

## 1.13. ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД В ВАКУУМЕ

**Цель лекции:** изучение газоразрядной плазмы в вакууме, ее назначения, параметров и способов получения.

### 1.13.1. ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ

Газовым разрядом называется протекание тока в ионизированном газе. При приложении к электродам в вакууме напряжения, превышающего определенное значение, возникает пробой и зажигается тлеющий разряд, который часто называют газоразрядной плазмой. При определенных условиях тлеющий разряд может перейти в дуговой.

Газоразрядная плазма является источником заряженных частиц — электронов и ионов, в связи с чем комплексно воздействует на поверхность материалов.

С помощью газоразрядной плазмы можно осаждать металлические и диэлектрические пленки, стимулировать осаждение из газовой фазы диэлектрических пленок, пленок переходных металлов и их силицидов, вытравливать материал через резистивную маску после операций микролитографии, а также формировать ионные и электронные пучки большой интенсивности. Плазменная обработка, заменившая жидкостное травление, получила название «сухое травление».

Плазменная обработка осуществляется при давлении ниже атмосферного и поэтому совместима с другими вакуумными процессами — электронно- и ионно-лучевыми, лазерными, рентгеновскими и другими операциями. Формирование микротопологии или микрорельефа на обрабатываемых изделиях осуществляется повторением цикла, включающего три группы операций: 1) получение, обработка и легирование тонких пленок и слоев; 2) микролитография (фото-, электроно-, ионо- и рентгенолитография); 3) травление топологического рисунка или микрорельефа. Благодаря использованию сухого травления геометрические размеры рисунка могут быть получены с погрешностью менее 0,1 мкм. Для определения момента окончания травления, контроля за химическими и физическими процессами в плазме, измерения скорости осаждения пленок и других параметров применяются различные методы диагностики плазмы.

## 1.13.2. ПАРАМЕТРЫ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ

Газоразрядная плазма (рис. 1.34), состоящая из электронов, ионов и электрически нейтральных атомов, молекул и радикалов, генерирующая различные виды излучений, также может служить инструментом для обработки материалов.

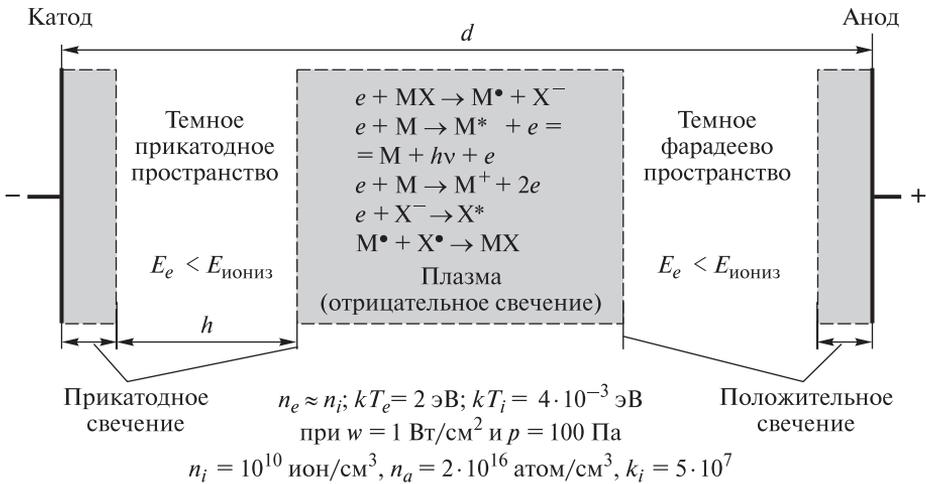


Рис. 1.40. Низкотемпературная газоразрядная плазма:

