chi, \eta, \zeta) = F(\chi) \cdot F(\eta) \cdot F(\zeta)$$

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

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

Диффузия в прямоугольное окно

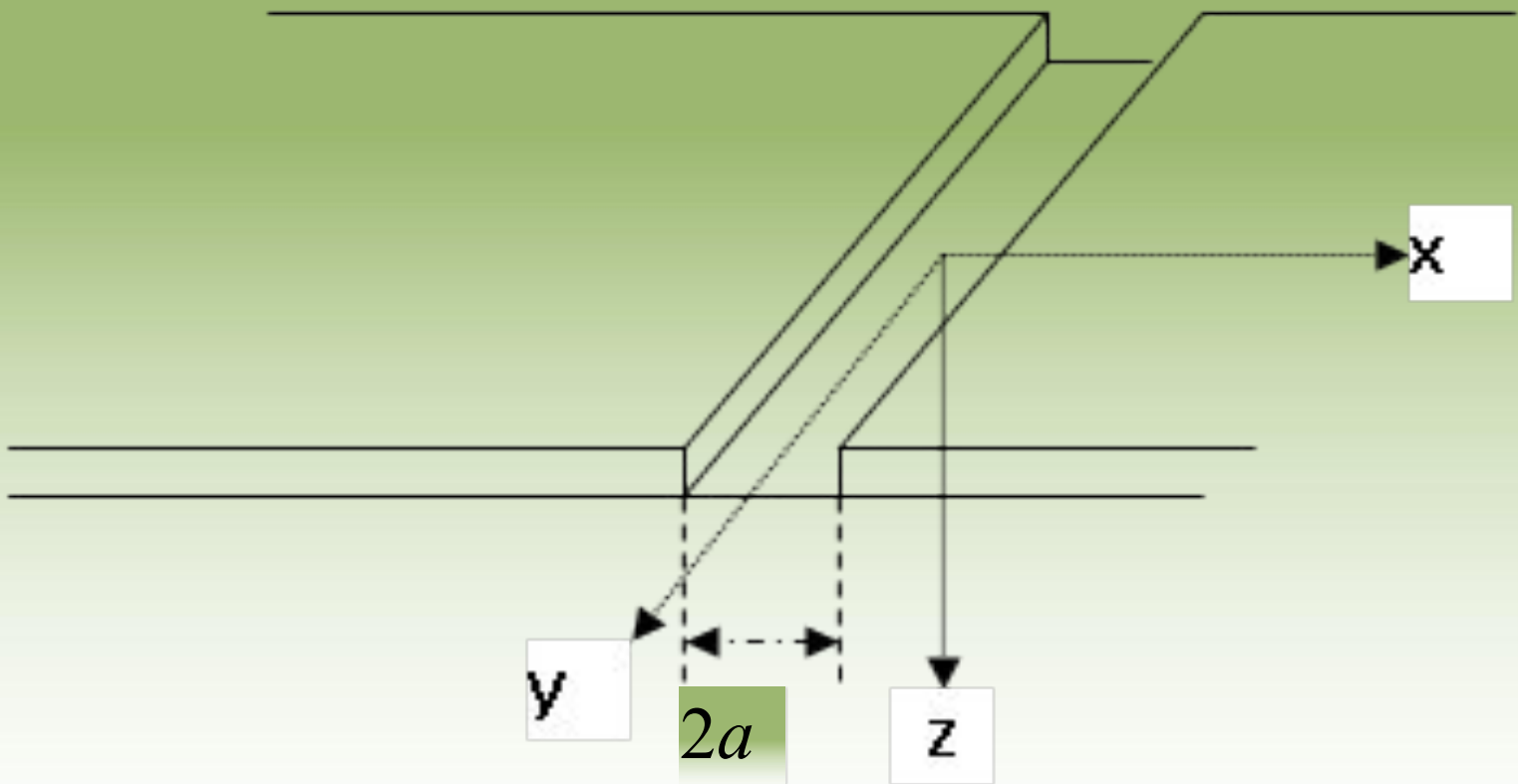


$$N(x, y, z, t) = \frac{N_S}{4} \cdot \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x-a}{L}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{x+a}{L}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{y-b}{L}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{y+b}{L}\right) \right] \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{L}\right)$$

