

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Katedra optiky

Bakalářská práce

Optická elipsometrie

Tomáš Horák

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem jen uvedenou literaturu a zdroje.

V Olomouci dne

Tomáš Horák

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval rodině za nekončící podporu v mém studiu. Také bych rád poděkoval vedoucímu práce panu RNDr. Ing Janu Podlouckému za nejjednodušší práci se mnou.

Dále bych chtěl poděkovat Bc. Karin Ghisiové za pomoc s překladem cizojazyčné literatury a za stylizaci práce.

ANOTACE

Jméno a příjmení:	Tomáš HORÁK
Katedra:	Optika
Vedoucí práce:	RNDr. Ing. Jan PODLOUCKÝ
Rok obhajoby:	2016

Název práce:	Optická elipsometrie
Název v angličtině:	Optical Ellipsometry
Anotace práce:	Tato práce se věnuje určení tloušťky tenké vrstvy metodou nulové elipsometrie na elipsometru LEOI-44. Za pomoci dvou sad úhlů nastavení polarizátoru a analyzátoru jsme schopni touto metodou zjistit výslednou tloušťku tenké vrstvy na substrátu.
Klíčová slova:	Elipsometrie, elipsometr LEOI-44, analyzátor, polarizátor, tenká vrstva, index lomu
Anotace v angličtině:	Calculation of thin film thickness on the base of null ellipsometry method with LEOI-44 Ellipsometer is carried out in this thesis. Two sets of angular setting of polarizer and analyzer allow to find refractive index and thickness values in the model of single homogenous layer.
Klíčová slova v angličtině:	Ellipsometry, LEOI-44 Ellipsometer, Analyzer, Polarizer, Thin film, refractive index
Přílohy vázané v práci:	Pracovní list Protokoly o měření jednotlivých vzorků s příslušnými úhly
Rozsah práce:	49 stran
Jazyk práce:	Český

OBSAH

ÚVOD.....	7
1. ZÁKLADNÍ TEORETICKÉ POZNATKY UPLATNĚNÉ V ELIPSOMETRII.....	8
1.1 Tenká vrstva.....	8
1.2 Laser	8
1.3 Polarizované světlo	9
1.3.1 Polarizace rovinné vlny	9
1.3.2 Chování rovinné vlny na rozhraní	10
1.4 Speciální případy polarizačních stavů	11
1.5 Fresnelovy vztahy	11
2 ELIPSOMETRIE	13
2.1 Základní rovnice elipsometrie	13
2.2 Přímý výpočet optických konstant z elipsometrických úhlů ψ a Δ	13
2.3 Vývoj měřicích přístrojů od minulosti po současnost	14
2.3.1 Měřicí metody v elipsometrii.....	14
2.3.2 Elipsometr s rotujícím analyzátozem RAE	16
2.3.3 Elipsometr s rotujícím analyzátozem a s kompenzátozem PSCA _R	17
2.3.4 Elipsometr s rotačním kompenzátozem RCE	17
2.3.5 Elipsometr s fázovou modulací PME	18
2.3.6 Infračervené spektroskopické elipsometry	19
2.3.7 Nulová elipsometrie a zobrazovací elipsometrie	20
2.4 Přístrojové vybavení pro elipsometrii.....	24
2.5 Vyhodnocení	24
2.6 Odhad chyby měření elipsometrem	25
2.7 Depolarizační účinek vzorků	27
3 MĚŘENÍ VZORKŮ NA ELIPSOMETRU	29
3.1 Elipsometr LEOI-44	29
3.1.1 Technické parametry	29
3.1.2 Popis	29
3.1.3 Nastavení	30
3.1.4 Kalibrace systému.....	31

3.1.5	Provoz/měření.....	33
3.1.6	Poznámky výrobce.....	34
3.1.7	Software.....	34
3.2	Měření	35
4	VÝSLEDKY.....	38
	ZÁVĚR.....	43
	SEZNAM LITERAYTURY	45
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	46
	SEZNAM GRAFŮ	47
	SEZNAM TABULEK	48
	SEZNAM PŘÍLOH	49

ÚVOD

Cílem této práce je seznámit se podrobněji s elipsometrickým měřením, a to především na elipsometru LEOI-44 firmy Lambda Scientific Systems, Inc., který se řadí do skupiny nulových elipsometrů. Díky tomuto seznámení a sepsání stručného postupu měření, tzv. pracovního listu, mohou budoucí studenti v rámci praktické výuky měřit tenké vrstvy vyrobené z různých materiálů na různých substrátech právě za pomoci tohoto přístroje.

Tato práce popisuje základní teorii měření elipsometrie na elipsometru LEOI-44 od firmy Lambda Science Systems, Inc.

Hlavním zdrojem při psaní této práce byly anglicky psané knihy *Spectroscopic Ellipsometry; Principles and Applications* od autora *Fujiwary Hiroyukia* [8] a *Handbook of Ellipsometry* od autorů *Harlanda G. Tompkinse* a *Eugene A. Irenovou* [14]. Ve třetí kapitole byl použit návod k elipsometrickému přístroji napsaný firmou *Lambda Scientific LEOI-44 Experimental Ellipsometer Instruction Manual* [11]. K zjištění indexu lomů jednotlivých měření materiálů bylo využito webové stránky <http://refractiveindex.info/> od autora *Mikhaila Polyanskiyeho* [13]. Pomocnou literaturou psanou již v českém jazyce byla skripta napsané panem *Jaromírem Křepelkou* zabývající se *Optikou tenkých vrstev* [10], ze které jsem využil především kapitolu sedm, která nese název *Základy vyhodnocení elipsometrických měření*.

V první části je tato práce zaměřena nejprve na základní teorii potřebnou k elipsometrickým měřením. Následně se zabývá metodami měření a různými typy konstrukcí elipsometrů. Podrobněji se pak věnuje tzv. nulovému elipsometru, na němž probíhalo měření.

V části měření je pak podrobněji popsán elipsometr LEOI-44 od firmy Lambda Scientific Systems, Inc., s nímž jsem se měl blíže seznámit a naměřit na něm vzorky. Výsledky vzorků se následně zabývá kapitola s názvem *Výsledky*

Hlavním přínosem této práce je seznámení se s elipsometrií a jejím měřením na daném elipsometru. Dalším přínosem vypracování krátkého postupu k měření na tomto elipsometru, jehož cílem je použití jako podklad k výukovým materiálům pro budoucí studenty, kteří by podle tohoto „Pracovního listu“ mohli měřit tloušťky tenkých vrstev.

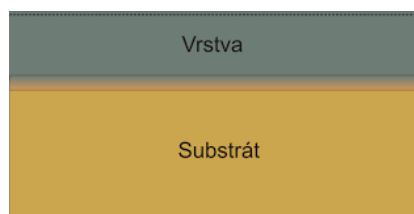
1. ZÁKLADNÍ TEORETICKÉ POZNATKY UPLATNĚNÉ V ELIPSOMETRII

1.1 Tenká vrstva

Je vrstva materiálu s tloušťkou od zlomku nanometru do několika mikrometrů. Fyzikální vlastnosti tenkých vrstev se díky malé tloušťce liší od objemových vlastností materiálu, což umožňuje velké množství praktických aplikací [12].

V elektronice se tenké vrstvy využívají na záznamová digitální média, fotočlánky, monitory, tranzistory, detekčních vrstvy chemických senzorů. V elektrotechnice pak na vodiče a kontakty, ve strojírenství zvyšují otěruvzdornost nebo tvrdost, ochrana proti korozi. V optice se používají jako ochrana proti UV záření nebo poškrábání, antireflexní vrstvy. Také se dají využít v dekorační technice.

System vrstva-substrát lze rozdělit do čtyř oblastí: substrát, rozhraní substrát-vrstva, objemová část vrstvy a povrchová část vrstvy. Při výběru vhodné vrstvy je třeba všechny tyto oblasti zohlednit. Ilustrativní schéma systému vrstva-substrát. Povrchová část vrstvy je vyznačena tečkovanou čarou. Barevný přechod označuje rozhraní substrát-vrstva. Rozhraní může být ostré nebo spojitě (gradientní).



Obrázek 1-1 Schema tenké vrstvy na substrátu

1.2 Laser

LASER, zkratka z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v překladu znamená “zesilování světla stimulovanou emisí záření“, je optický zdroj elektromagnetického záření, tedy světla v širším smyslu. Světlo z laseru obvykle vystupuje ve formě úzkého svazku. Oproti světlu přirozených zdrojů je koherentní a monochromatické. Princip laseru je založen na využití zákonů kvantové mechaniky a termodynamiky.

Laser je obvykle tvořen aktivním prostředím, rezonátorem a zdrojem energie.

V našem přístroji LEOI-44 je použit He-Ne laser o vlnové délce 632,8 nm.

1.3 Polarizované světlo

1.3.1 Polarizace rovinné vlny

Polarizace je charakteristická vlastnost příčného vlnění. Světlo je elektromagnetické povahy, a proto sdílí tuto vlastnost. Pro kompletní popis elektromagnetického pole je potřeba čtyř základních vektorových veličin: vektoru elektrické intenzity \mathbf{E} , elektrické indukce \mathbf{D} , magnetické intenzity \mathbf{H} a magnetické indukce \mathbf{B} . Pro popis stavu polarizace lze zvolit libovolnou z těchto čtyř vektorových veličin. Z čistě praktických důvodů se pole obvykle popisuje vektorem elektrické intenzity \mathbf{E} .

Uvažujme řešení soustav Maxwellových rovnic v homogenním a izotropním prostředí ve tvaru rovinné vlny, která se šíří v kladném směru osy z pravotočivého kartézského souřadnicového systému. Složky této vlny jsou

$$E_x = E_{x0} \sin(\omega t - kz + \varphi_x) \quad (1-1)$$

$$E_y = E_{y0} \sin(\omega t - kz + \varphi_y) \quad (1-2)$$

Kde E_x a E_y jsou složky vibrace ve směru osy x a y , ω je kruhová frekvence, t označuje čas, E_{x0} , E_{y0} , φ_x a φ_y jsou konstanty a k je vlnové číslo definované vztahem

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1-3)$$

Kde λ je vlnová délka dopadajícího záření.

Ze vztahů (1-1) a (1-2) lze vyloučením členu $(kz - \omega t)$ odvodit rovnici elipsy, kterou opisuje výslednice složek vektoru intenzity elektrického pole v rovině kolmé na směr šíření vlny [12]

$$\left(\frac{E_x}{E_{x0}}\right)^2 - 2\frac{E_x E_y}{E_{x0} E_{y0}} \cos \Delta + \left(\frac{E_y}{E_{y0}}\right)^2 = (\sin \Delta)^2 \quad (1-4)$$

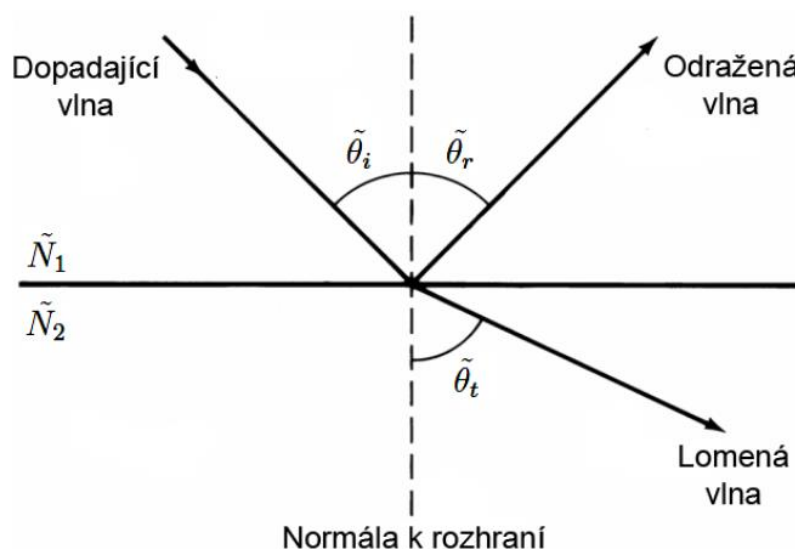
Kde Δ je fázový rozdíl definovaný vztahem

$$\Delta = \varphi_y - \varphi_x \quad (1-5)$$

Elipticky polarizované světlo představuje nejobecnější případ. Pro $E_{x0} = E_{y0}$ a $\Delta = \pm \pi/2$ se rovnice elipsy redukuje na rovnici kružnice. V případě kladného (záporného) znaménka u koeficientu Δ světlo označujeme jako pravotočivé (levotočivé) kruhově polarizované světlo. Pokud je Δ rovno celočíselnému násobku π , rovnice elipsy se redukuje na rovnici přímky a světlo označujeme jako lineárně polarizované [12].

1.3.2 Chování rovinné vlny na rozhraní

Při optických měřeních je důležitá znalost chování elektromagnetické vlny na rozhraní. Při dopadu elektromagnetické vlny na rozhraní musí dojít k odrazu od rozhraní nebo průchodu dopadající vlny rozhraním. Všechna prostředí jsou považována za homogenní, izotropní a absorbující.



Obrázek 1-2 Odraz a lom elektromagnetické vlny na materiálovém rozhraní [12]

Pro odraženou vlnu platí

$$\sin \theta_i = \sin \theta_r \quad (1-6)$$

Kde θ_i označuje úhel, který svírá dopadající paprsek a normála k rozhraní. Analogicky θ_r označuje úhel mezi odraženým paprskem a normálou k rozhraní. Pro vlnu prošlou rozhraním platí Snellův zákon

$$N_1 \sin \theta_i = N_2 \sin \theta_t \quad (1-7)$$

Kde N_1 a N_2 jsou komplexní indexy lomu jednotlivých rozhraní a θ_t označuje úhel, který svírá prošlý paprsek s normálou k rozhraní. Všechny symboly zavedené v této části jsou znázorněny na obrázku 1-2. Dopadající, odražený a prošlý paprsek leží v jedné rovině, která je kolmá k rozhraní. Tuto rovinu nazýváme rovinou dopadu.

Označme dopadající vlnu E_i a odraženou vlnu E_r . v případě aproximace dokonale hladkých povrchů lze průběh elektromagnetického pole v blízkosti dvou polonekonečných rozhraní určit z požadavku na spojitost tečných složek vektorů elektrické intenzity \mathbf{E} a intenzity magnetického pole \mathbf{H} . Z definice komplexní amplitudy odrazivosti r_s pro s-polarizaci (polarizace kolmá k rovině dopadu) a komplexní amplitudy odrazivosti r_p

pro p polarizaci (polarizace ležící v rovině dopadu) a s využitím Snellova zákona dostaneme Fresnelovy reflexní koeficienty ve tvaru

$$r_s = \frac{E_{rs}}{E_{is}} = \frac{N_1 \cos(\theta_1) - N_2 \cos(\theta_2)}{N_1 \cos(\theta_1) + N_2 \cos(\theta_2)} \quad (1-8)$$

$$r_p = \frac{E_{rp}}{E_{ip}} = \frac{N_1 \cos(\theta_2) - N_2 \cos(\theta_1)}{N_1 \cos(\theta_2) + N_2 \cos(\theta_1)} \quad (1-9)$$

V případě studia systémů obsahujících vyšší počet rozhraní (vrstev) je pro odvození Fresnelových koeficientů pro amplitudovou odrazivost r_p a r_s výhodné použít Jonesův maticový formalismus. Návod pro výpočet Fresnelových koeficientů pro systém obsahující libovolný počet vrstev je uveden například v monografii [8].

1.4 Speciální případy polarizačních stavů

Speciální případy polarizačních stavů je použito např.:

- Lineárně polarizované světlo, pro něhož platí $\psi_0 = \pi/4$, $\Delta_0 = 0$.
- Lineárně polarizované světlo, pro něhož platí $\psi_0 = \pi/4$, $\Delta_0 = \pi$.
- Kruhově polarizované světlo, pro něhož platí $\psi_0 = \pi/4$, $\Delta_0 = \pi/2$.
- Kruhově polarizované světlo, pro něhož platí $\psi_0 = \pi/4$, $\Delta_0 = -\pi/2$.
- Elipticky polarizované světlo, pro něhož ψ_0 a Δ_0 nabývají libovolné hodnoty různé od předchozích.

Elipsometrické parametry ψ_0 a Δ_0 , které jsou měřeny analyzátozem při úhlu dopadu svazku na vzorek rovném 90° , tedy v přímém neodraženém svazku [10].

1.5 Fresnelovy vztahy

Fresnelovy rovnice (případně Fresnelovy vzorce) udávají intenzitu odraženého a lomeného světla.

Pokud nedochází k úplnému odrazu, určitá část nepolarizovaného světla se od optického prostředí (vody, skla, atd.) odráží, zatímco zbývající část do prostředí vstupuje a lomí se.

Hodnoty koeficientů odrazu záleží na polarizaci dopadajícího světla. Rozlišujeme polarizaci s a p . Při s polarizaci je vektor elektrické intenzity dopadajícího světla kolmý na rovinu dopadu, v případě p polarizace je naopak součástí této roviny. Rovinou dopadu nazýváme rovinu, která obsahuje všechny tři paprsky (dopadající, lomený a odražený).

Zajímavostí p polarizace je skutečnost, že při určitém úhlu, Brewsterově úhlu, se všechno světlo lomí, intenzita odraženého svazku je v tomto případě nulová.

Nechť jsou indexy lomu prostředí n_1, n_2 (světlo vstupuje prostředím o indexu n_1). Dále označme postupně $\theta_i, \theta_r, \theta_t$ úhel dopadu, odrazu a lomu. Pak pro koeficienty odrazu (reflexe) R_s, R_p platí

$$R_s = \left[\frac{n_1 \cos(\theta_i) - n_2 \cos(\theta_t)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_2 \cos(\theta_t)} \right]^2 = \left[\frac{n_1 \cos(\theta_i) - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}}{n_1 \cos(\theta_i) + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}} \right]^2 \quad (1-10)$$

$$R_p = \left[\frac{n_1 \cos(\theta_t) - n_2 \cos(\theta_i)}{n_1 \cos(\theta_t) + n_2 \cos(\theta_i)} \right]^2 = \left[\frac{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2} - n_2 \cos(\theta_i)}{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2} + n_2 \cos(\theta_i)} \right]^2 \quad (1-11)$$

Koeficienty udávají poměr intenzity odraženého a dopadajícího svazku. Pokud nás naopak zajímá, kolik světla prošlo, tedy koeficient T (transmise), pak jej určíme jako $T = 1 - R$ pro každou z polarizací.

Pokud na rozhraní dopadá světlo nepolarizované, tak koeficient odrazivosti může být určen jako

$$R = \frac{R_s + R_p}{2} \quad (1-12)$$

Speciálním případem je pak situace kdy světlo dopadá na rozhraní kolmo, tedy v případech, kdy všechny úhly $\theta_i, \theta_r, \theta_t$ jsou nulové. Fresnelovy rovnice pak nezávisí na polarizaci a s využitím předchozího výrazu pro nepolarizované světlo nabývají tvaru [12].

$$R_p = \left[\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right]^2 = R_s = R \quad (1-13)$$

2 ELIPSOMETRIE

Elipsometrie měří změnu polarizačního stavu svazku polarizovaného světla odraženého od povrchu. Následně vyhodnocuje elipsometrické parametry ψ a Δ .

2.1 Základní rovnice elipsometrie

Elipsometrický úhel Δ , což je fázový rozdíl, byl zaveden v rovnici elipsy. Pokud dále zavedeme elipsometrický úhel ψ , tak je možné tyto elipsometrické úhly ψ a Δ svázat s reflexními koeficienty r_p a r_s pomocí vztahu označovaného jako základní rovnice elipsometrie

$$\tan \psi e^{i\Delta} = \rho \quad (2-1)$$

kde

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} \quad (2-2)$$

Zatímco hodnota úhlu ψ je určena jednoznačně ze vztahu $\tan \psi = \frac{E_{x0}}{E_{y0}}$, pro úhel Δ platí rovnosti $\cos(\Delta) = \cos(360^\circ - \Delta)$ a $\cos(\Delta) = \cos(-\Delta)$. Libovolné hodnoty úhlu Δ tak lze použitím těchto rovností zapsat pomocí intervalu $(0^\circ, 180^\circ)$ [12].

2.2 Přímý výpočet optických konstant z elipsometrických úhlů ψ a Δ

Přímý výpočet optických konstant n , k z naměřených elipsometrických úhlů ψ a Δ je možný pouze při studiu nejjednoduššího možného systému, kterým je jedno optické rozhraní. Optické konstanty pak lze získat řešením rovnice

$$N_s = N_a \tan(\theta_i) \sqrt{1 - \frac{4\rho \sin^2(\theta_i)}{(\rho+1)^2}} \quad (2-3)$$

kde N_a je komplexní index lomu okolí, N_s je komplexní index lomu substrátu, θ_i je úhel dopadu a ρ je získáno z rovnice $\rho = \frac{r_p}{r_s}$ [12].

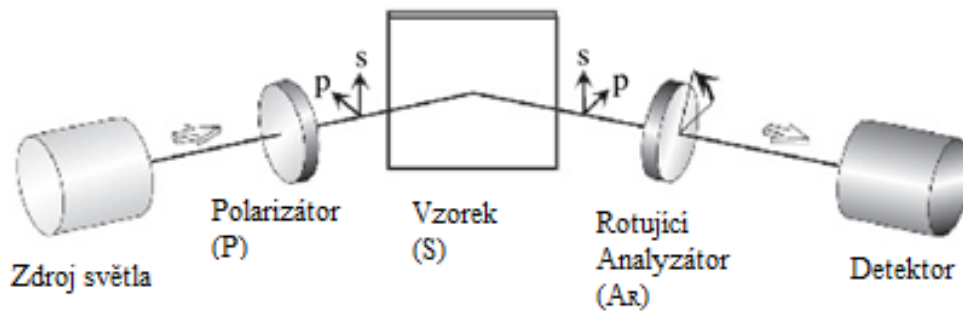
2.3 Vývoj měřících přístrojů od minulosti po současnost

Až do počátků sedmdesátých let minulého století se pro elipsometrické měření používala metoda nazývaná „nulová elipsometrie“. Takové přístroje se dnes již používají jen pro zobrazovací elipsometrii. Spektrální elipsometrické přístroje, které jsou nyní používány, mohou být rozděleny do dvou hlavních kategorií. Tedy na přístroje, které používají rotujících optických prvků, a na přístroje, které používají fotoelastický modulátor. Elipsometrické přístroje s otočným optickým prvkem lze dále dělit na rotující analyzátor (RAE) a na rotující kompenzátor (RCE). V dnešní době byla spektroskopická elipsometrie rozšířena i do infračervené oblasti spektra. Kromě toho byly vyvinuty metody elipsometrického stanovení celé Müllerovy matice, což umožnilo kompletní analýzu anizotropních materiálů [8].

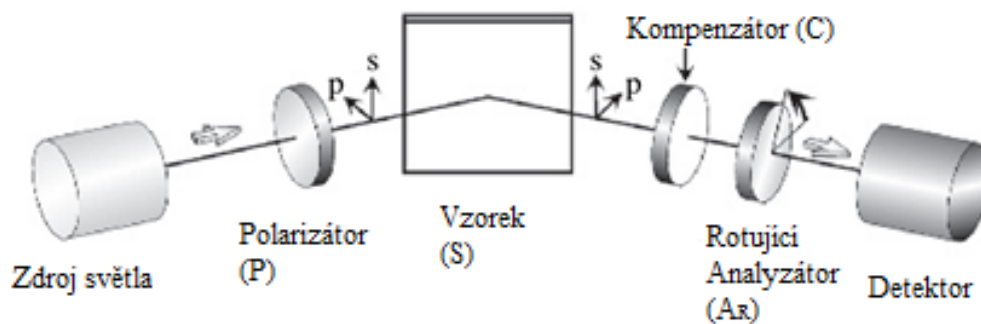
2.3.1 Měřicí metody v elipsometrii

Obrázek 2-1 ukazuje schematické diagramy elipsometrických prostředků, které se velmi využívají. Jejich stavba se vyjádří pomocí symbolů optických elementů; elipsometr s rotačním analyzátozem je například popsán jako PSA_R . Kde P, S a A reprezentují polarizátor, vzorek a analyzátor v daném pořadí a dolní index R signalizuje, že se analyzátor nepřetržitě otáčí [8].

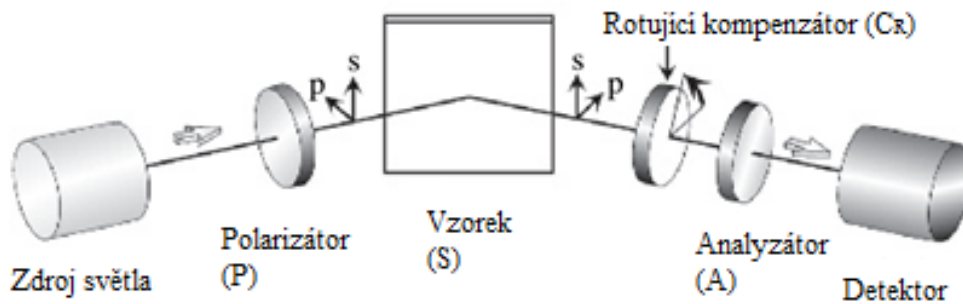
(a) Elipsometr s rotujícím analyzátořem (PSA_R)



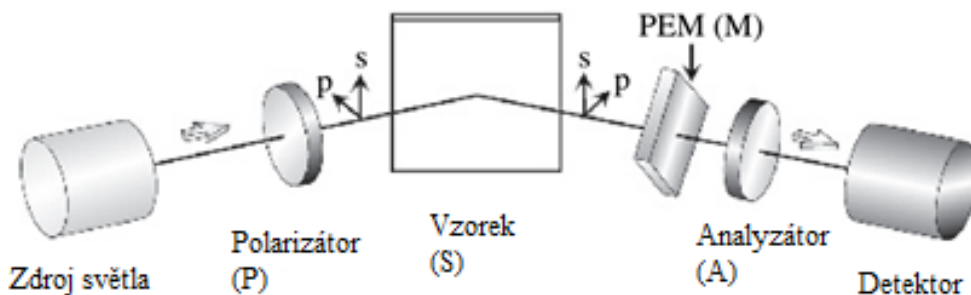
(b) Elipsometr s rotujícím analyzátořem a kompenzátořem (PSCA_R)



(c) Elipsometr s rotujícím kompenzátořem (PSCA)A



(d) Elipsometr s fázovou modulací (PSMA)



Obrázek 2-1 Optická konfigurace elipsometrických přístrojů: (a) elipsometr s rotujícím analyzátořem (RAE), (b) elipsometr s rotujícím analyzátořem a kompenzátořem, (c) elipsometr s rotujícím kompenzátořem (RCE), a (d) elipsometr s fázovou modulací (PME) [8].

2.3.2 Elipsometr s rotujícím analyzátozem RAE

Elipsometrická měření se mohou vyjádřit Jonesovými a Müllerovými maticemi. Zde popíšeme elipsometr s rotujícím analyzátozem pomocí jednoduché Jonesovy matice. Elipsometrický přístroj s konfigurací PSA_R je vyjádřen jako

$$L_{out} = AR(A)SR(-P)PL_{in} \quad (2-4)$$

kde L_{out} reprezentuje Jonesův vektor světla detekovaný detektorem světla a je dán vztahem [8]

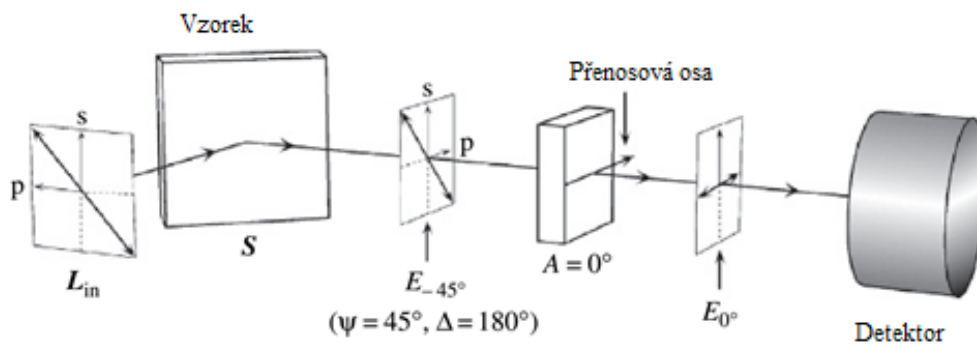
$$L_{out} = \begin{pmatrix} E_A \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2-5)$$

Pokud je vstupující světlo popsáno vektorem

$$L_{in} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2-6)$$

můžeme psát následující rovnici

$$\begin{bmatrix} E_A \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \psi \exp(i\Delta) & 0 \\ 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos P & -\sin P \\ \sin P & \cos P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-7)$$



Obrázek 2-2 Schematický diagram elipsometru s rotujícím analyzátozem (RAE). Na tomto obrázku je světlo odražené od vzorku lineárně polarizované pod úhlem -45° ($\psi = 45^\circ, \Delta = 180^\circ$) [8].

2.3.3 Elipsometr s rotujícím analyzátozem a s kompenzátozem PSCA_R

U elipsometru s rotujícím analyzátozem se Stokesův parametr S_3 neměří a to vede k tomu, že chyba měření pro $\Delta \cong 0^\circ$ a 180° vzroste. Pokud bychom zavedli kompenzátoz, problém bychom potlačili. Proto se v posledních letech stává RAE s kompenzátozem stále populárnější. Užitím Jonesova vektoru a matice znázorněné v rovnici 2-4, můžeme RAE s kompenzátozem, tedy PSCA_R konfiguraci, popsat následovně [8]

$$L_{out} = AR(A)CSR(-P)PL_{in} \quad (2-8)$$

kde C je vyjádřeno

$$C = \begin{bmatrix} \exp(-i\delta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

Pokud bude úhel polarizátoru $P = 45^\circ$, můžeme zapsat rovnici 2-8 vztahem:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_A \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-i\delta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \psi \exp(i\Delta) \\ \cos \psi \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \psi \exp[i(\Delta - \delta)G] \\ \cos \psi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-10)$$

2.3.4 Elipsometr s rotačním kompenzátozem RCE

Signál z elipsometru PSC_RA konfigurace můžeme vyjádřit obdobně, jako v rovnici (2-4):

$$L_{out} = AR(A)R(-C)CR(C)SR(-P)PL_{in} \quad (2-11)$$

Tato rovnice může být snadno získána vložení $R(-C)CR(C)$ do rovnice 2-4. Zde budeme předpokládat, že úhel pro polarizátor je $P = 45^\circ$ a pro analyzátoz pak úhel $A = 0^\circ$, protože přímě rozepsána rovnice 2-11 vede ke složitému výrazu. Pokud je vstupující světlo popsáno vektorem

$$L_{in} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2-12)$$

můžeme psát následující rovnici

$$\begin{bmatrix} E_A \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos C & -\sin C \\ \sin C & \cos C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\delta) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos C & \sin C \\ -\sin C & \cos C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \psi \exp(i\Delta) \\ \cos \psi \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

Výchozí osa kompenzátozu je ve směru p-polarizace a normovací konstanta je vypuštěna. Dosazením $\delta = 90^\circ$ do rovnice 2-13 dostaneme

$$E_A = (\cos C^2 - i \sin C^2) \sin \psi \exp(i\Delta) + (1 + i) \cos C \sin C \cos \psi \quad (2-14)$$

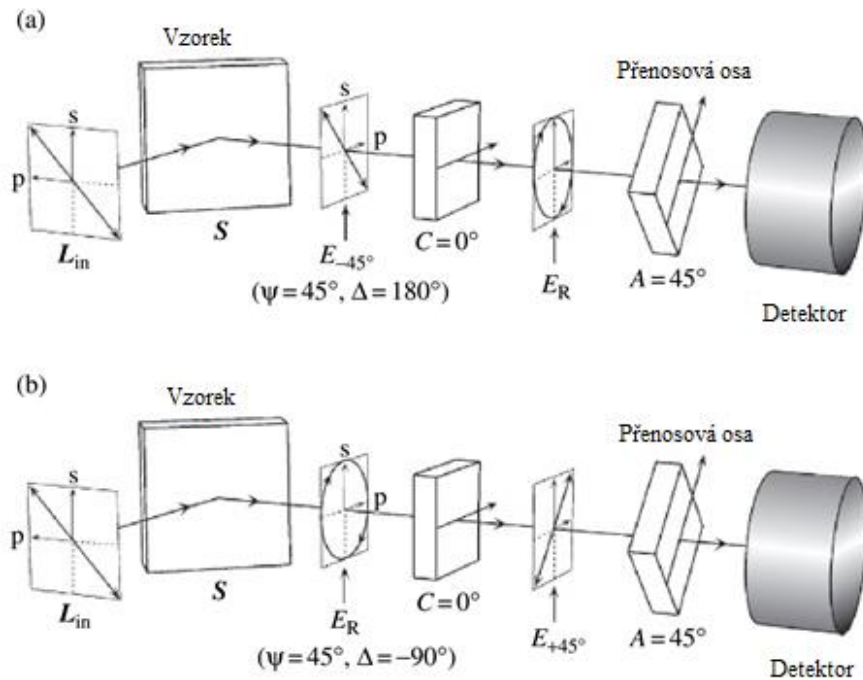
Z rovnice získáme intenzitu světla detekovanou pomocí detektoru světla následovně

$$I = |E_A|^2 = I_0(2 - \cos 2\psi + 2 \sin 2\psi \sin \Delta \sin 2C - \cos 2\psi \cos 4C + \sin 2\psi \cos \Delta \sin 4C) = I_0(2 + S_1 - 2S_3 \sin 2C + S_1 \cos 4C + S_2 \sin 4C) \quad (2-15)$$

Z rovnice je patrné, že pokud budeme kompenzátor otáčet o úhel C , můžeme S_{1-3} stanovit jako koeficienty Fourierovy transformace. Z rovnice 2-15 také vyplývá, že když $A = 0^\circ$, $\cos 2C$ se vyloučí. Obecně je rovnice popsána více obecným vzorcem

$$I(t) = I_0(1 + \alpha_2 \cos 2\omega t + \beta_2 \sin 2\omega t + \alpha_4 \cos 4\omega t + \beta_2 \sin 4\omega t) \quad (2-16)$$

kde úhel rotace kompenzátoru je v rovnici označen jako $C = \omega t$ a α, β jsou normalizované Fourierovy koeficienty [8].



Obrázek 2-3 Schematický diagram elipsometru s rotujícím kompenzátořem (RCE), když odražená vlna od vzorku je za (a) lineárně polarizovaná v -45° ($\psi = 45^\circ, \Delta = 180^\circ$) a za (b) pravotočivě kruhová polarizace ($\psi = 45^\circ, \Delta = -90^\circ$) [8].

2.3.5 Elipsometr s fázovou modulací PME

Pomocí Jonesových matic lze přístroj v konfiguraci PME s PSMA popsat výrazem (2-15):

$$L_{out} = AR(A)R(-M)MR(M)SR(-P)PL_{in} \quad (2-17)$$

Je-li úhel polarizátoru $P = 45^\circ$ a $L_{in} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$, dostaneme

$$\begin{bmatrix} E_A \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(A-M) & \sin(A-M) \\ -\sin(A-M) & \cos(A-M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\delta) \end{bmatrix} \times \\ \begin{bmatrix} \cos M & \sin M \\ -\sin M & \cos M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \psi \exp(i\Delta) \\ \cos \psi \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

V této rovnici byla proporciální konstanta zanedbána a užito $R(A)R(-M) = R(A-M)$. Rozepsání výše popsané rovnice vede ke komplikovanému výrazu podobně jako v případě konfigurace RCE. Pokud však konfiguraci PME nastavíme úhel mezi analyzátozem a fotoelastickým modulátorem $A-M = 45^\circ$, z rovnice (2-1) dostaneme:

$$E_A = [\cos M - \sin M \exp(i\Delta)] \sin \psi \exp(i\Delta) + [\cos M \exp(i\Delta) + \sin M] \cos \psi \quad (2-19)$$

Ve výše uvedené rovnici není proporciální konstanta vyčíslena. Z rovnice je pak intenzita světla v konfiguraci PSMA dána vztahem:

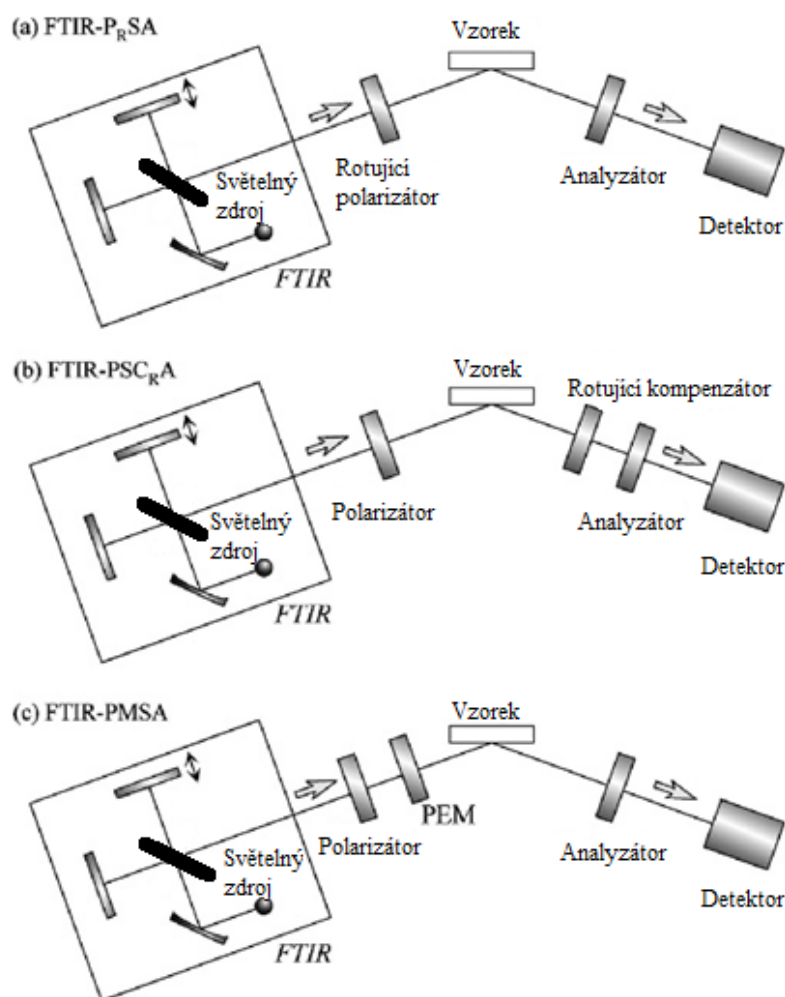
$$I = |E_A|^2 = \\ I_0 [1 + \sin 2\psi \sin \Delta \sin \delta + (\cos 2\psi \sin 2M + \sin 2\psi \cos \Delta \cos 2M) \cos \delta] = \\ I_0 [1 - S_3 \sin \delta + (-S_1 \sin 2M + S_2 \cos 2M) \cos \delta] \quad (2-20)$$

Jak lze z rovnice 2-20 vidět, Stokesovy parametry S_2 a S_3 se měří, když $M = 0^\circ$, a pro $M = 45^\circ$ pak zbývající S_1 a S_2 . Je to podobné, jako u konfigurace RAE s kompenzátozem [8].

2.3.6 Infračervené spektroskopické elipsometry

Až do počátku osmdesátých let dvacátého století se pro infračervenou spektroskopickou elipsometrii používal monochromátor s infračerveným světelným zdrojem. V roce 1981 Röseler představil první elipsometrický přístroj, do kterého včlenil Fourierovský infračervený spektrofotometr (FTIR).

Tento přístroj vycházel z elipsometru s rotujícím polarizátorem, tedy s P_{RSA} konfigurací, a později byl několikrát modifikován až na FTIR okolo roku 1993 [8].



Obrázek 2-4 Optické konfigurace elipsometrů v infračerveném spektru: (a) elipsometr s rotujícím polarizátorem (FTIR-P_RSA), (b) elipsometr s rotujícím kompenzátořem (FTIR-PSC_RA), (c) elipsometr s fázovou modulací (FTIR-PMSA). Tyto přístroje využívají Fourierovský infračervený spektrofotometr (FTIR) [8].

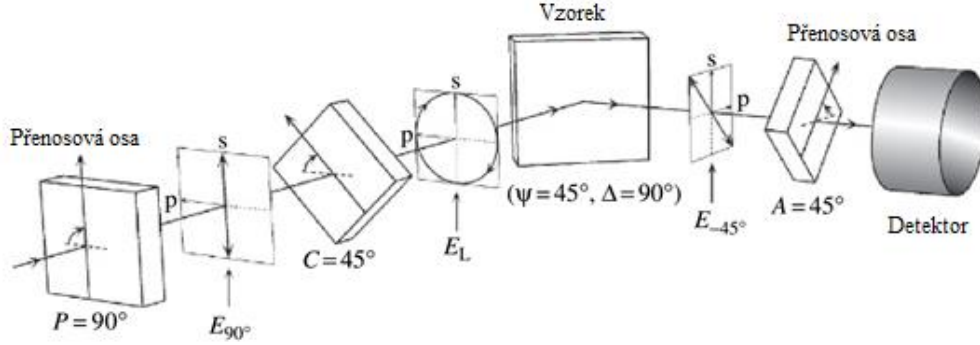
2.3.7 Nulová elipsometrie a zobrazovací elipsometrie

Historicky byla nulová elipsometrie základem prvního původně vyvinutého elipsometrického přístroje. Princip měření tímto přístrojem je odlišný než u dosud popsaných elipsometrů. Obrázek 2-5 ilustruje příklad měření nulovým elipsometrem. Jak je ukázáno na obrázku, optická konfigurace nulového elipsometru je úplně stejná jako u konfigurace RCE, respektive PCSA konfigurace. V této metodě se však polarizátor a analyzátor otáčí tak, aby detekované světlo bylo nulové a hodnoty (ψ , Δ) se určují z úhlů rotace polarizátoru a analyzátoru. Pokud tedy posuzujeme intenzitu světla lidským okem, měření lze provádět bez použití elektrických zařízení. To je důvod, proč Drude byl schopen zkonstruovat elipsometr před více než sto lety.

Pokud využijeme Jonesovy matice, nulový elipsometr představený na obrázku (2-5) je popsán

$$L_{out} = AR(A)SR(-C)CR(C)R(-P)PL_{in} \quad (2-21)$$

což je PSCA konfigurace.



Obrázek 2-5 Schematický diagram nulového elipsometru. Na tomto obrázku se předpokládá, že hodnoty vzorku jsou $\psi = 45^\circ$ a $\Delta = 90^\circ$. V tomto měření zjištěná intenzita světla je nulová [8].

Proto rovnice sama je stejná jako u RCE, přestože je kompenzátor v rovnici (2-11) dosazen za vzorek. Zde se pro vyjádření Jonesovy matice vzorku použije výraz

$$S = \begin{bmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

Po dosazení dostáváme:

$$E_A = r_p \cos A [\cos C \cos(P - C) - \rho_c \sin C \sin(P - C)] + r_s \sin A [\sin C \cos(P - C) + \rho_c \cos C \sin(P - C)] \quad (2-23)$$

kde ρ_c představuje fázi posunu kompenzátoru [$\rho_c = \exp(-i\delta)$]. Ve výše uvedené rovnici $R(C - P) = R(C)R(-P)$ bylo převedeno na $R(P - C)$ s použitím vztahu $\sin(C - P) = -\sin(P - C)$. Jak je uvedeno výše, detekovaná intenzita světla je v nulové elipsometrii nulová ($E_A = 0$). Navíc úhel natočení a fázový posun kompenzátoru jsou zpravidla 45° , respektive 90° . Proto dosazením $E_A = 0$, $C = 45^\circ$ a $\delta = 90^\circ$ ($\rho_c = -i$) do rovnice (2-23), získáme

$$\rho \equiv \frac{r_p}{r_s} = -\tan A \frac{1 - i \tan(P - 45^\circ)}{1 + i \tan(P - 45^\circ)} \quad (2-24)$$

jelikož

$$\exp(-i2\theta) = \frac{1 - i \tan \theta}{1 + i \tan \theta} \quad (2-25)$$

a $\rho = \tan \psi \exp(i\Delta)$, získáme následující rovnici

$$\tan \psi \exp(i\Delta) = \tan -A \exp[i(-2P + 90^\circ)] \quad (2-26)$$

Podle toho se (ψ, Δ) pak vyjádří následovně

$$\begin{aligned} \psi &= -A \quad (-A > 0) \\ \Delta &= -2P + 90^\circ \end{aligned} \quad (2-27)$$

Proto v nulové elipsometrii jsou hodnoty (ψ, Δ) určeny úhlem rotace (P, A) , kde $E_A = 0$. Pokud se $A' = 180^\circ$ a $P' = P + 90^\circ$, máme další řešení. Nahrazením A' a P' získáme

$$\begin{aligned} \psi &= A \quad (A > 0) \\ \Delta &= -2P - 90^\circ \end{aligned} \quad (2-28)$$

Když $C = -45^\circ$, pak máme dvě řešení. Proto jsou celkem čtyři nastavení, která splňují podmínku, že $E_A = 0$. Přesné měření se může provádět průměrováním těchto čtyř hodnot.

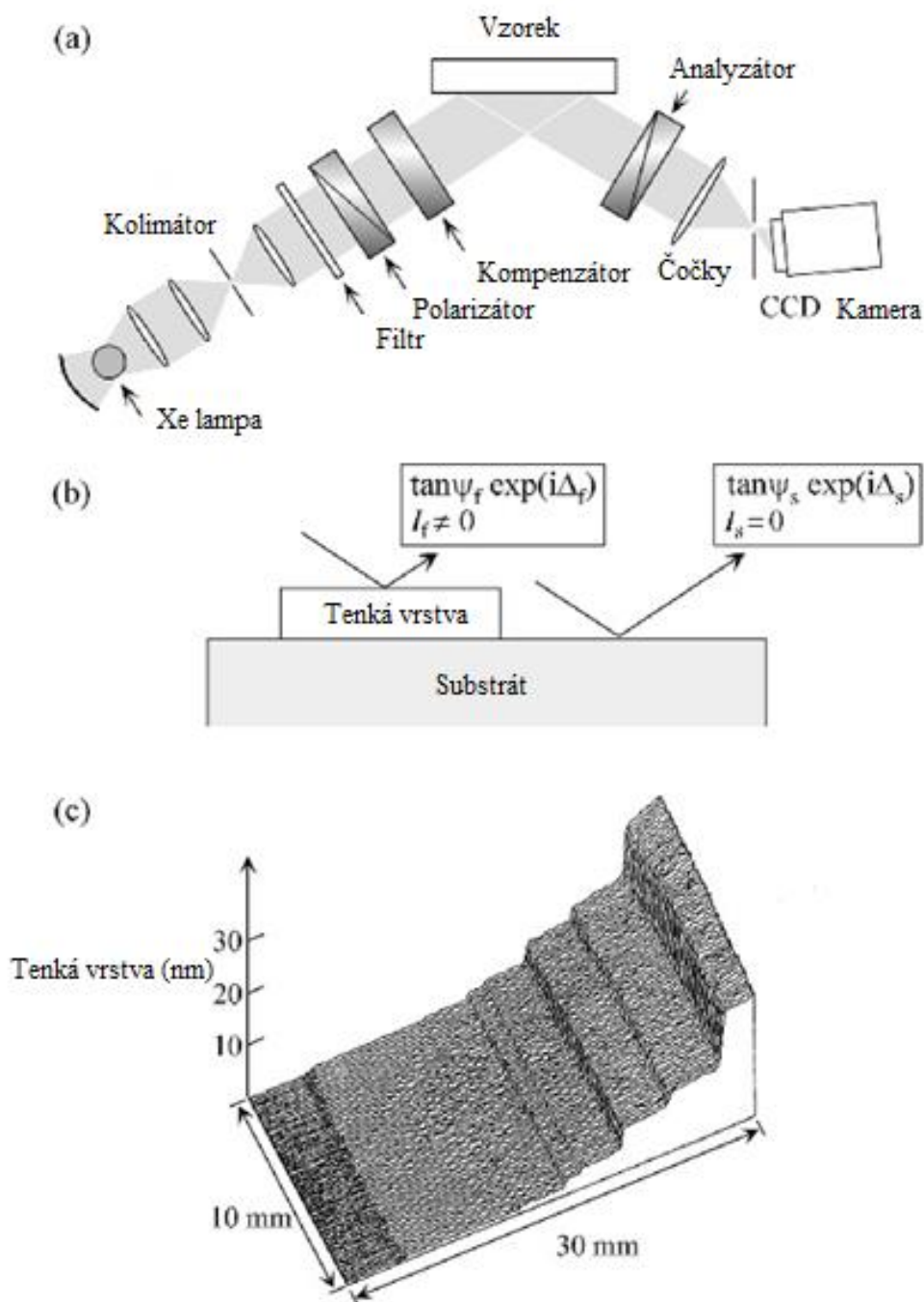
Obrázek 2-5 ukazuje příklad měření, kdy řešení je dáno rovnicí 2-28. Zde předpokládáme, že parametry (ψ, Δ) vzorku jsou $(45^\circ, 90^\circ)$. S těmito hodnotami pak z rovnice 2-28 získáme $A = 45^\circ$ a $P = 90^\circ (-270^\circ)$. V tomto případě polarizátor vytvoří lineární polarizaci ve směru s-polarizace (E_{90°), která se kompenzátozem převede na kruhovou levotočivou polarizaci (E_L), jak je zobrazeno na obrázku 2-5. Na obrázku 2-5 je pak kruhová polarizace (E_L) změněna odrazem od vzorku na lineární polarizaci -45° . Připomínáme, že $\Delta = 90^\circ$ vyjadřuje $\delta_{rp} - \delta_{rs} = 90^\circ$ a proto fáze s-složky při odrazu od vzorku zmenší o 90° oproti složce p .

Ačkoliv rozdíl fáze (E_L) je 90° , po odrazu od vzorku se δ změní na 180° . Orientace roviny lineární polarizace, která vznikne po odrazu od vzorku, je kolmá k ose propustnosti analyzátoru a následně detekovaná intenzita světla je nulová, tak jak očekáváme. V nulové elipsometrii se proto polarizátor natočí tak, aby světlo po odrazu od vzorku bylo lineárně polarizované.

Mělo by se zdůraznit, že nulový elipsometr je stále nejpresnějším přístrojem, poněvadž tento přístroj nemá různé detekční chyby. Avšak tato metoda je pro spektrální měření dost zdlouhavá, protože se musí stanovit dvojice úhlů (P, A) pro každou vlnovou délku.

Tato nulová metoda se používá pro zobrazovací elipsometrii, která umožňuje měření ve dvojrozměrné rovině.

Obrázek 2-6 (a) zobrazuje schematické zobrazení elipsometrem, jehož konfigurace je PCSA. Na tomto přístroji je rovnoběžným svazkem osvětlen vzorek a intenzita odraženého svazku se měří pomocí CCD kamery. Vlnová délka záření se volí filtrem. Jak zobrazuje obrázek 2-6 (a), CCD kamera je mírně skloněna, aby se získal ostrý obraz povrchu vzorku.



Obrázek 2-6 (a) Schematický diagram zobrazovacího elipsometru (PCSA konfigurace), (b) odraz světla na substrátu částečně potažené tenkou vrstvou, (c) obraz kroku struktury získané ze zobrazovacího elipsometru z (a) [8].

Obrázek 2-6 (b) zobrazuje měřící princip elipsometrického zobrazení. Představte si, že kolimované světlo osvětluje celý povrch substrátu částečně pokrytého tenkou vrstvou. Předpokládáme, že polarizační stav světelných vln odražených tenkou vrstvou a substrátem je popsán pomocí $\tan \psi_f \exp(i\Delta_f)$, respektive $\tan \psi_s \exp(i\Delta_s)$. Jestliže nastavíme úhly polarizátoru a analyzátoru (ψ_s, Δ_s) s použitím podmínek vyplývajících z rovnic 2-27 a 2-28, pak pozorovaná intenzita světla odraženého od substrátu bude nulová ($I_s = 0$). Přitom intenzita světla odraženého od tenké vrstvy bude nenulová ($I_f \neq 0$), neboť polarizační stav světla bude jiný ($\psi_s \neq \psi_f$ a $\Delta_s \neq \Delta_f$). Jestliže $\psi_s \sim \psi_f$ a $\Delta_s \sim \Delta_f$, I_f bude malé, protože $I_s \sim I_f$. Avšak I_f vzroste, když $\psi_s \neq \psi_f$ a $\Delta_s \neq \Delta_f$. Proto u tohoto měření detekovaná intenzita světla kolísá v závislosti na hodnotě (ψ_f, Δ_f) . Hodnoty (ψ, Δ) se mění signifikantně s tloušťkou vrstvy. Dle toho se naměřená intenzita může s pomocí číselné simulace a kalibrace v závislosti na tloušťce vrstvy převést na tloušťku.

Jinak řečeno, variace tloušťky je měřena jako variace intenzity v elipsometrickém zobrazení. Když je tloušťka vrstvy malá (< 5 nm), tloušťka tenké vrstvy může být odhadnuta přímo z intenzity světla použitím $I_f = I_0 d^2$, kde I_0 je konstanta úměrnosti a d je tloušťka povrchové tenké vrstvy.

Když se obvyklé nulové měření provede na povrchu tenké vrstvy, dá se vypočítat komplexní index lomu této tenké vrstvy.

Obrázek 2-6 (c) zobrazuje obrázek struktury získané při elipsometrickém zobrazení na obrázku 2-6 (a) [8].

2.4 Přístrojové vybavení pro elipsometrii

Obecně platí, že spektroskopické elipsometry si vyžadují speciální péči. Pro korektní elipsometrická měření jsou nezbytné různé kalibrace a korekce chyb [8].

2.5 Vyhodnocení

Vyhodnocení elipsometrických měření, což je nalezení parametrů vzorku, který byl změřen, je obecně neřešitelná úloha. Vždy se musí vycházet z vhodného modelu a i pak je obvykle třeba z nekonečné (spočetné) množiny řešení vybrat to správné.

Elipsometrická metoda všeobecně špatně konverguje v okolí kritických tlouštěk rovných celistvému násobku periody. Nastane-li takový případ, je možno měření zopakovat s jiným úhlem dopadu nebo s jinou vlnovou délkou.

Právem se očekává, že metody pracující s několika úhly dopadu anebo více vlnovými délkami budou přinášet mnohem více elipsometrických údajů, z nichž je možno vyvodit více informací o studovaném vzorku. Každá komplexnější více-parametrická metoda vyhodnocení zpracovávající větší objem vstupních dat vyžaduje znalost rychlého výpočtu derivací soustav tenkých vrstev podle jejich indexů lomu nebo tloušťek.

Tento, nikoliv již přímočarý a snadný výpočet, ukazuje, jaké principiální záludnosti jsou v elipsometrických metodách obsaženy, a to především kvůli nejistotě v určení parametru A a periodickému charakteru interference světla v soustavách tenkých vrstev.

Přesto vývoj a výzkum dospěl tak daleko, že současné spektroskopické elipsometry poskytují během krátké doby dokonce spektrální závislosti elipsometrických parametrů, což ve spojení s účinným programovým vybavením a rychlými počítači nové generace dovoluje řešit řadu úloh v reálném čase, jako je například monitorování vlastností tenkých vrstev v průběhu jejich napařování.

Elipsometrie našla významné uplatnění v průmyslu polovodičů, kde umožňuje rychlou a dostatečně přesnou kontrolu růstu tenkovrstvých struktur [8, 10].

2.6 Odhad chyby měření elipsometrem

Chyby elipsometrických měření mohou být předmětem náročného, nikdy nekončícího výzkumu pokaždé, když se objeví nový požadovaný model rekonstrukce fyzikálních veličin ze změřených elipsometrických parametrů. Pro vysvětlení výsledků měření je téměř vždy nezbytná podrobná znalost hmotného prostředí a testovacího elektromagnetického pole účastnícího se vzájemné interakce, včetně geometrického uspořádání a elektronického zpracování signálu.

Nejistota v určení elipsometrických parametrů, z nichž se neznámé fyzikální veličiny mají odvodit, může plynout z nepřesné znalosti polarizačního stavu dopadajícího záření. Z řady vlivů působících na přesnost měření, lze uvést:

- a) Požadovaná kruhová polarizace není téměř nikdy ideální, totéž lze říci o polarizaci lineární, u níž bychom například mohli požadovat, aby vzhledem k rovině dopadu byla orientována tak, že podíl obou ortogonálních složek polarizace je stejný. Polarizační stav záření dopadajícího nebo odraženého svazku výrazně ovlivňují nečistoty na čelech polarizujících hranolů ať již ve funkci polarizátoru nebo analyzátoru, stejně jako případné čtvrt vlnové destičky.

- b) Úhel dopadu je znám nedokonale. Změna polohy stolku, případně jeho pohyb v horizontální rovině, spojený s otáčením kolem dvou kolmých os ležících v předpokládané rovině dopadu, může vést k nezanedbatelným změnám jak v úhlu dopadu, tak ve změně polarizačního stavu (nejde-li o nepolarizované nebo kruhově polarizované světlo). Úhel dopadu je rovněž snadno a výrazně ovlivnitelný změnou polohy laserové trubice.
- c) Na polarizační stav záření má vliv difrakce Gaussovského svazku na stěnách tubusů, jimiž prochází, případně na nečistotách všech ploch.
- d) Směr chodu svazku po průchodu analyzátozem závisí na úhlu natočení analyzátozem, výsledkem je, že svazek opisuje na detektoru kružnici. Tím se může stát, že se část zářivého toku svazku aperturou detektoru odcloní a znehodnotí tím měření. Zmenšení poloměru kruhového pohybu svazku po detektoru čočkou může vést rovněž ke zkreslení signálu v důsledku závislosti propustnosti čočky na lokálním úhlu dopadu, pokud není opatřena antireflexní vrstvou pro danou vlnovou délku a předpokládané úhly dopadu.
- e) Použitý analogově digitální převodník pracuje s omezeným rozsahem hodnot, což vede k chybám v důsledku kvantování.
- f) Detektor v kombinaci s analogově digitálním převodníkem vykazuje nenulový signál velikost 1-4 bity, i když na něj žádný světelný výkon nedopadá. Toto „temné pozadí“ může mít v některých případech značný vliv na přesnost určení elipsometrických parametrů.
- g) Pro správné určení elipsometrických parametrů je třeba znát s dostatečnou přesností orientaci analyzátozem v okamžiku každého odečtu signálu, zvláště pak v okamžiku odečtu prvního měření. Tento „úhel nastavení analyzátozem“ je jedním z parametrů elipsometru, které se musí znát s co nejvyšší přesností.
- h) Teoretická analýza předpokládá, že měření signálu bylo provedeno v nekonečně krátkém okamžiku. Nenulová délka doby měření, během níž se signál integruje, může přesnost měření ovlivnit.

- i) Na přesnost má rovněž vliv rozložení okamžiků odečtu signálu v posloupnosti jednoho měření. Ideální rovnoměrné rozdělení například po pěti stupních je teoretickou fikcí, ve skutečnosti jsou odečty nerovnoměrné.
- j) Na přesnost má značný vliv kolísání výkonu laseru během jednoho měření (jedné otočky analyzátoru); vzhledem k velikosti časové konstanty detektoru a elektronického vyhodnocovacího obvodu se mohou projevit i případné rychlé změny výkonu laseru [10].

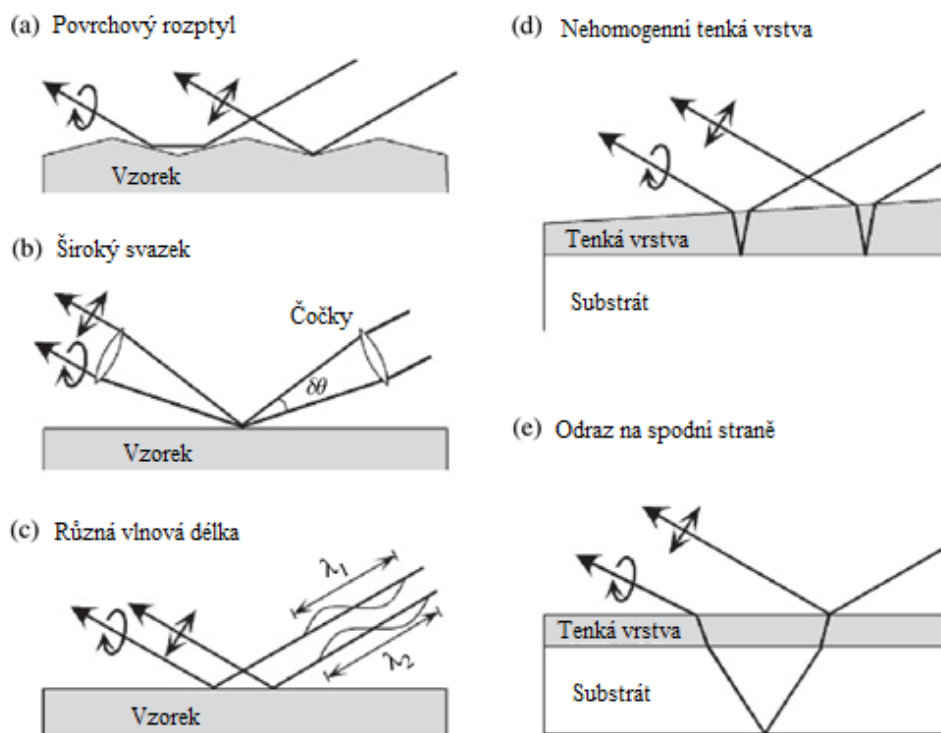
2.7 Depolarizační účinek vzorků

Pokud mají vzorky depolarizační efekt, úplně polarizované světlo použité pro měření se změní na částečně polarizované světlo. V tomto případě se chyby měření v konfiguraci RAE stávají docela velkými, protože přístroj předpokládá, že odražené světlo je zcela polarizované. Podobně když v metodě PME se měří pouze za použití jedné konfigurace, tj. když se S_1 nebo S_2 neměří, protože depolarizační účinek vzorků zvýší chybu měření. Struktury vzorků tedy také ovlivní přesnost a chybovost tohoto měření.

Můžeme shrnout fyzikální jevy, které generují částečně polarizované světlo při odrazu světla následovně:

- a) rozptyl na povrchu drsných vzorků,
- b) proměnný úhel dopadu kvůli nedokonalé kolimaci měřicího svazku,
- c) nemonochromatické světlo kvůli konečné spektrální šířce monochromátoru,
- d) nehomogenita tloušťky tenké vrstvy vytvořené na substrátu,
- e) zadní odraz, který nastane, když je absorpce světla substrátem velmi nízká.

Výše uvedené polarizační jevy jsou schematicky znázorněny na následujícím obrázku. Je zjevné, že k depolarizaci dojde v důsledku vzniku generování různých polarizačních stavů při odrazu světla. Takový jev se obecně označuje jako kvazi-depolarizace.[8]



Obrázek 2-7 Depolarizace dopadajícího světla způsobeného (a) povrchoým rozptylem, (b) širokým svazkem paprsku, (c) různou vlnovou délkou, (d) nehomogenní tenkou vrstvou a (e) odrazem na spodní straně [8].

3 MĚŘENÍ VZORKŮ NA ELIPSOMETRU

Pro měření vzorků bude použit elipsometr LEOI-44 od firmy Lambda Scientific Systems, Inc., jehož popis je v následující podkapitole, a který se řadí k nulovým elipsometrům.

3.1 Elipsometr LEOI-44

Elipsometr využívá náhodně polarizovaný svazek, který generuje helium-neonový laser. Tento svazek se stává lineárně polarizovaným po průchodu polarizátorem. Následuje průchod svazku čtvrtvlnnou destičkou, jejíž optická osa je orientována pod úhlem 45° a vlna se stává elipticky polarizovanou. Tento svazek se promítá na povrch tenké vrstvy vzorku. Stav polarizace dopadajícího paprsku je změněn po odrazu od vzorku, který zavádí fázový posun, kdy je opět lineárně polarizován. Rovina polarizace je následně detekována pootáčením analyzátoru, jak zobrazuje schematický obrázek 3-1 [11].

3.1.1 Technické parametry

Technické parametry udávané výrobcem pro přehlednost v tabulce 3-1 [11].

Rozsah měření	1 nm ~ 300 nm
Přesnost	< 1 nm
Rozsah úhlu	$30^\circ \sim 90^\circ$, chyba < $0,1^\circ$
Úhel Polarizátor/Analyzátor	$0^\circ \sim 180^\circ$
Úhlová stupnice	2° / dílek
Minimální čtení ze stupnice	$0,05^\circ$
Výška optického středu	152 mm
Průměr vymezené pracovní plochy	$\varnothing 50$ mm
Vnější rozměr	730 x 230 x 290 mm
Hmotnost	Cca. 20 kg

Tabulka 3-1 Technické parametry elipsometru LEOI-44 [11]

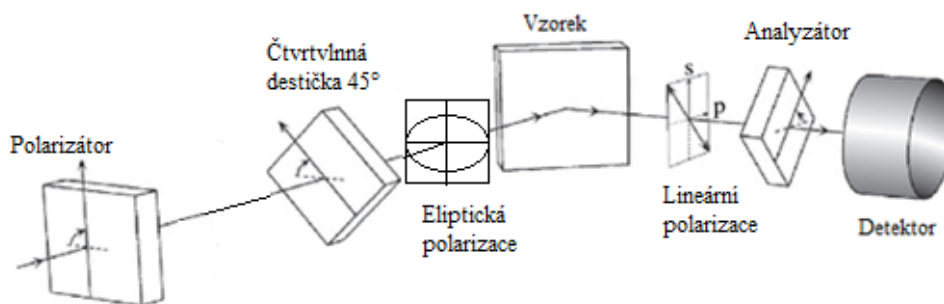
3.1.2 Popis

System se skládá ze tří hlavních částí, kterými jsou zdroj světla, detektor a hlavní přístroj. Jako součást instalace je pak přiložen vyhodnocovací program.

Zdrojem světla je helium neonový (He-Ne) laser o vlnové délce 632,8 nm, který se vyznačuje vysokou intenzitou a vynikající koherencí.

Samotný přístroj se pak skládá z polarizátoru, čtvrtvlnné destičky, vstupního tubusu, stolku pro vzorky, u kterého je možné měnit výšku pomocí mikrometrického šroubu, výstupního tubusu, analyzátoru a detektoru. Ten převádí optický signál na elektrický, který je zesílen a zobrazen analogovým měřidlem.

Na výstupním rameni je možné si pomocí sklopného zrcátka volit fotometrickou detekci nebo vizuální sledování stopy na matnici [11].



Obrázek 3-1 Schematický obrázek znázorňující optické prvky, přes něž postupuje světelný paprsek od zdroje světla až po detektor.

3.1.3 Nastavení

Před zahájením kalibrace si přečtěte nejdříve poznámky výrobce v kapitole 3.1.6 a pokyny při práci respektujte.

Umístěte systém na stole v laboratoři.

Sejměte černé krytky na ochranu otvorů tubusu vstupního ramene a laseru, a laser připevněte k vstupnímu rameni. K laserovému tubusu připojte tři vodiče (červený - bílá, modrá – černá a zelená – ochranný kabel).

Pomocí třížilového kabelu připojte fotodetektor se zesilovačem s použitím. K elektronické jednotce připojte síťovou šňůru.

Ověřte, zda-li jsou všechny přepínače uvolněny. Poté zapněte zesilovač a tím i laser.

Vyrovnejte optické dráhy na základě těchto postupů:

- 1) Vyrovnejte stolek pro vzorky. Vložte testovaný vzorek na stolek, osvětlete vzorek laserem tak, že šířící se odražený laserový paprsek se objeví na obrazovce (např. stěně) se vzdáleností větší než pět metrů. Otáčejte stolem pro vzorky a upravujte náklon stolku pomocí mikrometrických šroubů. Přitom

sledujte pohyb stopy svazku. Jakmile stopa přestane kroužit, je vzorek ustaven správně s horní plochou kolmo k ose rotace.

- 2) Nastavte výšku stolku tak, aby odrazil laserový paprsek do vstupní pupily, a aby odražená stopa svazku byla uprostřed kontrolního okénka (páčka v poloze „Visual“). Nyní stolek zaaretuje [11].

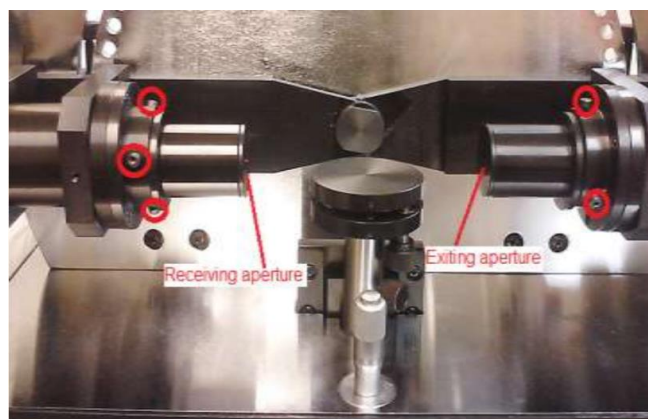
3.1.4 Kalibrace systému

System byl předem kalibrován a splnil stanovené výrobní specifikace, nicméně během přepravy mohlo dojít ke změně polohy komponent. Chcete-li zkontrolovat, zda systém je stále ještě seřízen, nastavte jak vstupní tak i výstupní rameno do horizontální polohy, zapněte laser a sledujte světelnou stopu v okénku, minimální intenzity by se mělo dosáhnout, když polarizátor bude natočen o 45° a analyzátor rovněž o 45° . Pokud se oba údaje liší, je třeba systém kalibrovat. Ke kalibraci systému můžete použít jednu z následujících možností.

- 1) Sklopte vstupní a výstupní rameno do vodorovné polohy a „Nulu“ stupnice nonia umístěte na rysku 90° polohy hlavní stupnice (na zadní straně desky). Zkontrolujte, zda laserový svazek prochází středem apertury. Pokud tomu tak není, upravte seřízením šesti šroubů držících laserovou trubici, až bude stopa na matnici kontrolního okénka nejintenzivnější.

V případě, že došlo k rozjustování a laserový svazek nevystupuje ze vstupního ramene nebo nelze jej zaměřit do vstupního otvoru výstupního ramene, postupujte podle následujících kroků:

- a) Sklopte vstupní a výstupní rameno tak, aby byla v jedné linii v horizontálním směru, viz obrázek 3-2.



Obrázek 3-2 Optické vyrovnání dráhy [11].

- b) V případě, že svazek nebude procházet výstupní aperturou, snažte se upravit polohu laseru pomocí šesti nastavitelných šroubů.
 - c) Pokud laserový svazek stále neprochází, odstrojte výstupní aperturu, upravte šest nastavitelných šroubů laserové trubice tak, aby laserový paprsek byl přibližně ve středu trubky (můžete použít bílý papír pro zobrazení). Poté výstupní aperturu umístěte zpět a pomocí 2,5 mm šestihranného klíče uvolněte tři šrouby (označeno červeným kroužkem na vstupním rameni na obrázku 3-2), opatrně pohybujte uvolněnou hlavou trubice tak, aby vystupující laserový svazek prošel aperturou. Poté tyto tři šrouby dotáhněte.
 - d) V případě, že laserový paprsek neprojde vstupní aperturou do výstupního ramene, vstupní aperturu vyšroubujte. Zkontrolujte, zda je stopa svazku vidět v kontrolním okénku. Pokud tomu tak není, upravte sklon vstupního anebo výstupního ramene tak, aby stopa svazku byla uprostřed okénka.
 - e) Vstupní aperturu našroubujte zpět, uvolněte tři šrouby (označeno červeným kroužkem na výstupním rameni v obrázku 3-2), opatrně pohybujte uvolněnou hlavou tubusu tak, aby laserový paprsek procházel vstupní aperturou. Pak tyto šrouby dotáhněte.
- 2) Vyjměte čtvrtvlnnou destičku (zapamatujte si její orientaci), umístěte obě vstupní a výstupní ramena do 70° polohy. Na stolek položte ploché zrcátko a náklon upravte tak, aby odražený svazek prošel vstupní aperturou. Nastavte polarizátor na 0° a analyzátor natočte o 90° . Zkontrolujte, zda dojde k zeslabení intenzity. Pokud ne, otáčejte opatrně jak polarizátorem, tak analyzátozem sem a tam, dokud signál na detektoru nebude minimální. Zapište úhlové údaje na polarizátoru a analyzátoru jako základní systémové chyby měření úhlu, které se při práci musí od naměřených hodnot odečíst.
- 3) Sklopte vstupní i výstupní rameno do horizontální polohy, vraťte čtvrtvlnnou destičku na její původní místo ve správné orientaci. Zkontrolujte, zda dojde k vyhasnutí svazku, pokud polarizátor bude natočen o 45° a analyzátor rovněž o 45° . Pokud ne, otočte čtvrtvlnnou destičku tak, aby se dosáhlo minima světelného signálu a čtvrtvlnnou destičku upevněte [11].

3.1.5 Provoz/měření

Zapněte napájení a vzorek umístěte na stolek.

Pro nastavení úhlu vstupního či výstupního ramene je zapotřebí rameno držet a následně povytáhnout odpovídající šroub ze „zámku“ na zadní straně vertikální stupnice. Po nastavení ramene do odpovídajícího úhlu rameno uvolněním zajišťovacího šroubu zajistíte. Úhel je možné upravit pomocí dvou černých šroubů na obou stranách zámku.

Položíme vzorek na stolek pro vzorky tak, aby odražený paprsek vstupoval do výstupního tubusu.

Páčkou na výstupním rameni se do cesty svazku vklopí zrcátko. Stopu svazku pak můžeme pozorovat v okénku a nastavením výšky stolku ji vycentrujeme. Otáčením polarizátoru a analyzátoru při sledování změny intenzity světla dosáhněte minimální intenzity. Poté se opět přepne na fotoelektrickou detekci, kdy se zrcátko odklopí tak, že svazek dopadá přímo na detektor a na analogovém měřidle se otáčením polarizátoru a analyzátoru vyhledá co nejmenší signál.

Jakmile se dosáhne minima, tak zaznamenáme první sadu úhlů polarizátoru a analyzátoru.

To se opakuje i u druhé sady úhlů natočení polarizátoru P a analyzátoru A.

Následně se spočítají průměrné hodnoty podle následujících vztahů.

Mějme zaznamenané hodnoty (P_1, A_1) a (P_2, A_2) . Pokud hodnota A je v intervalu $0^\circ < A < 90^\circ$, označíme ji A_1 a odpovídající hodnotu P jako P_1 . Druhá skupina hodnot je (P_2, A_2) .

S použitím následujících rovnic se provede transformace (P_2, A_2) na (P_2', A_2') :

$$A_2' = 180^\circ - A_2 \quad (3-1)$$

$$P_2' = \begin{cases} P_2 + 90^\circ & \text{kdýž } 0^\circ \leq P_2 \leq 90^\circ \\ P_2 - 90^\circ & \text{kdýž } 90^\circ \leq P_2 \leq 180^\circ \end{cases} \quad (3-2)$$

Výpočet průměru (P_1, A_1) a (P_2, A_2) ¹

$$P_{\text{průměr}} = \frac{(P_1 + P_2')}{2}$$

jestliže $90^\circ \leq P_{\text{průměr}} \leq 180^\circ$, pak $P_{\text{průměr}} \rightarrow 180^\circ - P_{\text{průměr}}$ (3-3)

$$A_{\text{průměr}} = \frac{(A_1 + A_2')}{2} \quad (3-4)$$

¹ Z teorie platí $A_1 + A_2 = 180^\circ$ a $P_1 - P_2 = 90^\circ$ [11].

Následně si musíme zjistit interval možné tloušťky pro tenkou vrstvu (např. porovnáním se vzorkovnicí nebo ze znalosti doby a rychlosti napařování).

Nyní máme nachystané informace pro zadání do dodaného softwaru [11].

3.1.6 Poznámky výrobce

Nevystavujte fotodetektor silnému záření laserů nebo jiných světelných zdrojů.

Na matnici můžete vidět dvě světelné stopy kvůli odrazům od povrchu zkušebního vzorku. Nicméně jedna stopa, ta hlavní, by měla být jasnější než ostatní. Tato stopa se musí použít pro měření.

Pokud je nutné vyměnit laserovou trubici uvnitř laserového ramene, vypněte napájení a odpojte 3 vodiče od elektronické jednotky. Celou laserovou hlavici vyjměte z tubusu vstupního ramene, pak sejměte zadní kryt laserového tubusu, vytáhněte laserovou trubici z tepelného krytu. Pro instalaci laserové trubice postupujte v opačném pořadí. Upravte šest nastavitelných šroubů na nové trubici tak, abyste zajistili průchod svazku středy všech optických clon, když obě ramena (vstupní i výstupní) budou sklopena 90°. V tomto případě by měl být laserový paprsek pozorovaný v okénku nejjasnější.

Za normálních okolností neotáčejte čtvrtlínou destičkou.

Před provedením prvního měření na neznámých vzorcích se doporučuje ověření funkčnosti systému pomocí známého vzorku (plátku s vrstvou se známou tloušťkou a indexem lomu).

Přístroj se musí skladovat a provozovat v odpovídajících laboratorních podmínkách.

Také se používá nomogram $(\Delta, \psi) \sim (n, d)$. Existuje zde následující vztah mezi grafem $(\Delta, \psi) \sim (n, d)$ a grafem $(P, A) \sim (d, n)$ [11].

$$\psi = A \quad (3-5)$$

$$\Delta = \begin{cases} 270 - 2P & \text{kdýž } 0^\circ < P < 135^\circ \\ 630 - 2P & \text{kdýž } P > 135^\circ \end{cases} \quad (3-6)$$

3.1.7 Software

Nainstalujte program. Dvakrát klikněte na „LEOI-44_1.0.0_Setup“ a postupujte podle pokynů k dokončení instalace.

Spusťte program. Dvakrát klikněte na ikonu „LEOI-44“, tento program se objeví na hlavním panelu.

Upravte implicitně hodnoty ve všech okénkách „Parametr“ na hodnoty, které odpovídají aktuálnímu vzorku.

Klikněte na tlačítko „Create Table“, všechny vypočtené hodnoty tloušťky odpovídající úhlů polarizátoru a analyzátoru se zobrazí v pravé tabulce za podmínek daných těmito zadanými parametry.

Na základě výše uvedených výsledků dvou měření spočítejte úhly polarizátoru P a analyzátoru A , a vložte je do příslušných polí v pravém dolním panelu programu (hodnoty Δ budou aktualizovány automaticky). Nastavte rozsah odchylky ε polarizátoru a analyzátoru na 1.0 ~ 5.0. Klikněte na tlačítko „Hledat“ [Search] - v tabulce s hodnotou odchylky ε (zde je ε nestranný rozptyl hodnoty tloušťky vrstvy) se zobrazí seznam hodnot tloušťky. Jako změřenou tloušťku d vyberte hodnotu odpovídající minimálnímu ε [11].

3.2 Měření

Vlastní měření proběhlo na pracovišti přírodovědecké fakulty v laboratoři číslo 4.008b, kde je elipsometr LEOI-44 firmy Lambda Scientific Systems, Inc. umístěný.

Před prvním měřením jsme přístroj nejdříve uvedli do provozu a nakalibrovali. Následně jsme provedli jako první referenční měření referenčního vzorku dodaného spolu s přístrojem.

U tohoto referenčního vzorku známe veškeré jeho parametry, tedy index lomu substrátu i tenké vrstvy a tloušťku tenké vrstvy, kterou máme pomocí tohoto přístroje změřit.

Umístili jsme daný vzorek na stolek a pak jsme nastavili ramena do požadovaného úhlu, pod kterým jsme chtěli vzorek změřit.

Po zapnutí je vždy nutné vynulovat údaj detektoru při zakrytém okénku krytkou a bez osvětlení odraženým svazkem.

Po zapnutí laseru se stolek se vzorkem nastaví pomocí mikrometrického šroubu tak, aby odražený svazek vstupoval do vstupní apertury výstupního ramene. Směr svazku se kontroluje po sklopení zrcátka v okénku.

Nyní se naklápěním stolku vycentruje stopa svazku na střed okénka. V tomto nastavení jsme se pokusili za pomoci natáčením polarizátoru a analyzátoru získat co nejmenší intenzitu stopy, tedy potenciálně co nejmenší signál. Následně jsme opět odklopili zrcátko tak, aby svazek dopadal na detektor. Nyní se okénko musí opět zakrýt krytkou, aby na detektor nedopadalo okolní světlo.

Po tomto kroku se již jemně doladí nastavení polarizátoru a analyzátoru tak, aby na stupnici ukazující intenzitu světla dopadajícího na detektor, byla co nejmenší výchylka.

Takto získané hodnoty úhlů polarizátoru a analyzátoru zapíšeme jako jednu ze dvou sad úhlů uvedený daného měření.

Postup opakujeme pro druhou sadu úhlů polarizátoru a analyzátoru.

Prověření správnosti měření, jsme daný vzorek změřili vždy pro více úhlů dopadu. Pro každé nastavení jsme změřili vždy dvě sady úhlů polarizátor – analyzátor a zapisovali jsme do vlastního formuláře „Protokol o měření“ v tabulkovém programu Excel. Zde jsme si také předdefinovali výpočty podle návodu k přístroji.

Jednotlivé indexy lomů materiálů, ze kterých byly vzorky vyrobeny, jsme vyhledali na webové stránce www.refractiveindex.info od autora *Mikhaila Polyanskiyho* [13]. Na tomto anglickém webu jsme si našli vždy konkrétní index lomu materiálu, který jsme potřebovali zadat do softwaru pro výpočet tloušťky měřené tenké vrstvy.

Následně jsme spustili program LEOI-44, který byl součástí softwaru dodaného přístroje. Zde jsme požadované hodnoty zadali na pravé straně okna a na dolní straně jsme vložili výsledné průměrné hodnoty úhlů analyzátoru a polarizátoru.

Po kliknutí na tlačítko „Create Table“ a pak na „Search“ program vygeneruje několik řádků s hodnotami n a d , které se nejvíce blížily k naměřeným hodnotám. Následně se manuálně vybere ta hodnota tloušťky tenké vrstvy, která by mohla nejlépe vyhovovat.

Tuto vybranou tloušťku tenké vrstvy si zapíšeme do protokolu.

Tento postup opakujeme pro další úhly ramen, jimiž byly úhly 40°, 50°, 56°, 60°, 70° a 80°. Měření jsem pak zopakoval i pro další vzorky, jímž byl oxid křemíku SiO₂ na matovaném skle.

Dále jsme se pokoušeli změřit dva „tlusté“ vzorky, jejichž podstava byla seříznuta pod úhlem 45°, tudíž ideální vzorky pro měření tenké vrstvy bez odrazu světla od podstavy. Tenké vrstvy byly fluorid hlinitý AlF₃ a fluorid hořečnatý MgF₂ na skle B270.

Bohužel konstrukce elipsometru neumožňuje jednoduché měření takových vzorků. Hlavním důvodem je malý rozsah výšky stolu pro vzorky.

Provizorní měření je možné po odmontování stolku. Více rozebrané měření je popsáno v kapitolách Výsledky a Závěr.

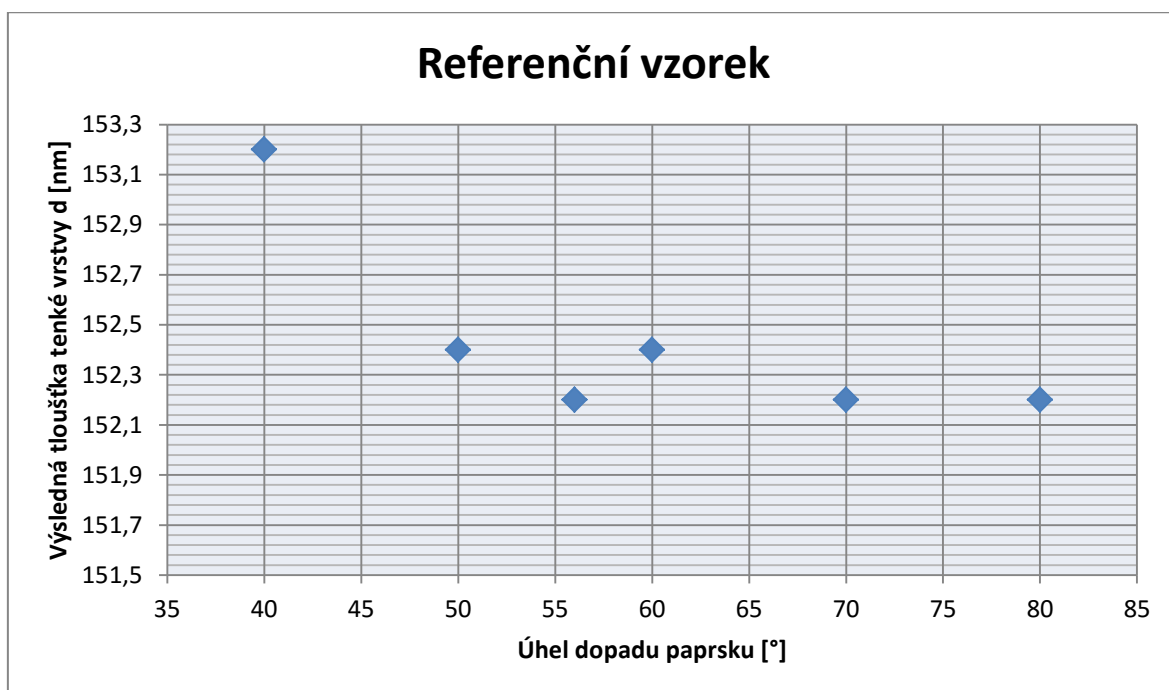
Protokoly o měření s naměřenými hodnotami z jednotlivých měření najdete v příloze. Výsledky měření se zabývám v kapitole 4

4 VÝSLEDKY

V této kapitole najdete především naměřené hodnoty pro daný úhel měření k danému vzorku. Jednotlivé protokoly o měření jsou v příloze.

Ke změření jsem měl hned několik vzorků, ale jako první jsem proměřoval vzorek tzv. referenční, který byl dodán spolu s elipsometrem, abychom mohli otestovat funkčnost a správné nastavení přístroje.

Tento referenční vzorek má substrát z křemíku Si. Tenká vrstva je pak vyrobena z SiO₂, a výrobce udává tloušťku této tenké vrstvy na substrátu 152,2 nm. Tato hodnota vyšla hned ve třech úhlech měření z šesti a to konkrétně pro úhly 56°, 70° a 80°. Zbylé hodnoty byly velice podobné, tedy 152,4 nm bylo naměřeno pro úhly 50° a 60°. Nejvíce se lišila hodnota tloušťky pro úhel 40°, která byla o celý jeden nanometr větší, tedy tloušťka činila 153,2 nm. Tyto hodnoty najdete v tabulce 4-1 nebo na grafu 4-1.



Graf 4-1 Výsledné hodnoty tlouštěk tenké vrstvy vyrobené z SiO₂.

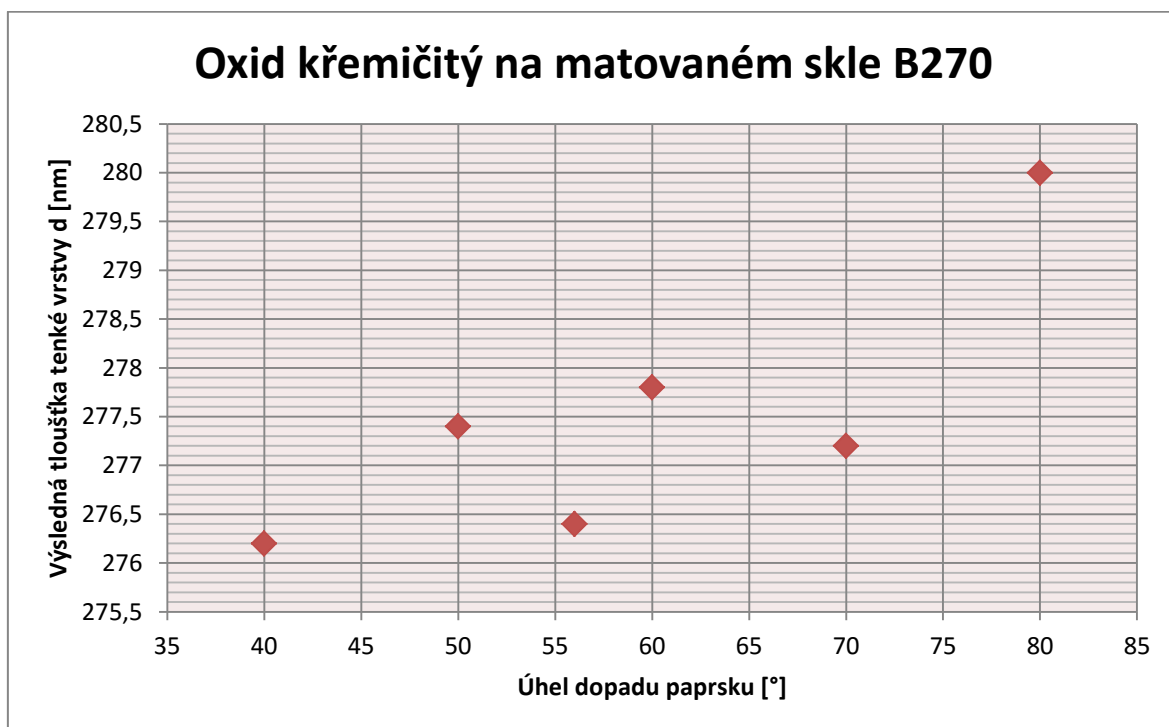
Druhým vzorkem, u něhož jsem měl změřit tloušťku tenké vrstvy na povrchu, byl vzorek se substrátem matovaného skla s napařenou vrstvou SiO₂ o indexu lomu 1,457 [13] pro vlnovou délku optického záření 632,8 nm na substrátu skla B270 o indexu lomu 1,5212 [13] pro vlnovou délku 632,8 nm.

U tohoto vzorku odpovídají naměřené hodnoty deklarovaným s odchylkou necelých 4 nm.

Hodnoty tloušťky pro dané úhly tenké vrstvy jsou 276,2 nm pro 40°, 277,4 nm pro úhel 50°, 276,4 nm pro 56°, pro 60° to pak je 277,8 nm, pro úhel 70° to vyšlo 277,2 nm a pro úhel 80° tato tloušťka činí rovných 280 nm. Při této poslední tloušťce tenké vrstvy zřejmě došlo při měření k ne příliš přesnému odečtení úhlu polarizátoru a analyzátoru ze stupnice, jelikož bych očekával výslednou hodnotu někde v rozmezí 276 nm až 278 nm.

V tomto měření zřejmě drobné výchylky byly způsobeny s největší pravděpodobností drobnými nepřesnostmi při odečtu úhlů z nonia natočení polarizátoru a analyzátoru, jelikož k tomuto měření využíváme lidský vjem, kterým je zrak. Nelze ani vyloučit nehomogenitu měřené vrstvy.

Podrobněji to najdete popsané v tabulce 4-1 nebo pro lepší přehlednost v grafu 4-2, kde má tento vzorek zelenou barvu.



Graf 4-2 Výsledné hodnoty tlouštěk tenké vrstvy vyrobené z SiO₂.

V tabulce 4-1 můžete vidět přehledně sepsané výsledné tloušťky pro oba dva vzorky a k nim odpovídající úhly, pod nimiž bylo prováděno měření. V záhlaví tabulky najdete daný úhel dopadu ve stupních, tedy i odrazu, pod kterým záření dopadalo na vzorek umístěný na stolku pro vzorky. Celkem bylo šest různých úhlů, pro které jsem

dané vzorky proměřoval a pod kterými následně po přepočtech vyšly dané hodnoty tloušťek tenkých vrstev, které jsou v tabulce uvedeny v nanometrech.

Úhel dopadu [°]	40	50	56	60	70	80	
Referenční vzorek	153,2	152,4	152,2	152,4	152,2	152,2	Výsledná tloušťka tenké vrstvy [nm]
Silicon dioxide	276,2	277,4	276,4	277,8	277,2	280,0	

Tabulka 4-1 Výsledky měření vzorků na „tenkém“ substrátu, kde nedochází k interferenci s odrazem na spodní straně substrátu.

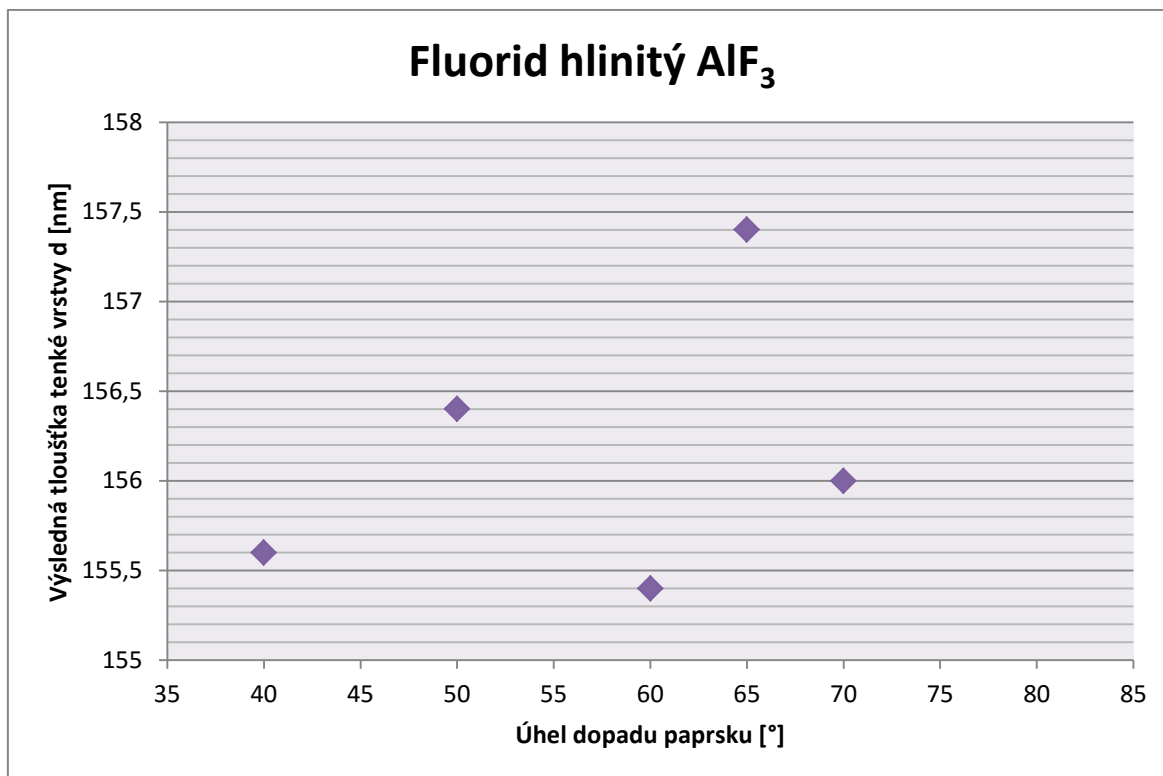
Dostal jsem za úkol změřit ještě dva vzorky s tloušťkou substrátu v řádech jednotek centimetrů, které měli seříznutou podstavu pod úhlem 45°, kdy se zcela vyloučí vliv odrazu svazku od spodní strany substrátu. Takové měření se dalo provizorně provést až po demontáži stolku. Jelikož vzorky pokládáme na kov, je potřeba mezi kov a vzorek vložit kus papíru, který ochrání plochu před poškrábáním. Tyto vzorky, mezi něž jsem umístil opět kousek papírku, aby se zamezilo jejich poškození, jsem za pomoci kousku plastelíny slepil seříznutými podstavami tak, abych dostal válec a tudíž jsem mohl začít zjišťovat parametry tenkých vrstev na rovných plochách vzorku i na tomto elipsometru.

Jedním ze vzorků byl fluorid hlinitý AlF_3 o indexu lomu 1,36 [13] pro vlnovou délku optického záření 632,8 nm na substrátu skla B270, jehož index lomu je 1,5212 [13] pro vlnovou délku 632,8 nm.

Hodnoty tloušťky pro dané úhly tenké vrstvy jsou 155,6 nm pro 40°, 156,4 nm pro úhel 50°, 155,4 nm pro 60°, pro 65° to pak je 157,4 nm, pro úhel 70° to vyšlo 156 nm a pro úhel 80° se mi nepodařilo změřit ani jednu ze dvou sad úhlů polarizátoru a analyzátoru.

V tomto měření byly drobné odchylky zřejmě způsobeny s největší pravděpodobností nepřesným ustavením vzorku při jeho provizorním měření.

Podrobněji to najdete popsané v tabulce 4-2 nebo pro lepší přehlednost v grafu 4-3, kde má tento vzorek fialovou barvu.



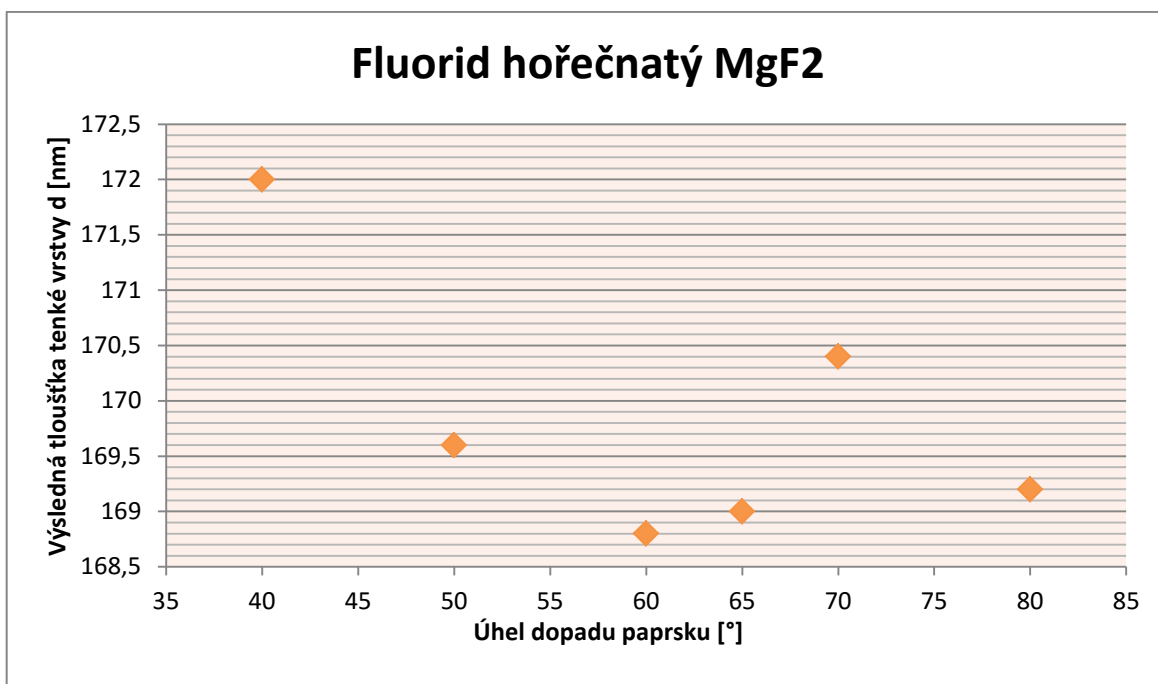
Graf 4-3 Výsledné hodnoty tlouštěk tenké vrstvy vyrobené z AlF_3

Druhým stejně vypadajícím vzorkem byl fluorid hořečnatý MgF_2 o indexu lomu 1,377 [13] pro vlnovou délku optického záření 632,8 nm na substrátu skla B270, jehož index lomu je 1,5212 [13] pro vlnovou délku 632,8 nm.

Hodnoty tloušťky pro dané úhly tenké vrstvy jsou 172,0 nm pro 40°, 169,9 nm pro úhel 50°, 168,8 nm pro 60°, pro 65° to pak je 169,0 nm, pro úhel 70° to vyšlo 170,4 nm a pro úhel 80° pak výsledná tloušťka tenké vrstvy činí 169,2 nm.

V tomto měření byly drobné odchylky zřejmě způsobeny s největší pravděpodobností nepřesným ustavením vzorku při jeho provizorním měření.

Podrobněji to najdete popsané v tabulce 4-2 nebo pro lepší přehlednost v grafu 4-4, kde má tento vzorek oranžovou barvu.



Graf 4-4 Výsledné hodnoty tlouštěk tenké vrstvy vyrobené z MgF₂

V tabulce 4-2 můžete vidět přehledně sepsané výsledné tloušťky pro oba dva vzorky na „tlustém“ substrátu s podstavou seříznutou pod 45° a k nim odpovídající úhly, pod nimiž bylo prováděno měření. V záhlaví tabulky najdete daný úhel dopadu ve stupních, tedy i odrazu, pod kterým záření dopadalo na vzorek umístěný na stolku pro vzorky. Celkem bylo šest různých úhlů, pro které jsem dané vzorky proměřoval a pod kterými následně po přepočtech vyšly dané hodnoty tlouštěk tenkých vrstev, které jsou v tabulce uvedeny v nanometrech.

Úhel dopadu [°]	40	50	60	65	70	80	
Fluorid hlinitý AlF ₃	155,6	156,4	155,4	157,4	156,0	-	Výsledná tloušťka tenké vrstvy [nm]
Fluorid hořečnatý MgF ₂	172,0	169,6	168,8	169,0	170,4	169,2	

Tabulka 4-2 Výsledky měření vzorků na „tlustém“ substrátu, kde nedochází k interferenci s odrazem na spodní straně substrátu, jelikož je seříznutý pod 45°.

ZÁVĚR

Zjistil jsem, že tzv. nulová elipsometrie je jedna z nejstarších metod, která se v elipsometrii hojně využívá. Původně nepotřebovala žádné elektronické vybavení typu CCD kamery či snímače intenzity dopadajícího záření. Stačil k tomu lidský orgán oko a jeho zrak.

V dnešních nulovacích elipsometrech se používá koherentní záření, které je vybuzeno nejčastěji lasery. Jako snímač je právě použit CCD senzor, který buď snímá celý povrch, nebo pouze odraženou intenzitu na něho dopadajícího odraženého paprsku od vzorku, u něhož se snažíme pomocí polarizátoru a analyzátoru dosáhnout nulové intenzity procházejícího svazku.

V našem elipsometru LEOI-44 se měří dvě dvojice úhlů – úhlové nastavení polarizátoru a analyzátoru. S těmito naměřenými čtyřmi úhly se dále pracuje a po přepočtech získáme dvě hodnoty, které zadáme do softwaru. Po zadání správných hodnot program vygeneruje možné tloušťky tenkých vrstev, které ručně sledujeme a hledáme tu nejvíce vyhovující hodnotu, u níž se ostatní parametry blíží k hodnotám porovnávaným.

V praktické části jsem elipsometr LEOI-44, se kterým jsem se seznámil, používal pro praktická měření. Nejobtížnější pro mě bylo správně odečíst hodnotu úhlu z nonia. Dále bylo vždy nejdůležitější, a tím i nejdélhavější, nastavit stolek s měřeným vzorkem tak, aby odražený svazek vstupoval do středu vstupní apertury a současně do středu kontrolního okénka výstupního tubusu s detektorem. Poté se stolek aretoval a provedlo se měření pro daný úhel.

Zjistil jsem, že pro získání relativně přesné hodnoty tloušťky tenké vrstvy je zapotřebí přesně odečíst z nonia obě sady úhlů, správně je přepočítat a zjistit si správné indexy lomů substrátu a tenké vrstvy. Důležité je také správně tyto hodnoty zadat do příloženého softwaru, který výsledně nabídne pro zadané hodnoty možné tloušťky dané tenké vrstvě. Nám pak nezbývá, než tyto pravděpodobné hodnoty projít a porovnat s naměřenými hodnotami. Ty hodnoty tloušťky a indexu lomu, které dávají nejlepší shodu s naměřenými parametry ψ a Δ , považujeme za správný výsledek a přepíšeme si výslednou hodnotu tloušťky tenké vrstvy.

Pro budoucí studenty jsem vypracoval pracovní list, podle kterého mohou měřit vzorky na elipsometru LEOI-44 firmy Lambda Scientific Systems, Inc. Tento pracovní list najdete v příloze.

SEZNAM LITERAYTURY

- [1] **Azzam, R. M. A. a Bashara, N. M.** *Ellipsometry and Polarized Light*. Amsterdam, New York, Oxford : North-Holland publishing company, 1977. ISBN 0-7204-0694-3.
- [2] **Company, J.A. Woollam.** Data Analysis. *J.A. Woollam Co.* [Online] 2014. [Citace: 20. 12. 2014.] http://www.jawoollam.com/tutorial_5.html. NE 68508-2243 USA.
- [3] **Company, J.A. Woollam.** Ellipsometry Measurements. *J.A. Woollam Co.* [Online] 2014. [Citace: 20. 12. 2014.] http://www.jawoollam.com/tutorial_4.html. NE 68508-2243 USA.
- [4] **Company, J.A. Woollam.** Film Thickness. *J.A. Woollam Co.* [Online] 2014. [Citace: 20. 12. 2014.] http://www.jawoollam.com/tutorial_6.html. NE 68508-2243 USA.
- [5] **Company, J.A. Woollam.** Introduction. *J.A. Woollam Co.* [Online] 2014. [Citace: 20. 12. 2014.] http://www.jawoollam.com/tutorial_1.html. NE 68508-2243 USA.
- [6] **Company, J.A. Woollam.** Light & Materials - Part I. *J.A. Woollam Co.* [Online] 2014. [Citace: 20. 12. 2014.] http://www.jawoollam.com/tutorial_2.html. NE 68508-2243 USA.
- [7] **Company, J.A. Woollam.** Light & Materials - Part II. *J.A. Woollam Co.* [Online] 2014. [Citace: 20. 12. 2014.] http://www.jawoollam.com/tutorial_3.html. NE 68508-2243 USA.
- [8] **Fujiwara, Hiroyuki.** *Spectroscopic Ellipsometry; Principles and Applications*. Tokyo : Published by Maruzen Co. Ltd, 2003. ISBN 4-621-07253-6.
- [9] **Hinrichs, Karsten a Eichhorn, Klaus-Jochen.** *Ellipsometry of Functional Organic Surfaces and Films*. místo neznámé : Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014. ISBN 978-3-642-40127-5.
- [10] **Křepelka, Jaromír.** *Optika tenkých vrstev*. Olomouc : Ediční středisko rektorátu Univerzity Palackého v Olomouci, 1996. stránky 113-120. ISBN 80-7067-319-2.
- [11] **Lambda scientific.** LEOI-44 Experimental Ellipsometer Instruction Manual. 14055 SW 142nd Avenue, Suite 22, Miami, FL 33186, USA : Lambda scientific.
- [12] **Novotný, Zbyněk.** *Elipsometrie tenkých vrstev*. Brno : autor neznámý, 2010.
- [13] **Polyanskiy, Mikhail.** RefractiveIndex.info. *Refractive index database*. [Online] CC0 1.0, 2008-2016. [Citace: 14. 12. 2014.] <http://refractiveindex.info/>.
- [14] **Tompkins, Harland G. a Irene, Eugene A.** *Handbokk of Ellipsometry*. Norwich : William Andrew publishing, 2005. ISBN 0-8155-1499-9.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1	Schema tenké vrstvy na substrátu	8
Obrázek 1-2	Odraz a lom elektromagnetické vlny na materiálovém rozhraní [12].....	10
Obrázek 2-1	Optická konfigurace elipsometrických přístrojů: (a) elipsometr s rotujícím analyzátozem (RAE), (b) elipsometr s rotujícím analyzátozem a kompenzátozem, (c) elipsometr s rotujícím kompenzátozem (RCE), a (d) elipsometr s fázovou modulací (PME) [8].	15
Obrázek 2-2	Schematický diagram elipsometru s rotujícím analyzátozem (RAE). Na tomto obrázku je světlo odražené od vzorku lineárně polarizované pod -45° ($\psi = 45^\circ, \Delta = 180^\circ$) [8].....	16
Obrázek 2-3	Schematický diagram elipsometru s rotujícím kompenzátozem (RCE), když odražená vlna od vzorku je za (a) lineárně polarizovaná v -45° ($\psi = 45^\circ, \Delta = 180^\circ$) a za (b) pravotočivě kruhová polarizace ($\psi = 45^\circ, \Delta = -90^\circ$) [8].....	18
Obrázek 2-4	Optické konfigurace elipsometriů v infračerveném spektru: (a) elipsometr s rotujícím polarizátorem (FTIR- P_{RSA}), (b) elipsometr s rotujícím kompenzátozem (FTIR- PSC_{RA}), (c) elipsometr s fázovou modulací (FTIR- $PMSA$). Tyto přístroje využívají Fourierovský infračervený spektrofotometr (FTIR) jako zdroj světla [8].....	20
Obrázek 2-5	Schematický diagram nulového elipsometru. Na tomto obrázku se předpokládá, že hodnoty vzorku jsou $\psi = 45^\circ$ a $\Delta = 90^\circ$. V tomto měření zjištěná intenzita světla je nulová [8].....	21
Obrázek 2-6	(a) Schematický diagram zobrazovacího elipsometru (PCSA konfigurace), (b) odraz světla na substrátu částečně potažené tenkou vrstvou, (c) obraz kroku struktury získané ze zobrazovacího elipsometru z (a) [8].....	23
Obrázek 2-7	Depolarizace dopadajícího světla způsobeného (a) povrchovým rozptylem, (b) širokým svazkem paprsku, (c) různou vlnovou délkou, (d) nehomogenní tenkou vrstvou a (e) odrazem na spodní straně [8].....	28
Obrázek 3-1	Schematický obrázek znázorňující optické prvky, přes něž postupuje světelný paprsek od zdroje světla až po detektor.	30
Obrázek 3-2	Optické vyrovnání dráhy [11].	31

