

## 1.10. ФОРМИРОВАНИЕ ИОННЫХ ПОТОКОВ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С МАТЕРИАЛАМИ

**Цель лекции:** изучение основных характеристик ионных пучков, методов их формирования и физических явлений, возникающих при взаимодействии пучков различных энергий с материалами.

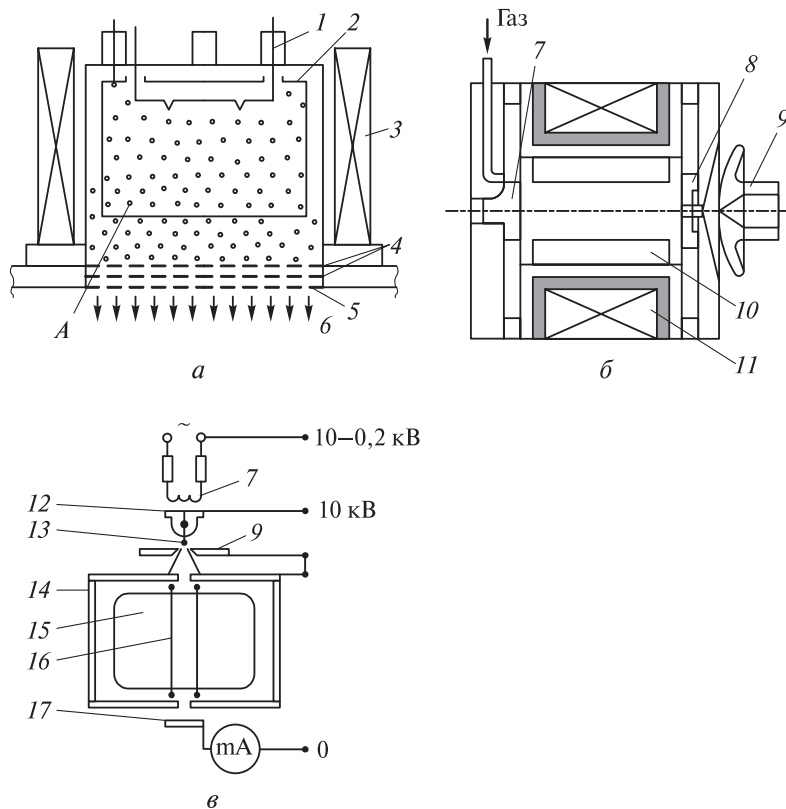
### 1.10.1. ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ

Формирование пучков ионов осуществляется с помощью источников ионов, которые состоят из разрядной (ионизационной) камеры, источника электронов (нагреваемого термокатода, холодного или полого катода), анода, магнитной системы (для повышения эффективности ионизации), экстрагирующего электрода и электрода первичной фокусировки, системы подачи рабочего газа или пара. Ионные источники должны генерировать однородные высокоинтенсивные пучки со стабильными во времени параметрами и многозарядные ионные пучки, обеспечивать предельную плотность ионного тока при максимально низких экстрагирующих напряжениях, ионизировать газообразные ( $\text{Ar}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{BF}_3$ ,  $\text{PCl}_3$ ,  $\text{AsF}_3$ ,  $\text{AlCl}_3$  и т. п.) и твердые ( $\text{B}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Sb}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Tl}$  и т. п.) вещества, формировать ионный пучок заданного сечения, быть простыми в управлении и обладать большим временем наработки на отказ катода и всего источника.

Поскольку обеспечить в одном источнике все перечисленные требования невозможно, применяют различные типы источников, основными из которых являются автономные источники ионов с горячим, холодным или полым катодом, дуоплазмотроны, источники с ВЧ- и СВЧ-возбуждением, источники с поверхностной ионизацией и др.

В источниках ионов с горячим катодом, также называемых источниками Кауфмана (рис. 1.31, *а*), в качестве источника электронов используются катоды прямого накала или с косвенным подогревом. Эти источники бывают с экстракцией ионов вдоль оси разрядной камеры и коническим пучком (аксиальная экстракция) или перпендикулярно оси разрядной камеры через отверстие прямоугольной формы и пучком ионов в виде узкой ленты (радиальная экстракция). Основным достоинством таких источников является возможность получения высокоинтенсивных пучков ионов, а главным недостатком — быстрое разрушение термокатода при использовании химически активных рабочих газов.