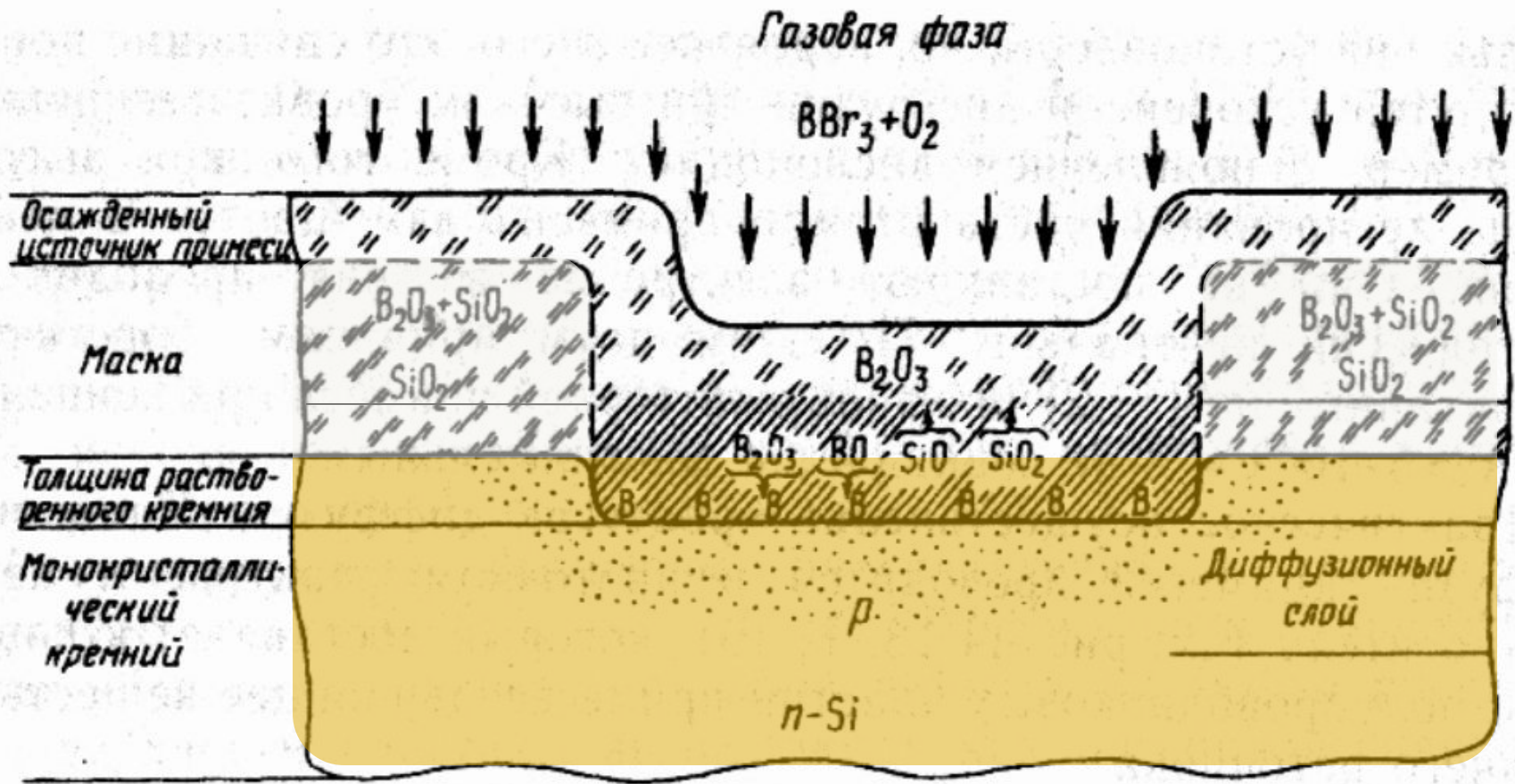
$$N(x, y, z, t) = \frac{Q}{4\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \cdot \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x-a}{L}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{x+a}{L}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{y-b}{L}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{y+b}{L}\right) \right] \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{L^2}\right)$$

$$N(x, y, z, t) = \frac{N_s}{2} \cdot \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x-a}{L}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{x+a}{L}\right) \right] \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{L}\right)$$

$$N(x, y, z, t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \cdot \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x-a}{L}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{x+a}{L}\right) \right] \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{L^2}\right)$$

