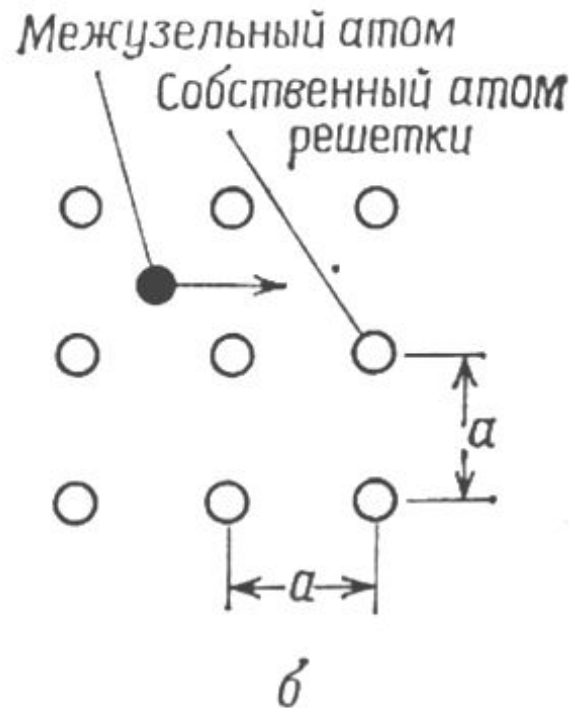
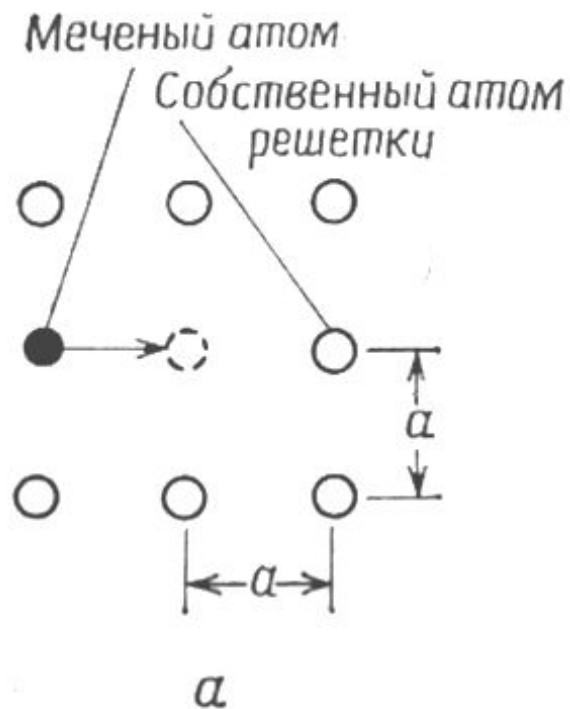


# Диффузия



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

# Законы Фика

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

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

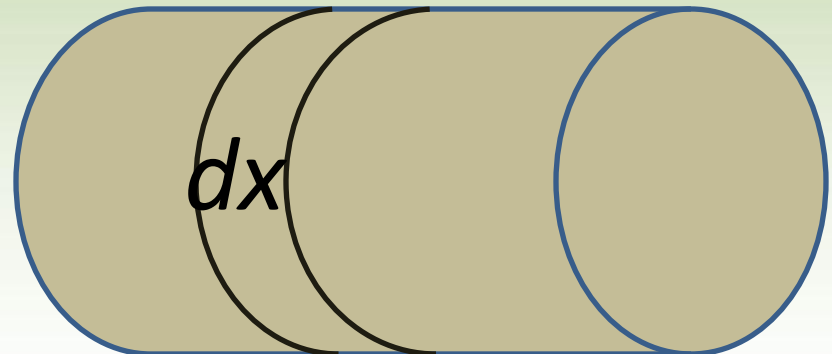
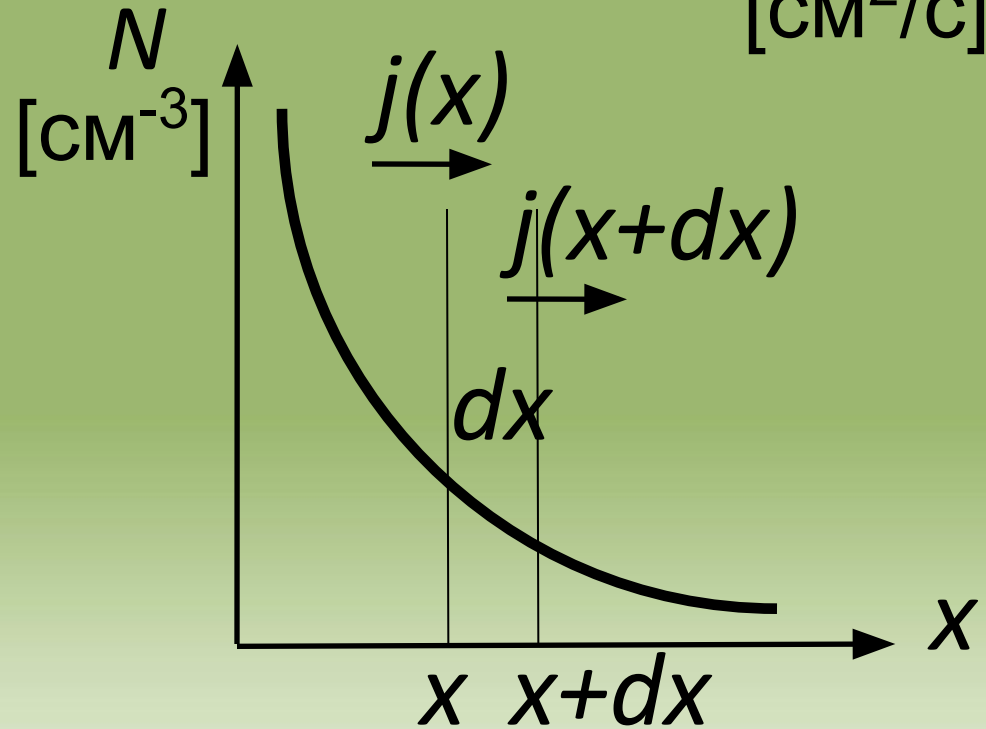
$$\text{[cm}^2\text{/c]}$$

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

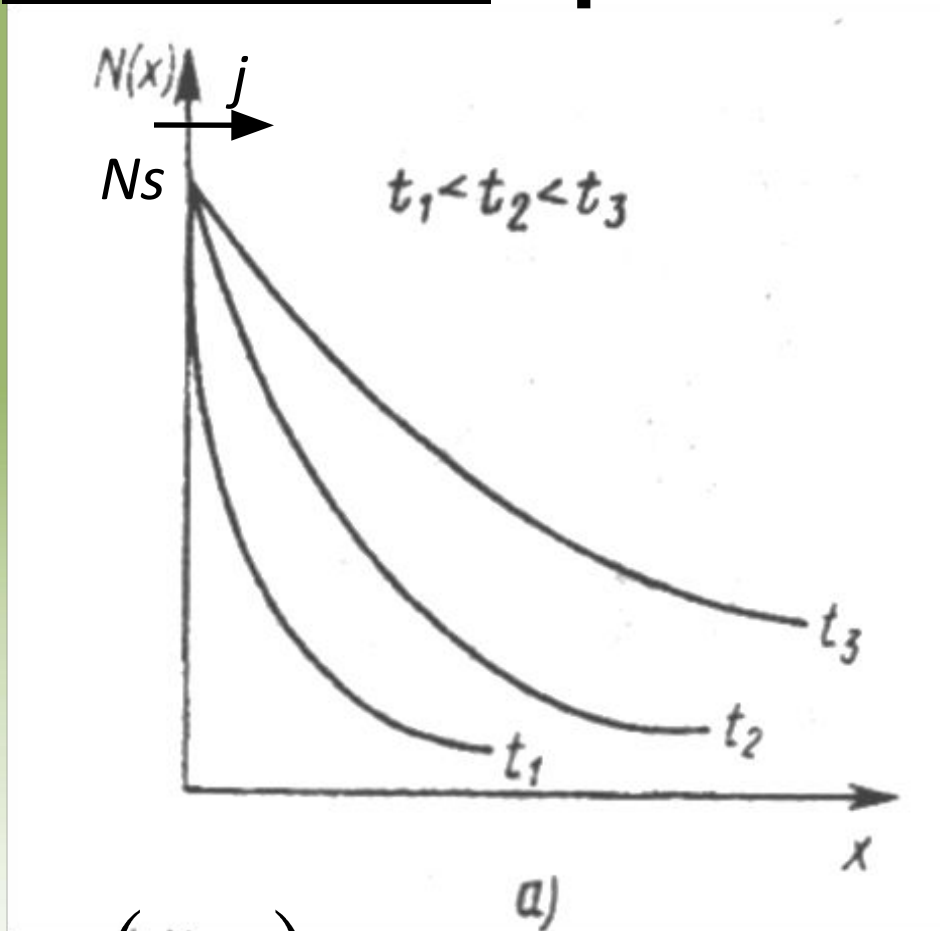
$$\frac{dj}{dx} = - \frac{d}{dx} \left[ D \frac{dN}{dx} \right]$$