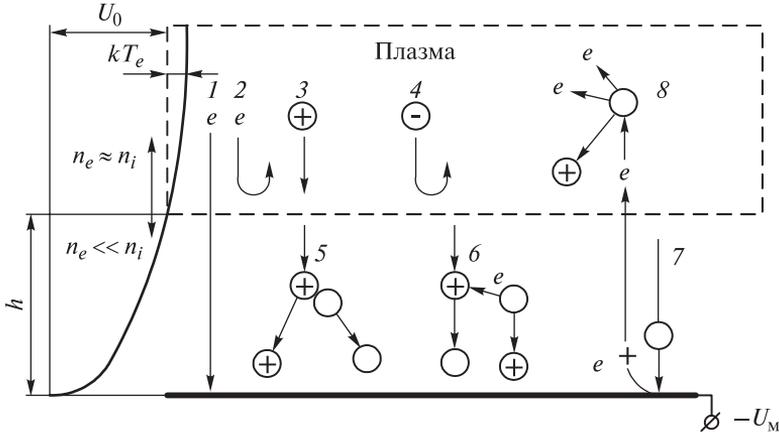
$\text{MX}$  — молекула;  $\text{M}$ ,  $\text{X}$  — атомы;  $\text{M}^*$  — возбужденный атом;  $\text{M}^+$  — положительный ион;  $\text{X}^-$  — отрицательный ион;  $\text{M}^\bullet$ ,  $\text{X}^\bullet$  — радикалы;  $h\nu$  — фотон (квант излучения);  $e$  — электрон

Параметрами газоразрядной плазмы являются: состав и концентрация частиц, температура электронов и ионов, плазменное давление и др. В плазменных технологиях в качестве рабочего газа для обработки материалов чаще других используются  $\text{Ar}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CF}_4$ ,  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{SiH}_4$ , различные углеводородные соединения  $\text{C}_x\text{H}_y$  при давлении от 0,65 до 250 Па; концентрация ионов в плазме составляет порядка  $10^{10}$  ион/см<sup>3</sup>, а электронов —  $10^8 \dots 10^{10}$  эл/см<sup>3</sup>; энергия электронов может составлять 1,2...30 эВ, частота ВЧ-плазмы может изменяться в диапазоне 3,5...27 МГц.

Различные виды плазменной обработки материалов зависят от энергетических характеристик плазмы и доминирующего влияния одного из эффектов в пространстве между областью газового разряда и электродами (рис. 1.41).

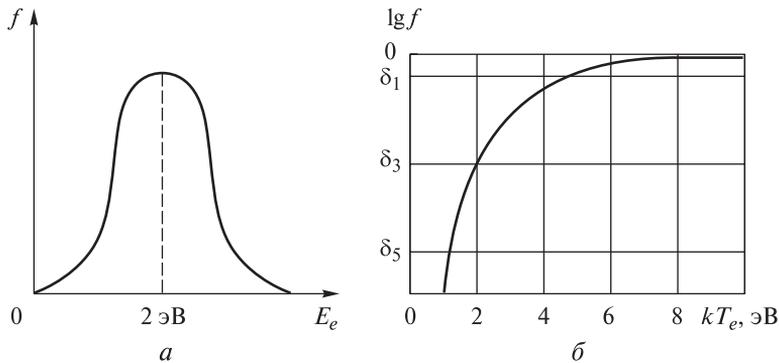
Важным параметром плазмы является энергия  $E_e$  (температура  $kT_e$ ) электронов (рис. 1.42), которая имеет нормальное распределение (рис. 1.42, а) и от которой зависит вероятность образования ионов, т. е. коэффициент ионизации (рис. 1.42, б).

Длина свободного пробега электрона в плазме  $\lambda = \frac{1}{(S_e N)}$ , где  $S_e$  — сечение столкновения электрона с атомами плазмообразующего газа, м<sup>2</sup> (для  $\text{Ar}$



**Рис. 1.41.** Явления в газоразрядной плазме и ее энергетические характеристики:

1 — уход быстрого электрона; 2 — отражение медленного электрона; 3 — инжекция иона; 4 — отражение отрицательного иона; 5 — рассеяние на нейтральной частице; 6 — обмен заряда иона с нейтральной частицей; 7 — эмиссия вторичного электрона; 8 — ионизация электронным ударом;  $U_0$  — прикатодный потенциал;  $h$  — толщина прикатодной области — темного катодного пространства;  $n_e$ ,  $n_i$  — концентрация соответственно электронов и ионов;  $kT_e$  — энергия электрона;  $U_m$  — потенциал мишени



**Рис. 1.42.** Распределение электронов в газоразрядной плазме по энергиям (а) и вероятность ионизации атомов аргона (б)

при  $E_e = 2$  эВ  $S_e = 3 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>);  $N$  — концентрация атомов или молекул газа (м<sup>-3</sup>),  $N = \frac{p}{(kT)} = 2,5 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>3</sup> (при давлении аргона  $p = 100$  Па и температуре стенок вакуумной камеры  $T = 293$  К). При этих параметрах плазмы  $\lambda = 0,13$  см.

