

1.11. ФОРМИРОВАНИЕ АТОМАРНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОТОКОВ

Цель лекции: изучение основных характеристик атомарных и молекулярных потоков, методов формирования таких потоков и физических явлений, позволяющих эти потоки получать.

1.11.1. ФОРМИРОВАНИЕ АТОМАРНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОТОКОВ ИСПАРЕНИЕМ

Основными способами формирования атомарных и молекулярных пучков являются: термическое и дуговое испарение; испарение взрывом; ионное распыление; получение ионных пучков из газовой фазы с последующей нейтрализацией.

Термин «испарение» отражает высокую температуру формирования потока вещества и наличие паровой фазы. С помощью испарения можно формировать потоки атомов и молекул металлов, сплавов, полупроводников и диэлектриков.

Термическое испарение (рис. 1.34) с точки зрения термодинамики описывается уравнением Клаузиуса — Клапейрона:

$$\frac{dp_{\text{нас}}}{dT} = \frac{H_{\text{г}} - H_{\text{ж}}}{T(V_{\text{г}} - V_{\text{ж}})} = \frac{\Delta H}{TV_{\text{г}}}, \quad (1.16)$$

где $p_{\text{нас}}$ — давление насыщенного пара испаряемого материала, Па; T — температура материала, К; H — энтальпия газа (г) и жидкости (ж), ккал/кмоль; V — объем газа (г) и жидкости (ж), м³ ($V_{\text{г}} \gg V_{\text{ж}}$); ΔH — теплота испарения, ккал/кмоль.

Поскольку

$$V_{\text{г}} = \frac{R_0 T}{p}, \quad (1.17)$$

где R_0 — универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); p — давление пара, Па:

$$\frac{dp_{\text{нас}}}{p} = \frac{\Delta H}{T^2 R_0} dT; \quad \lg p_{\text{нас}} = -\frac{\Delta H}{R_0 T} + C; \quad \lg p_{\text{нас}} = A - \frac{B}{T}, \quad (1.18)$$

где C — постоянная интегрирования; A, B — константы (табличные данные).

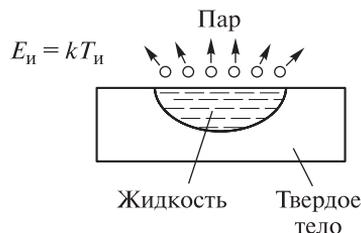


Рис. 1.34. Схема процесса термического испарения

Согласно молекулярно-кинетической теории газов, термическое испарение подчиняется закону Герца — Кнудсена:

$$\frac{dN_{\text{и}}}{dtA} = \frac{p_{\text{нас}}\alpha_{\text{и}}}{\sqrt{2\pi mkT_{\text{и}}}} \left[\frac{\text{атом}}{\text{м}^2\text{с}} \right], \quad (1.19)$$

где $N_{\text{и}}$ — количество испаренных атомов или молекул; t — время, с; A — площадь испарения, м²; $\alpha_{\text{и}}$ — коэффициент испарения (для чистых материалов $\alpha_{\text{и}} = 1$); m — масса испаренного атома или молекулы, кг; $T_{\text{и}}$ — температура испарения, К.

Скорость испарения рассчитывается по следующей формуле:

$$v_{\text{и}} = m \frac{dN_{\text{и}}}{dtA} = m \frac{p_{\text{нас}}\alpha_{\text{и}}}{\sqrt{2\pi mkT_{\text{и}}}} = p_{\text{нас}}\alpha_{\text{и}} \sqrt{\frac{m}{2\pi kT_{\text{и}}}}, \quad (1.20)$$

или

$$v_{\text{и}} = 5,83 \cdot 10^{-3} p_{\text{нас}} \sqrt{\frac{M}{T_{\text{и}}}} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2\text{с}} \right], \quad (1.21)$$

где M — молекулярная масса испаряемого вещества, кг/кмоль.

Испарение сплавов описывается законом Рауля:

$$\frac{p_{\text{насАраств}}}{p_{\text{насА}}} = \frac{x_{\text{А}}}{x_{\text{А}} + (100 - x_{\text{А}}) \frac{M_{\text{А}}}{M_{\text{Б}}}}, \quad (1.22)$$

где $x_{\text{А}}$ — содержание материала А в растворе, массовые %; $M_{\text{А,Б}}$ — молекулярные массы материалов А и Б сплава, кг/кмоль.

