

# NASVETI

## ZAKAJ PRI VAKUUMSKEM NANAŠANJU TANKIH PLASTI POTREBUJEMO VISOKI VAKUUM?

Peter Panjan, Miha Čekada

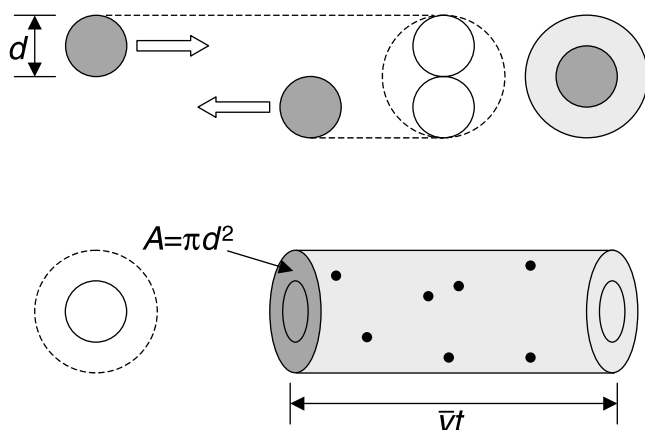
Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

PVD-postopki nanašanja tankih plasti potekajo v visokem vakuumu. Visoki vakuum potrebujemo, ker uparjenim atomom zagotavlja dovolj dolgo prosto pot, da na njej od izvira do podlage ne pride do trkov z atomi preostalega plina. Pri trkih se uparjeni atomi sipljejo in izgubljajo energijo, vse dokler se njihova energija ne izenači z energijo atomov oz. molekul preostalega plina. Razdalja, na kateri se to zgodi, in število trkov sta odvisna od njihove energije, od molekulske mase, tlaka v vakuumski posodi in temperature. Pri argonu je pri tlaku 1 mbar in pri sobni temperaturi pogostost trkov  $6,7 \cdot 10^3$  trkov/s.

Prosto pot, to je povprečna razdalja med dvema zaporednima trkoma, izračunamo z uporabo kinetične teorije plinov. Po modelu Seewayala lahko prosto pot molekul vizualno prikažemo na naslednji način (slika 1). Prerez za trk molekule s premerom  $d$  lahko prikažemo kot krog s premerom  $2d$  in ploščino  $\pi d^2$ . Tak krog je efektivna ploskev, kjer lahko pride do trka z atomi tarče, za katere privzamemo, da so točke. V času  $t$  ta krog očrta valj z dolžino  $vt$ , kjer je  $v$  povprečna hitrost molekul:

$$v = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

Povprečna hitrost helijevih atomov pri temperaturi  $0^\circ\text{C}$  je 1200 m/s, za argon 380 m/s, za dušikove molekule 453 m/s in za molekule vodne pare 564 m/s. Število trkov je določeno s številom molekul, ki se



Slika 1: Model za izpeljavo enačbe za povprečno prosto pot

nahajajo v tem volumnu ( $V = \pi d^2 vt$ ). Povprečna pot  $\lambda$  je dolžina valja, deljena s številom molekul v njem:

$$\lambda = \frac{vt}{\pi d^2 vt n_v} = \frac{1}{\pi d^2 n_v}$$

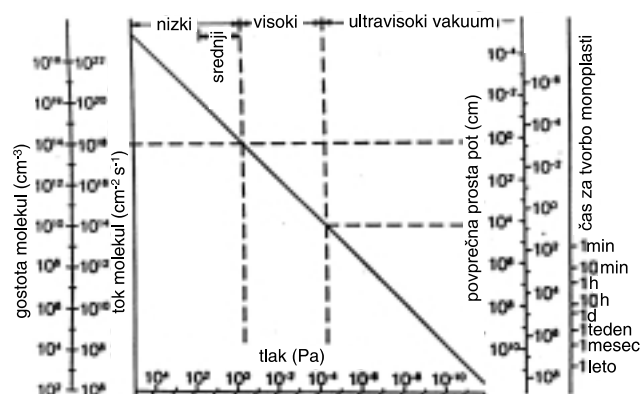
kjer je  $n_v$  število molekul plina, deljeno s prostornino, ki ga izračunamo iz enačbe za idealne pline:

