

## SPECIÁLNÍ PRAKTIKUM B 2 – F8572

Jarní semestr

### 9 Stanovení indexu lomu a tloušťky tenké vrstvy z reflexního spektra

#### Teorie

Cílem této úlohy praktika je stanovit index lomu a tloušťky tenké vrstvy fotorezistu na křemíkovém substrátu. Předpokládáme, že optické vlastnosti substrátu (především index lomu) jsou známy. Přítomnost tenké vrstvy se projeví v reflexním spektru, ze kterého mohou být následně určeny parametry tenké vrstvy.

Situace je znázorněna na obrázku 1. Pro větší názornost jsme volili velký úhel dopadu, v našem případě je úhel dopadu mnohem menší. Světlo dopadá na tenkou vrstvu a částečně se odráží. Prošlý svazek se dostává až k rozhraní tenká vrstva – substrát, kde opět dochází k částečnému odrazu. V případě slabě absorbující tenké vrstvy se záření jen málo tlumí a na výsledné zpět směřující vlně se podílí mnoho vln postupně odražených. Navíc, pokud je vrstva dostatečně tenká, promlouvá do výsledku ještě interference odražených paprsků.

Uvažujeme-li neabsorbující prostředí vrstvy, lze pro reflektivitu systému odvodit vztah

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos x}{1 + r_1^2r_2^2 + 2r_1r_2 \cos x}, \quad (1)$$

kde  $r_1$  a  $r_2$  jsou Fresnelovy koeficienty pro reflexi na rozhraních vzduch – tenká vrstva a vrstva – substrát. V případě kolmého dopadu pro ně platí vztahy

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, \quad r_2 = \frac{n_1 - n}{n_1 + n}. \quad (2)$$

Zde  $n_0$ ,  $n_1$  a  $n$  postupně značí index lomu vzduchu, tenké vrstvy a substrátu. Ve vztahu (1) dále vystupuje veličina  $x$ , což je fázový rozdíl paprsků ve vrstvě. Za předpokladu téměř kolmého dopadu je dán vztahem

$$x = \frac{4\pi}{\lambda} n_1 d, \quad (3)$$

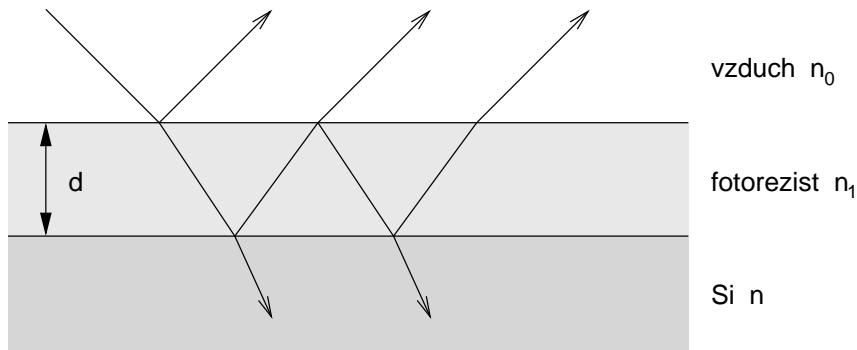
kde  $d$  je tloušťka tenké vrstvy.

Jednou z možností, jak z naměřeného reflexního spektra získat informaci o indexu lomu a tloušťce tenké vrstvy, je analýza minim a maxim v reflektivitě. Výraz (1) má lokální maxima v bodech, kde  $\cos x = 1$  a lokální minima v bodech, kde  $\cos x = -1$ . Tomu odpovídá  $x = 2\pi, 4\pi, \dots, 2m\pi, \dots$  v maximech resp.  $x = \pi, 3\pi, \dots, (2m-1)\pi, \dots$  v minimech.

Z minimálních hodnot  $R_{\min}$  spektrální závislosti  $R(\lambda)$  můžeme určit index lomu tenké vrstvy pomocí vztahu

$$n_1 = \sqrt{n \frac{1 - \sqrt{R_{\min}}}{1 + \sqrt{R_{\min}}}}, \quad (4)$$

který lze získat z rovnic (1) a (2) pro případ  $\cos x = -1$ .



Obrázek 1: Šíření světla systémem tenká vrstva – substrát.

Oproti tomu v místě maxim platí

$$\sqrt{R_{\max}} = \frac{r_1 + r_2}{1 + r_1 r_2} = \frac{n_0 - n}{n_0 + n}, \quad (5)$$

tedy hodnota reflektivity v maximu nezávisí na  $n_1$  a odpovídá reflektivě substrátu bez přítomnosti tenké vrstvy. Pokud jako etalon reflektivity používáme stejný materiál jako substrát (monokrystalický křemík v našem případě), lze platnost tohoto výrazu ověřit hned na relativním reflexním spektru, kde hodnoty v maximu by měly ležet blízko 1 nezávisle na vlnové délce.

Z poloh maxim a minim lze získat hodnotu tloušťky tenké vrstvy. Maxima v reflektivě totiž nastanou při splnění podmínky

$$2n_1 d = 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (6)$$

kde  $m$  je přirozené číslo. Pro sousední minimum s menší vlnovou délkou  $\lambda'$  platí

$$2n_1 d = (2m + 1) \frac{\lambda'}{2}. \quad (7)$$

Vyloučíme-li z předchozích dvou rovnic  $m$ , dostaneme pro tloušťku tenké vrstvy vztah

$$d = \frac{\lambda \lambda'}{4n_1(\lambda - \lambda')}. \quad (8)$$

Přitom předpokládáme, že index lomu se na uvažovaném intervalu vlnových délek významně nemění. V opačném případě bychom místo  $n_1$  u  $\lambda$  ve jmenovateli (8) museli vzít index lomu  $n'_1$  příslušný vlnové délce  $\lambda'$ .

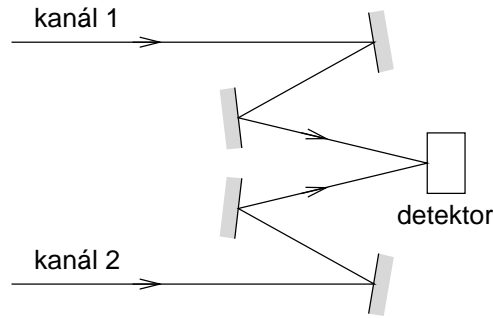
Uvedená metoda určení indexu lomu a tloušťky tenké vrstvy využívá pouze informace o extréměch spektrální závislosti reflektivity. Vhodnější je použít celou naměřenou křivku, ve které je obsaženo více informací. To lze například při fitování naměřených dat na teoretický model vyjádřený vztahem (1). Fitování provádíme minimalizací sumy čtverců odchylek naměřených experimentálních bodů od závislosti (1) jako funkce parametrů  $n_1$  a  $d$ ; případně, pokud budeme předpokládat spektrální závislost indexu lomu  $n_1$  ve tvaru

$$n_1(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}, \quad (9)$$

jako funkce parametrů  $A$ ,  $B$ ,  $C$  a  $d$ . Tento postup nám poskytne maximálně věrohodné odhady parametrů a rovněž odhady jejich chyb.

## Experiment

Měření reflektivity vzorku fotorezistu na křemíkovém substrátu je prováděno na dvoukanálovém spektrometru Varian Cary 5E. Tento spektrometr je mřížkovým spektrofotometrem v Littrowově uspořádání. Jako zdroj záření slouží halogenová žárovka případně deuteriová výbojka. Základní součástí monochromátoru jsou 4 holografické mřížky, rozsah měření přístroje je 185–3000 nm. Detektorem je fotonásobič nebo chlazená PbS komora.



Obrázek 2: Schéma detekce intenzity záření ve dvou kanálech.

Přístroj zaznamenává intenzitu ve dvou kanálech (viz obrázek 2). První kanál slouží jako referenční a umožňuje tak kompenzovat kolísání intenzity světelného zdroje. Do druhého kanálu lze umístit vzorek určený k měření propustnosti nebo (jako v našem případě) reflexní přístavek. Přepínání mezi kanály se děje s frekvencí 40 Hz.

Před měřením reflektivity vzorku je třeba kalibrovat přístroj pomocí etalonů. Etalon nulové reflektivity simulujeme zacloněním měřicího kanálu. Takto zjistíme korekci pro nulovou reflektivitu. Dále použijeme vyleštěný monokrystalický křemík, jehož reflektivita bude představovat referenční hodnotu pro další měření. Po provedení kalibrací je proměřena spektrální závislost reflektivity vzorku fotorezistu vztažená na křemík a přepočítána na absolutní reflektivitu s využitím známé spektrální závislosti reflektivity křemíku:

$$n(\lambda) = A_{\text{Si}} + \frac{B_{\text{Si}}}{\lambda^2} + \frac{C_{\text{Si}}}{\lambda^4} \quad (10)$$

s parametry  $A_{\text{Si}} = 3,397$ ,  $B_{\text{Si}} = 1,40513 \times 10^5 \text{ nm}^2$  a  $C_{\text{Si}} = 1,992 \times 10^{10} \text{ nm}^4$  (platí dobře v rozsahu cca 400–1000 nm).

## Úkoly

1. Změřte reflexní spektrum zkoumané vrstvy spolu s referenčním vzorkem leštěného Si v rozsahu 200–800 nm.
2. Přepočtete relativní spektrum na absolutní pomocí uvedeného zjednodušeného průběhu indexu lomu křemíku.
3. Stanovte polohy minim event. maxim a odhadněte z nich tloušťku vrstvy a (průměrný) index lomu vrstvy v daném místě spektra.
4. Nafitujte závislost indexu lomu vrstvy na vlnové délce pomocí navržené dvouparametrické funkce.

Zejména u posledního bodu se omezte na oblast  $\lambda > 400 \text{ nm}$ , kde se neuplatňuje příliš absorpce ani ve vrstvě ani v substrátu.