Автономные источники ионов с холодным катодом и разрядом Пеннинга (рис. 1.31, *б*) содержат цилиндрический кольцевой анод, размещенный между



**Рис. 1.31.** Типы ионных источников:

*а* — источник Кауфмана; *б* — автономный источник ионов; *в* — жидкометаллический источник; 1 — термокатод; 2 — анод; 3 — магнит; 4 — ионно-оптические сетки; 5 — ускоряющая сетка; 6 — ионный пучок; *А* — область плазмы разряда; 7 — катод; 8 — антикатод; 9 — экстрактор; 10 — цилиндрический кольцевой анод; 11 — соленоид; 12 — контейнер; 13 — игла; 14 — магнитопровод; 15 — плоский магнит; 16 — отклоняющая пластина; 17 — коллектор

параллельно расположенными катодом и антикатодом. Ионы вытягиваются из плазмы самостоятельного газового разряда через отверстие в антикатоде и ускоряются системой экстракции. Благодаря наличию соленоида источник обладает высокой эффективностью ионизации (до  $10^{14}$  ион/см<sup>3</sup>), срок службы катода превышает 1000 ч. Недостатком такой конструкции является малый ток пучка ионов (до 100 мкА), большая пульсация тока и возможность использования только газообразных рабочих веществ.

Типовой жидкометаллический источник ионов (рис. 1.31, *в*) состоит из двух электродов: острия-анода и заземленного экстрактора, между которыми приложено напряжение порядка 4...10 кВ. Острие выполнено в виде тонкой вольфрамовой трубки с капиллярным отверстием диаметром 50 мкм, через которое поступает жидкий металл. При давлении внутри иглы порядка 1 МПа

и наличии электрического поля высокой напряженности (порядка  $10^{10}$  В/м) на конце капилляра образуется выступ жидкого металла в виде конуса, с вершины которого эмитируется расходящийся пучок положительных ионов.

### 1.10.2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОННЫХ ПУЧКОВ С МАТЕРИАЛАМИ

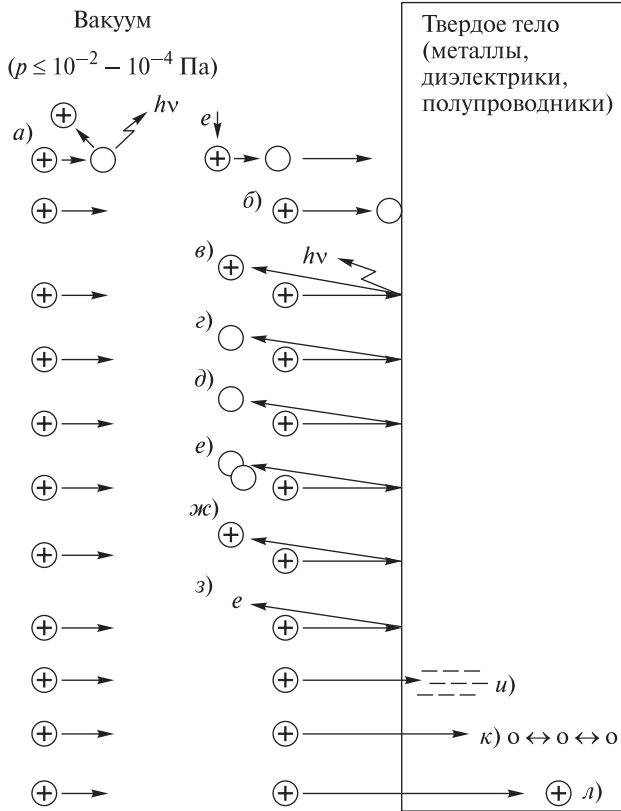
В зависимости от материала, формы, энергии и удельной мощности ионного пучка при взаимодействии его с веществом происходят процессы направленного изменения геометрических размеров и свойств твердого тела, а также их контроля. Ионный пучок может быть сформирован как из положительных, так и отрицательных ионов, однако наиболее часто используют ионы, несущие положительный заряд, вследствие большей простоты их получения и управления параметрами пучка. В качестве материала ионного пучка могут быть использованы атомы практически всех элементов таблицы Менделеева, включая ионы молекул, что при возможности варьирования величиной заряда делает ионные пучки потенциально более гибким средством воздействия на обрабатываемый или исследуемый объект по сравнению с электронными пучками.