Испарение диэлектриков и полупроводников может происходить: без диссоциации (SiO , MgF_2); с диссоциацией (при $T > 1800$ К практически все диссоциируют, а при $T > T_{\text{и}} + (200 \div 400)$ К без диссоциации испаряются MgO , Al_2O_3 , BeO , SiO_2 , ThO_2); с разложением, когда химический состав пара не соответствует испаряемому веществу (Ag_2S , CuJ , WC , CrN , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$).

1.11.2. ФОРМИРОВАНИЕ АТОМАРНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОТОКОВ ИОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ

Ионное распыление материала происходит при взаимодействии («бомбардировке») ускоренных до 0,5...5 кэВ ионов с веществом, находящемся в твердом или жидком состоянии. Сущность метода заключается в механическом выбывании атомов или молекул материала мишени путем передачи им кинетической энергии ускоренных ионов инертного газа (рис. 1.35). Основным показателем эффективности данного процесса является коэффициент распыления

$$S = \frac{N_A z q_e \Delta m}{M J_i t}, \quad (1.23)$$

где N_A — число Авогадро, атом/кмоль; $z q_e$ — заряд иона (z — кратность ионизации), Кл; Δm , M — масса (кг) и молекулярная масса (кг/кмоль) распыляемого вещества; J_i — ионный ток, А; t — время, с.

Скорость ионного распыления рассчитывается по следующим формулам ($z = 1$):

$$v_p = S \frac{j_i M}{q_e N_A} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}} \right]$$

или

$$v_p = S \frac{j_i M 10^9}{q_e N_A \rho} \left[\frac{\text{нм}}{\text{с}} \right], \quad (1.24)$$

где j_i — плотность ионного тока, А/м²; ρ — плотность распыляемого материала, кг/м³.

Поток атомов или молекул, сформированный из газовой фазы, характеризуется небольшой энергией ($E_r = k T_r = 0,1 \dots 0,2$ эВ, где T_r — температура газа, К) и гибким регулированием интенсивности N_r или v_r путем изменения давления газа p_r в широком диапазоне — $10^{-5} \dots 10^5$ Па:

$$N_r = \frac{p_r}{\sqrt{2 \pi m_r k T_r}} \left[\frac{\text{атом}}{\text{м}^2 \text{с}} \right]; \quad v_r = 5,83 \cdot 10^{-3} p_r \sqrt{\frac{M}{T_r}} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}} \right]. \quad (1.25)$$

Тесты к лекции 11

1. Что описывает уравнение Клаузиуса — Клапейрона?

а) Термодинамический процесс перехода вещества из одного агрегатного состояния в другое.

б) Взаимосвязь давления в камере и давления насыщенного пара испаряемого вещества.

в) Зависимость скорости испарения от термодинамических условий системы.

2. Что описывает закон Герца — Кнудсена?

а) Количество испаренных атомов или молекул, испаренных с единицы поверхности в единицу времени.

б) Взаимосвязь давления насыщенных паров испаряемого вещества и температуры его испарения.

в) Взаимосвязь массы испаренного вещества и температуры его испарения.

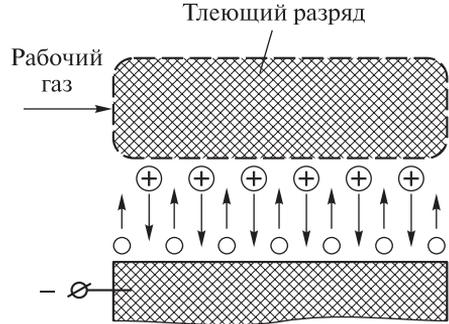


Рис. 1.35. Схема процесса ионного распыления

3. От каких параметров зависит скорость испарения?

- а) От молекулярной массы испаряемого вещества и давления насыщенных паров при температуре его испарения.
- б) От скорости разогрева испаряемого вещества.
- в) От мощности источника питания, используемого для разогрева испаряемого вещества.

4. От каких параметров зависит скорость ионного распыления?

- а) От коэффициента распыления, молекулярной массы и плотности распыляемого вещества.
- б) От концентрации ионов рабочего газа.
- в) От мощности источника распыления.