

19. Meranie hrúbky tenkej dielektrickej vrstvy

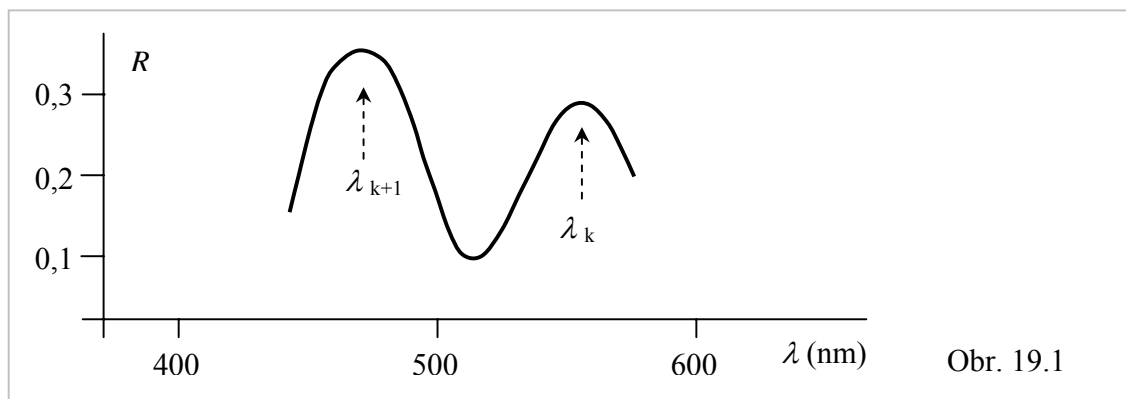
Autor pôvodného textu: **Ondrej Foltin**

Úloha: Určiť hrúbku tenkej dielektrickej vrstvy odmeraním spektrálnej závislosti šikmej odrazivosti svetla.

Teoretický úvod

Tenké dielektrické vrstvy sú súčasťou mikroelektronických prvkov pripravených planárnou technológiou. Hrúbka tenkej vrstvy ovplyvňuje fyzikálne parametre prvkov (kapacitu, elektrický odpor ...), preto je kontrola hrúbky dôležitou súčasťou technologického procesu. Jednou z metód určenia hrúbky je meranie spektrálnej odrazivosti, t.j. meranie závislosti odrazivosti od vlnovej dĺžky svetla.

Pri šikmom dopade svetla na tenkú dielektrickú vrstvu pomer intenzity odrazeného a intenzity dopadajúceho svetla závisí od jeho vlnovej dĺžky. Táto závislosť má periodický charakter (obr.19.1), čo je dôsledkom interferencie svetla odrazeného na rozhraní vzduchu a tenkej vrstvy so svetlom odrazeným na rozhraní vrstvy a podložky (na ktorej je vrstva nanosená).



