

# **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ**

# Явления

# Переноса

<http://webcenter.ru/~litnevsk>

# Содержание

## Введение

1. Кинематические характеристики молекулярного движения
2. Виды процессов переноса
3. Уравнение переноса в газах

# Введение

*Явления переноса наблюдаются лишь в том случае, если система находится в неравновесном состоянии.*

## Диффузия

*-перемешивание газов,  
-изготовление р-п переходов,  
-одно из явлений, обуславливающих работу транзистора*

## Теплопроводность

*отвод тепла от работающих полупроводниковых устройств:  
мощных диодов, тиристоров, транзисторов,  
от процессоров компьютеров*

## Внутреннее трение (вязкость)

*вызывает сопротивление движению жидкостей и газов.*

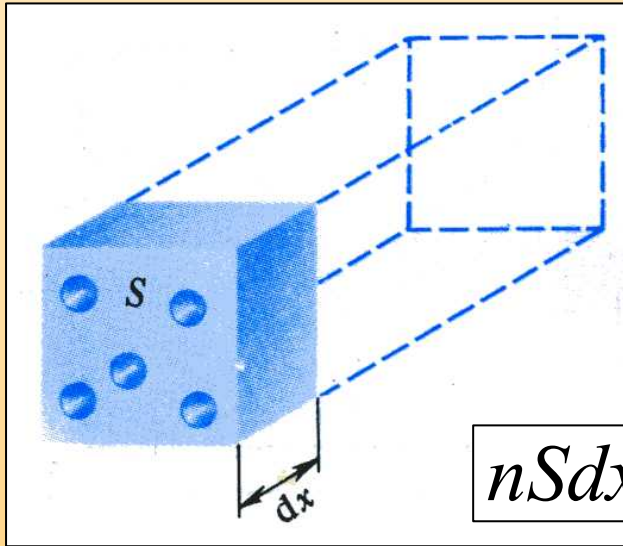
*Все явления переноса имеют общую физическую природу, обусловлены молекулярным движением и, следовательно, описываются уравнениями одинакового вида*

# 1. Кинематические характеристики молекулярного движения

- Эффективное поперечное сечение
- Средняя длина свободного пробега
- Средняя частота столкновений

# Эффективное поперечное сечение

Вероятность столкновения движущейся частицы с другими частицами с конкретным результатом такого столкновения характеризуется эффективным поперечным сечением  $\sigma$



Это воображаемая, а не геометрическая площадь. Она подбирается такой, чтобы вероятность рассматриваемого результата столкновения была равна вероятности того, что частица, двигаясь прямолинейно, попадет в площадку  $\sigma$

$nSdx$

- число частиц-мишеней в слое толщиной  $dx$

$dS = \sigma nSdx$  - площадь, перекрытая частицами-мишенями в слое  $dx$

$$dP = \frac{dS}{S} = \sigma n dx$$

- количественное определение эффективного поперечного сечения как коэффициента пропорциональности

**Эффективный диаметр**

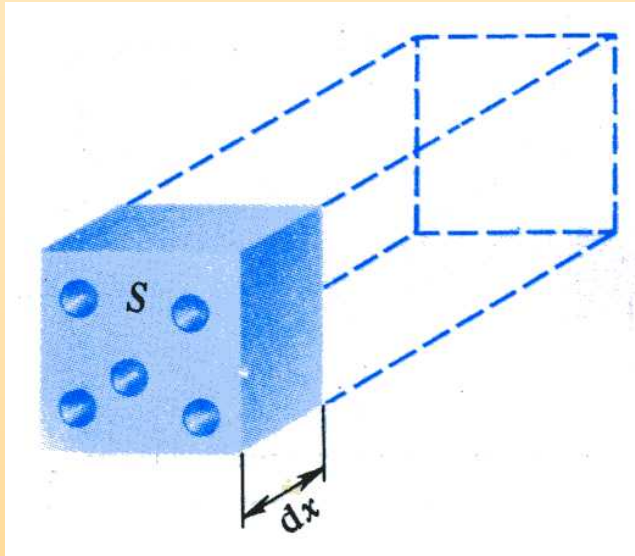
$$\sigma = \frac{\pi d_{\text{эфф}}^2}{4}$$

**Размерность, единицы измерения**

$$[\sigma] = [S] = \text{м}^2$$

$$1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2$$

# Средняя длина свободного пробега



$$dP = \frac{dS}{S} = \sigma n dx$$

величины  $\sigma$  и  $n_0$  не зависят от  $x$ , тогда

$$P = \sigma n x$$

$$1 = \sigma n \langle l \rangle$$

Длина пути  $\langle l \rangle$ , при которой вероятность столкновения с частицами-мишенями становится равной единице, называется **средней длиной свободного пробега**:

