

1.9. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ С МАТЕРИАЛАМИ

Цель лекции: изучение различных эффектов, возникающих при взаимодействии электронных потоков с материалами.

1.9.1. ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ С МАТЕРИАЛОМ

Поверхность твердого тела отличается от объемного материала по геометрическому расположению атомов, структуре электронных связей, химическим соединениям и т. п. Все поверхности, соприкасающиеся с атмосферой, покрыты слоями адсорбированных атомов и молекул. Так, если при давлении 10^{-4} Па получить ювенильно чистую поверхность, то примерно через 1 с она оказывается покрытой монослоем (приблизительно 10^{15} атом/см²) адсорбированных газов. Для удержания поверхности на атомарно чистом уровне при проведении, например, молекулярно-лучевой эпитаксии, необходим сверхвысокий вакуум с давлением не выше 10^{-8} Па.

Эффекты, возникающие при взаимодействии электронного пучка с веществом (рис. 1.29), реализуются как дискретные события, сопровождающиеся ионизацией и возбуждением остаточных газов и паров, появлением вторичных электронов, возбуждением колебаний плотности плазмы, ионизацией на внутренних электронных оболочках, вызывающих рентгеновское излучение и эмиссию оже-электронов и атомных частиц, рождением электронно-дырочных пар с последующим световым излучением, переходным излучением и возбуждением упругих колебаний кристаллической решетки — возбуждением фононов, образованием дислокаций и радиационных дефектов, нагревом и химическими реакциями и другими явлениями.

При столкновении ускоренных электронов с атомами или молекулами остаточных или рабочих газов и паров происходит их ионизация (образование и поддержание газоразрядной плазмы) и испускание фотонов (свечение плазмы). Метод получения плазмы «электронным ударом» используется во многих источниках ионов и плазменных установках.

В зависимости от параметров пучка электронов и свойств материала мишени (обрабатываемой детали) возможны упругое и неупругое отражения электронов от поверхности твердого тела, что позволяет наблюдать за поверхностью с помощью электронного микроскопа, получать новые электронные пучки, анализировать химический состав материала мишени и др. Электронные пучки могут вызывать и эмиссию атомов и молекул с облучаемой

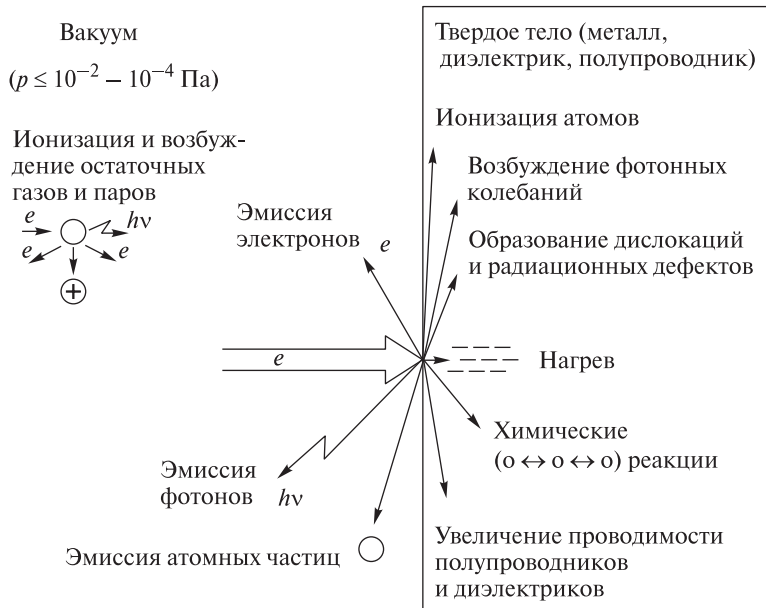


Рис. 1.29. Эффекты взаимодействия электронных пучков с материалом

поверхности за счет испарения или сублимации вещества, термо- и электроностимулированной десорбции адсорбированных газов, разложения химических соединений и т. п.