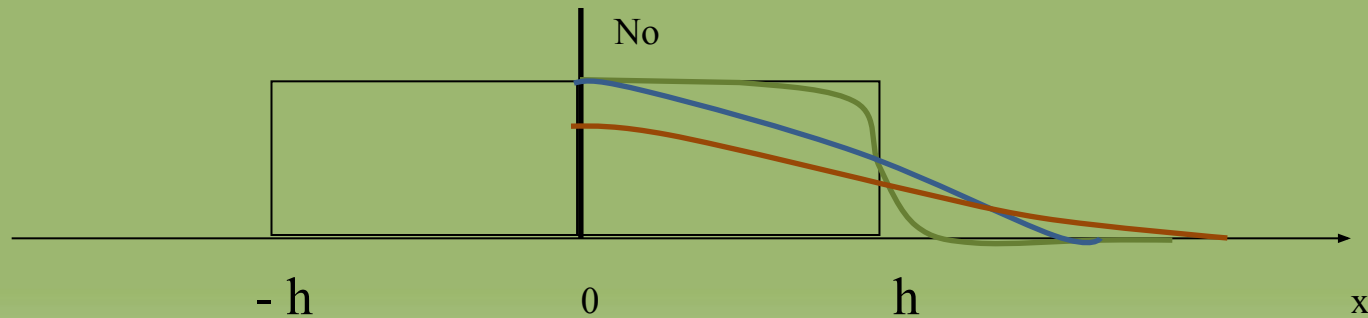


Схематическое представление диффузионного очага при локальной диффузии бора в кремний

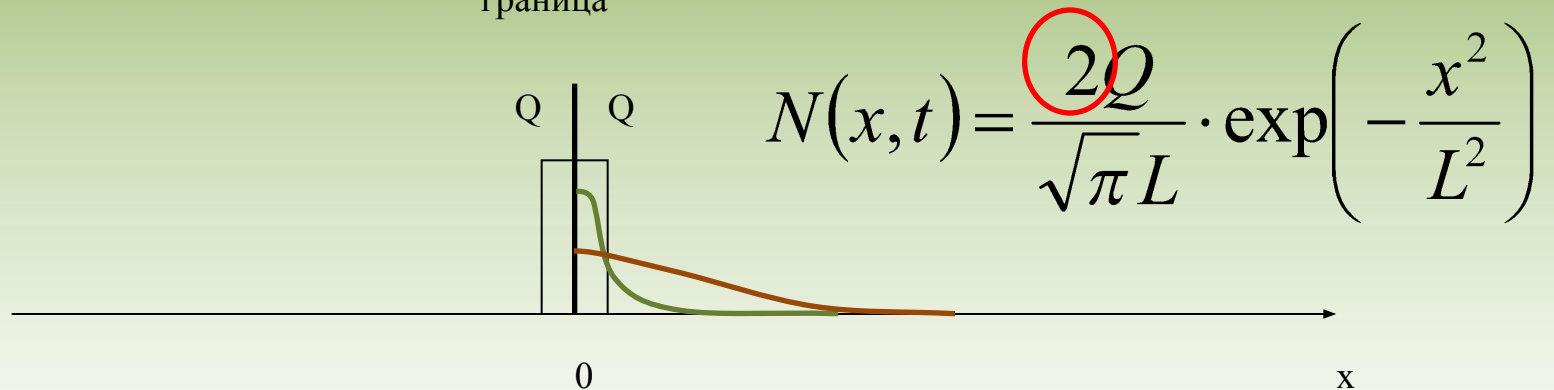


Отражающая граница

$$N_{\text{Отражающая граница}}(x, t) = \frac{N_0}{2} \cdot \left\{ \operatorname{erfc}\left(\frac{x-h}{L}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{x+h}{L}\right) \right\}$$