$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sigma n}$$

Это путь, который в среднем проходит частица в веществе мишени, прежде чем происходит столкновение

## Средняя частота столкновений

Двигаясь со средней скоростью  $\langle v \rangle$  в среднем за время  $\tau$  частица проходит расстояние, равное средней длине свободного пробега  $\langle l \rangle$ :

$$\langle l \rangle = \langle v \rangle \tau$$

$\tau$

- это время, которое молекула движется между двумя последовательными соударениями (аналог периода)

Тогда среднее число столкновений за единицу времени (средняя частота столкновений) есть величина, обратная периоду:

$$\nu = \frac{1}{\tau} = \frac{\langle v \rangle}{\langle l \rangle} = \sigma n \langle v \rangle$$

## 2. Виды процессов переноса

- Диффузия
- Теплопроводность
- Внутреннее трение (вязкость)

# Диффузия

***В состоянии равновесия плотность каждой из компонент смеси во всех точках фазы одинакова.***

***При отклонении плотности какой-либо компоненты в смеси от равновесного (одинакового по всему объему) значения в некоторой области в системе возникает движение этой компоненты вещества в таких направлениях, чтобы сделать плотность каждой компоненты одинаковой по всему объему системы.***

***Диффузией называется процесс переноса вещества компоненты в смеси, приводящий к выравниванию концентрации этой компоненты по всему объему системы***

# Теплопроводность

*В состоянии равновесия температура во всех точках системы одинакова.*

*При отклонении температуры от равновесного (одинакового по всему объему) значения в некоторой области в системе возникает движение теплоты в таких направлениях, чтобы сделать температуру одинаковой по всему объему системы.*

***Теплопроводностью*** называется процесс переноса теплоты, приводящий к выравниванию температуры по всему объему системы

# **Внутреннее трение (вязкость)**

*В состоянии равновесия различные части фазы покоятся друг относительно друга.*

*При относительном движении различных частей системы возникают явления, стремящиеся уменьшить относительную скорость движения, то есть возникают силы торможения, или вязкость. Механизм этих сил сводится к обмену импульсами упорядоченного движения между различными слоями газа, находящимися в относительном движении*

***Вязкостью или внутренним трением называется процесс переноса импульса от слоя газа, движущегося с большей скоростью, к слою, движущемуся медленнее, приводящий к выравниванию скорости движения слоев газа по всему объему системы***

# 3. Уравнение переноса в газах

- Общее уравнение переноса
- Уравнение Фурье для теплопроводности
- Уравнение Ньютона для вязкости
- Уравнение Фика для диффузии
- Связь между коэффициентами переноса

# Общее уравнение переноса

 $G(x)$ 

- характеристика произвольного молекулярного свойства, отнесенного к одной молекуле, например, энергия, импульс, концентрация, электрический заряд и т. д.

$$\langle \Delta x \rangle = \frac{2}{3} \langle \ell \rangle$$

$$G\left(x \pm \frac{2}{3} \langle \ell \rangle\right) = G(x) \pm \frac{2}{3} \langle \ell \rangle \frac{\partial G(x)}{\partial x}$$

$$\frac{dN}{dt dS} = \frac{1}{4} n \langle v \rangle$$

- поток числа молекул вдоль оси  $Ox$

$$I_G^{(-)} = -\frac{1}{4} n \langle v \rangle \left\{ G(x) + \frac{2}{3} \langle \ell \rangle \frac{\partial G(x)}{\partial x} \right\}$$

- поток свойства  $G$   
сквозь площадку  $dS$   
в направлении  
против оси  $Ox$

$$I_G^{(+)} = \frac{1}{4} n \langle v \rangle \left\{ G(x) - \frac{2}{3} \langle \ell \rangle \frac{\partial G(x)}{\partial x} \right\}$$

- поток свойства  $G$   
сквозь площадку  $dS$  в  
направлении оси  $Ox$

**Основное уравнение  
процессов переноса:**

$$I_G = I_G^{(+)} + I_G^{(-)} = -\frac{1}{3} n \langle v \rangle \langle \ell \rangle \frac{\partial G}{\partial x}$$

# Уравнение Фурье для теплопроводности

Переносимым количеством является средняя энергия теплового движения, приходящаяся на одну молекулу:

$$G(x) = \frac{i}{2} kT$$

**Уравнение Фурье:**

$$I_q = -\frac{1}{3} n \langle v \rangle \langle \ell \rangle \frac{i}{2} k \frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{1}{3} n \langle v \rangle \langle \ell \rangle \frac{i}{2} \frac{m_0 k N_A}{m_0 N_A} \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\lambda = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle \ell \rangle c_V$$

