

1.12. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТОМАРНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОТОКОВ С МАТЕРИАЛАМИ

Цель лекции: изучение различных эффектов, возникающих при взаимодействии атомарных и молекулярных потоков с материалами.

1.12.1. АДГЕЗИЯ

Атомарные и молекулярные пучки имеют две основные области применения: осаждение тонких пленок и травление диэлектрических слоев. Варьируя энергией и плотностью пучка атомов или молекул, можно получать пленки толщиной от долей нанометра (несколько слоев молекул) до нескольких микрометров. В технологии тонких пленок атомарные и молекулярные пучки используются при конденсации металлических и диэлектрических слоев, окислении, эпитаксиальном росте пленок, а также при легировании полупроводниковых материалов.

С помощью атомарных или молекулярных потоков можно создавать уникальные структуры тонких пленок и химические соединения с не имеющими аналогов в природе параметрами кристаллической решетки и физическими характеристиками. Для получения тонкопленочных слоев с уникальными свойствами необходимо сохранить атомарно чистую поверхность подложки, для этого парциальное давление посторонних примесей должно быть существенно ниже 10^{-4} Па. Подготовка поверхностей перед осаждением тонких пленок является важным процессом для получения хорошей адгезии и других требуемых свойств на границе раздела «подложка—пленка». Для очистки подложек от поверхностных загрязнений служит вакуумно-плазменное травление ионами инертных или химически активных газов.

Общим для всех тонкопленочных покрытий свойством является адгезия (от лат. *adhaesio* — прилипание) — сцепление поверхностей различных твердых и жидких тел. Адгезия обусловлена межмолекулярным взаимодействием в поверхностном слое и характеризуется удельной работой, необходимой для разделения поверхностей.

1.12.2. ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Свойства тонких пленок и качество тонкопленочных покрытий в значительной мере зависят от стадии роста пленки на поверхности подложки. Существует несколько теорий роста тонких пленок в вакууме, из которых

наибольшее практическое применение нашли термодинамическая и молекулярно-кинетическая теории.

Количество осаждающихся атомов или молекул n_1 и задерживающихся на единице поверхности подложки на время жизни адатома (адсорбированного атома) τ_a

$$n_1 = N_1 \tau_a = v_0 \frac{N_A}{M} \frac{1}{\nu} \exp\left(\frac{\Delta E_{\text{дес}}}{kT}\right) \left[\frac{\text{шт}}{\text{м}^2} \right], \quad (1.26)$$

где N_1 — поток осаждающихся на единицу поверхности подложки в единицу времени атомов или молекул, атом/(м²·с); ν — частота собственных колебаний адатома ($\nu \approx 10^{14}$ Гц); $\Delta E_{\text{дес}}$ — энергия активации десорбции, Дж; T — температура подложки, К (условием, необходимым для образования адатома, является $E_a > kT$, где E_a — энергия осаждающихся атомов или молекул (рис. 1.36)).

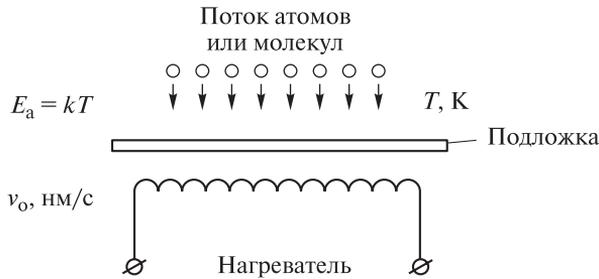


Рис. 1.36. Схема осаждения атомов или молекул на подложку

Поскольку температура (энергия) осаждающихся атомов или молекул больше температуры поверхности подложки, то адатомы перемещаются (диффундируют) по поверхности и могут либо покинуть поверхность (десорбировать), либо остаться на ней. Процесс роста тонкой пленки включает в себя несколько стадий (рис. 1.37): 1) перемещение адатомов по поверхности, их соединение и образование зародышей; 2) укрупнение зародышей за счет захвата новых адатомов; 3) слияние зародышей и образование островков; 4) слияние островков; 5) образование несплошной пленки; 6) образование сплошной пленки.

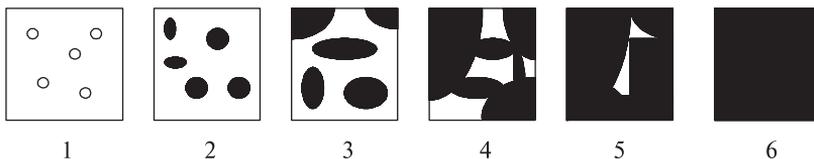


Рис. 1.37. Стадии формирования тонкопленочного покрытия (1–6)

Существует понятие «критический радиус зародыша», которое объясняет стадию зарождения тонкой пленки: минимальное количество атомов, при котором энергия (температура) десорбции зародыша меньше температуры поверхности подложки.