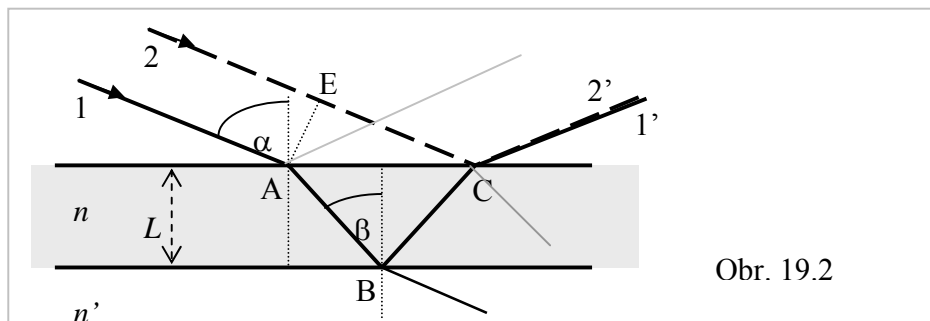
Obr. 19.1

Na obrázku 19.2 je nakreslený rez tenkou vrstvou s hrúbkou L , o ktorej predpokladáme, že má index lomu n , na ktorú necháme dopadať zväzok rovnobežných monochromatických lúčov s vlnovou dĺžkou λ . Index lomu nad vrstvou nech má hodnotu 1, pod vrstvou $n' > n$. Z množiny lúčov si vyberieme dva také, ktoré sa za bodom C stretnú a spolu postupujú ďalej v jednej priamke. Lúč 1 pri dopade na vrstvu v bode A sa čiastočne odrazí, ale všímať si budeme časťou, ktorá prešla do prostredia vrstvy. V bode B časť lúča vyjde z vrstvy von, ale časť sa vráti a smeruje k bodu C . Aj tam sa časť odrazí späť do vrstvy, ale všímať si budeme časťou, ktorá prešla nad vrstvu a interferuje s odrazenou časťou lúča 2. Lúč 2 smeruje priamo do bodu C , a jeho odrazená časť 2' interferuje s časťou 1' prvého lúča. Z hľadiska posúdenia interferencie týchto lúčov je dôležité vypočítať ich vzájomné dráhové posunutie. Lúče 1 a 2 sú súčasťou rovinnnej vlny, preto v bodoch A a E kmitajú vektory svetelnej vlny s rovnakými fázami. Lúč 1 po lome v bode A a odraze v bode B musí k bodu C prejsť dlhšiu dráhu ako lúč 2 od bodu E po bod C . Navyše prechádza prostredím s indexom lomu n čo znamená, ako keby prešiel n -krát dlhšiu dráhu ako vo vákuu. Lúče sú takto dráhovo, a tým aj fázovo vzájomne posunuté.

Dráhové posunutie spomenutých lúčov vypočítame ako rozdiel optických dráh Δs :

$$\Delta s = n(AB + BC) - EC .$$

(19.1)



Vzdialenosť AB vypočítame pomocou hrúbky vrstvy L a uhla β :

$$AB = L / \cos \beta , \quad EC = AC \sin \alpha , \quad AC/2 = L \operatorname{tg} \beta .$$

Pri výpočte použijeme aj Snellov zákon, aplikovaný na tento prípad, keď index lomu prostredia nad vrstvou má hodnotu 1, index lomu vrstvy n , teda

$$\sin \alpha = n \sin \beta .$$

Dosadením týchto vzťahov do rovnice (19.1) dostaneme:

$$\Delta s = \frac{2Ln}{\cos \beta} - 2L \operatorname{tg} \beta \sin \alpha = \frac{2Ln}{\cos \beta} - 2L \frac{\sin \beta}{\cos \beta} n \sin \beta = \frac{2Ln}{\cos \beta} (1 - \sin^2 \beta) = 2Ln \cos \beta$$

teda:

$$\Delta s = 2nL \cos \beta . \tag{19.2}$$

Interferenčné maximum vznikne, keď $\Delta s = 2nL \cos \beta = 2k(\lambda/2)$, teda keď

$$2nL \cos \beta = k\lambda . \tag{19.3}$$

Je vhodné uvedomiť si, že výsledný vzťah má pomerne jednoduchý tvar vďaka tomu, že v ňom nevystupuje uhol dopadu α , ale uhol lomu β , ktorý nie je priamo merateľný. Vo vzťahu (19.3) vystupuje celé číslo k vyjadrujúce rád interferenčného maxima. Pri fixnom uhle dopadu - ktorý sa používa v tejto laboratórnej úlohe - teda aj fixnom uhle β , hodnota ľavej strany rovnice (19.3) sa nemôže meniť. Interferenčné maximum môže síce vzniknúť pri rôznych vlnových dĺžkach, ale iba vtedy, keď sa súčin $k\lambda$ nezmení. Pre susedné interferenčné maximá (k -te a $k+1$) musí teda platiť vzťah

$$k\lambda_k = (k+1)\lambda_{k+1} \tag{19.4}$$

čo znamená, že pomer vlnových dĺžok susedných interferenčných maxím na obr. 19.1 sa rovná pomeru celých čísiel:

$$\frac{\lambda_{k+1}}{\lambda_k} = \frac{k}{k+1}, \text{ napríklad } \frac{\lambda_4}{\lambda_3} = \frac{3}{4}. \quad (19.5)$$

