

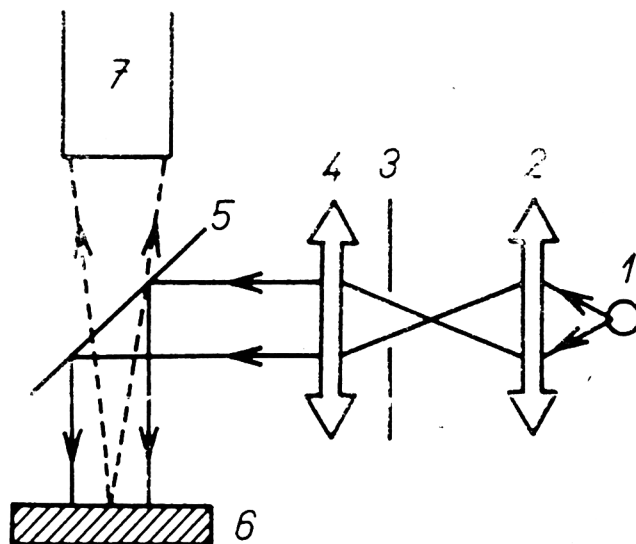
27. MĚŘENÍ TLOUŠŤKY TENKÉ VRSTVY INTERFEROMETRICKOU METODOU

Jednou z nejužívanějších metod měření tloušťky tenkých vrstev (tloušťka $t \in \langle 10^1 - 10^2 \text{ nm} \rangle$) je interferometrická metoda podle Tolanského /1/, která se v současné době častěji nazývá Fizeauova metoda (Fizeauovy interferenční proužky stejné tloušťky).

Metoda je založena na vícepraskové interferenci světla na vzduchové mezeře vytvořené mezi měřeným vzorkem a polopropustným zrcadlem. Měřený vzorek je připraven tak, že na části podložky je měřená vrstva odstraněna (např. vryp). Tento systém se pokryje nepropustnou vrstvou kovu s vysokou odrazivostí (např. Al, Ag). Předpokládá se, že krycí vrstva dokonale reprodukuje vryp. Mezi takto

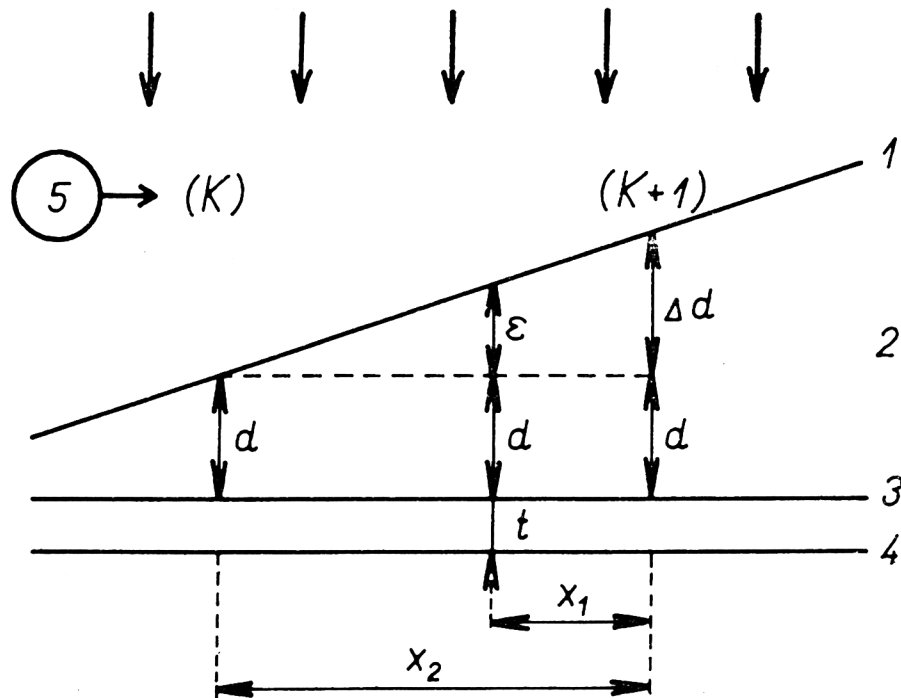
připraveným vzorkem a polopropustným zrcadlem se citlivým mechanickým zařízením vytvoří vzduchová klínová mezera s malým úhlem klínu. Celý tento systém se pak osvětlí monochromatickým světlem, charakterizovaným vlnovou délkou λ . Schematicky je optické uspořádání na obr.27.1.