Критический радиус зародыша

$$r_{\text{кр}} = \frac{8\pi r_a^3 \sigma}{3kT \ln \frac{p_s}{p}} \quad \text{или} \quad r_{\text{кр}} = \frac{2\sigma}{\Delta E_{\text{дис}}}, \quad (1.27)$$

где r_a — радиус одного атома; p_s и p — давление насыщенного пара при температуре испарения материала и температуре поверхности подложки T соответственно; σ — коэффициент поверхностного натяжения ($\approx 10^{-4}$ Дж/см²); $\Delta E_{\text{дис}}$ — энергия диссоциации зародыша ($\approx 2 \cdot 10^3$ Дж/см³). При приведенных в скобках данных критический радиус зародыша и число составляющих его атомов приблизительно составят

$$r_{\text{кр}} \approx 10^{-7} \text{ см} \approx 10 \text{ \AA} \quad \text{и} \quad n_{\text{кр}} \approx \frac{r_{\text{кр}}^2}{r_a^2} \approx 6-7 \text{ шт.} \quad (1.28)$$

Скорость образования зародышей v_3 зависит от r_a и $r_{\text{кр}}$, потока осаждающихся на единицу поверхности в единицу времени атомов или молекул N_1 , энергии активации десорбции и диффузии $\Delta E_{\text{диф}}$, температуры поверхности подложки T :

$$v_3 = \frac{1}{4} \left(\frac{r_a}{r_{\text{кр}}} \right)^2 N_1 \exp \left(\frac{\Delta E_{\text{дес}} - \Delta E_{\text{диф}}}{kT} \right) \left[\frac{\text{зар}}{\text{м}^2 \text{с}} \right]. \quad (1.29)$$

Время образования зародышей

$$t_3 = \frac{1}{\pi r_{\text{кр}}^2 v_3} [\text{с}]. \quad (1.30)$$

Температура поверхности подложки является одним из важнейших факторов, определяющим не только скорость образования зародышей и роста пленки, но и структуру и свойства тонкопленочного покрытия. Структура пленки определяется характером зависимости максимального числа устойчивых зародышей от температуры поверхности подложки T (рис. 1.38, а); при $T > T_0$:

$$n_3 = \max \exp \left(-\frac{\Delta E_{\text{дес}} - \Delta E_{\text{диф}}}{kT} \right), \quad (1.31)$$

а при $T < T_0$:

$$n_3 = \max \sqrt{\frac{n_0 N_1}{v} \exp \left(\frac{\Delta E_{\text{диф}}}{kT} \right)}, \quad (1.32)$$

где n_0 — количество отдельных атомов, которое может поместиться на единице площади подложки ($n_0 \approx 2 \cdot 10^{18}$ шт./м²). Температура T_0 — критическая

температура, выше которой происходит неполная конденсация, когда коэффициент accommodations $\alpha < 1$, время жизни адатома меньше времени диффузии (перемещения) адатома по поверхности подложки ($\tau_a < \tau_{\text{диф}}$, $r_{\text{кр}} > r_a$), а максимальное число устойчивых зародышей не зависит от потока осаждающихся атомов или молекул N_1 , т. е. созданы условия для роста кристаллической пленки. Если подложка относительно холодная ($T < T_0$), то максимальное количество устойчивых зародышей зависит от N_1 и практически каждый осевший атом или молекула остается на подложке, т. е. при полной конденсации $\alpha \approx 1$, $\tau_a > \tau_{\text{диф}}$, $r_{\text{кр}} \approx r_a$, а пленка получается аморфной.

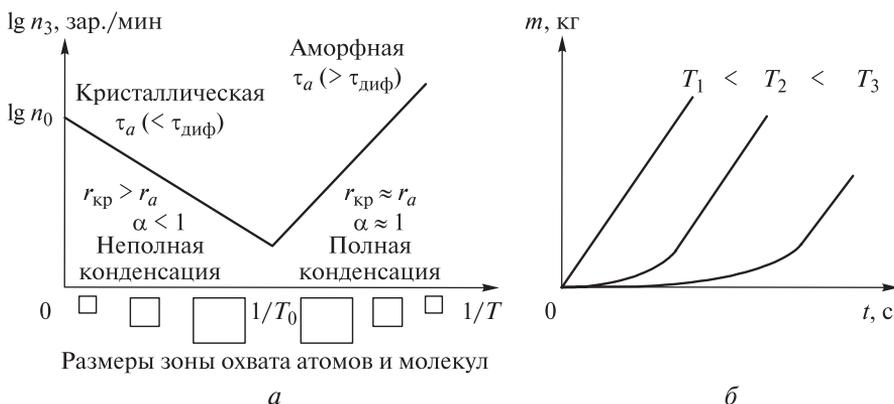


Рис. 1.38. Зависимость числа зародышей (а) и скорости увеличения массы тонкопленочного покрытия (б) от температуры подложки

Изменение размеров зоны захвата адатомов при увеличении температуры поверхности подложки объясняется увеличением или уменьшением вероятности образования зародышей с радиусом, равным или бóльшим критического. Увеличение массы растущей пленки во времени тем больше, чем меньше температура подложки (рис. 1.38, б), однако после образования сплошной пленки скорость дальнейшего увеличения ее массы слабо зависит от температуры подложки.

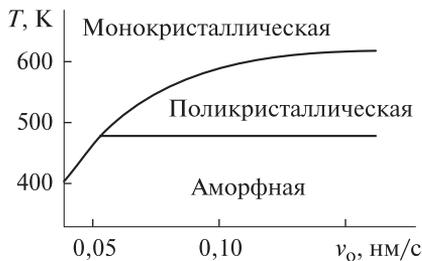


Рис. 1.39. Типовая зависимость структуры тонкопленочного покрытия от температуры подложки и скорости осаждения пленкообразующих частиц

Таким образом, чтобы получить аморфную, моно- или поликристаллическую пленку необходимо правильно выбрать режимы технологического процесса: скорость осаждения ν_0 , температуру поверхности подложки T (рис. 1.39), энергию атомов и молекул и др.

Тесты к лекции 12

1. От чего зависит число осаждающихся и задерживающихся на поверхности атомов?

- а) от температуры подложки;
- б) от остаточного давления в камере;
- в) от длины свободного пробега молекул.

2. На степень кристалличности пленки влияют:

- а) скорость осаждения и температура подложки
- б) только скорость осаждения
- в) только температура подложки

3. Сколько стадий выделяют до образования сплошной пленки?

- а) 5;
- б) 6;
- в) 4.