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

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

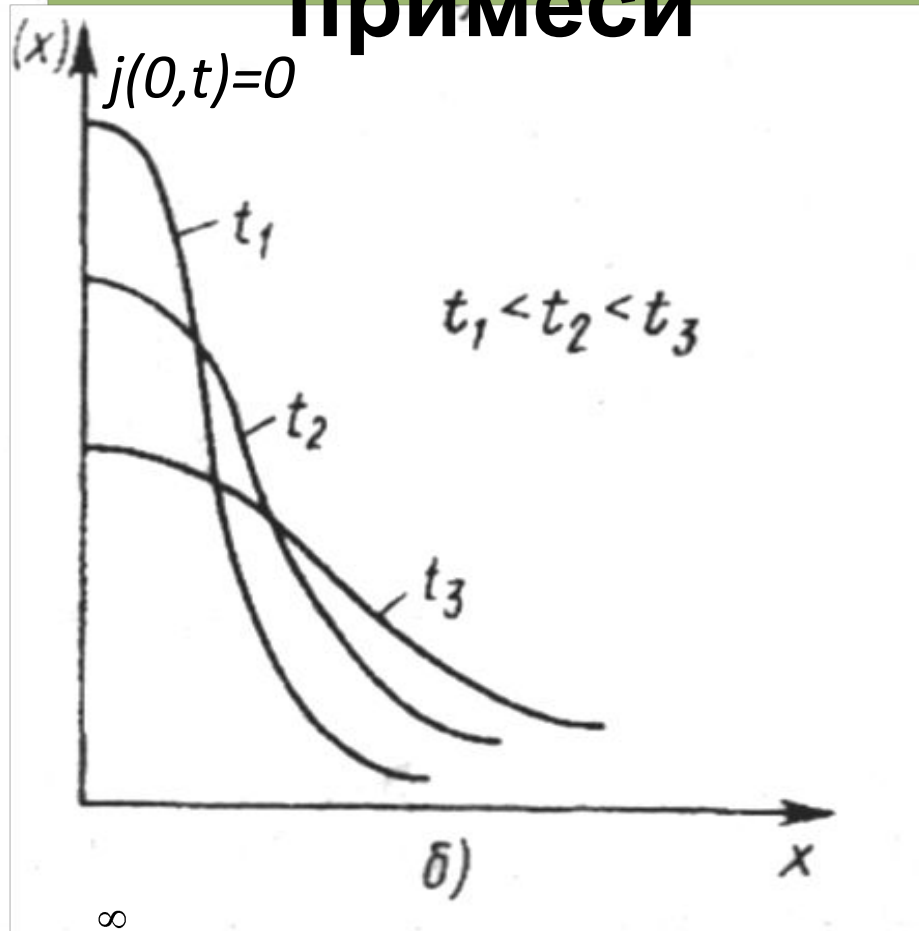


# Диффузия из неограниченного источника примеси



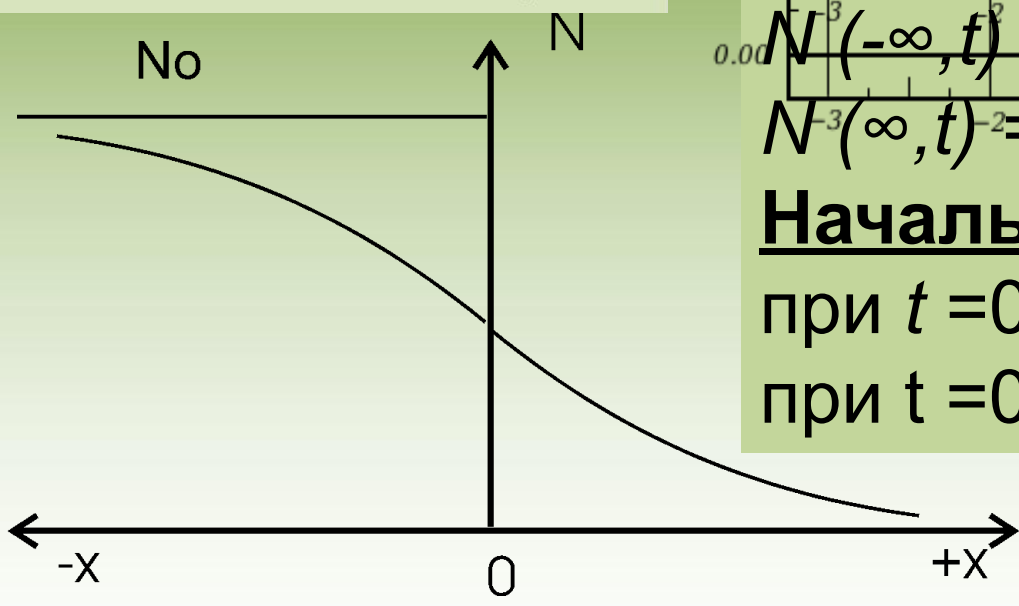
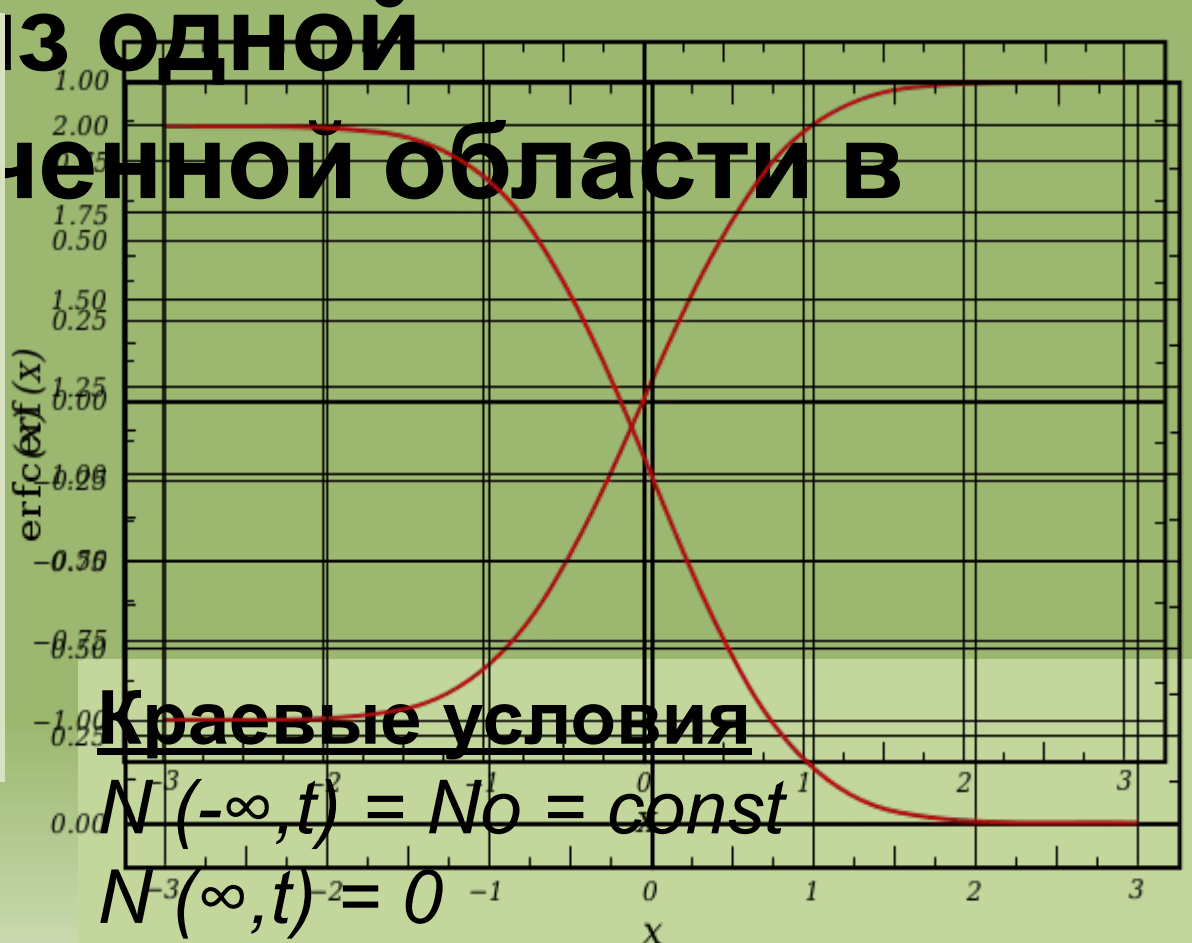
$$N(0, t) = N_s = \text{const}$$

# Диффузия из ограниченного источника примеси



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

Если набор случайных величин подчиняется нормальному распределению со стандартным отклонением  $\sigma$ , то вероятность, что величина отклонится от среднего не более чем на  $\alpha$ , 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

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

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

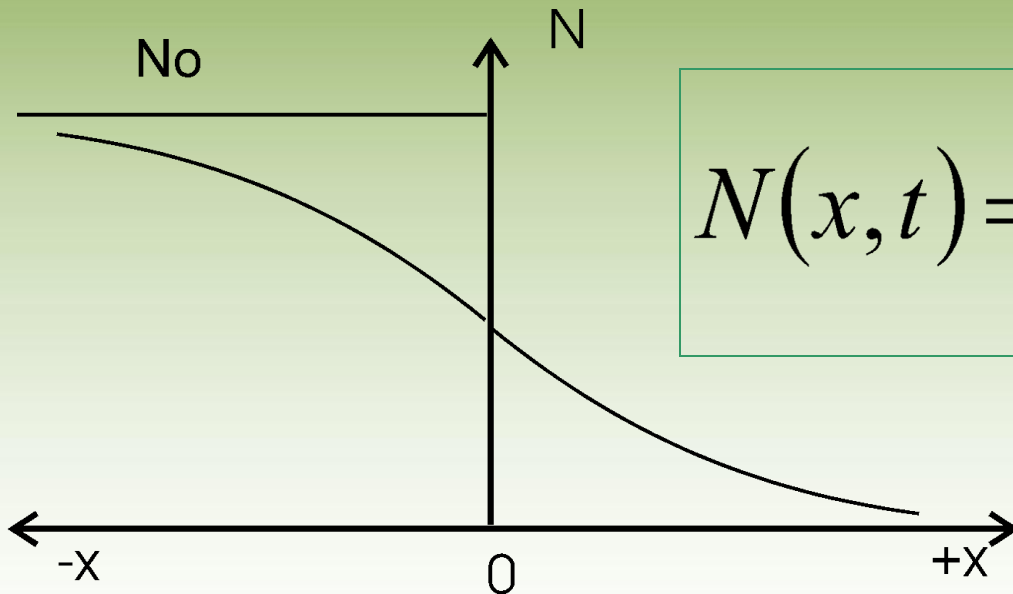
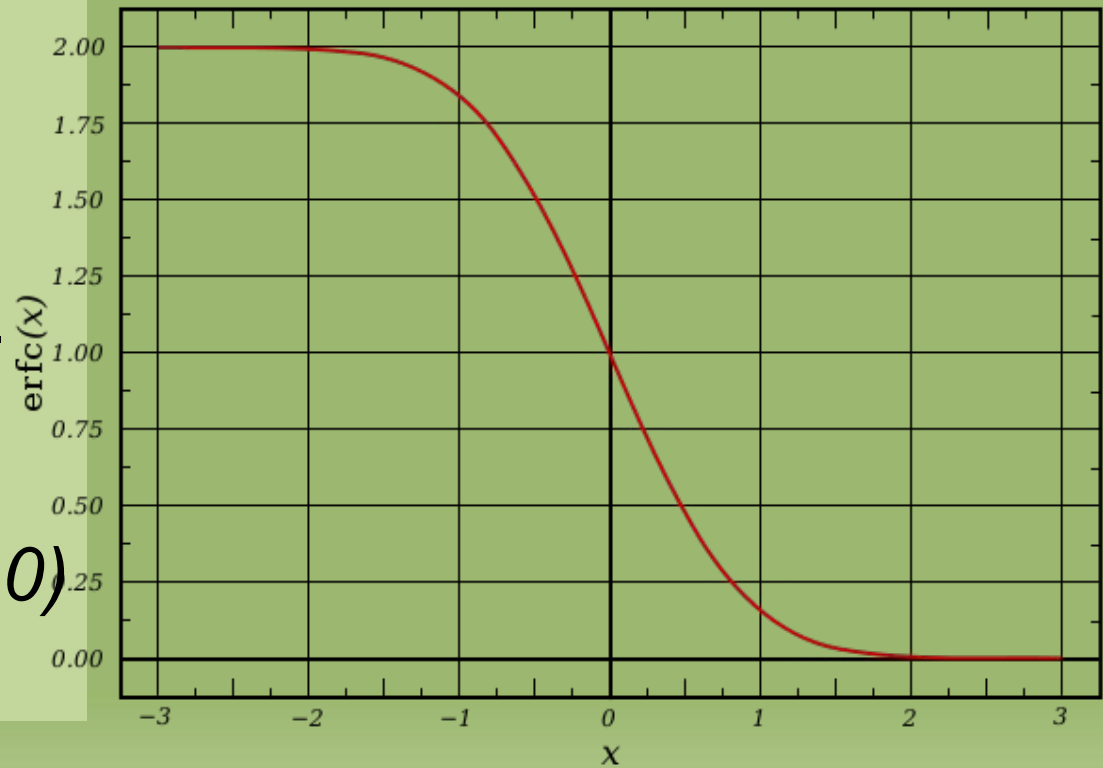
## Начальные условия

