

Studium vlastností tenkých vrstev

V laboratorní úloze budeme proměřovat propustnost vzorků ve viditelné oblasti spektra a oblastech těsně přiléhajících. Smyslem první části úlohy je zvládnout převod naměřené propustnosti vzorku na určení indexu lomu vzorku v závislosti na vlnové délce. Ve druhé části měření budeme zkoumat propustnost vrstvy, jejíž malá tloušťka způsobuje, že je potřeba spočítat interferenci na této tenké vrstvě. Pro jisté vlnové délky stanovíme index lomu tenké vrstvy a pokusíme se následně odhadnout její tloušťku.

Spektrální závislosti obecně označujeme závislost zkoumané veličiny na nějakém parametru, v našem případě závislost indexu lomu na vlnové délce. Přístroje, které umožňují tento paramter v průběhu měření nastavovat, se obecně nazývají spektrometry. V našem případě optického spektrometru, musí být součástí přístroje element, který dokáže rozlišit světlo různých vlnových délek. Standardně se využívá difrakčních mřížek, které (podobně jako klasický hranol) rozdělují dopadající světlo do různých směrů podle jeho vlnové délky. Mechanickým nastavením difrakční mřížky můžeme zajistit, že na detektor dopadá vždy pouze malý výsek vlnových délek a získat tak postupně pro různá natočení mřížky požadovanou spektrální závislost.

Pro závislost index lomu na vlnové délce (disperzi indexu lomu) platí Cauchyův vztah,

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4},$$

který můžeme použít v oblasti tzv. normální disperze. Uvedeným vztahem můžeme proložit naměřená data a získat tak pro zkoumaný materiál konstanty A , B , C .

Předpokládejme tedy, že jsme měřením získali N dvojic λ_i , n_i . Potom z metody nejmenších čtverců můžeme napsat

$$A = \frac{\det A}{\det} \quad B = \frac{\det B}{\det} \quad C = \frac{\det C}{\det},$$

kde

$$\begin{aligned} \det &= NS_{x^2}S_y + 2S_xS_yS_{xy} - (S_x)^2S_y - (S_y)^2S_{x^2} - N(S_{xy})^2 \\ \det A &= S_nS_{x^2}S_y + S_{nx}S_{xy}S_y + S_{ny}S_xS_{xy} - S_{ny}(S_{xy})^2 - S_{nx}S_xS_y - S_{ny}S_{x^2}S_y \\ \det B &= NS_{nx}S_y + S_xS_{ny}S_y + S_yS_nS_{xy} - NS_{xy}S_{ny} - S_xS_nS_y - (S_y)^2S_{nx} \\ \det C &= NS_{x^2}S_{ny} + S_xS_{xy}S_n + S_xS_yS_{nx} - NS_{xy}S_{nx} - (S_x)^2S_{ny} - S_yS_{x^2}S_n. \end{aligned}$$

V předchozích vztazích je zavedeno $x_i = 1/\lambda_i^2$ a $y_i = 1/\lambda_i^4$ a dále platí značení

$$\begin{aligned} S_n &= \sum_{i=1}^N n_i & S_x &= \sum_{i=1}^N x_i & S_y &= \sum_{i=1}^N y_i & S_{x^2} &= \sum_{i=1}^N x_i^2, \\ S_{xy} &= \sum_{i=1}^N x_i y_i & S_{nx} &= \sum_{i=1}^N n_i x_i & S_{ny} &= \sum_{i=1}^N n_i y_i. \end{aligned}$$

Chceme-li získat materiálové konstanty například v Excelu, je nejlépe seřadit změřené hodnoty λ_i a n_i do prvních dvou sloupců. Do dalších sloupců je pak potřeba vypočítat pro každý řádek příspěvky do jednotlivých S (například první přidaný sloupec nechť je S_x ; potom na každém řádku bude jeho hodnota rovna $1/\lambda_i^2$ s použitím hodnoty vlnové délky na téže řádce). Pod těmito přidanými sloupci vytvoříme buňky, které budou představovat součty v každém ze sloupců - to jsou přímo hodnoty jednotlivých S . Tyto součty můžeme použít pro výpočet všech veličin \det a následně materiálových konstant A , B , C .

Máme-li takto získané závislosti vynést do grafu, je opět nejlépe přidat ještě jeden sloupec, do kterého vypočteme hodnoty podle Cauchyova vztahu (použijeme první sloupec: λ , a získané materiálové konstanty). Tento nový sloupec můžeme přímo přidat do grafu (v Excelu použijeme typ grafu 'XY', kde na osu x necháme zobrazit vlnovou délku a podél osy y budou probíhat jednotlivé indexy lomu - naměřené a nafilované, apod.)

(Všimněte si, že jednou vytvořenou strukturu datového listu není potřeba vytvářet znovu pro každý fit - stačí nová data nakopírovat do prvních dvou sloupců a výpočet proběhne automaticky.)

Spektroskop Specord

Spektroskop Specord umožňuje měření propustnosti nebo odrazivosti v rozsahu vlnových délek od blízké ultrafialové do blízké infračervené oblasti spektra. Spektrometr je automatizovaný, jeho ovládání probíhá prostřednictvím připojeného počítače, vybaveného specializovaným software.

Parametry, které je potřeba nastavit v zásadě souvisejí jednak s rozlišením spektra (počet měřených kroků na jednotku vlnové délky) a dále s precizností nasnímaného spektra (šum snižující délka akumulace každého z měřených kroků).