Na obr. 27.2. je schematický pohled na měřený objekt. Nechť na systém znázorněný na tomto obrázku dopadá téměř kolmo rovnoběžný svazek paprsků monochromatického světla. V důsledku interference na vzduchové mezeře se v zorném poli mikroskopu, za předpokladu,



Obr.27.1: Experimentální uspořádání pro pozorování interferenčních proužků v monochromatickém světle.

1-zdroj monochromatického světla, 2-kondenzor, 3-clona, 4-kolimátor, 5-dělicí kostka, 6-vzorek, 7-objektív mikroskopu.



Obr.27.2: K výkladu vzniku interferenčních proužků na klínové vzduchové mezeře, 1-polopropustné zrcadlo, 2-vzduchová mezera (index lomu $n = 1$), 3-horní plocha vrypu, 4-spodní plocha vrypu, 5-interferenční řád.

že by v měřené vrstvě nebyl vryp, objeví systém rovnoběžných tmavých proužků v těch místech, kde je splněna podmínka minima interference. Tedy například:

$$2d = K \lambda \quad (1)$$

$$2(d + \Delta d) = (K + 1) \lambda \quad , \quad (2)$$

kde K je interferenční řád. Z rovnice (1) a (2) dostáváme

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2} \quad . \quad (3)$$

Jak bude nyní vypadat situace, je-li v uvažovaném systému vryp? Vzhledem k tomu, že jde o proužky stejné tloušťky, bude zřejmě platit:

$$2(d + \Delta d) = (K + 1) \lambda \quad (4)$$

$$2(d + \varepsilon + t) = (K + 1) \lambda \quad , \quad (5)$$

kde t - tloušťka vrstvy, kterou máme stanovit. Ze vztahů (4) a (5) plyne

$$t = \Delta d - \varepsilon \quad (6)$$

a z podobnosti trojúhelníků na obr. 27.2. vyplývá

$$\frac{\varepsilon}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta d}{x_2}, \quad \text{tedy}$$

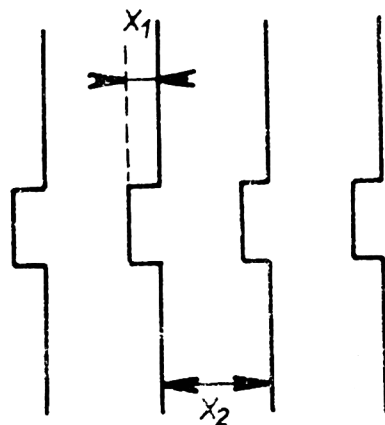
$$\varepsilon = \Delta d \frac{x_2 - x_1}{x_2}. \quad (7)$$

Dosadíme-li nyní vztah (7) do vztahu (6) dostaneme

$$t = \frac{x_1}{x_2} \frac{\lambda}{2}, \quad (8)$$

což je hledaný vztah pro určení tloušťky vrstvy. V zorném poli mikroskopu se objeví systém interferenčních proužků (obr. 27.3.), kde úseky x_1 a x_2 jsou jednoduše měřitelné např. odečítacím okulárem.

Poznámka: Určení parametru t podle vztahu (8) je jednoznačné pouze pro případ $t < \lambda/2$. Je-li $t > \lambda/2$ je úloha nejednoznačná a měření je třeba provádět nejméně pro dvě vlnové délky.



Obr.27.3: Ke stanovení tloušťky tenké vrstvy v monochromatickém světle.

Přesnost uvedené metody je $\pm(1 - 3)$ nm a závisí zejména na

- a) odrazivostech polopropustného zrcadla i krycí vrstvy. Požaduje se poměrně vysoká odrazivost obou, přičemž odrazivost krycí vrstvy musí být vyšší než odrazivost polopropustného zrcadla abychom dosáhli dobrého kontrastu interferenčních proužků;

b) monochromatickosti dopadajícího světla;

c) povrchové drsnosti polopropustného zrcadla i krycí vrstvy.