при  $t = 0$  и  $x \rightarrow +0$ ,

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

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

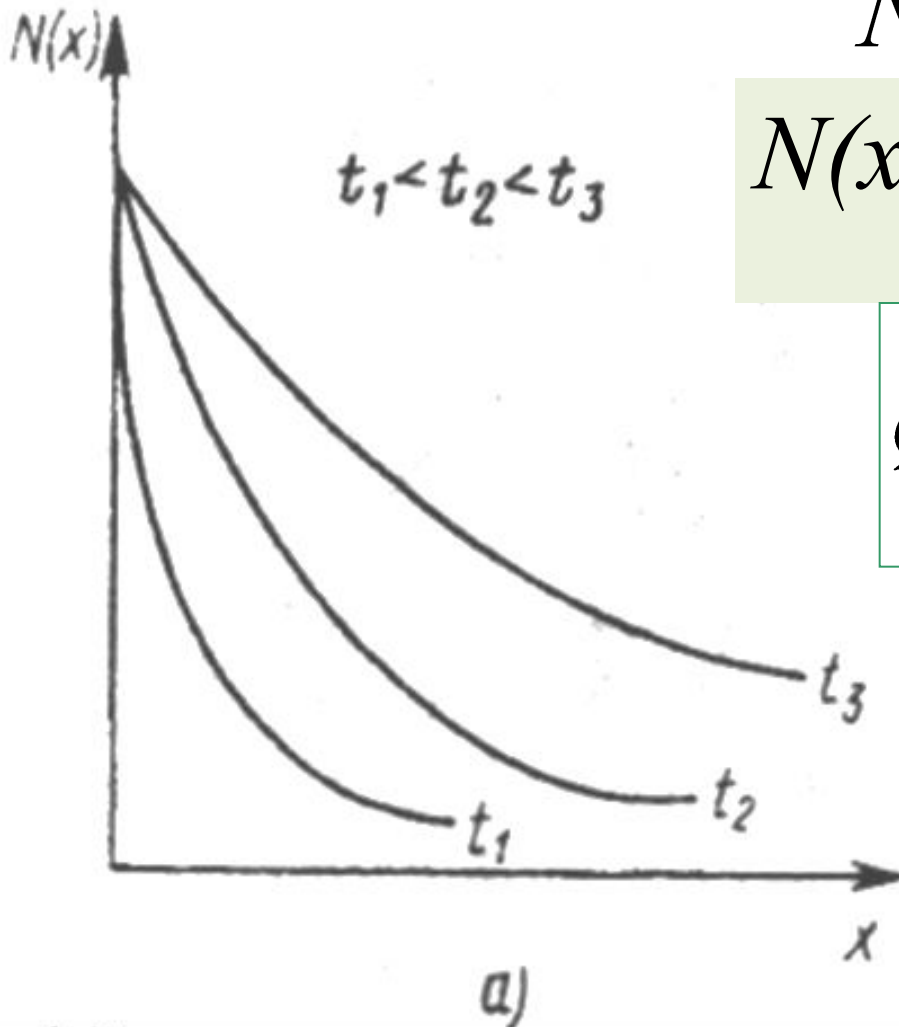
$\rightarrow N_0$



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

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

# Диффузия из неограниченного источника примеси



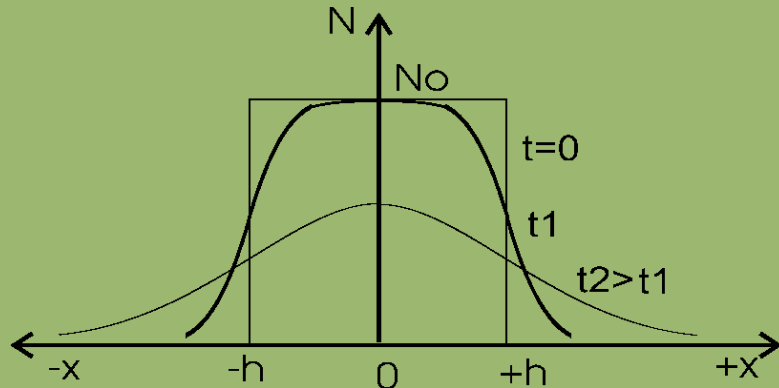
$$N(0, t) = N_s = \text{const}$$

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

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

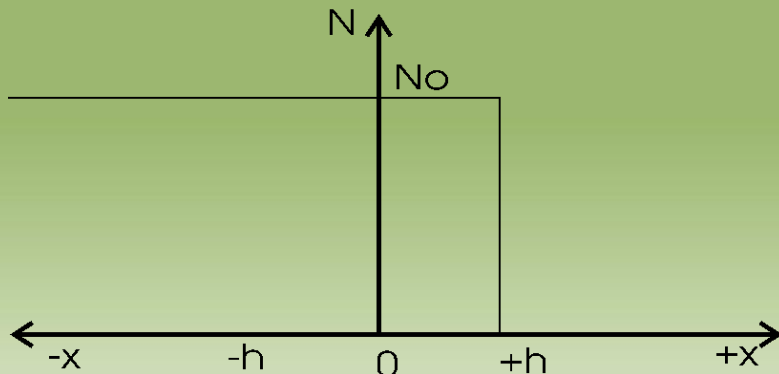
$$j(0, t) = N_s \cdot \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{\pi \cdot t}}$$

# Диффузия из слоя конечной толщины

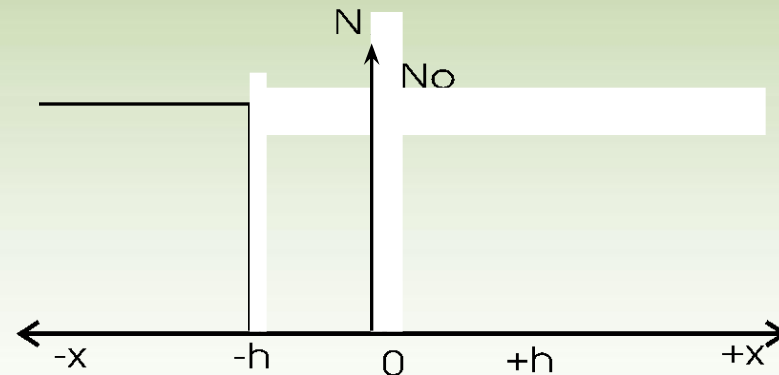


суперпозиция двух профилей  $N_1-N_2$

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



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



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



# 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).***

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

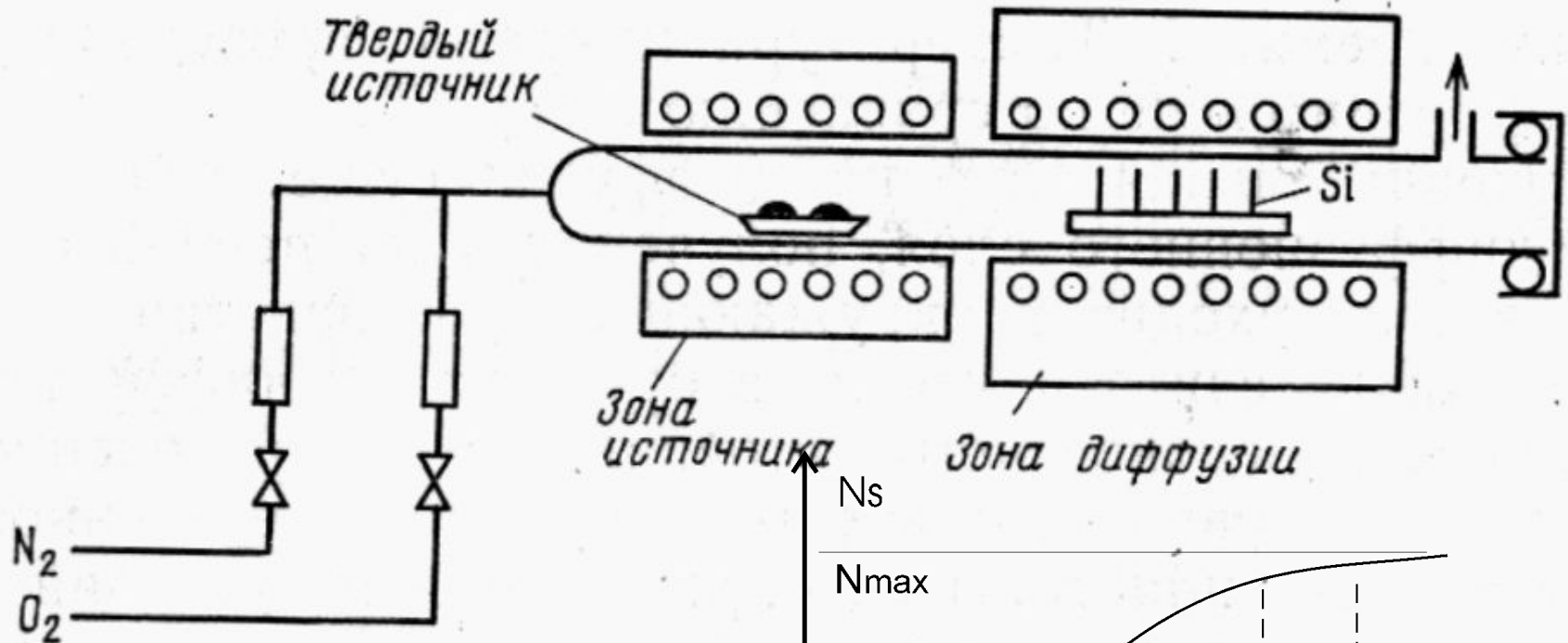
# Факторы, влияющие на величину коэффициента диффузии