Pre susedné interferenčné maximá zodpovedajúce rôznym vlnovým dĺžkam platia rovnice:

$$2nL \cos \beta = k\lambda_k, \quad 2nL \cos \beta = (k+1)\lambda_{k+1}.$$

Prvú rovnicu vynásobíme číslom $(k+1)$, druhú číslom k a rovnice navzájom odčítame:

$$(\lambda_k - \lambda_{k+1}) 2nL \cos \beta = (k+1 - k) (\lambda_k \cdot \lambda_{k+1}) = (\lambda_k \cdot \lambda_{k+1}),$$

odkiaľ vyjadríme hrúbku tenkej vrstvy

$$L = \frac{\lambda_{k+1}\lambda_k}{\lambda_k - \lambda_{k+1}} \frac{1}{2n \cos \beta}. \quad (19.6)$$

Uhol β však nedokážeme zmerať, preto využijeme Snellov zákon lomu, aby sme ho mohli vyjadriť pomocou merateľného uhla dopadu α :

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n \Rightarrow n \sin \beta = \sin \alpha.$$

Ďalšou úpravou dostaneme

$$n^2 \sin^2 \beta = \sin^2 \alpha \rightarrow n^2 (1 - \cos^2 \beta) = \sin^2 \alpha$$

a nakoniec

$$n \cos \beta = (n^2 - \sin^2 \alpha)^{1/2},$$

čo dosadíme do vzťahu (19.6), čím získame výsledok, ktorý sa dá použiť pri meraní hrúbky tenkej vrstvy:

$$L = \frac{\lambda_{k+1}\lambda_k}{\lambda_k - \lambda_{k+1}} \frac{1}{2\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}. \quad (19.7)$$

Pri meraní tejto laboratórnej úlohy je nastavený uhol dopadu $\alpha = 45^\circ$, a index lomu tenkej vrstvy oxydu kremíka je $n = 1,46$.

Metóda merania

Keď poznáme index lomu vrstvy a uhol dopadu, treba zmerať už len závislosť odrazivosti R_v tenkej vrstvy od vlnovej dĺžky a určiť maximá tejto závislosti. Odrazivosť je definovaná ako podiel intenzity I_{odr} odrazeného svetla a intenzity I_{dop} dopadajúceho svetla – pri všetkých vlnových dĺžkach – teda

$$R_v(\lambda) = \frac{I_{odr}(\lambda)}{I_{dop}(\lambda)}. \quad (19.8)$$

Zdroje svetla vo všeobecnosti nevyžarujú na všetkých vlnových dĺžkach rovnako intenzívne, ale ani detektory žiarenia nereagujú na rôzne vlnové dĺžky rovnako. Preto sa odrazivosť dielektrickej vrstvy porovnáva s odrazivosťou štandardu, ktorá od vlnovej dĺžky prakticky nezávisí. Ako štandard s takouto vlastnosťou je vhodné hliníkové zrkadlo, na ktorom nedochádza k interferencii, svetlo sa na ňom iba odráža. Aj odrazivosť štandardu je definovaná vzťahom analogickým vzťahom ako (19.8):

$$R_s = \frac{I_{\text{odr}\ddot{s}}(\lambda)}{I_{\text{dop}}(\lambda)}, \quad (19.9)$$