Tloušťku tenké vrstvy lze stanovit poměrně s vysokou přesností, jestliže je popsané interferometrické zařízení osvětleno bílým světlem. V tomto případě hovoříme o metodě FEEO (fringes of equal chromatic order - proužky stejného chromatického řádu) /2/. Vlastní vzorek s vrypem překrytým krycí vrstvou a polopropustné zrcadlo musí být v tomto případě vzájemně dokonale rovnoběžné. Principiální uspořádání je uvedeno na obr. 27.4. V bílém světle, které dopadá na vstupní štěrbinu spektrometru je obsažena informace o interferenci světla na vzduchové mezeře interferometru. Rozložíme-li bílé světlo, dostaneme v ohniskové rovině spektrometru spojité spektrum zdroje; přitom pro ty vlnové délky, pro které je splněna podmínka minima se ve spektru objeví tmavý interferenční proužek (obr. 27.5.).

Pro tloušťky $t < \lambda / 2$ pak zřejmě platí:

$$2d = K \lambda_1 \quad (9)$$

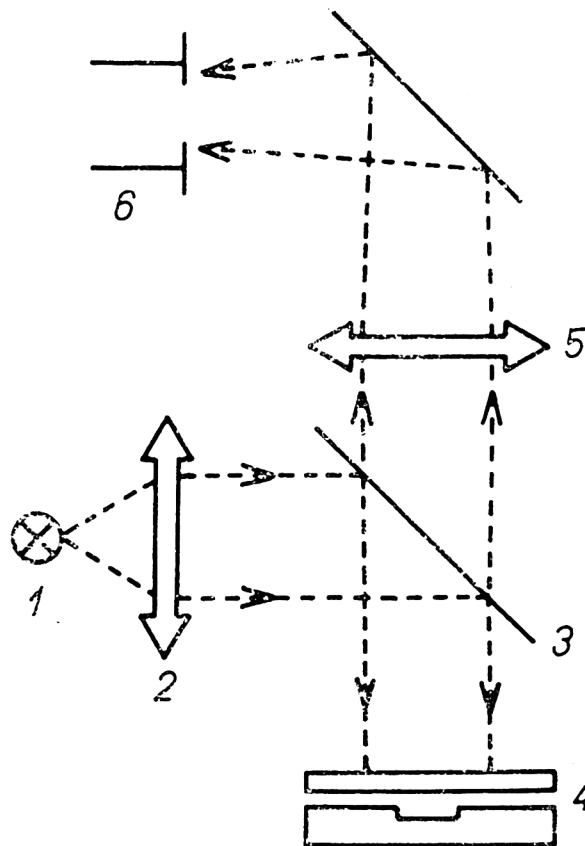
$$2(d + t) = K \lambda_1',$$

kde K je interferenční řád. Ze vztahu (9) pak plyne

$$t = \frac{K}{2} (\lambda_1' - \lambda_1). \quad (10)$$

Interferenční (chromatický) řád lze jednoduše stanovit ze dvou sousedních proužků, např.:

proužků v bílém světle. 1-zdroj světla, 2-kondenzor, 3-dělicí kostka, 4-interferometr, 5-fokusační čočka, 6-vstupní štěrbinu spektrometru.