- **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

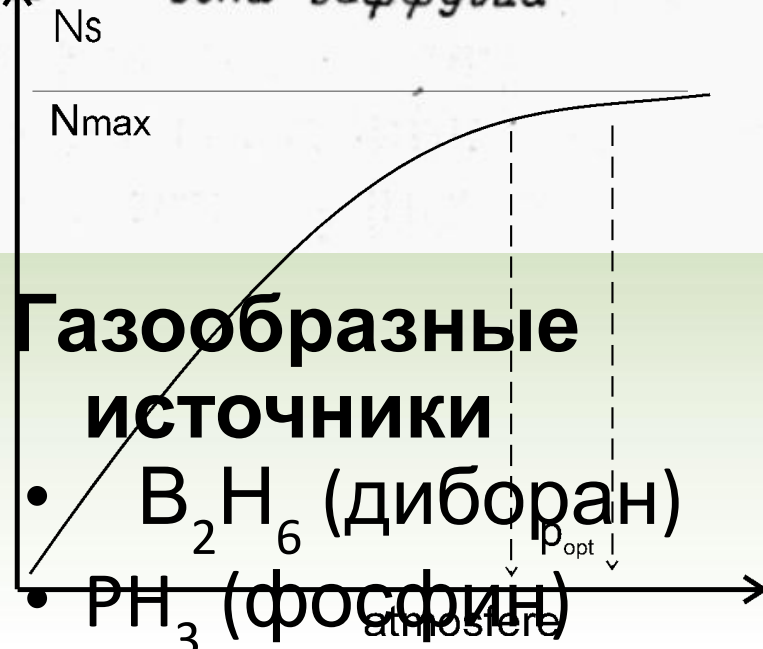


## Твердые источники

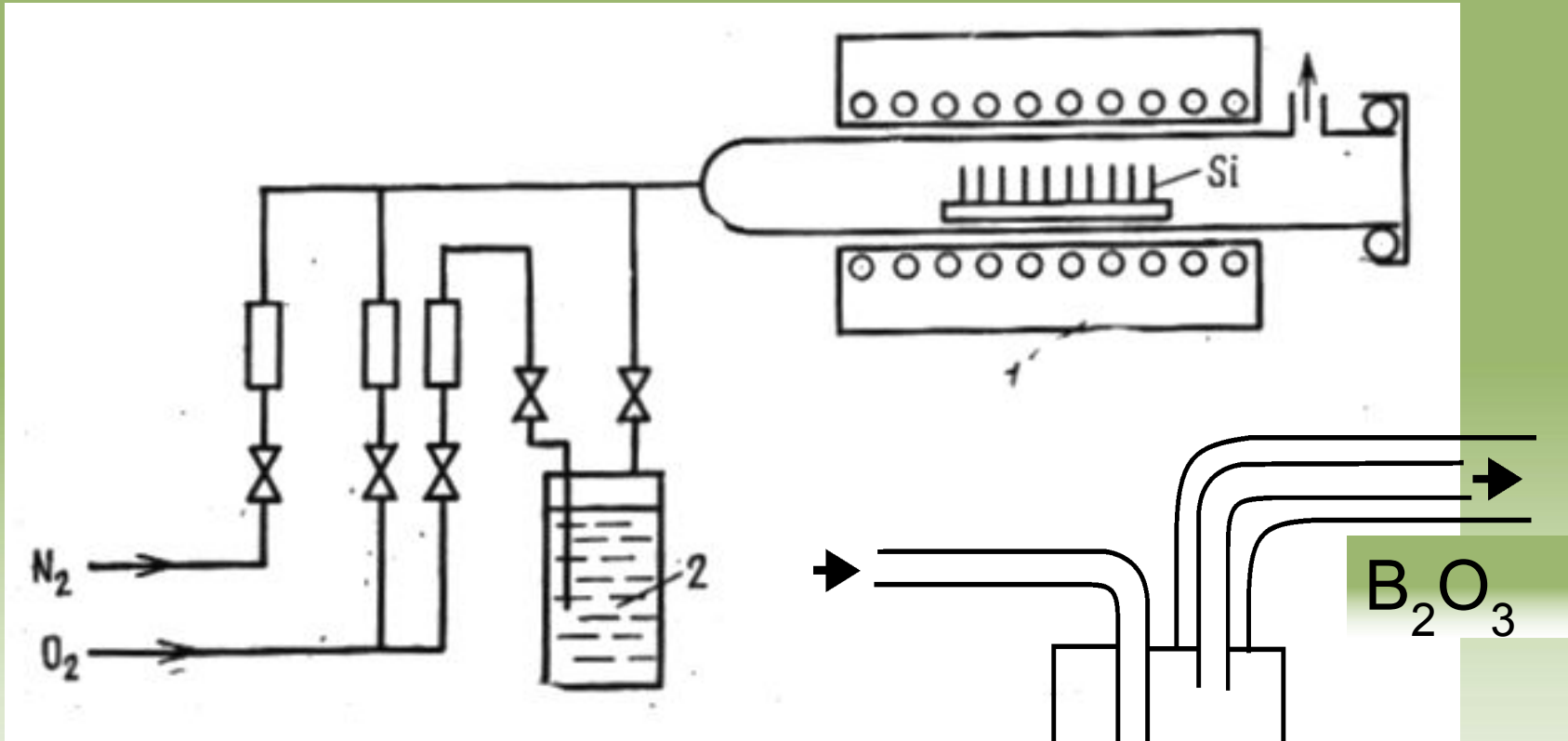
- БСС ( $nB_2O_3 \cdot mSiO_2$ ),  
 $B_2O_3$
- ФСС ( $nP_2O_5 \cdot mSiO_2$ )

## Газообразные источники

- $B_2H_6$  (диборан)
- $PH_3$  (фосфин)



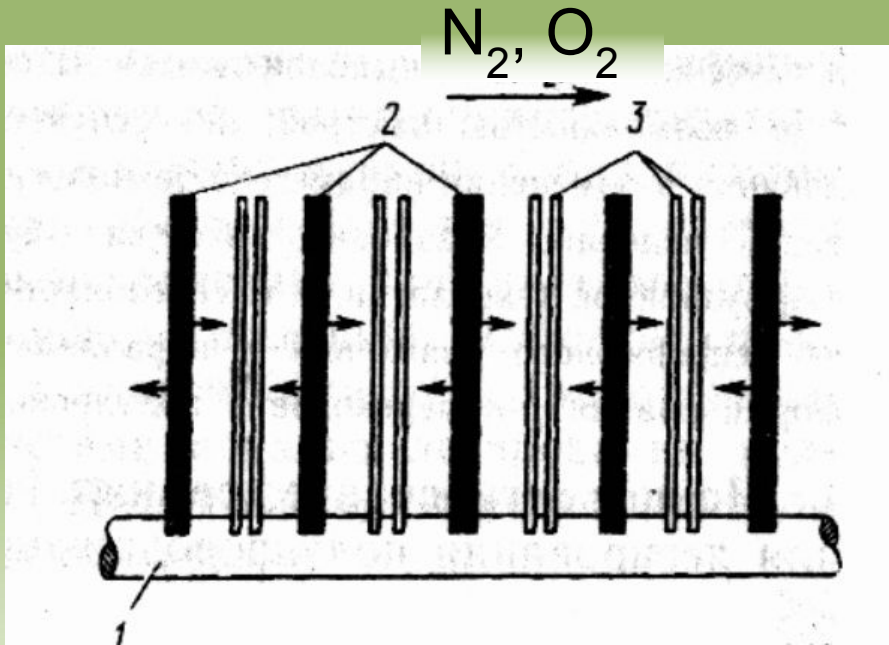
# Диффузия в потоке газа-носителя из жидкого источника



- $BCl_3$  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:

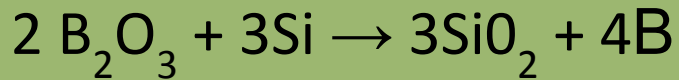
- 1 – кварцевая кассета;
- 2 – твердые планарные источники;
- 3 – пластины

# 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)

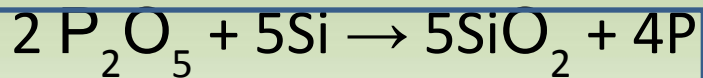
$BCl_3$  и  $BBr_3$

- **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.