Основные эффекты, возникающие при взаимодействии ускоренных до энергий от 100 эВ до 10 МэВ ионов с веществом и наиболее часто используемые в ионных и плазменных технологиях, иллюстрирует следующая схема (рис. 1.32).

**Ионизация газа** (рис. 1.32, а). Двигаясь в вакууме к облучаемому образцу, ионы могут сталкиваться с атомами и молекулами остаточных или рабочих газов и паров. Как и в случае с электронными пучками, может происходить рассеяние и потеря энергии первичных частиц, однако кроме ионизации попавшегося на пути атома и испускания при этом фотона возможно явление перезарядки ионного пучка. Оно сводится к тому, что движущийся ион захватывает электрон у атома, с которым он столкнулся, и продолжает движение практически с той же скоростью, но уже в нейтральном состоянии. Эффект перезарядки ионного пучка можно осуществить и с помощью направленного на него потока электронов, которые нейтрализуют заряд и тем самым создают пучок ускоренных атомов, которые используются, например, для обработки диэлектриков.

**Осаждение на поверхность** (рис. 1.32, б). Ударяющиеся о поверхность образца ионы могут оказаться связанными с ней за счет адсорбции или хемосорбции, что может быть использовано для получения тонкопленочных слоев. Вероятность того, что ударившийся о поверхность ион останется на ней, рассчитывается с помощью коэффициента аккомодации  $\alpha = (E_i - E_d') / (E_i - E_d'') \leq 1$ , где  $E_i$  — кинетическая энергия иона;  $E_d'$  — энергия десорбированного атома до наступления термодинамического равновесия с подложкой;  $E_d''$  — энергия десорбированного атома после установления термодинамического равновесия с подложкой.

**Отражение ионов** (рис. 1.32, в). При столкновении с поверхностью твердого тела ионный пучок может рассеиваться атомами или группой атомов



**Рис. 1.32.** Эффекты взаимодействия ускоренных ионов с веществом:

*a* — ионизация газа; *б* — осаждение на поверхность; *в* — отражение иона; *г* — десорбция атома или молекулы; *д* — физическое распыление; *е* — химическое распыление; *ж* — вторичная ионная эмиссия; *з* — эмиссия электронов; *и* — нагрев; *к* — химические реакции; *л* — ионная имплантация

облучаемого образца, при этом происходит отклонение траектории ионов от первоначального направления и обмен энергией между ними и атомами мишени. В зависимости от материала взаимодействующих частиц и энергии ионного пучка обмен энергиями может быть упругим (с ядрами) и неупругим (с электронами). При неупругих соударениях энергия может выделяться в виде квантов излучения — свечения (ионолюминесценция), характеристического или тормозного рентгеновского излучения. Эти эффекты используются в ионной микро- и спектроскопии. Если импульс иона достаточно велик, то он может сместить поверхностный атом из положения, где он слабо связан с кристаллической структурой образца, в положение, где связь оказывается сильнее (атомная дислокация). Ионы с более высокими энергиями могут вызывать внутренние дислокации в толще образца.

**Десорбция молекул или атомов** (рис. 1.32, *з*). Упруго отраженные ионы могут вызывать десорбцию слабо связанных с поверхностью атомов и молекул газов и паров, а также различных видов загрязнений. Этот эффект широко используется для очистки поверхностей деталей перед многими операциями, особенно перед процессами эпитаксии и осаждения тонких пленок.