Obr.27.4. Experimentální uspořádání pro pozorování interferenčních

$$2d = K \lambda_1$$

$$2d = (K + 1) \lambda_2,$$

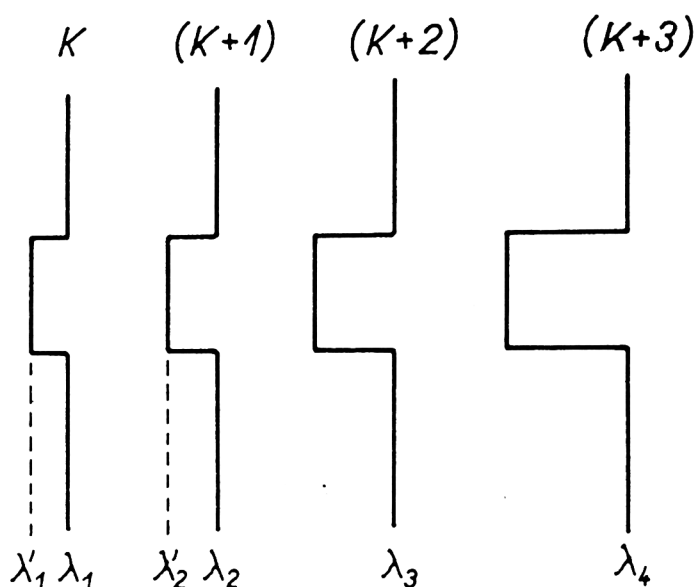
$$\lambda_1 > \lambda_2 \quad (11)$$

pak

$$K = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (12)$$

Je-li $t > \lambda / 2$, lze tloušťku stanovit ze vztahu /2/:

$$t = \frac{1}{2} (K'_j \lambda'_j - K_j \lambda_j), \quad (13)$$



Obr.27.5: Schema FECO interferogramu.

kde K'_j je interferenční řád ve vrypu, K_j - interferenční řád odpovídající horní ploše vrypu.

Poznámka: Srovnáním s metodou Fizeau v monochromatickém svět-
le je zřejmé, že v tomto případě se nemůžeme setkat
s nejednoznačným řešením. Dále je vhodné poznamenat,
že každý FECO proužek zobrazuje tutéž část povrchu
vzorku; u metody Fizeau tomu tak není.

Přesnost stanovení tloušťky vrstvy touto metodou je 0.1 -
- 0.2 nm, přičemž závisí na:

- presnosti stanovení vlnových délek λ_i , λ'_i ;
- velikosti interferenčního řádu K ; čím je nižší, tím je měření přesnější;
- dokonalosti ploch krycí vrstvy i polopropustného zrcadla /2/.

Poznámka:

Teorie interferometru není v případě FECO metody tak jed-
noduchá, jak jsme právě ukázali; v našich úvahách jsme zaned-

bali fázové posuvy světelné vlny /3/ na polopropustném zrcadle a krycí vrstvě. V případě metody Fizeau se uvedené zanedbání neprojeví, protože se jedná o případ $\lambda = \text{konst.}$; v případě FECO metody však pracujeme s proměnnou vlnovou délkou. Pro fázový posuv δ světelné vlny na absorbujícím prostředí platí /4/

$$\text{tg } \delta = \frac{-2k}{n^2 + k^2 - 1}, \quad (14)$$

kde k je index absorpce, n - index lomu prostředí na němž dochází k odrazu. Potom se k dráhovému rozdílu světelné vlny odražené na horní a spodní části vrypu přičítají rozdíly (zdánlivé zvětšení tloušťky)

$$\chi_1 = (\lambda / 2\pi) \delta_1 \quad \text{a} \quad \chi_2 = (\lambda / 2\pi) \delta_2 ;$$

tedy podmínky pro vznik minima zní správně:

$$2d + \chi_1 + \chi_2 = K \lambda_1 \quad (15)$$

$$2(d \pm t) + \chi'_1 + \chi'_2 = K \lambda'_1 ,$$

protože obecně je $\chi = f(\lambda)$. Systém rovnic (15) je mnohem komplikovanější než původní systém (9). Explicitní řešení vztahů (15) není možné. Aplikací např. Lukešovy grafické metody /3/ je možno vyloučit systematickou chybu určení tloušťky vzniklou fázovými posuvy.

Literatura:

- /1/ S.Tolansky, Multiple-Beam Interferometry of Surfaces and Films, Claredon, Oxford (1948).
- /2/ H.E.Bennett, J.M.Bennett, Physics of Thin Films, Academic, New York (1967).
- /3/ A.Vašíček, Měření a vytváření tenkých vrstev v optice, NČSAV Praha (1957).
- /4/ A.Vašíček, Optika tenkých vrstev, NČSAV Praha (1956).