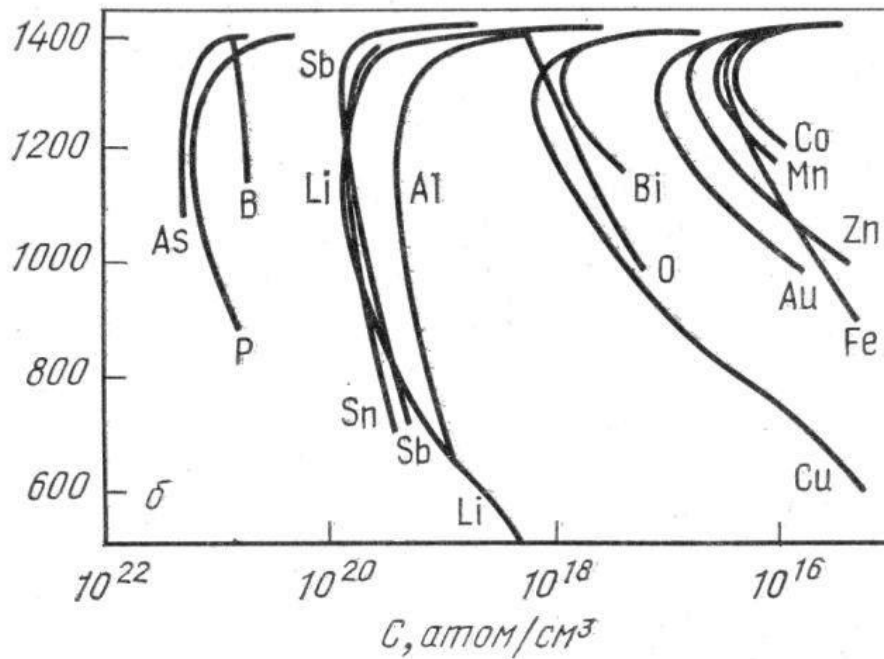
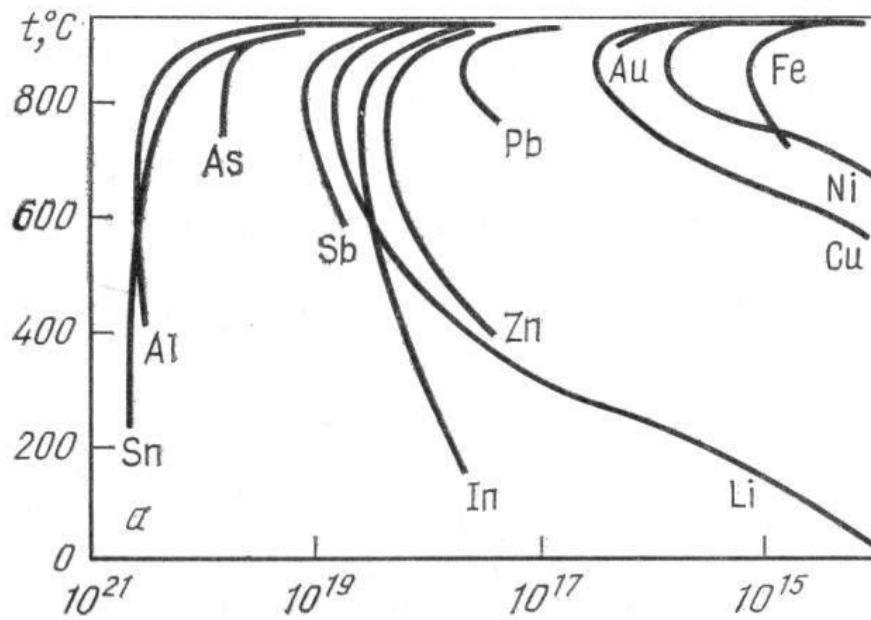
- **Предельная растворимость примеси.**

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

- **Величина коэффициента диффузии.**

Наибольший коэффициент диффузии  $D$  имеет Al. Заметно уступают ему В и Р. Очень велики  $D$  у Au и O<sub>2</sub>.

- **Технологичность.** В первую очередь  $D$  в Si и SiO<sub>2</sub>.



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

Ge

Si

## **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<sup>-1</sup>]

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

$(x_1, y_1, z_1)$  – координаты источника примеси

## Формула Пуассона

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

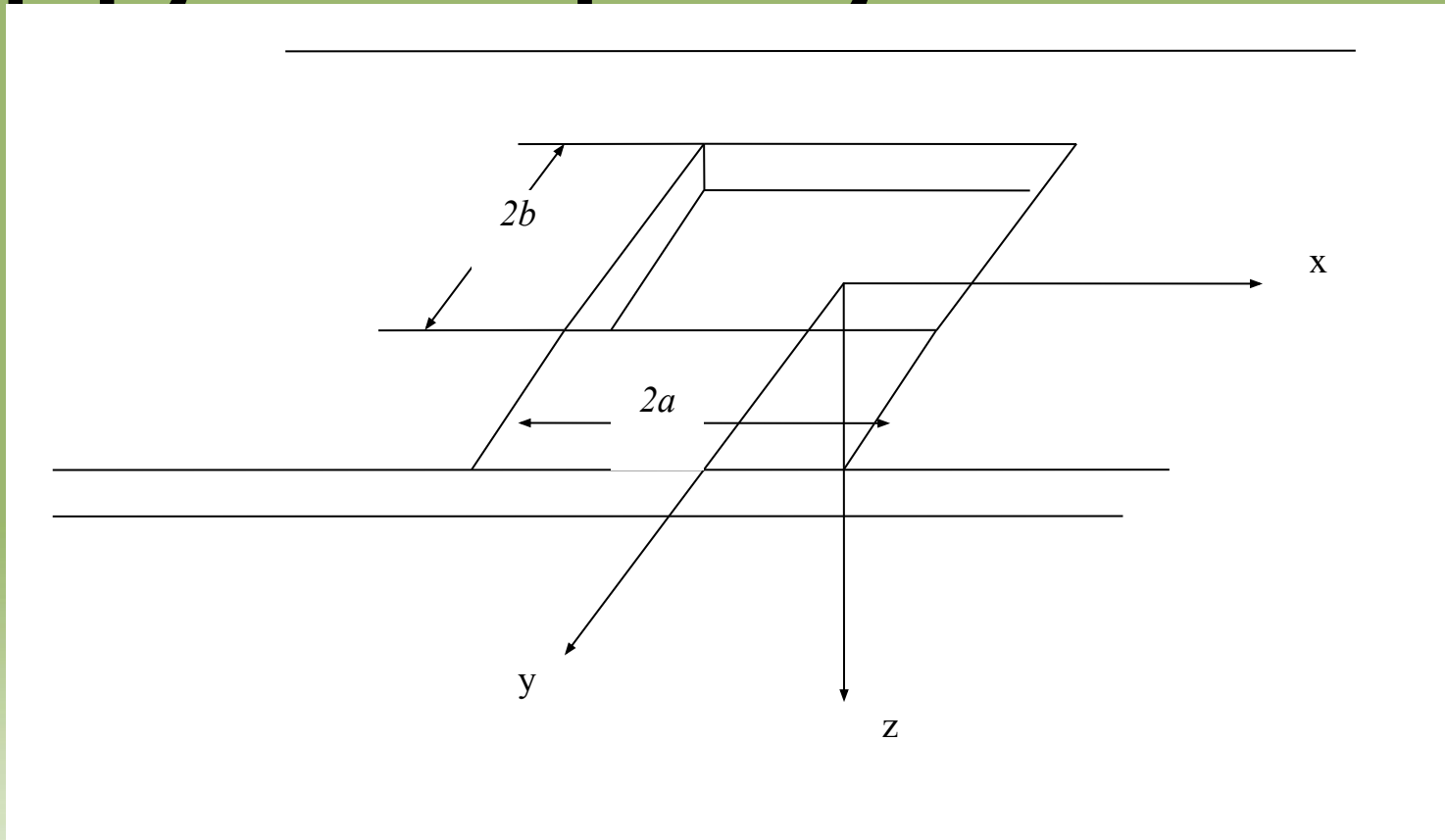
$$N(x, y, z, t) = \iiint_{\infty} \frac{F(\chi, \eta, \zeta)}{(4\pi Dt)^{3/2}} \exp\left[-\frac{(x-\chi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}{4 \cdot D \cdot t}\right] d\chi d\eta d\zeta$$

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

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

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

# Диффузия в прямоугольное окно

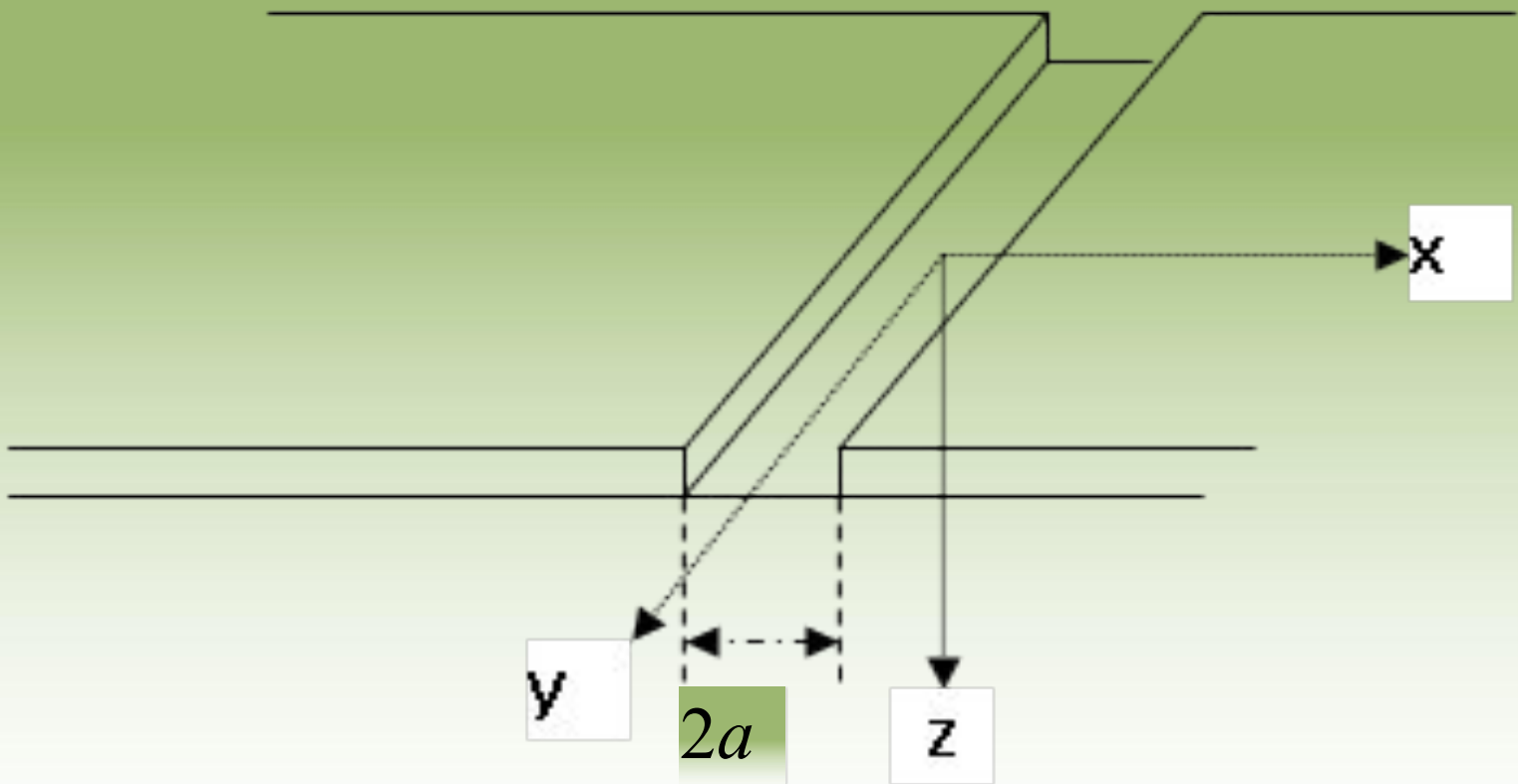


$$N(x, y, z, t) = \frac{N_S}{4} \cdot \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{x-a}{L}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{x+a}{L}\right) \right] \cdot \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{y-b}{L}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{y+b}{L}\right) \right] \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{L}\right)$$

