

Kapitola 6

Technologie napařování

6.1 Realizace vakuového napařování

Termické napařování, nebo vakuové napařování (čistě fyzikální metoda) je jedna z nejstarších technik nanášení tenkých vrstev. Je široce používána v laboratořích a průmyslu pro nanášení tenkých vrstev kovů a slitin.

Existuje několik různých napařovacích postupů:

- **Odporové zahřívání.** Teto metoda je založena na ohřívání materiálu využitím lodičky nebo drátu z odporového, těžko tavitelného materiálu, jako je W, Mo, Ta, Nb. Někdy se používá i keramické úpravy povrchu těchto držáků.
 - K přímému napařování dochází v okamžiku, kdy je napařovaný materiál:
 - Zavěšen například na drátěné spirále ve formě svorky tvaru U (odpařovaný materiál musí smáčet spirálu, aby se na něj po roztavení nalepil),
 - Je vložen do drátu tvaru košíku (napařovaný materiál nesmí smáčet lodičku, aby po roztavení vytvořil kapku, která nevyteče z košíku)

- je vložen do lodičky. lodička je přibližně 0,3 cm hluboká, 10 cm dlouhá a 1 až 2 cm široká. Výkon potřebný pro tyto zdroje je podstatně větší, než v případě drátového uchycení, ale lze deponovat tlustší vrstvy.
- Je uvnitř uzavřené nádoby (pece) určené k tomu, aby zabránila vytváření napařených skvrn na substrátu. Pícka má tvar uzavřené nádoby s malými otvory, kterými proudí napařovaný materiál.

- Kelímek z křemene, grafitu, keramiky se používá pro nepřímé zahřívání.

⇒ *Sublimace*. Pokud má materiál dostatečně vysokou tenzi par před tavením, začne sublimovat a následné kondenzát vytváří tenkou vrstvu. Nevýhodou je nízká deponiční rychlost.

⇒ *Napařování několika komponent* Pokud je napařována slitina, nebo několik složek, může být rozdílná napařovací rychlost pro jednotlivé komponenty, díky rozdílné tenzi par, tendenci reagovat s nosným materiálem nebo možné tepelné dekompozici materiálu. Pro případ rozdílu tenze par lze pro určit koeficient pro složku slitiny A a B z Lungmuirova vztahu (??) za předpokladu, že tlak plynu každé složky je měrná relativní koncentraci C_A , C_B :

$$\frac{j_A}{j_B} = \frac{C_{AP_A}}{C_{BP_B}} \sqrt{\frac{m_B}{m_A}}. \quad (6.1)$$

Technicky zajímavé je to, že za čím vyšší napařovací teplota pro slitinu složenou ze sloučenin s velmi rozdílnou tenzí par, tím blíže je složení vrstvy podobné složení původní slitiny.

- **Jiskrové napařování** Rychlé napařování slitin, či několikasložkových sloučenin, které se normálně mají tendenci rozpadat na složky, lze dosáhnout kapáním malinkých kapek na horký povrch. Dojde tak k separátnímu odpařování na mnoha místech kdy se ale v každém místě odpaří všechny složky.
- **Obloukové napařování.** Zapálením elektroického oblouku mezi dvěma vodivými elektrodami dochází v místě dopadu oblouku k velkému ohřevu materiálu. Teplota je dostatečná i k odpařování Nb a Ta. Tato metoda je také často používá k napařování uhlíku na vzorky pro elektronový mikroskop.
- **Technika explodujícího drátu.** Tato technika je založená na explozi drátku způsobené prudkým ohřevem díky průchodu velkého proudu, řádově 10^6 A/cm². Takového efektu je dosaženo polem kondenzátorů (≈ 10 to 100 μ F) nabitým na napětí ≈ 1 to 10 kV.
- **Laserové napařování.** Obrovská intenzita laserového svazku může být použita k ohřevu a odpařování materiálu. Laserový zdroj může být mimo vakuový systém a svazek bývá zaostřen na povrch napařovaného materiálu.
- **RF ohřev.** Pro ohřev materiálu lze použít elektromagnetickou indukci. Ohřev lze aplikovat buď přímo na napařovaný materiál, nebo nepřímo na kelímek v němž je

napařovaný materiál uložen.