Эффекты, возникающие при проникновении электронного пучка в вещество на глубину x , определяются характером и величиной потерь энергии электронов E_e в твердом теле:

$$\frac{dE_e}{dx} = \left(\frac{N_A q_e^4}{2\pi\epsilon_0^2} \right) \left(\frac{Z\rho}{M} \right) \left(\frac{1}{E_e} \ln \frac{1,66E_e}{J} \right), \quad (1.4)$$

где N_A — число Авогадро, атом/кмоль; q_e — заряд электрона, Кл; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м; Z — атомный номер; ρ — плотность вещества, кг/м³; M — молекулярная масса, кг/кмоль; $j = 13,5Z$ — потенциал ионизации, эВ.

В зависимости от энергии электрона возникают следующие процессы:

упругие столкновения с атомами вещества (энергия и направление движения мало изменяются), когда скорость электрона $v_e > v_{орб}$, где $v_{орб}$ — орбитальная скорость электронов атома, равная $2,2 \cdot 10^6$ м/с, а средняя энергия E , передаваемая электроном атому с массой m_a , составляет:

$$E = E_e \frac{4m_e m_a}{(m_e + m_a)^2} \sin^2 \frac{\Theta}{2}, \quad (1.5)$$

где Θ — угол рассеяния электрона ($\approx 1^\circ$), при этом

$$E / E_e \approx 10^{-9} - 10^{-10};$$

неупругие столкновения (изотропное или диффузное рассеяние), когда $v_e < v_{орб}$ и потеря энергии происходит дискретно на межатомном расстоянии 0,3...0,4 нм, что вызывает возбуждение, ионизацию, диссоциацию, ассоциацию атомов и молекул вещества, колебания кристаллической решетки и т. п.

Согласно модели Арчарда (рис. 1.30), траекторный пробег электронов R_s (сумма пробегов электрона от атома к атому (рис. 1.30, а))

$$R_s \approx \frac{32\epsilon_0 E_e^2}{Nq_e^4 Z}, \quad (1.6)$$

где N — плотность атомов ($\approx 10^{28} \dots 10^{29} \text{ м}^{-3}$), а проекция пробега R на ось x составляет

$$R \approx \frac{E_e^2}{\rho b}, \quad (1.7)$$

где b — константа торможения, равная $\approx 5 \cdot 10^5 \text{ кэВ} \cdot \text{см}^2/\text{г}$; E_e , кэВ; ρ , г/см³.

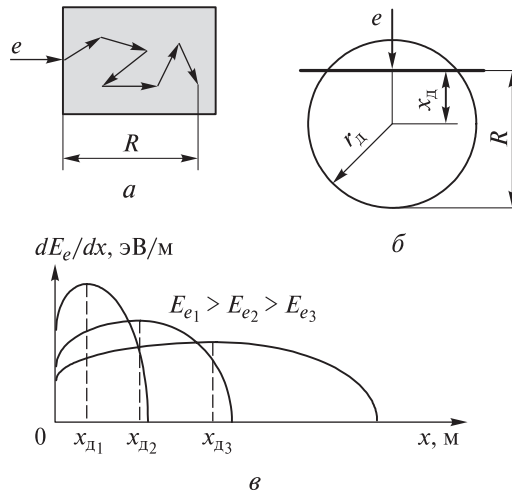


Рис. 1.30. Модель Арчарда

Таким образом, модель Арчарда позволяет рассчитать глубину проникновения электрона x_d , на которой выделяется максимум энергии, а также радиус r_d диффузного рассеяния энергии электронов (рис. 1.30, б, в):

$$x_d \approx \frac{12R}{(Z+8)}; \quad r_d \approx R - x_d = \frac{R(Z-4)}{(Z+8)}. \quad (1.8)$$

На рис. 1.30, в видно, что с увеличением энергии электронов E_e увеличивается x_d и уменьшается максимум выделения энергии dE_e/dx .

Физические эффекты в объеме твердого тела, возникающие в результате проникновения электронного пучка вглубь материала, подразделяют на нетермические и термические. К первым относятся ионизация атомов мишени, возбуждение фоновых колебаний, образование дислокаций и радиационных дефектов, активация химических реакций и увеличение проводимости полупроводников и диэлектриков; ко вторым — плавка, испарение, сварка и размерная обработка (прошивка отверстий, пазов, профилирование и т. п.).

Из нетермических эффектов наибольшее применение нашло изменение структуры и свойств материала электронорезиста при облучении его остросфокусированным электронным пучком с энергией 20...30 кэВ. В электронно-лучевой литографии в качестве резиста используются органические материалы, которые при взаимодействии с ускоренными электронами либо полимеризуются (образуются более крупные молекулы), либо в них происходит деструкция материала (распад на более мелкие молекулы).