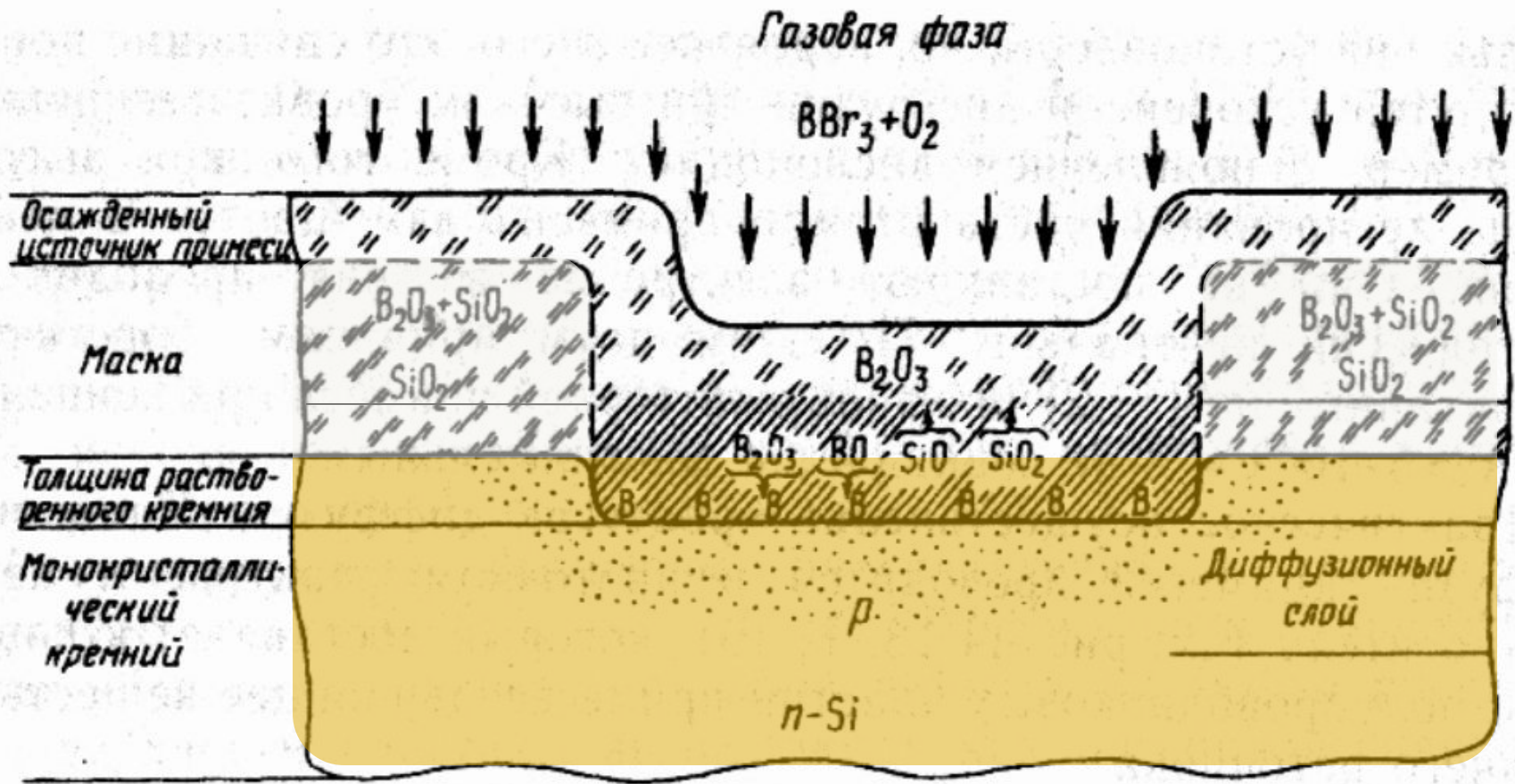
$$N(x, y, z, t) = \frac{Q}{4\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \cdot \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{x-a}{L}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{x+a}{L}\right) \right] \cdot \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{y-b}{L}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{y+b}{L}\right) \right] \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{L^2}\right)$$