- **Napařování elektronovým svazkem** Napařování použitím odporového zahřívání má velkou nevýhodu v tom, že napařovaný materiál bývá kontaminován materiálem držáku. Také je napařování limotováno vstupním výkonem (došlo by k tavení držáku), což značně ztěžuje napařování materiálů s vysokou teplotou tání. \Rightarrow lze to obejít pomocí elektronového bombardu materiálu.

Nejjednodušší uspořádání sestává z Wolframového vlákna, které je žhaveno a emituje elektrony. Ty jsou následně urychlovány díky přivedení kladného napětí na napařovaný materiál. Elektrony v něm ztrácejí svou energii, čímž materiál ohřívají a dochází k jeho vypařování.

6.2 Epitaxe z molekulárních svazků (MBE)

Epitaxe z molekulárních svazků (MBE z anglického molecular beam epitaxy) je sofistikovaná, přesně kontrolovaná metoda pro růst monokrystalické epitaxní vrstvy ve velmi vysokém vakuu (10^{-9} Pa). Vrstvy jsou vytvářeny na monokrystalickém substrátu pomalým napařováním jednotlivých atomů či molekul. Substrát je a rostoucí vrstva jsou udržovány na přesně dané teplotě. Aparatura pro MBE se skládá z následujících částí:

- **Vakuový systém** je velice podobný uspořádání, které je používáno pro analýzu povrchů a kompatibilní s technikou vysokého vakua. Typický systém pro MBE je složen

ze čtyř oddělených komor: vstupní komora pro vkládání a vyjímání substrátů, de-
poziční komora, komora pro analýzu a pomocná komora pro přípravné procesy.

- **Zdroje materiálu** jsou základem každého MBE systému. Musí být schopné posky-
tovat dostatečnou čistotu a rovnoměrnost napařovaného materiálu.
 - *Knudsenovy cely* jsou standartním zdrojem pro napařování. Vypadají
jako hluboké tyglíky uvnitř pece. Pec je vybavena chlazením stěn a
termočlánkem. Jsou většinou vyrobeny z odolného kovu jako je Ta, Mo
nebo keramiky.
 - *Solid Source Cracking Cells*. Některé materiály jako arsen a fosfor se
odpařují ve více molekulárních formách. Obvykle platí, že větší molekuly
mají vyšší tenzi par a nižší koeficient ulpění při dané teplotě substrátu
než menší molekuly \Rightarrow výtěžnost lze zvýšit rozbitím větších molekul již
ve zdroji. Konstrukce zdroje materiálu v tomto případě odpovídá obvyklé
Knudsenově cele s tím rozdílem, že je přidán další ohřev na výstupu z cely,
který slouží k rozkladu molekul.
 - *Kontinuální zdroj* je typ zdroje pro tekuté materiály (např. rtuť).
 - *Zdroj s elektronovým ohřevem* je používán pro těžko tavitelné materiály
(W, Co, Ni, Si, Ge).
 - *Implantační zdroj* Plyn ze zdroje je ionizován, v některých případech jsou
ionty separovány podle hmotnosti. Následně jsou ionty urychleny směrem

k substrátu.

- *Clona* Jedním ze základních prvků, nutných pro správnou funkci MBE, je clona umístěná na zdroji. Spolu s pomalou rychlostí růstu vrstvy umožňuje kontrolu nad procesem růstu. Požadavkem je schopnost zavřít se během 0,1 s.
- **Manipulace se vzorky.** Vzorky pro MBE jsou uchyceny v molybdenovém držáku pomocí indiového tmelu. Za teploty obvyklé pro MBE je indium tekuté a zajišťuje dobrou přilnavost a převod tepla. Teplota substrátu bývá kontrolována buď termočlánkem, nebo pyrometrem. Obvyklé bývá velké substráty (> 5 cm) nechat během depozice rotovat.