Средняя скорость электронов в плазме

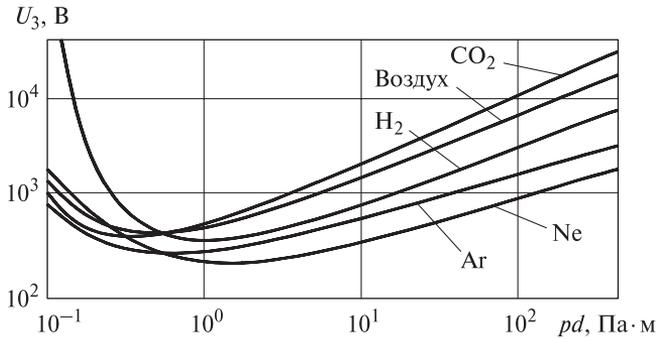
$$v_e = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e B}}, \quad (1.37)$$

где  $m_e$  — масса электрона при скорости  $v_e$ ;  $B$  — коэффициент,

$B = 6,24 \cdot 10^{11} \left[ \frac{\text{эВ} \cdot \text{с}^2}{\text{г} \cdot \text{см}^2} \right]$  (при  $E_e = kT_e = 2 \text{ эВ}$ ;  $v_e = 108 \text{ см/с} = 1000 \text{ км/с}$ ). Частота столкновений электронов с молекулами газа в плазме  $\nu = v_e S_e N$  и составляет  $7,5 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$  или 750 МГц и приведенных выше параметрах плазмы.

### 1.13.3. КРИВЫЕ ПАШЕНА

Напряжение зажигания самостоятельного тлеющего газового разряда  $U_3$  зависит от рода газа и произведения давления  $p$  и расстояния между электродами  $d$ . Эта зависимость иллюстрируется кривыми Пашена (рис. 1.43).



**Рис. 1.43.** Зависимость потенциала зажигания газового разряда  $U_3$  от произведения  $pd$  для различных газов (кривые Пашена)

Поток ионов в катодное пространство приблизительно равен:

$$Q_i \approx n_i \sqrt{\frac{kT_i}{M_i}}, \quad [\text{ион}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})], \quad (1.38)$$

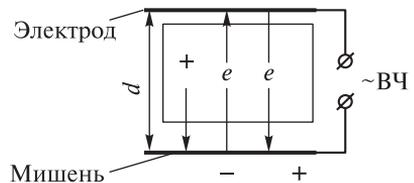
где  $kT_i$ ,  $M_i$  — энергия, Дж, и молекулярная масса иона, кг/кмоль.

Плотность ионного тока

$$j_i = Q_i q_e \left[ \frac{\text{А}}{\text{м}^2} \right]. \quad (1.39)$$

Высокочастотная плазма формируется исходя из условия, что значение пробега электронов равно расстоянию между электродами  $d$  (рис. 1.44), а пробег значительно более тяжелых ионов намного меньше.

Необходимую частоту изменения полярности на электродах рассчитывают из неравенства  $f > \frac{1}{t_e}$ , где время пробега



**Рис. 1.44.** Схема высокочастотной плазмы

электронов  $t_e = d / v_e$  (при  $v_e = 10^6$  м/с и  $d = 0,1$  м,  $t_e = 10^{-7}$  с, а  $f > 10^7$  Гц). Наиболее распространена стандартная частота 13,56 МГц, при которой время пробега ионов  $t_i$  расстояния  $d$  составляет  $t_i = d / v_i$  (при  $v_i \approx 500$  м/с,  $t_i = 2 \cdot 10^{-4}$  с), а пробег ионов за время  $t_i$   $d_i = \frac{v_i}{f}$  ( $d_i = 3,7 \cdot 10^{-5}$  м, или 37 мкм).

### Тесты к лекции 13

#### 1. Под газовым разрядом понимают:

- а) протекание тока в ионизированном газе;
- б) пробой разрядного промежутка;
- в) свечение в разрядном промежутке.

#### 2. Тлеющий разряд характеризуется:

- а) относительно высоким напряжением и низким током;
- б) относительно низким напряжением и высоким током;
- в) наличием процесса испарения катода.

#### 3. Кривые Пащенко описывают:

- а) зависимость потенциала зажигания газового разряда от произведения давления в разрядном промежутке и расстояния между электродами;
- б) зависимость потенциала зажигания газового разряда от давления в разрядном промежутке;
- в) зависимость потенциала зажигания газового разряда от расстояния между электродами.