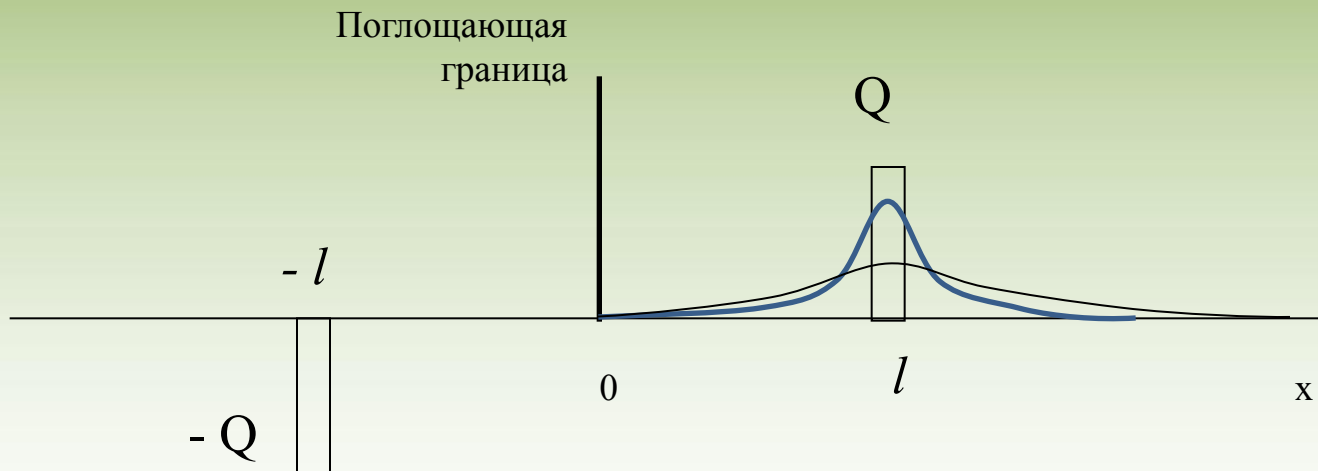
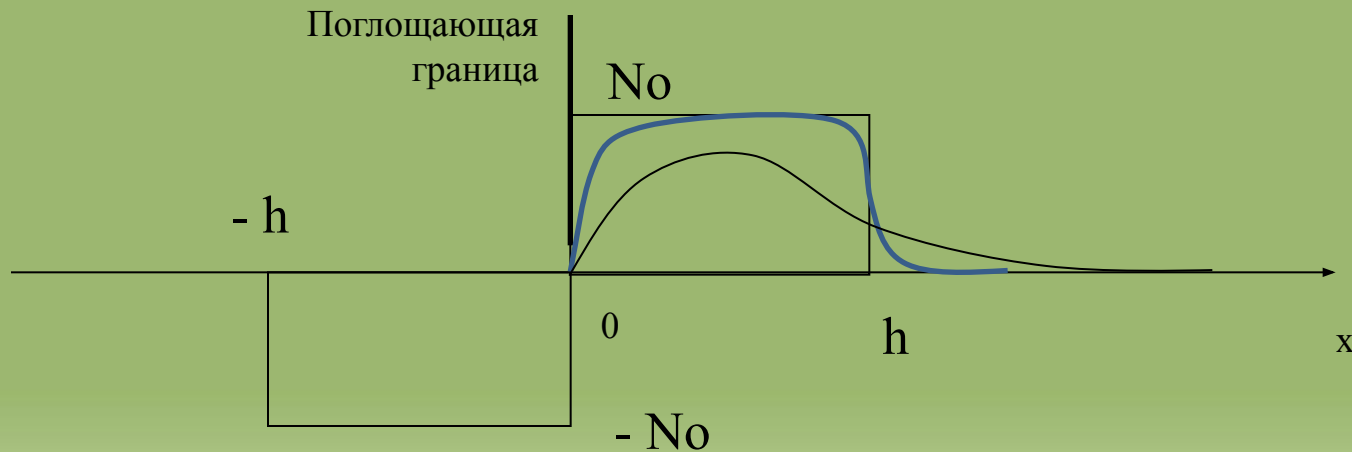