**Физическое распыление** (рис. 1.32, *д*). Если бомбардирующие поверхность образца ионы передают настолько большой импульс, что полностью освобождает от связей один или несколько атомов, то происходит физическое распыление. Это явление наиболее эффективно проявляется при энергиях иона 0,5...5 кэВ, а показателем эффективности является коэффициент распыления  $S = N_a / N_i$ , где  $N_a$  — число распыленных атомов;  $N_i$  — число падающих на поверхность мишени ионов.

Коэффициент распыления зависит от максимальной энергии  $E_{max}$ , передаваемой атому материала падающим на поверхность мишени ионом (с энергией  $E_i$ ), коэффициента  $\alpha$ , энергии межатомных связей распыляемого материала  $U_0$  и рассчитывается по следующей формуле:

$$S(E) = \frac{3}{4\pi^2} \alpha \frac{E_{max}}{U_0}. \tag{1.13}$$

Отношение масс распыленных атомов и падающих ионов  $M_2 / M_1$  влияет на коэффициент  $\alpha$ , а  $U_0 \approx 4$ , где  $H_{субл}$  — энергия сублимации распыляемого материала.

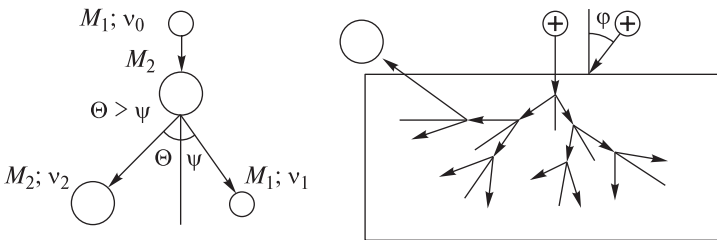
Соотношение между  $M_2 / M_1$  и  $\alpha$ :

$M_2 / M_1$ .....	0,01 .....	1,0 .....	10,0
$\alpha$ .....	0,17 .....	0,23 .....	5,0

Коэффициент распыления  $S$  зависит также от угла падения иона  $\phi$ :

$$S(\phi) = \frac{S(0)}{\cos \phi}, \tag{1.14}$$

где  $S(0)$  — коэффициент распыления при падении иона перпендикулярно поверхности мишени, т. е. при  $\phi = 0$ . Увеличение коэффициента распыления при отклонении направления падения иона от перпендикуляра к поверхности объясняется гипотезой о парных упругих столкновениях (рис. 1.33).



**Рис. 1.33.** Эффект парных соударений

В соответствии с этой гипотезой при столкновении ускоренного иона с молекулярной массой  $M_1$  с атомом материала мишени с молекулярной массой  $M_2$  угол отклонения иона  $\Psi$  меньше угла отклонения атома  $\Theta$ :

$$\Theta = \frac{1}{2} \left( \pi - \Psi - \arcsin \frac{\sin \Psi}{\mu} \right);$$

$$\cos \Psi = \frac{1}{2} \left[ (1 - \mu) \frac{v_0}{v_1} + (1 + \mu) \frac{v_1}{v_0} \right]; \quad \mu = \frac{M_2}{M_1}, \quad (1.15)$$

где  $v_1, v_2$  — соответственно скорости иона и атома материала мишени.

Таким образом, при  $M_1 < M_2$  вероятность «выхода» иона больше, так как увеличиваются углы  $\Theta$  и  $\Psi$ ; при  $M_1 > M_2$  — вероятность «выхода» иона меньше, так как движение атомов зарождается на большей глубине. При этом атомы или группы атомов в приповерхностном слое толщиной порядка 1 нм движутся в направлении границы «твердое тело—вакуум» и выходят из мишени. Вылетающие атомы или кластеры (группы атомов) могут находиться в нейтральном, заряженном или возбужденном состоянии.

Явление ионного распыления широко используется для строго дозированного удаления вещества с определенных участков обрабатываемого изделия (ионное фрезерование), нанесения тонких пленок в вакууме из большой номенклатуры материалов, анализа распыленных частиц по массам.