- теплопроводность

$$\rho = m_0 n$$

$$M = m_0 N_A$$

$$c_V = \frac{i}{2} \frac{R}{M} = \frac{i}{2} \frac{k N_A}{m_0 N_A}$$

**Зависимость от макропараметров:**

$\lambda$  не зависит от  $p$  ( $T = const$ )

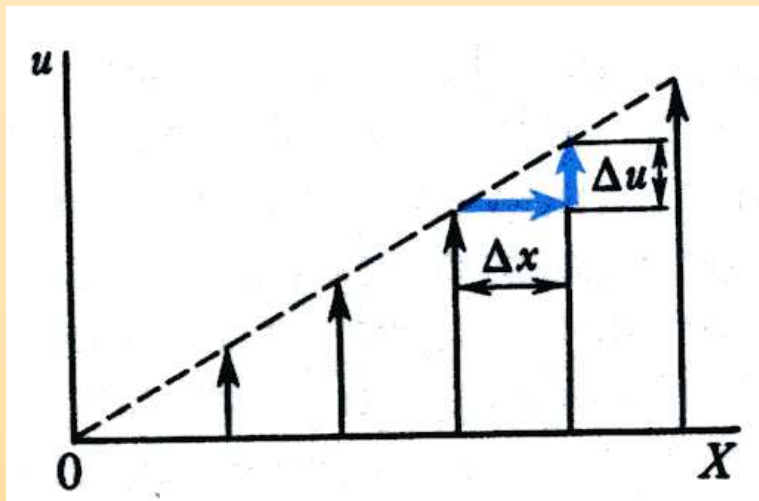
**Для кислорода при нормальных условиях:**

$$\lambda = 0,024 \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot \text{К})}$$

$$\lambda \sim \sqrt{T} \quad \left( p = const, n \langle \ell \rangle = 1/\sigma, \langle v \rangle \sim \sqrt{T} \right)$$

**Легкие газы обладают большей теплопроводностью, чем тяжелые**

# Уравнение Ньютона для внутреннего трения



Переносимым количеством является импульс упорядоченного (не хаотического) движения молекулы:

$$G(x) = m_0 u(x)$$

Уравнение

Ньютона:

$$I_{m_0 u} = -\frac{1}{3} n \langle v \rangle \langle \ell \rangle m_0 \frac{\partial u}{\partial x} = -\eta \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{F_{\text{тр}}}{S}$$

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle \ell \rangle$$

- динамическая вязкость

$$\rho = m_0 n$$

Кинематическая вязкость:

$$\nu = \eta / \rho$$

Зависимость от макропараметров:

$\eta$  не зависит от  $p$  ( $T = \text{const}$ )

$$\eta \sim \sqrt{T} \quad \left( p = \text{const}, n \langle \ell \rangle = 1/\sigma, \langle v \rangle \sim \sqrt{T} \right)$$

Для кислорода и азота в воздухе при нормальных условиях:

$$\eta \sim 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

# Уравнение Фика для диффузии

Переносимым количеством является концентрация рассматриваемого сорта молекул

$n_1(x)$  - концентрация молекул первого сорта

$n$  - равновесная концентрация молекул

$$G(x) = \frac{n_1(x)}{n}$$

- так как свойство  $G$  есть характеристика переносимого количества, отнесенная к одной молекуле

Общее уравнение (уравнением Фика):

$$I_{n_1} = -\frac{1}{3} n \langle v \rangle \langle \ell \rangle \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{n_1}{n} \right) = -D \frac{\partial n_1}{\partial x}$$

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \ell \rangle$$

- коэффициент диффузии

Зависимость от макропараметров:

$$D \sim 1/p \quad (T = const)$$

$$D \sim T^{3/2} \quad (p = const, \langle \ell \rangle \sim T, \langle v \rangle \sim \sqrt{T})$$

Для кислорода и азота в воздухе при нормальных условиях:

$$D \sim 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$$

# Связь между коэффициентами переноса

Выпишем все три коэффициента переноса:

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \ell \rangle$$

$$\lambda = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle \ell \rangle c_V$$

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle \ell \rangle$$

$$\langle v \rangle \langle \ell \rangle$$

- входит в каждую формулу, что позволяет выразить их друг через друга:

$$\lambda = c_V \eta = \rho c_V D, \quad \eta = \rho D$$

Наличие связи между коэффициентами переноса подчеркивает единую природу этих, на первый взгляд, разнородных явлений, в основе которых лежит молекулярное движение