Úkoly:

1. Změřte propustnost podložního skla bez povrchových úprav v rozsahu 400-900 nm
2. Z naměřené závislosti získejte v oblasti vysoké propustnosti hodnoty indexu lomu podložky
3. Změřte propustnost téhož skla s povrchovou tenkou vrstvou, opět v rozsahu 400-900 nm
4. Vypočtěte propustnost, kterou by způsobila samotná tenká vrstva
5. V minimech propustnosti tenké vrstvy stanovte její index lomu
6. Ze dvou sousedních minim určete tloušťku vrstvy

Provedení:

1. Provedte měření kolmé propustnosti T' podložního skla.

Uvědomte si, že v případě justování čočky ve vzorkové komoře spektrometru by bylo třeba dbát na to, aby vzorky, které mají vypuklé stěny, byly centrovány na optické ose přístroje, jinak světlo ohnou mimo detektor. Stejně tak se optické centrování vyžaduje proto, aby čočky svou optickou mohutností měnily co nejméně chod světelných paprsků – to by se projevilo defokusací světla oproti vnitřnímu nastavení přístroje a ztrátou intenzity měřicího signálu.

U slabých čoček stačí nechat světlo probíhat v oblasti vrcholu čočky (stěny čočky jsou tam prakticky ploché), u silnějších by bylo potřeba doplnit mezičočku opačné mohutnosti k vyrovnání vlivu měřené čočky (je ovšem potřeba uvědomit si, že mezičočka rovněž ovlivňuje celkovou propustnost).

V našem případě bude podložní sklo planoparalelní a tato starost odpadá; jedinou podmínkou zůstává nutnost mít k dispozici materiál identický s tím, na který byla (na jeho části, případně na jiném vzorku) nanášena tenká vrstva.

2. Pro propustnost T jednoho rozhraní obecně platí celkový vztah $T + R + A = 1$, kde R je odrazivost materiálu a A absorpce v materiálu vzorku. Budeme uvažovat neabsorbující podložku, tedy $A = 0$. To je důvod, proč zadání požaduje zpracování pouze oblasti s vysokou propustností - v jiných oblastech neplatí vzorec $T + R = 1$, který v rámci úlohy budeme používat.

Při kolmém dopadu na jedno rozhraní platí zjednodušené Fresnelovy vztahy,

$$T = \frac{4n_1n_2}{(n_1 + n_2)^2}.$$

V případě planoparalelní desky máme rozhraní dvě a tento efekt se samozřejmě musí započítat (v dalším volíme index lomu vzduchu roven jedné a index lomu podložky označíme n). Protože při kolmém dopadu vztahy nerozlišují lom do desky a z desky, je výsledná propustnost dána jednoduše jako

$$T' = T \cdot T = \left[\frac{4n}{(1 + n)^2} \right]^2.$$

Předpokládáme-li dále v souladu se zkušeností, že deska sama nezpůsobí interferenci, můžeme počítat intenzity jednotlivých sekundárních paprsků vzniklých štěpením na obou stěnách čočky do výsledného vztahu

$$T' = \frac{1 - R}{1 + R},$$

kde pro kolmou odrazivost R rozhraní vzduch-deska platí zjednodušený Fresnelův vztah

$$R = \left(\frac{1 - n}{1 + n} \right)^2.$$

Dosazením propustnosti rozhraní do sumárního vztahu pro propustnost desky dostáváme

$$T' = \frac{2n}{n^2 + 1},$$

odkud

$$n = \frac{1 \pm \sqrt{1 - T'^2}}{T'}.$$

Protože hodnoty propustnosti známe v závislosti na vlnové délce, získáme i hodnoty indexu lomu v závislosti na vlnové délce. Vyneste do grafu jak závislost indexu lomu se zanedbanými odrazy, tak s odrazy nezanedbanými a posudte, jak velké chyby bychom se zanedbáním násobných odrazů dopustili.

Pro závislost se započtenými odrazy nafilujte Cauchyův vztah a vyneste jej do grafu společně s daty. Nezapomeňte přitom, že všechny vztahy byly odovzeny za podmínky zanedbatelné absorpce. Proto přepočty indexu lomu provádějte pouze ve spektrálním rozsahu, kde změřené propustnost není absorbcí ovlivněna.

3., 4. Způsobem obdobným první části úlohy změřte propustnost podložky s nanesenou tenkou vrstvou. Nyní je ovšem pravda, že změřené hodnoty propustnosti vznikají jako kombinace příspěvků podložní desky a povrchové vrstvy. Tyto dva příspěvky je od sebe potřeba oddělit.

Označíme T_{ss} propustnost samotné podložky, změřenou v předchozím kroku. Dále označíme T_{fs} změřenou propustnost systému podložka-vrstva. Z těchto dvou hodnot vypočteme veličinu relativní propustnost T_m podle vztahu $T_m = T_{fs}/T_{ss}$. Tato veličina již je svázána s propustností T_f samotné tenké vrstvy, vztahem

$$T_f = T_m \frac{1 - R_s}{1 + R_s(1 - T_m)},$$

kde R opět představuje odrazivost jedné stěny podložního skla ve vzduchu.

5. Index lomu n' tenké vrstvy se snadno určí v místech, kde vypočtená propustnost T_f tenké vrstvy nabývá lokálního minima:

$$T_f^{\min} = \frac{4n'^2 n}{(n + n')^2},$$

odkud

$$n'(\lambda^{\min}) = \frac{1 + \sqrt{1 - T_f^{\min}}}{\sqrt{T_f^{\min}}} \sqrt{n(\lambda^{\min})}.$$

6. Ve dvou sousedních minimech $\lambda_2 > \lambda_1$ propustnosti T_f musí navíc platit

$$\frac{2n'_1 d}{\lambda_1} = \frac{2n'_2 d}{\lambda_2} + 1,$$

odkud

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(n'_1 \lambda_2 - n'_2 \lambda_1)}.$$

Pro všechny nalezené dvojice sousedních minim propustnosti T_f tuto tloušťku určete a vzájemně porovnejte.