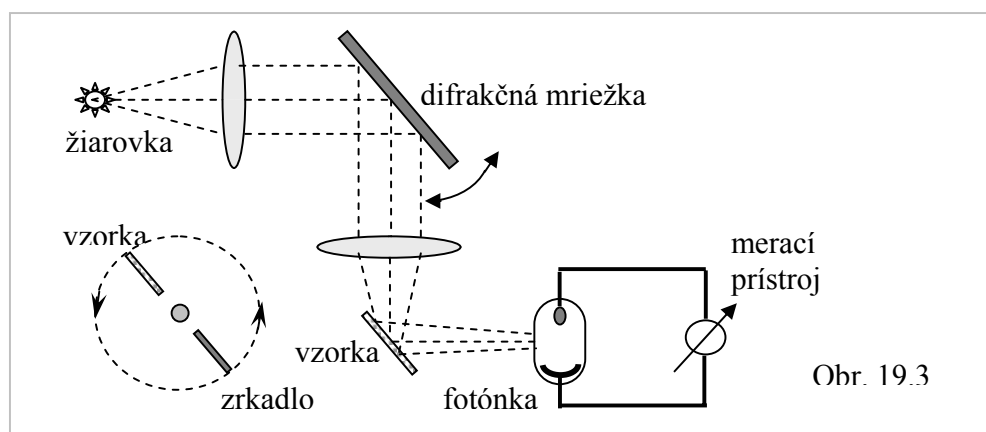
ale ako už bolo uvedené, nezávisí od vlnovej dĺžky. Pri zachovaní experimentálneho usporiadania, keď sa iba zmení meraná tenká vrstva štandardom, na obidva objekty dopadá rovnaká intenzita svetla. Preto sú intenzity dopadajúceho svetla vystupujúce v menovateľoch obidvoch vzťahov rovnaké. Vyjadríme intenzitu dopadajúceho svetla zo vzťahu (19.9) a dosadíme do vzťahu (19.8), čím dostaneme:

$$R_v(\lambda) = \frac{I_{\text{odr}v}(\lambda)}{I_{\text{dop}}(\lambda)} = \frac{I_{\text{odr}v}(\lambda)}{I_{\text{odr}\ddot{s}}(\lambda)} R_s. \quad (19.9)$$

Z výsledku vyplýva, že závislosť odrazivosti tenkej vrstvy od vlnovej dĺžky svetla dokážeme určiť ako podiel intenzít svetla odrazeného vrstvou a štandardom. Na určenie skutočnej veľkosti odrazivosti vrstvy by však bolo potrebné poznať aj veľkosť odrazivosti štandardu. Tú však pri tomto meraní nepotrebujeme, lebo nám ide len o polohu maxim odrazivosti.

Opis aparatury

Zariadenie a meranie spektrálnej odrazivosti musí byť konštruované tak, aby dokázalo generovať monochromatické svetlo rozličných vlnových dĺžok, skoncentrovať ho na meranú vzorku a potom merať intenzitu odrazeného svetla. Na tento účel sa hodí *kolorimeter*, v ktorom ako zdroj svetla je použitá žiarovka s wolfrámovým vláknom. Má zabudovanú difrakčnú mriežku ktorá rozkladá spojité spektrum žiarovky, pričom otáčaním difrakčnej mriežky sa dá dosiahnuť, aby cez výstupnú štrbinu prechádzala iba úzka, temer monochromatická časť zo spojitého spektra. Svetlo odrazené od vzorky sa registruje fotónkou, a jeho intenzita sa zobrazuje na displeji v percentách (vzhľadom na začiatočnú hodnotu).



Vlnovú dĺžku svetla možno odčítať na nastavovacom bubienku, ktorým sa natáča difrakčná mriežka. Z výstupnej štrbiny kolorimetra dopadá monochromatické svetlo buď na vzorku s tenkou vrstvou, alebo na štandard. Ich polohy sa dajú jednoducho zmeniť vysunutím držiaka a jeho súčasným otočením o 180°, pričom uhol dopadu sa nemení.

Postup pri meraní

Najprv si treba prečítať inštrukcie položené vedľa aparatury a podľa nich uviesť aparaturu do chodu. Do meracej polohy sa najprv umiestni vzorka a premeria sa spektrálna odrazivosť v intervale vlnových dĺžok od 450 nm po 600 nm, s krokom 1 nm (150 údajov). Potom sa do meracej polohy umiestni štandard a premeria sa odrazivosť pri tých istých vlnových dĺžkach. Údaje sa zapisujú do tabuľky a vypočíta sa odrazivosť R vzorky pri všetkých meraných vlnových dĺžkach.