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

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

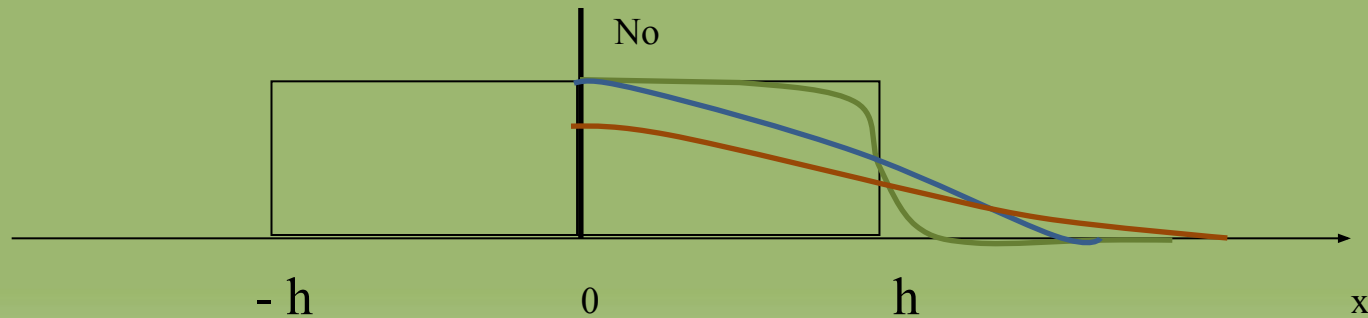


# Схематическое представление диффузионного очага при локальной диффузии бора в кремний

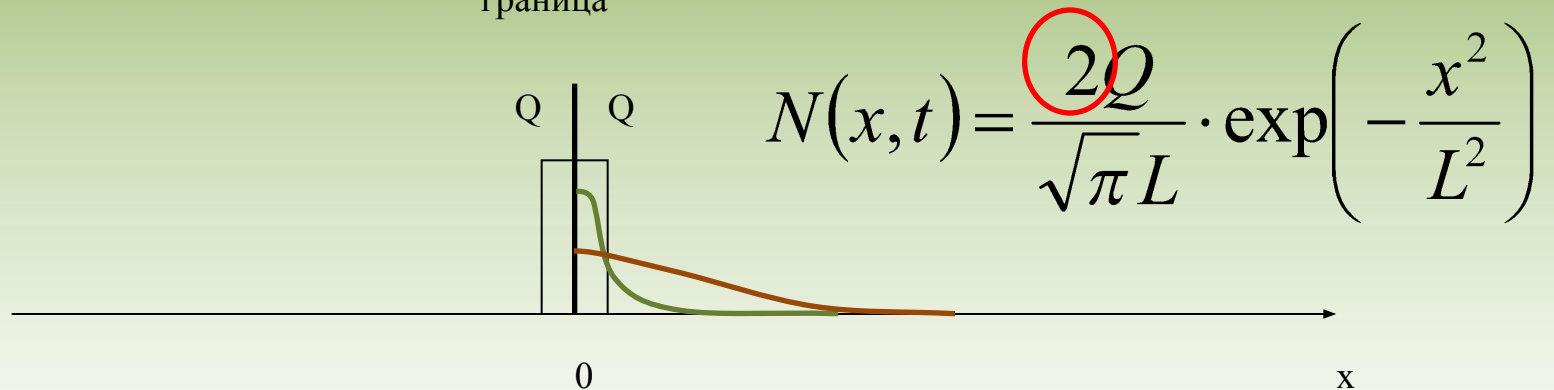


# Отражающая граница

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



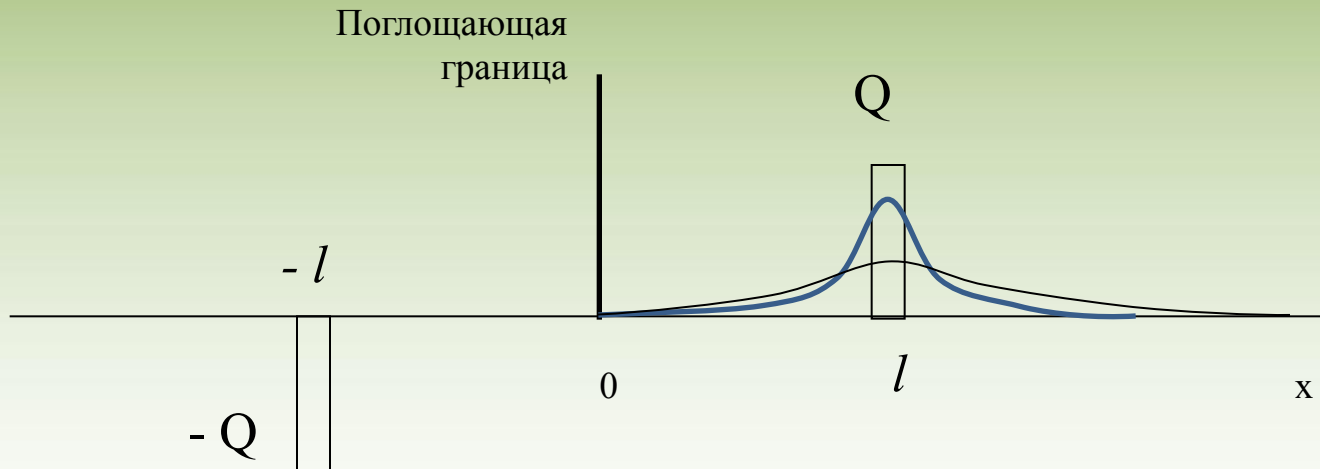
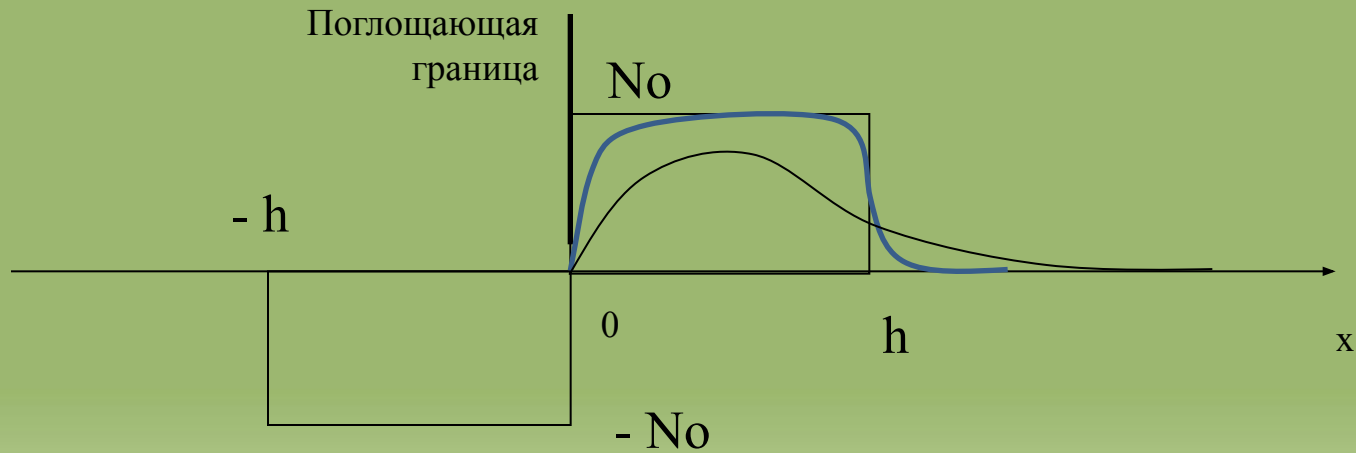
Отражающая  
граница



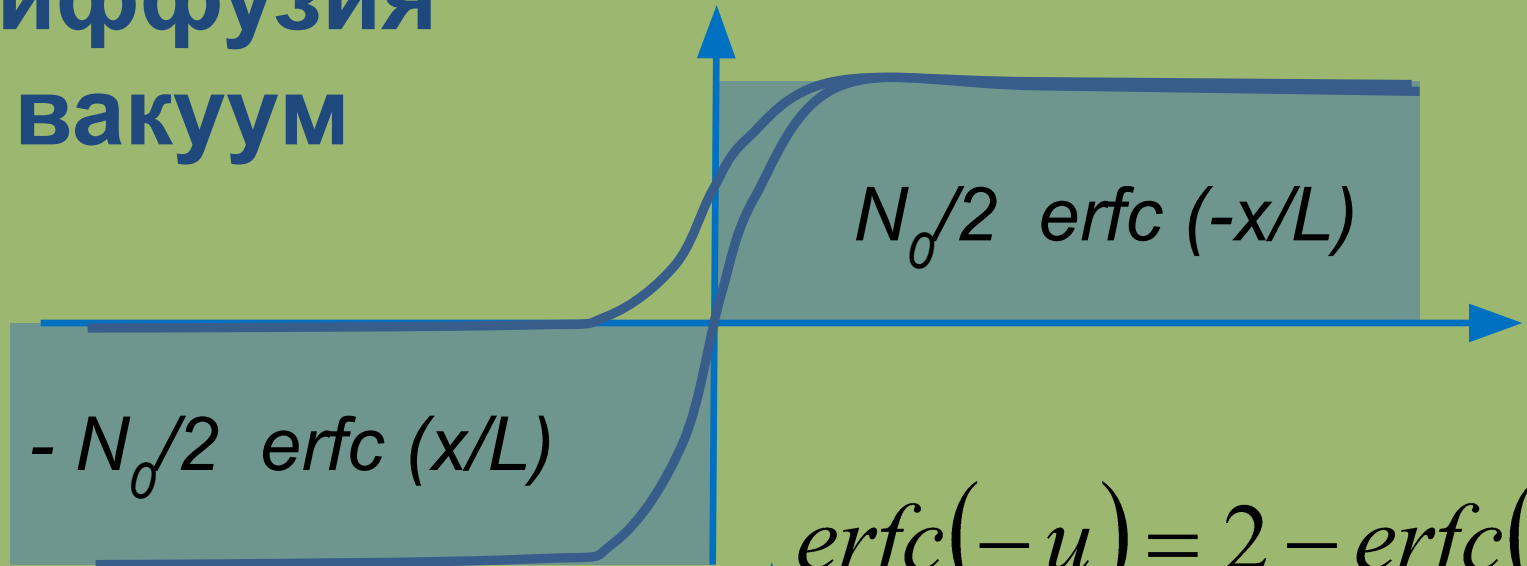
$$N(x, t) = \frac{2Q}{\sqrt{\pi L}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{L^2}\right)$$



# 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  $D t = D_3 t_3 + D_p t_p$

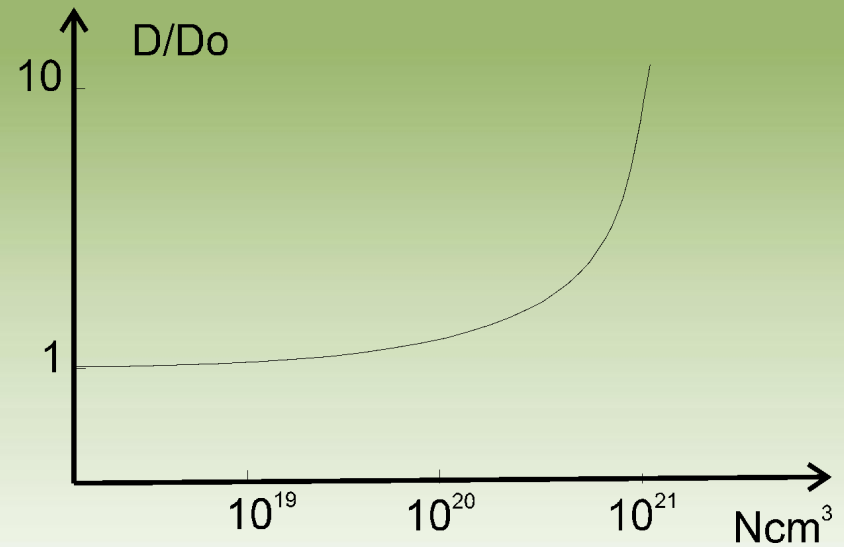
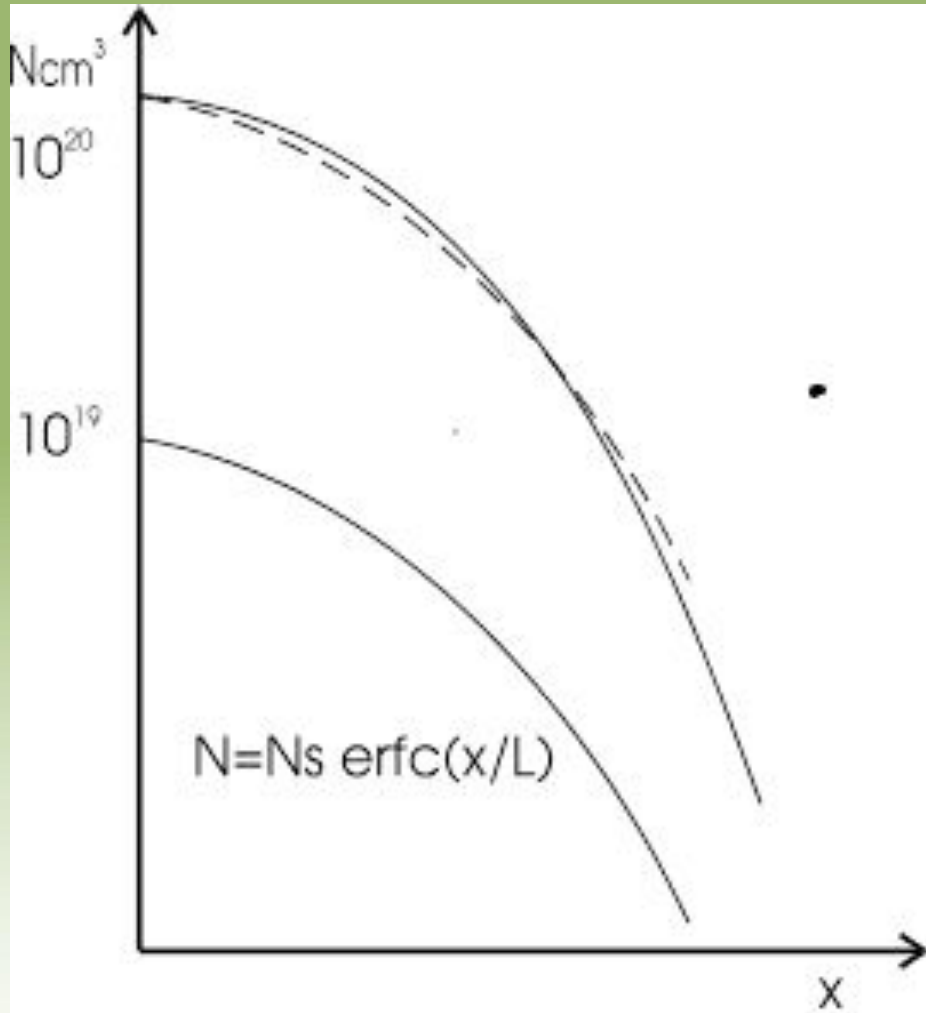
Если  $D_p t_p > 3 D_3 t_3$