$$n_v = \frac{n N_A}{V} = \frac{p N_A}{RT}$$

$N_A$  je Avogadrovo število,  $n$  število molov in  $R$  plinska konstanta. Problem tega modela je v tem, da privzema povprečno hitrost molekul in ne upošteva dejstva, da se tudi atomi oz. molekule tarče premikajo. Pri natančnejšem izračunu moramo upoštevati, da je pogostost trkov odvisna od povprečne relativne hitrosti molekul ( $v_{rel}$ ), ki se naključno gibljejo. Izračuni kažejo, da je  $v_{rel} = v\sqrt{2}$ . Povprečna prosta pot je potem enaka:

$$\lambda = \frac{RT}{\sqrt{2} \pi d^2 p N_A}$$

Prosta pot je torej sorazmerna razmerju med temperaturo in tlakom v vakuumski posodi. Tako je npr. pri dušiku pri sobni temperaturi in tlaku 1 mbar povprečna prosta pot molekule približno 5 cm. Slika 2 prikazuje povprečno prosto pot molekul, pogostost trkov na površino podlage ( $\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ) pri  $25^\circ\text{C}$  in



Slika 2: Značilne vrednosti različnih količin v odvisnosti od tlaka

časa za nastanek (adsorpcijo) enoatomske plasti kot funkcijo časa. Tako je npr. pri tlaku  $10^{-6}$  mbar, kar je visoki vakuum, povprečna prosta pot nekaj metrov in čas, v katerem nastane enoatomska plast kontaminanta, pa 1 s. Čas za nastanek enatomske plasti kontaminanta je odvisen od mnogo parametrov, približno pa ga lahko izračunamo iz enačbe:

$$t = \frac{3,2 \cdot 10^{-6}}{p}$$

kjer je čas  $t$  v sekundah in tlak  $p$  v milibarjih. Če torej želimo, da ostane površina, ki jo preizkušamo, čista eno uro, potem mora biti tlak v vakuumski posodi nižji od  $10^{-9}$  mbar.

**Tabela 1:** Gostota molekul ( $n_V$ ), njihova prosta pot ( $\lambda$ ) in čas, v katerem na površini podlage nastane monoplast kontaminata ( $t$ )

| vakuum             | p/mbar     | $n_V$ /<br>(mol/m <sup>3</sup> ) | $\lambda$ /m      | $t$ /s    |
|--------------------|------------|----------------------------------|-------------------|-----------|
| (atmosferski tlak) | 1000       | $2 \cdot 10^{25}$                | $7 \cdot 10^{-8}$ | $10^{-9}$ |
| nizki              | 1          | $3 \cdot 10^{22}$                | $5 \cdot 10^{-5}$ | $10^{-6}$ |
| srednji            | $10^{-3}$  | $3 \cdot 10^{19}$                | $5 \cdot 10^{-2}$ | $10^{-3}$ |
| visoki             | $10^{-6}$  | $3 \cdot 10^{16}$                | 50                | 1         |
| ultravisoki        | $10^{-10}$ | $3 \cdot 10^{12}$                | $5 \cdot 10^5$    | $10^4$    |

Prosta pot molekul je parameter, ki ga moramo upoštevati tudi pri konstrukciji vakuumskih sistemov.

Če je prosta pot veliko manjša od premera vakuumske posode, potem je tok molekul plina viskozen, če pa je večji, je tok molekularen. Za tipične vakuumske sisteme je ta prehod nekje med  $10^{-2}$  mbar in  $10^{-3}$  mbar.

Visoki vakuum je potreben tudi zato, da je kontaminacija rastoče plasti čim manjša. Kontaminacijo tanke plasti zmanjšamo, če uporabimo boljši vakuum in večjo hitrost kondenzacije. Kvantitativno izrazimo onesnaženje kot razmerje med tokom atomov preostalih plinov in toka uparjenih atomov (molekul), ki se kondenzirajo na podlagi. Ekvivalenten izraz je razmerje med številom trkov molekul preostalega plina na podlago, deljeno s časom in hitrostjo kondenzacije plasti. Praktično izračunamo to razmerje ( $K$ ) iz tlaka preostalih plinov in hitrosti kondenzacije. V standardnih pogojih naprevanja v proizvodnih napravah je velikost onesnaženja ( $K$ ) v mejah od  $10^{-3}$  do 10. Le s težavo dosežemo v skrajno čistih razmerah v UVV vrednost  $K$  od  $10^{-6}$  do  $10^{-5}$ . Pri naprševanju so te vrednosti večje: od 0,1 do  $10^3$ .

Med nanašanjem tankih plasti se vakuumska posoda in podlage segrevajo zaradi sevanja iz izvirov za naprevanje oz. naprševanje. Segrevanje povzroči desorpcijo iz pregretilih površin.