**Химическое распыление** (рис. 1.32, *e*). Пучок химически активных ионов на основе  $H^+$ ,  $O^+$ ,  $N^+$ ,  $Cl^+$ ,  $F^+$  и других элементов может вступать в химическую реакцию с атомами облучаемого образца и образовывать на его поверхности новые химические соединения, в том числе и газообразные. Этот эффект называется химическим ионным распылением и широко используется в операциях ионно-химического травления материалов и ионно-химического осаждения тонких пленок.

**Вторичная ионная эмиссия** (рис. 1.32, *ж*). Если при ионном распылении поверхностные атомы возбуждаются до ионизированных состояний и покидают образец, то имеет место вторичная ионная эмиссия. Сила тока вторичных ионов моноизотопа распыленного вещества  $J_{i2} = \eta k C S$ , где  $\eta$  — чувствительность датчика;  $k$  — коэффициент ионизации ( $10^{-5} \dots 10^{-1}$ );  $C$  — концентрация  $i$ -го элемента в мишени;  $S$  — коэффициент распыления  $i$ -го элемента (0,1...10). Этот эффект лежит в основе принципа действия анализатора химического состава вещества.

**Вторичная электронная эмиссия** (рис. 1.32, *з*). При ионной бомбардировке металлических поверхностей возникает вторичная электронная эмиссия, которая является естественным средством поддержания самостоятельного газового разряда. Кроме того, это явление используется в ионной микроскопии и спектроскопии.

**Нагрев** (рис. 1.32, *и*). Если энергия, переданная пучком ионов атомам мишени, недостаточна для их распыления, то атомы начинают колебаться около положения равновесия, растрачивая энергию на нагрев окружающей их

среды, что приводит к нагреву мишени. При достаточной мощности, выделяемой на единицу поверхности мишени, возникают процессы (плавление и испарение вещества мишени, термоэмиссия электронов, термоизлучение и т. п.), которые не отличаются от происходящих при облучении мишени электронами. Примером термической обработки с помощью ионных пучков может служить протонный отжиг полупроводниковых материалов. Однако они, как правило, не выдерживают конкуренции с нагревом электронными пучками, получение которых значительно проще.

**Химические реакции** (рис. 1.32, *к*). Ионные пучки, подобно электронным, могут изменять химический состав вещества, в который они проникают. Если в качестве материала использовать ионорезист, а ионный пучок сфокусировать в пятно малого диаметра, то можно получить изображение с размерами в доли микрометра.

**Ионная имплантация** (рис. 1.32, *л*). При энергии ионов более 30 кэВ они могут проникать вглубь образца. На этом явлении основан процесс, который называется ионной имплантацией, или ионным легированием. Независимо от материала мишени в нее можно внедрить атомы практически любых элементов таблицы Менделеева, что широко используется для изменения механических, электрических, химических, оптических, эмиссионных и других свойств вещества.

Поскольку имплантация ионов — процесс термодинамически неравновесный, то можно создавать соединения, которые принципиально невозможно получить диффузией или металлургическим путем, а также достигнуть концентрации имплантированного материала, существенно превышающей предел растворимости данной примеси в материале мишени.

Этот эффект используется в микроэлектронике для получения *p-n*-переходов в полупроводниковых материалах, в машиностроении — для легирования сталей, в других областях — для определения в широких пределах свойств материалов.

## Тесты к лекции 10

### 1. Что определяет коэффициент аккомодации?

- вероятность того, что ион материала останется на поверхности твердого тела после взаимодействия с ней;
- отношение энергий иона до и после взаимодействия с поверхностью твердого тела;
- часть энергии, переданной твердому телу при взаимодействии с ним.

### 2. От чего зависит коэффициент распыления?

- от угла падения иона на поверхность твердого тела;
- от величины остаточного давления в рабочей камере;
- от концентрации ионов.

**3. В чем заключается физический смысл эффекта парных соударений?**

а) взаимодействие падающего иона и покинувшего твердое тело атома осуществляется через цепочку последовательных соударений атомов в твердом теле;

б) покидание атома кристаллической решетки твердого тела происходит после двукратного (парного) соударения с ионами;

в) выход атома из твердого тела осуществляется после двух соударений с соседними атомами кристаллической решетки.