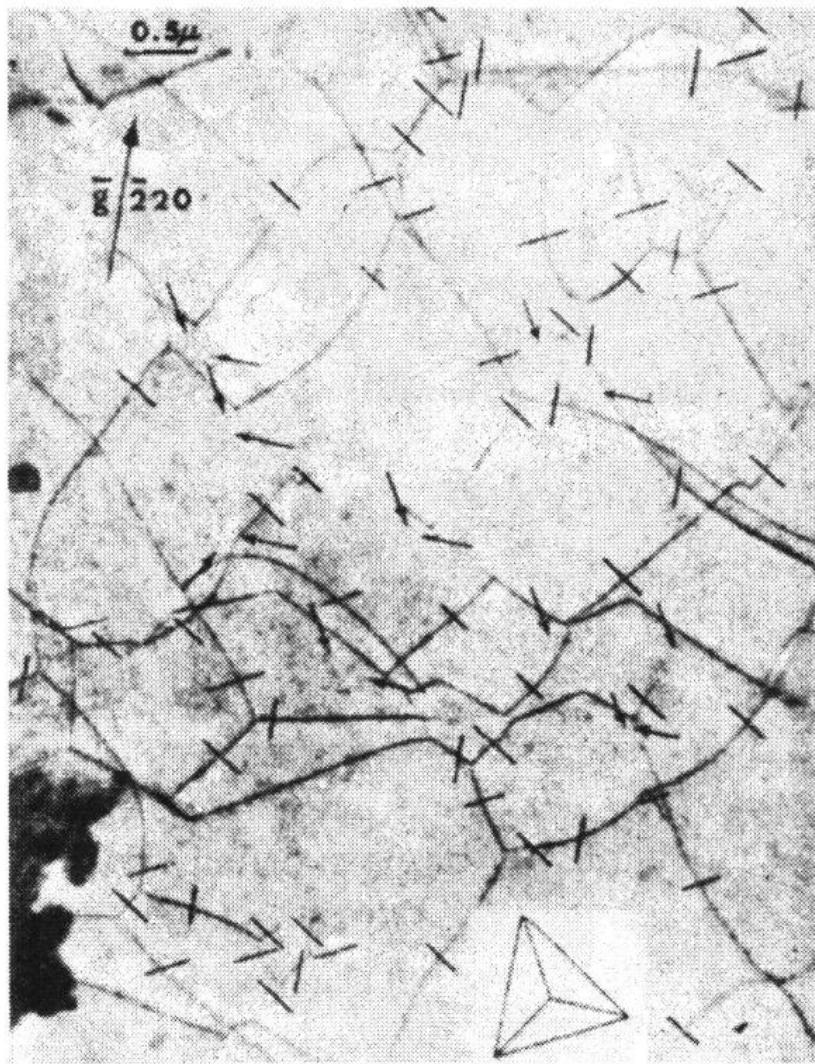
$$N(x, t) = \frac{N_S}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{D_3 \cdot t_3}{D \cdot t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}\right)$$

Если  $D_p t_p < D_3 t_3$

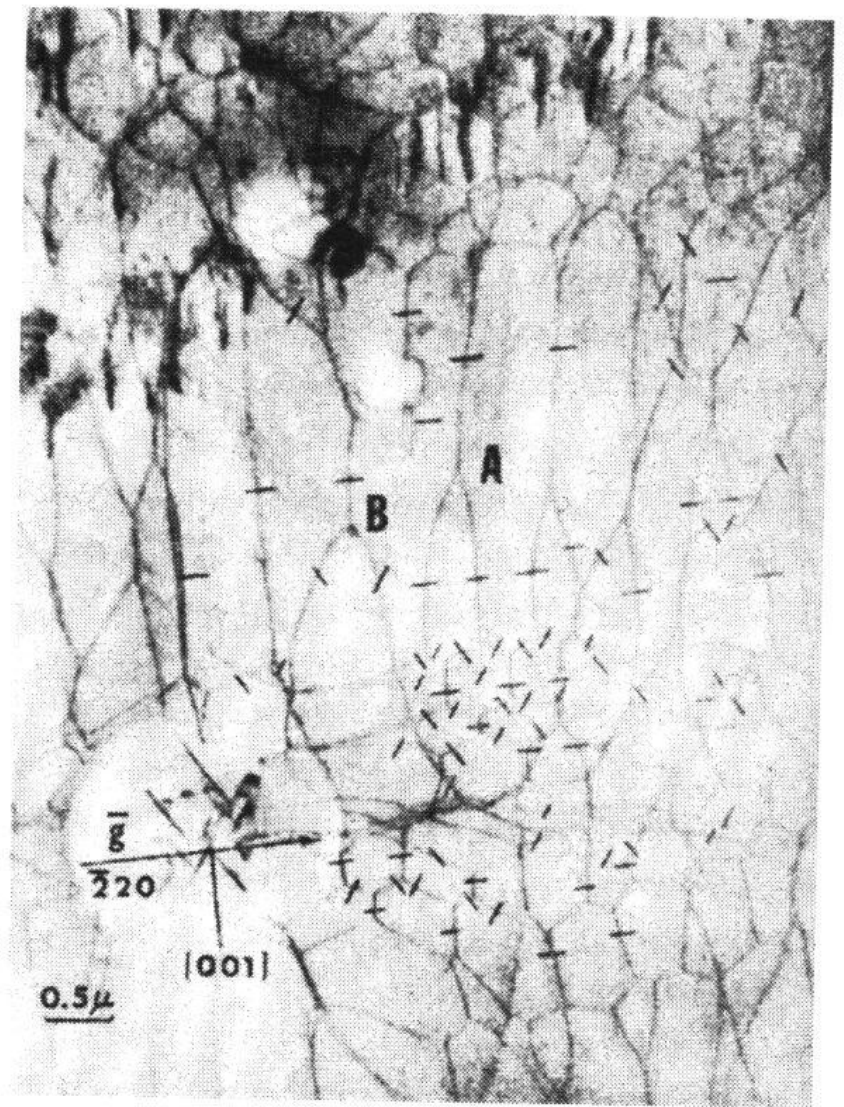
$$N(x, t) = N_{S\text{эф}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad N_{S\text{эф}} = N_S \sqrt{\frac{D_3 \cdot t_3}{D \cdot t}}$$

# Диффузия В в Si



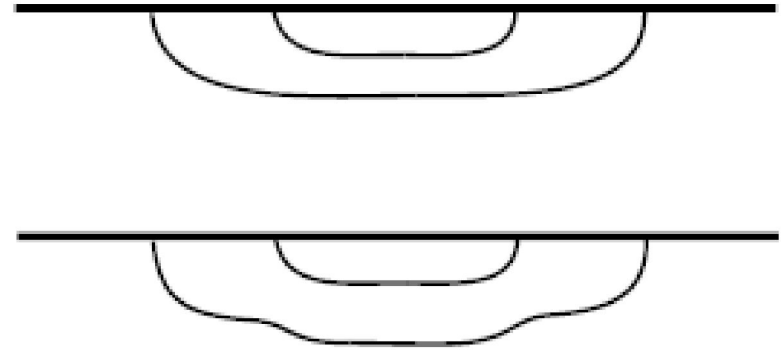
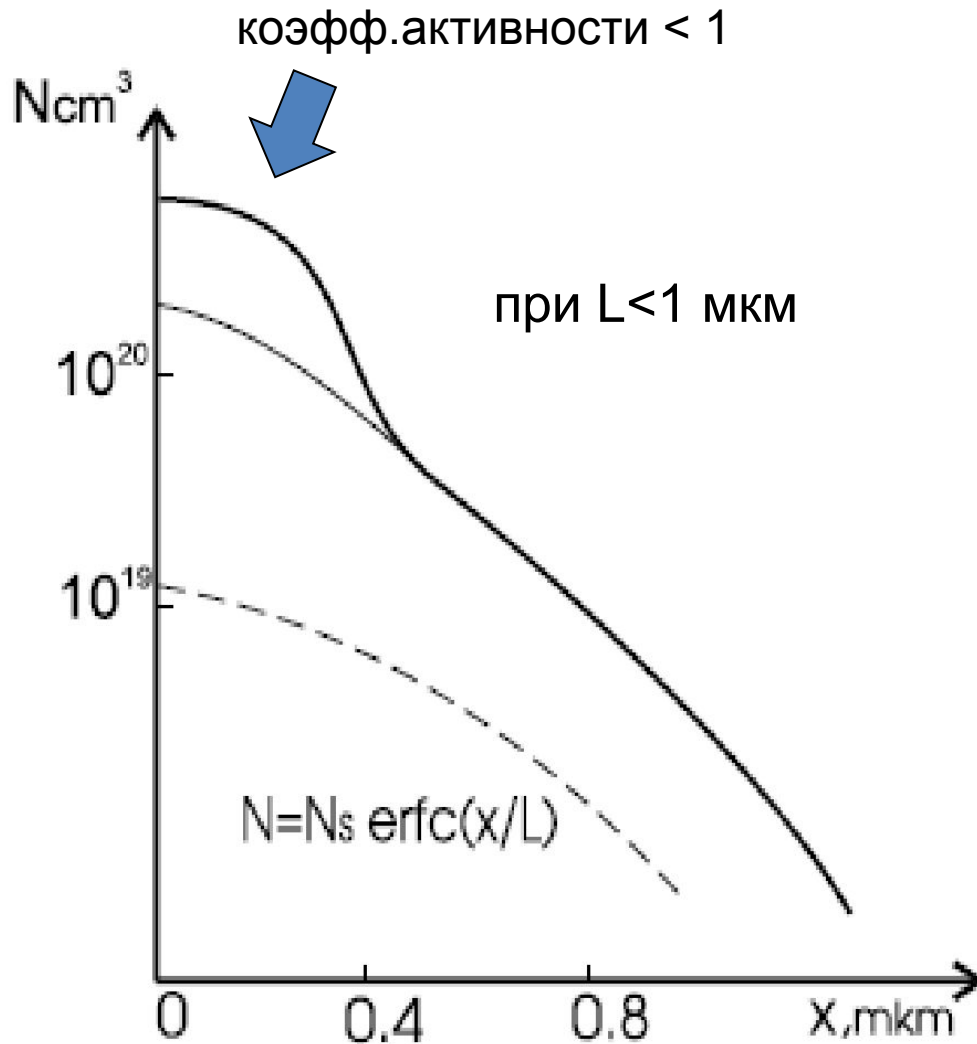


Структура дислокаций, наблюдаемая в образце Si (111) при диффузии В; короткие линии обозначают дислокации, чьи вектора Бюргера лежат в плоскости(111), а стрелками отмечены дислокации с наклонными векторами Бюргера. (Levine и др., 1967).



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

# Диффузия Р в Si



транзистор с тонкой базой  
(менее 0.2 мкм)

**Эффект вытеснения  
коллекторного перехода**