Нагрев вещества при облучении его электронами имеет несколько особенностей: так, максимум поглощенной энергии находится в объеме твердого тела (см. рис. 1.30, *в*), а не на поверхности, как, например, при лазерной обработке; с помощью термического воздействия электронов можно вызывать в веществе структурные фазовые переходы, отжиг дефектов, диффузию примесей, рекристаллизацию, плавление материала, десорбцию и испарение с поверхности атомных частиц.

Тепловое воздействие электронного луча с энергией E_0 на твердое тело характеризуется распределением температуры по его поверхности во времени:

$$T(r, t) = \frac{E_0}{\rho c (4\pi\sigma_T t)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(\frac{-r^2}{4\sigma_T t}\right), \quad (1.9)$$

где r — расстояние от центра луча до рассматриваемой точки; $\sigma_T = \frac{\lambda_T}{\rho c}$ — температуропроводность материала; λ_T — теплопроводность; ρ — плотность материала; c — теплоемкость.

Установившаяся температура

$$T(r) \approx \frac{r_0^2}{2r} \frac{P_e}{\lambda_T}, \quad (1.10)$$

где r_0 — радиус электронного луча; P_e — удельная мощность электронного луча.

Изменение температуры поверхности при воздействии электронного луча

$$\Delta T = \frac{3}{2} \frac{E_0 I_e}{\pi q_e \lambda_T R}, \quad (1.11)$$

где I_e — ток пучка; q_e — заряд электрона.

Скорость испарения материала

$$v_{\text{и}} = 5,38 \cdot 10^{-3} p_s \sqrt{\frac{M}{T}}, \quad (1.12)$$

где p_s — упругость пара материала при температуре T ; M — молекулярная масса испаряемого материала.

1.9.2. ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

Параметры электронных пучков можно регулировать в широком диапазоне значений для проведения различных видов обработки изделий (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Параметры электронных пучков

Вид электронно-лучевой обработки	Энергия электронов E_e , кэВ	Диаметр пучка $d_{\text{п}}$, мм	Удельная мощность P_e , Вт/см ²
Нетермическое воздействие	20–250	10^{-5} – 10^{-2}	10^{-2} – 10^5
Химическое воздействие	20–5000	10–300	10^{-3} – 10^3
Плавка	15–40	10–50	10^3 – 10^4
Испарение	10–40	2–30	$2 \cdot 10^3$ – $2 \cdot 10^4$
Сварка	15–175	10^{-1} –6	$8 \cdot 10^4$ – 10^7
Резание	20–150	$5 \cdot 10^{-3}$ – 10^{-1}	10^5 – 10^{10}

Несмотря на сложности выполнения электронно-лучевой обработки, связанные с необходимостью помещать объекты обработки в вакуум, она успешно конкурирует с другими методами благодаря следующим преимуществам:

- универсальности (можно обрабатывать практически любые материалы, причем не только изменять геометрические размеры деталей и свойства их поверхности, но и проводить различные измерения);
- экологической чистоте (процесс протекает в высоком вакууме, электронный луч не вносит загрязнений и не подвержен износу, контроль с его помощью, как правило, является неразрушающим);
- управляемости (можно легко регулировать энергию, фокусировку, модуляцию и отклонение электронных пучков, причем малая инерционность позволяет быстро перемещать луч с одного участка на другой и обеспечивать высокую скорость обработки и локальность воздействия).

Тесты к лекции 9

1. От чего в наибольшей степени зависят эффекты, возникающие при взаимодействии электронного пучка и твердого тела?

- а) от энергии электронов;
- б) от состава среды распространения электронного пучка;
- в) от типа электронно-лучевой пушки.

2. Что позволяет определить модель Арчарда?

а) глубину проникновения электрона в твердое тело, на которой выделяется максимум энергии, а также радиус диффузного рассеяния энергии электронов;

- б) количество и энергию проникающих в твердое тело электронов;
- в) вероятность взаимодействия электронов с атомами кристаллической решетки твердого тела.

3. От чего зависит скорость испарения вещества при его нагреве электронным лучом?

- а) от молекулярной массы испаряемого материала;
- б) от энергии электронов;
- в) от остаточного давления в вакуумной камере.