Отражающая
граница

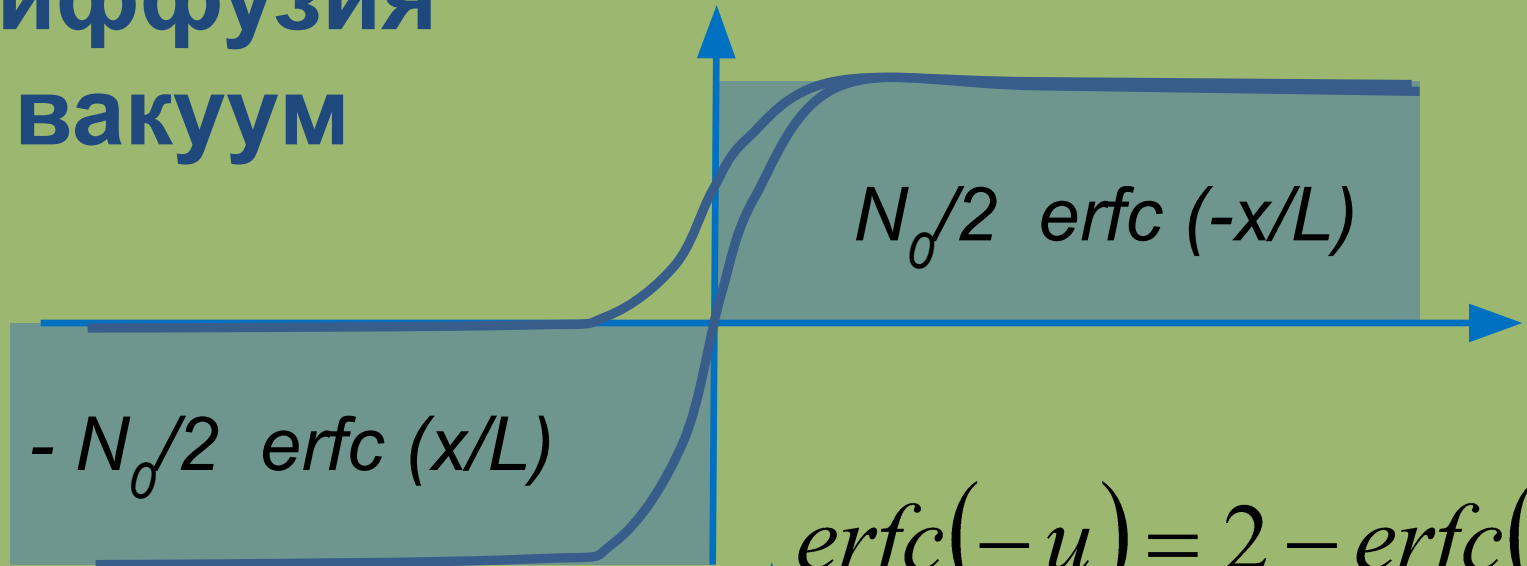


$$N(x, t) = \frac{2Q}{\sqrt{\pi L}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{L^2}\right)$$

Связывающая (поглощающая) граница



Диффузия в вакуум



$$N(x,t) = N_0/2 \operatorname{erfc}(x/L)$$

$$\operatorname{erfc}(-u) = 2 - \operatorname{erfc}(u)$$

$$\operatorname{erf}(-u) = -\operatorname{erf}(u)$$

$$N(x,t) = N_0 \cdot \left[1 - \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{L}\right) \right] = N_0 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{L}\right)$$

«Разгонка» примеси

Многостадийная диффузия

$$N(x, t) = N_S \int \frac{\operatorname{erfc}\left(\chi / 2\sqrt{D_3 \cdot t_3}\right)}{\sqrt{\pi \cdot D_p \cdot t_p}} \cdot \exp\left[-\frac{(x - \chi)^2}{4 \cdot D_p \cdot t_p}\right] d\chi$$

$$D_p t_p = D_{p1} t_{p1} + D_{p2} t_{p2} + \dots + D_{pi} t_{pi} \quad Q = \int_0^{\infty} N(x, t) dt = \frac{2N_S}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{D_3 \cdot t_3}$$