Hodnoty odrazivosti sa vynesú do grafu, na ktorom sa nájdu vlnové dĺžky λ_k a λ_{k+1} zodpovedajúce maximám odrazivosti. Na základe týchto vlnových dĺžok, vychádzajúc zo vzťahu (19.5), sa stanovujú difrakčné rády k a $k+1$ zodpovedajúce maximám odrazivosti.

Získané hodnoty vlnových dĺžok λ_k a λ_{k+1} sa použijú na výpočet hrúbky L tenkej vrstvy.

Tabuľka

	λ (nm)	I_v (%)	I_s (%)	R (%)
1				
2				
3				

Výpočet smerodajnej odchýlky

Zo vzťahu (19.7) na výpočet hrúbky vrstvy vyplýva, že treba zvažovať iba presnosť určenia vlnových dĺžok zodpovedajúcich maximám na krivke odrazivosti. Vlnové dĺžky vystupujú v čitateli vzťahu v súčine a aj v menovateli. Preto na výpočet môžeme použiť približný vzťah

$$\left(\frac{s_L}{L}\right)^2 = \left(\frac{s_\lambda}{\lambda}\right)_{\lambda_1}^2 + \left(\frac{s_\lambda}{\lambda}\right)_{\lambda_2}^2 + \left(\frac{s_\lambda^2 + s_\lambda'^2}{\lambda^2}\right)_{\lambda_1-\lambda_2} \Rightarrow \frac{s_L}{L} = \sqrt{4} \frac{s_\lambda}{\lambda}$$

smerodajnú odchýlku polohy maxima na krivke odrazivosti v jednotkách vlnovej dĺžky. Podľa výrobcu prístroja $s_\lambda = 11$ nm. Za vlnovú dĺžku do menovateľa dosadíme približne stred intervalu meraných vlnových dĺžok.

Otázky

1. Ako súvisí rád difrakcie k s dráhovým rozdielom interferujúcich lúčov?
2. Možno merať hrúbku vrstvy touto metódou, ak jej index lomu $n = 1$?
3. Ako by sme vypočítali hrúbku vrstvy, keby jej index lomu závisel od vlnovej dĺžky, pričom by sme príslušné hodnoty indexu zodpovedajúce maximám difrakcie poznali?

Meno:

Krúžok:

Dátum merania:

Protokol laboratórnej úlohy 19

Meranie hrúbky tenkej dielektrickej vrstvy

Stručný opis metódy merania:

Schéma chodu lúčov v tenkej vrstve:

Vzťahy ktoré sa používajú pri meraní:

Prístroje a pomôcky:

Tabuľky nameraných hodnôt odrazivosti (vlnové dĺžky sú uvedené v nanometroch)

λ	420	425	430	435	440	445	450	455	460	465	470	475	480	485	490	495
I_v																
I_s																
R																

λ	500	505	510	515	520	525	530	535	540	545	550	555	560	565	570	575
I_v																
I_s																
R																

Tu vpište výpočet s uvedením hodnôt a rozmerov veličín:

$L =$

Tabuľka výsledkov

Veličina	jednotka	číselná hodnota
λ_k		
λ_{k+1}		
k		
k+1		
L		

Výpočet smerodajnej odchýlky

Veličina	s_λ	λ	s_λ/λ	s_L/L
jednotka	nm			
hodnota	11			

Vypočítaná hodnota hrúbky tenkej vrstvy s uvedením neistoty merania:

Súčasťou protokolu je aj graf závislosti odrazivosti R od vlnovej dĺžky svetla.

Slovné zhrnutie výsledkov merania:

Dátum odovzdania protokolu:

Podpis študenta:

Podpis učiteľa: