

## 1.2. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ВАКУУМА И ЕГО СВОЙСТВА

**Цель лекции:** дать определение вакуума и основных его характеристик для использования в качестве технологической среды.

*Вакуум* — газовая среда с давлением ниже атмосферного ( $p < p_{\text{атм}}$ ), используется в технологии производства практически всех приборов электронной техники (ЭВП и полупроводниковых приборов, интегральных микросхем и др.) и других изделий, необходима для физического функционирования электровакуумных приборов.

Размерность давления воздуха, в соответствии с ГОСТ 8.417–2002:

1 Па = 1 Н/м<sup>2</sup>; 1 бар = 10<sup>5</sup> Па = 750 мм рт. ст. = 750 Торр; 1 Торр = 133,3 Па.

Вакуум обладает рядом свойств, которые обеспечивают реализацию технологических процессов:

- позволяет формировать потоки заряженных и нейтральных частиц с приданием им необходимой энергии и плотности;

- благодаря вакууму потоки заряженных частиц могут беспрепятственно преодолевать межэлектродные расстояния (при этом они могут ускоряться, фокусироваться и отклоняться по заданной траектории);

- позволяет сохранить чистоту обрабатываемой поверхности материала (обеспечить отсутствие сорбированных молекул газа, паров углеводорода и воды, оксидов и др.) для технологических процессов (формирование элементов топологии на полупроводниковой пластине, ионная очистка и т. д.);

- предохраняет нагреваемые поверхности (нити накала, катоды и др.) от окисления и перегорания.

### 1.2.1. ДАВЛЕНИЕ ГАЗА. ТЕПЛОВЫЕ СКОРОСТИ МОЛЕКУЛ

*Давление газа* — отношение нормальной составляющей силы, действующей со стороны газа на ограничивающую поверхность, к площади этой поверхности.

В соответствии с молекулярно-кинетической теорией газов в стационарном состоянии ( $T_{\text{газа}} = T_{\text{стенок}}$ ) устанавливается *определённое распределение скоростей* между отдельными молекулами.

Наиболее вероятная скорость движения молекул газа

$$v_z = \sqrt{\frac{2kT}{m}},$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура;  $m$  — масса молекулы.

Средняя арифметическая скорость

$$v_a = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}.$$

Средняя квадратическая скорость

$$v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m}};$$

Соотношение скоростей молекул:

$$v_{н.в} : v_a : v_k = 1 : 1,13 : 1,22.$$

Функция распределения молекул газа по скоростям  $F(v)$  приведена на рис. 1.1.

Определим выражение для давления  $p$  из уравнения Менделеева — Клапейрона для одного моля газа:

$$pV_m = RT,$$

где  $V_m$  — объем одного моля газа;  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Запишем это выражение в виде уравнения газового состояния:

$$p = \frac{R}{V_m} T = \frac{N_A}{V_m} \frac{R}{N_A} T = nkT,$$

где  $N_A$  — число Авогадро;  $n$  — концентрация молекул.

Полное давление смеси газов

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_k = \sum_{i=1}^k p_i,$$

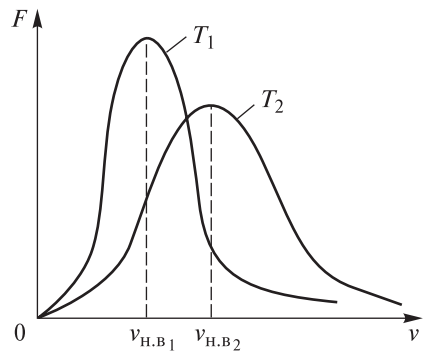
где  $p_i$  — парциальное давление  $i$ -го газа;  $k$  — количество газов в смеси.

### 1.2.2. ОБЪЕМ ГАЗА, УДАРЯЮЩЕГОСЯ О ЕДИНИЦУ ПОВЕРХНОСТИ В ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ

Число соударений молекул в единицу времени о единицу поверхности:

$$N_1 = n \frac{v_a}{4},$$

где  $v_a$  — средняя арифметическая скорость молекулы.



**Рис. 1.1.** Функция распределения молекул газа по скоростям:

$F(v)$  — вероятность того, что молекула имеет абсолютную скорость  $v$ ;  $v_{н.в1}$ ,  $v_{н.в2}$  — наиболее вероятные скорости молекул при температурах  $T_1$  и  $T_2$

Объем газа, ударяющегося о единицу поверхности в единицу времени

$$V_1 = \frac{N_1}{n} = \frac{v_a}{4} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}.$$

При нормальных условиях ( $T = 293 \text{ К}$ ) средняя арифметическая скорость молекул воздуха

$$v_a = 462,5 \text{ м/с};$$

$$V_1 = \frac{462,5}{4} = 116 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = 116 \text{ м/с}.$$

Величина  $V_1$  не зависит от давления  $p$  и определяет максимальную теоретическую быстроту действия идеального вакуумного насоса, откачивающего все молекулы газа, которые попадают в него через входное сечение.

### 1.2.3. ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ

Определим длину свободного пробега молекул газа:

$$\lambda = \frac{v_a}{\nu},$$

где  $\nu$  — число столкновений молекулы с другими частицами.

Пусть все молекулы газа неподвижны, кроме одной (нижней на рис. 1.2), движущейся со средней арифметической скоростью  $v_a$ . Молекула столкнется со всеми молекулами, центры которых находятся в цилиндре диаметром  $\sigma$  и высотой  $v_a$ .

Тогда число столкновений

$$\nu = \pi \sigma^2 v_a n,$$

где  $\sigma$  — диаметр молекулы;  $n$  — концентрация молекул.

Таким образом,

$$\lambda = \frac{1}{\pi \sigma^2 n} = \frac{kT}{p \pi \sigma^2}, \text{ поскольку } n = \frac{p}{kT}.$$

В действительности все молекулы движутся, и рассматриваемая молекула движется с относительной скоростью

$$v_{a \text{ отн.}} = \sqrt{2} v_a.$$

При этом число столкновений:

$$\nu = \sqrt{2} \pi \sigma^2 v_a n \text{ и } \lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2} p \pi \sigma^2}.$$

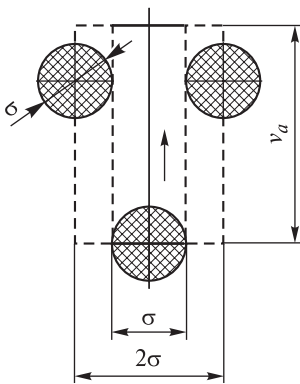


Рис. 1.2. Схема для определения длины свободного пробега молекул

Например, для молекулы воздуха при нормальной температуре  $T = 293 \text{ К}$  и  $\sigma_g = 3,7 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж / К}$ :

$$\lambda = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{\sqrt{2}\pi(3,7 \cdot 10^{-10})^2 p} = \frac{6,51 \cdot 10^{-3}}{p} [\text{м}].$$

### 1.2.4. СТЕПЕНИ ВАКУУМА

Если длина свободного пробега молекул  $\lambda$  становится соизмеримой с размерами сосуда (вакуумной камеры, ЭВП и др.) и молекулы вместо взаимных соударений начинают сталкиваться в основном со стенками сосуда, то резко меняется характер явления переноса (теплопроводности, диффузии, вязкости, движения потоков заряженных частиц — электронов и ионов).

Таким образом, степень вакуума, определяемая значением  $\lambda$ , существенно влияет на процессы, происходящие в вакуумированном объеме.

*Низкий вакуум* характеризуется давлением газа  $p$ , при котором  $\lambda \ll d$ , где  $d$  — характерный размер вакуумного сосуда.

*Средний вакуум* характеризуется давлением газа  $p$ , при котором  $\lambda$  соизмерима с  $d$  ( $\lambda \approx d$ ).

*Высокий вакуум* характеризуется давлением газа  $p$ , при котором  $\lambda \gg d$ .

*Сверхвысокий вакуум* (СВВ) характеризуется давлением газа  $p$ , при котором за время рабочего процесса не происходит заметного изменения свойств поверхности, первоначально свободной от адсорбированного газа.

Таким образом, степень вакуума определяется двумя параметрами: давлением  $p$  (и соответственно длиной свободного пробега  $\lambda$ ) и характерным размером вакуумного сосуда  $d$  (например, диаметром). Учитывая, что наиболее используемыми размерами являются диаметры в диапазоне 16–320 мм, условные границы степеней вакуума приведены ниже.

Критерий степени вакуума	Давление, Па	Вакуум
$pd \geq 1,2 \text{ м} \cdot \text{Па}$ .....	$10^5 - 10^2$ .....	Низкий
$0,004 < pd < 1,2 \text{ м} \cdot \text{Па}$ .....	$10^2 - 10^{-1}$ .....	Средний
$pd \leq 0,004 \text{ м} \cdot \text{Па}$ .....	$10^{-1} - 10^{-4}$ .....	Высокий
$\theta < 1, p < \frac{4 \cdot 10^{-4}}{t_0}$ .....	$p < 10^{-4}$ .....	Сверхвысокий

Условия существования СВВ определяются его взаимодействием с поверхностью материала, и в частности коэффициентом заполнения поверхности  $\theta$ :

$$\theta = \frac{N'_{\text{пов}}}{N'},$$

где  $N'$  — число мест на единице поверхности;  $N'_{\text{пов}}$  — число сорбированных молекул на единице поверхности).

Если за время  $t_0$  проведения рабочего процесса сохранится хотя бы малая доля чистой (ювенильной) поверхности, т. е.  $\theta < 1$ , то граница СВВ определяется давлением

$$p \leq \frac{4 \cdot 10^{-4}}{t_0}.$$

С учетом того, что  $t_0 = 1$  с,  $p < 10^{-4}$  Па.

## Тесты к лекции 2

### 1. Что понимают под вакуумом?

- а) газовая среда с давлением ниже атмосферного;
- б) полное отсутствие воздуха;
- в) пустота.

### 2. Чем определяются скорости молекул в газе?

- а) температурой;
- б) давлением;
- в) типом газа.

### 3. Что характеризует объем газа, ударяющегося о единицу поверхности в единицу времени?

- а) максимальная теоретическая быстрота действия вакуумных насосов;
- б) давление газа;
- в) концентрация газа.