характеристическая величина $D t = D_3 t_3 + D_p t_p$

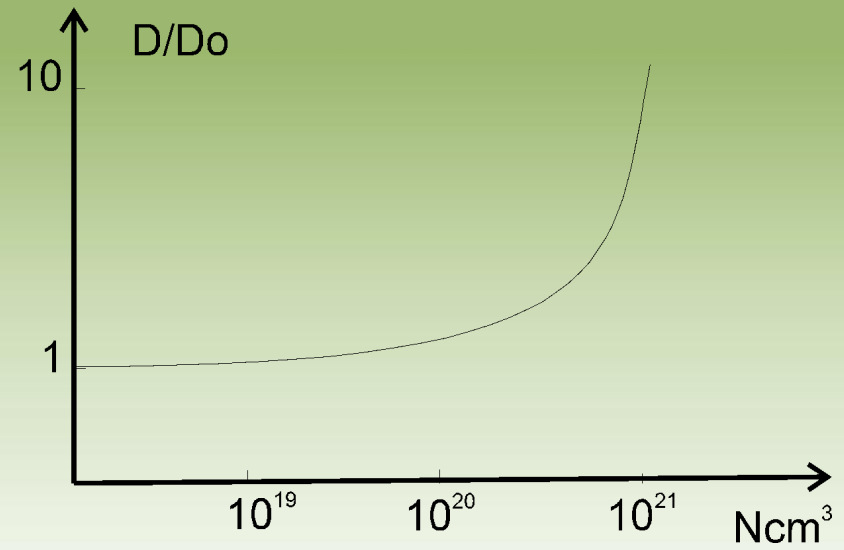
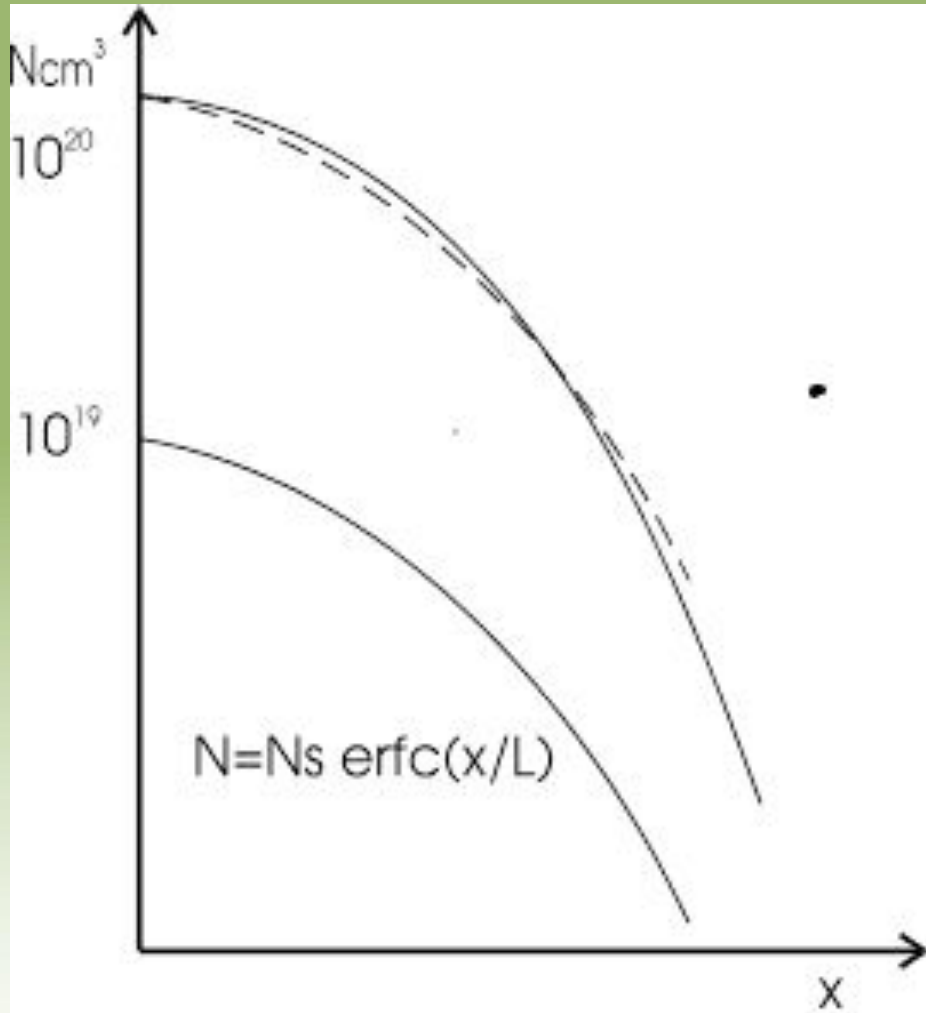
Если $D_p t_p > 3 D_3 t_3$

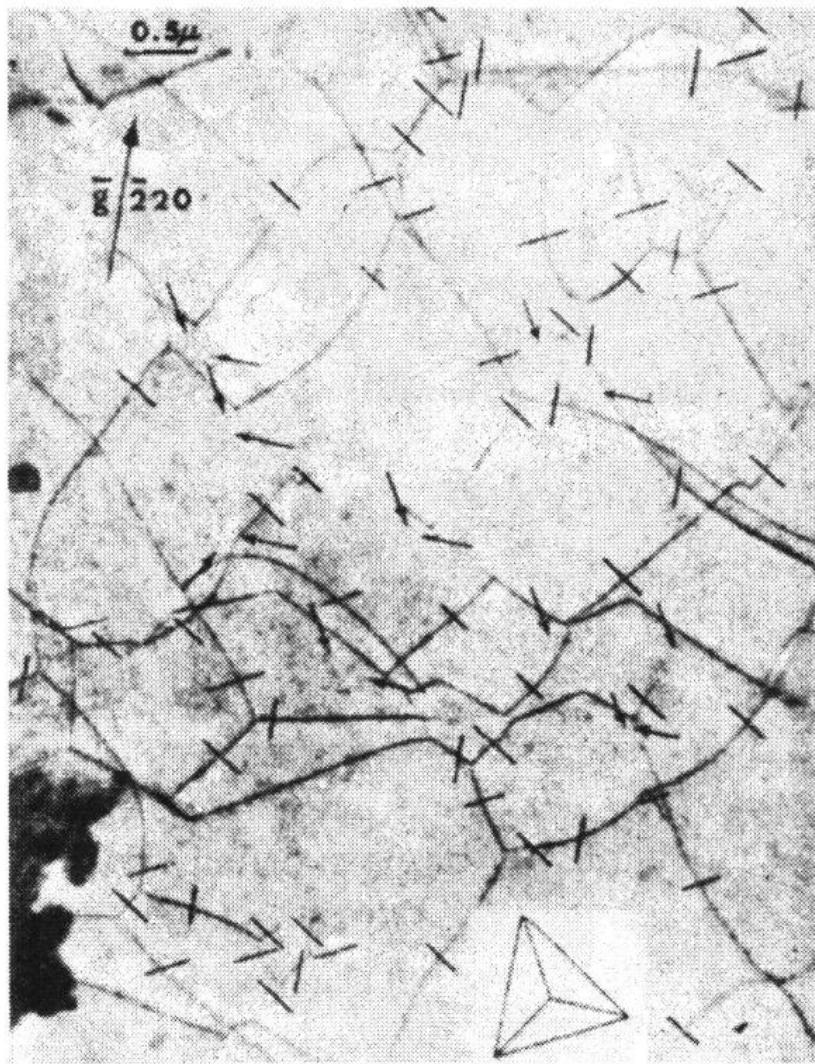
$$N(x, t) = \frac{N_S}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{D_3 \cdot t_3}{D \cdot t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}\right)$$

Если $D_p t_p < D_3 t_3$

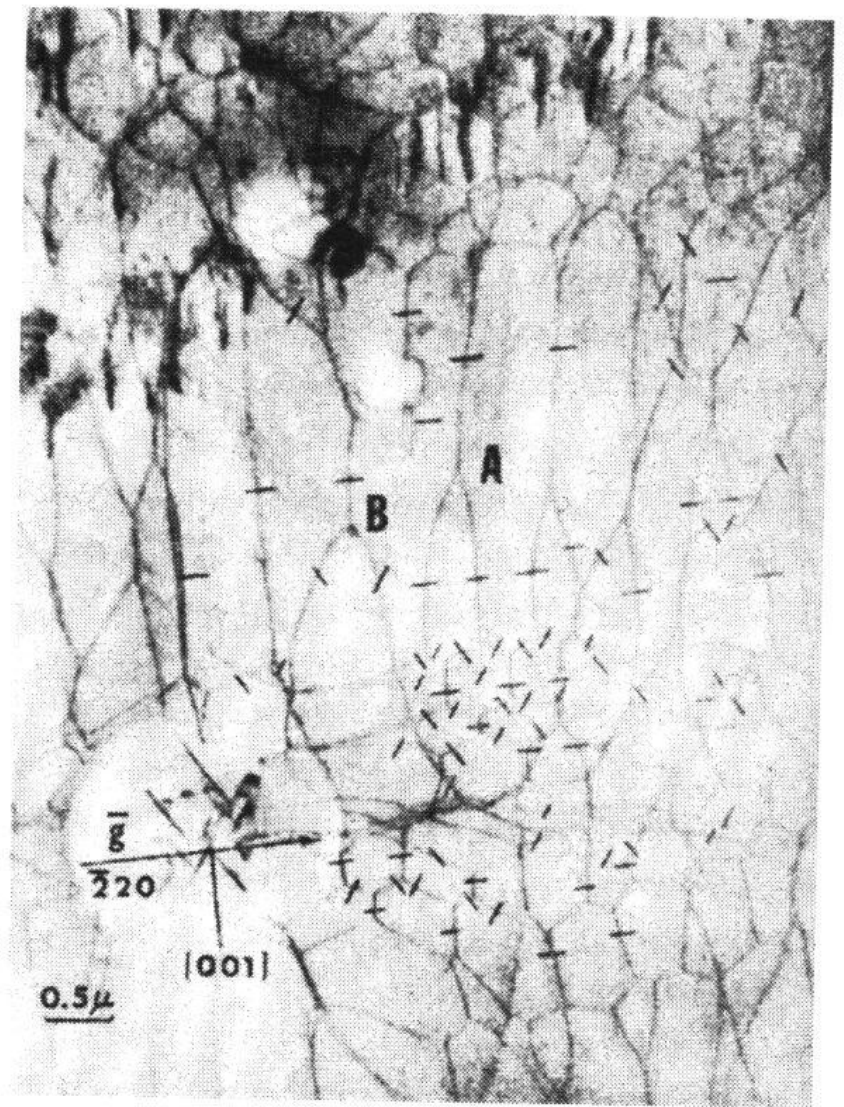
$$N(x, t) = N_{S\text{эф}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad N_{S\text{эф}} = N_S \sqrt{\frac{D_3 \cdot t_3}{D \cdot t}}$$

Диффузия В в Si





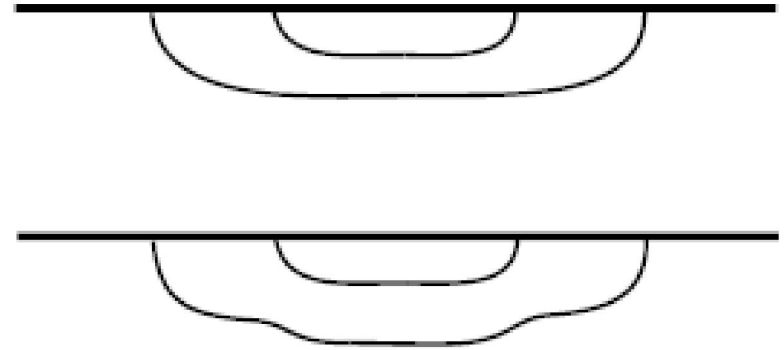
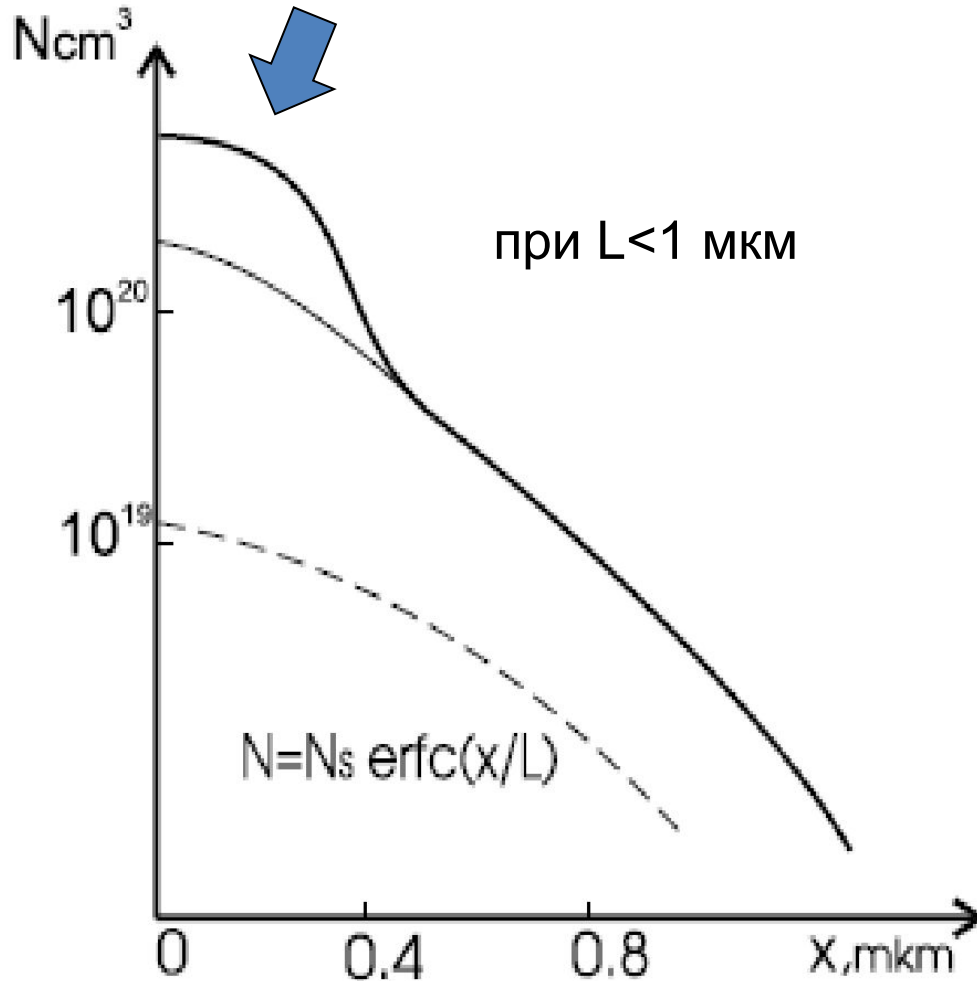
Структура дислокаций, наблюдаемая в образце Si (111) при диффузии В; короткие линии обозначают дислокации, чьи вектора Бюргерса лежат в плоскости (111), а стрелками отмечены дислокации с наклонными векторами Бюргерса. (Levine и др., 1967).



Дислокационные сетки, наблюдаемые в образце Si (110) при диффузии В. Дислокации с векторами Бюргерса, наклонными к (110) плоскости, обозначены короткими стрелками. (Levine и др., 1967).

Диффузия Р в Si

коэфф. активности < 1



транзистор с тонкой базой
(менее 0.2 мкм)

**Эффект вытеснения
коллекторного перехода**