SEZNAM GRAFŮ

Graf 4-1	Výsledné hodnoty tloušťek tenké vrstvy vyrobené z SiO ₂	38
Graf 4-2	Výsledné hodnoty tloušťek tenké vrstvy vyrobené z SiO ₂	39
Graf 4-3	Výsledné hodnoty tloušťek tenké vrstvy vyrobené z AlF ₃	41
Graf 4-4	Výsledné hodnoty tloušťek tenké vrstvy vyrobené z MgF ₂	42

SEZNAM TABULEK

Tabulka 3-1 Technické parametry elipsometru LEOI-44 [11].....	29
Tabulka 4-1 Výsledky měření vzorků na „tenkém“ substrátu, kde nedochází k interferenci s odrazem na spodní straně substrátu.	40
Tabulka 4-2 Výsledky měření vzorků na „tlustém“ substrátu, kde nedochází k interferenci s odrazem na spodní straně substrátu, jelikož je seříznutý pod 45°.....	42

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 Pracovní list

Příloha č. 2 Protokoly o měření jednotlivých vzorků s příslušnými úhly

PRACOVNÍ LIST

Elipsometrie**1 Úvod**

Elipsometrie měří stav odraženého svazku paprsku elipticky polarizovaného světla od povrchu. Následně vyhodnocuje elipsometrické parametry ψ a Δ .

Pro měření vzorků bude použit elipsometr LEOI-44 od firmy Lambda Scientific Systems, Inc. Elipsometr pracuje na principu náhodně polarizovaného svazku, který generuje helium-neonový laser. Tento svazek se stává lineárně polarizovaným po průchodu polarizátorem. Následuje průchod paprsku čtvrtvlnnou destičkou, jejíž optická osa je orientována pod úhlem 45° , a vlna se stává elipticky polarizovanou. Tento svazek se promítá na povrch tenké vrstvy vzorku. Stav polarizace dopadajícího svazku je po odrazu od vzorku, který zavádí fázový posun, změněn a paprsek je opět lineárně polarizován. Rovina polarizace je následně detekována otáčením analyzátoru.

Systém se skládá ze tří hlavních částí, kterými jsou zdroj světla, detektor a elektronická jednotka. Součástí je i vyhodnocovací program. Zdrojem světla je helium neonový (He-Ne) laser o vlnové délce 632,8 nm.

2 Zadání

Cílem praktického cvičení je osvojit si jednu z metod měření tloušťky tenké vrstvy za pomoci elipsometrických úhlů ψ a Δ získaných ze dvou sad úhlů natočení polarizátoru a analyzátoru na elipsometru LEOI-44 a ověřit tloušťku tenké vrstvy SiO_2 na substrátu Si pod úhly dopadu 70° a 55° .

3 Postup měření

Přístroj zapojíme do elektrické sítě. Laser se rozsvítí. Nastavíme úhel ramen s tubusy, pod kterými chceme měřit daný vzorek. Poté položíme vzorek na stolek pro vzorky tak, že tenká vrstva bude nahoře, aby se od ní laserový svazek odrážel. Poté nastavíme vzorek do vodorovné polohy a do takové výšky, aby odražený svazek vstupoval do středu apertury výstupního tubusu.

Páčkou se zrcátko sklopí na vizuální pozorování, kde v okénku pozorujeme stopu světelného svazku, kterou se snažíme nastavením stolku dostat do středu. Následně začneme točit polarizátorem a analyzátozem tak, aby světelný signál byl minimální, respektive nulový.

Zrcátko odklopíme do polohy pro detekci na fotodiodě, která převede signál na indikátor, který se snažíme drobným otáčením polarizátoru a analyzátoru dostat na nulu.

Výsledné úhly zapíšeme a změříme ještě pod stejnými úhly ramen tubusů druhou sadu úhlů analyzátoru a polarizátoru.

Definujeme (P_1, A_1) a (P_2, A_2) . Nastavené hodnoty A jako $0^\circ < A < 90^\circ$ je A_1 a odpovídající hodnota P je P_1 . Druhá skupina hodnot je (P_2, A_2) .

Transformace (P_2, A_2) v (P_2', A_2') s použitím následujících rovnic:

$$A_2' = 180^\circ - A_2$$

$$P_2' = \begin{cases} P_2 + 90^\circ & \text{když } 0^\circ \leq P_2 \leq 90^\circ \\ P_2 - 90^\circ & \text{když } 90^\circ \leq P_2 \leq 180^\circ \end{cases}$$

Průměr (P_1, A_1) a (P_2, A_2)

$$P_{\text{průměr}} = \frac{(P_1 + P_2')}{2}$$

$$\text{jestliže } 90^\circ \leq P_{\text{průměr}} \leq 180^\circ, \quad \text{pak } P_{\text{průměr}} \rightarrow 180^\circ - P_{\text{průměr}}$$

$$A_{\text{průměr}} = \frac{(A_1 + A_2')}{2}$$

Následně si musíme zjistit indexy lomu pro tenkou vrstvu a substrát, například na <http://refractiveindex.info/>.

Nyní máme nachystané informace pro zadání do softwaru, přidaného k zařízení, který spustíme na PC v laboratoři. Do něj je zapotřebí zadat správné hodnoty. Pozor na zadávání desetinné čárky, jelikož je to americký software, je zapotřebí zadávat ne desetinnou čárku, ale desetinnou tečku.

Po zadání parametrů klikneme na *Create table*, vypíše se tabulka s pravděpodobnými hodnotami. Po zadání úhlů polarizátoru a analyzátoru klikneme na *Search*, který by měl vygenerovat jen ty hodnoty, které se blíží k naměřeným hodnotám.

Vybereme tu nejvíce vyhovující a zapíšeme výslednou tloušťku tenké vrstvy.

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 18.12.2014

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	referenční	
	materiál	index lomu
Substrát:	Si	3,4401
Tenká vrstva:	SiO ₂	1,457

úhel dopadu:	40
--------------	----

A1	30
P1	148

153	A1+A2(180)
-----	------------

A2	123
P2	55

93	P1-P2(90)
----	-----------

A2'	57
P2'	145

Průměrné hodnoty

A	43,5
P	33,5

Výsledná tloušťka vrstvy d:	153,2
------------------------------------	--------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 18.12.2014

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	referenční	
	materiál	index lomu
Substrát:	Si	3,4401
Tenká vrstva:	SiO ₂	1,457

úhel dopadu:	50
--------------	----

A1	45,5
P1	154

179,5	A1+A2(180)
-------	------------

A2	134
P2	63

91	P1-P2(90)
----	-----------

A2'	46
P2'	153

Průměrné hodnoty

A	45,75
P	26,5

Výsledná tloušťka vrstvy d:	152,4
------------------------------------	--------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 18.12.2014

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	referenční	
	materiál	index lomu
Substrát:	Si	3,4401
Tenká vrstva:	SiO ₂	1,457

úhel dopadu:	56
--------------	----

A1	37
P1	158,5

177,5	A1+A2(180)
-------	------------

A2	140,5
P2	69

89,5	P1-P2(90)
------	-----------

A2'	39,5
P2'	159

Průměrné hodnoty

A	38,25
P	21,25

Výsledná tloušťka vrstvy d:	152,2
------------------------------------	--------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 18.12.2014

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	referenční	
	materiál	index lomu
Substrát:	Si	3,4401
Tenká vrstva:	SiO ₂	1,457

úhel dopadu:	60
--------------	----

A1	56
P1	160

180	A1+A2(180)
-----	------------

A2	124
P2	74,2

85,8	P1-P2(90)
------	-----------

A2'	56
P2'	164,2

Průměrné hodnoty

A	56
P	17,9

Výsledná tloušťka vrstvy d:	152,4
------------------------------------	--------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 18.12.2014

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	referenční	
	materiál	index lomu
Substrát:	Si	3,4401
Tenká vrstva:	SiO ₂	1,457

úhel dopadu:	70
--------------	----

A1	72
P1	180

180	A1+A2(180)
-----	------------

A2	108
P2	88

92	P1-P2(90)
----	-----------

A2'	72
P2'	178

Průměrné hodnoty

A	72
P	1

Výsledná tloušťka vrstvy d:	152,2
------------------------------------	--------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 18.12.2014

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	referenční	
	materiál	index lomu
Substrát:	Si	3,4401
Tenká vrstva:	SiO ₂	1,457

úhel dopadu:	80
--------------	----

A1	67,2
P1	143,5

180	A1+A2(180)
-----	------------

A2	112,8
P2	53,5

90	P1-P2(90)
----	-----------

A2'	67,2
P2'	143,5

Průměrné hodnoty

A	67,2
P	143,5

Výsledná tloušťka vrstvy d:	152,2
------------------------------------	--------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 29.04.2016

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	SiO ₂	
	materiál	index lomu
Substrát:	B270	1,5212
Tenká vrstva:	SiO ₂	1,457

úhel dopadu:	40
--------------	----

A1	32,9
P1	133,8

180,6	A1+A2(180)
-------	------------

A2	147,7
P2	44,5

89,3	P1-P2(90)
------	-----------

A2'	32,3
P2'	134,5

Průměrné hodnoty

A	32,6
P	45,85

Výsledná tloušťka vrstvy d:	277,4
------------------------------------	--------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 29.04.2016

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	SiO ₂	
	materiál	index lomu
Substrát:	B270	1,5212
Tenká vrstva:	SiO ₂	1,457

úhel dopadu:	50
--------------	----

A1	21,87
P1	131

178,87	A1+A2(180)
--------	------------

A2	157
P2	38,5

92,5	P1-P2(90)
------	-----------

A2'	23
P2'	128,5

Průměrné hodnoty

A	22,435
P	50,25

Výsledná tloušťka vrstvy d:	277,4
------------------------------------	--------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 29.04.2016

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	SiO ₂	
	materiál	index lomu
Substrát:	B270	1,5212
Tenká vrstva:	SiO ₂	1,457

úhel dopadu:	56
--------------	----

A1	12,5
P1	125,8

180,5	A1+A2(180)
-------	------------

A2	168
P2	36,69

89,11	P1-P2(90)
-------	-----------

A2'	12
P2'	126,69

Průměrné hodnoty

A	12,25
P	53,755

Výsledná tloušťka vrstvy d:	276,4
------------------------------------	-------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 29.04.2016

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	SiO ₂	
	materiál	index lomu
Substrát:	B270	1,5212
Tenká vrstva:	SiO ₂	1,457

úhel dopadu:	60
--------------	----

A1	2,9
P1	120

179	A1+A2(180)
-----	------------

A2	176,1
P2	32

88	P1-P2(90)
----	-----------

A2'	3,9
P2'	122

Průměrné hodnoty

A	3,4
P	59

Výsledná tloušťka vrstvy d:	277,8
------------------------------------	--------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 29.04.2016

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	SiO ₂	
	materiál	index lomu
Substrát:	B270	1,5212
Tenká vrstva:	SiO ₂	1,457

úhel dopadu:	70
--------------	----

A1	23,5
P1	140,7

180,1	A1+A2(180)
-------	------------

A2	156,6
P2	52,05

88,65	P1-P2(90)
-------	-----------

A2'	23,4
P2'	142,05

Průměrné hodnoty

A	23,45
P	141,375

Výsledná tloušťka vrstvy d:	277,2
------------------------------------	--------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 29.04.2016

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	SiO ₂	
	materiál	index lomu
Substrát:	B270	1,5212
Tenká vrstva:	SiO ₂	1,457

úhel dopadu:	80
--------------	----

A1	39,25
P1	136,8

179,65	A1+A2(180)
--------	------------

A2	140,4
P2	47,3

89,5	P1-P2(90)
------	-----------

A2'	39,6
P2'	137,3

Průměrné hodnoty

A	39,425
P	137,05

Výsledná tloušťka vrstvy d:	280
------------------------------------	------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 02.05.2016

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	AlF ₃	
	materiál	index lomu
Substrát:	B270	1,5212
Tenká vrstva:	AlF ₃	1,36

úhel dopadu:	40
--------------	----

A1	27,95
P1	136,2

179,95	A1+A2(180)
--------	------------

A2	152
P2	46

90,2	P1-P2(90)
------	-----------

A2'	28
P2'	136

Průměrné hodnoty

A	27,975
P	43,9

Výsledná tloušťka vrstvy d:	155,6
------------------------------------	--------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 02.05.2016

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	AlF ₃	
	materiál	index lomu
Substrát:	B270	1,5212
Tenká vrstva:	AlF ₃	1,36

úhel dopadu:	50
--------------	----

A1	14,35
P1	149

180	A1+A2(180)
-----	------------

A2	165,65
P2	59,5

89,5	P1-P2(90)
------	-----------

A2'	14,35
P2'	149,5

Průměrné hodnoty

A	14,35
P	30,75

Výsledná tloušťka vrstvy d:	156,4
------------------------------------	--------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 02.05.2016

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	AlF ₃	
	materiál	index lomu
Substrát:	B270	1,5212
Tenká vrstva:	AlF ₃	1,36

úhel dopadu:	60
--------------	----

A1	17,1
P1	158,5

180,1	A1+A2(180)
-------	------------

A2	163
P2	68,4

90,1	P1-P2(90)
------	-----------

A2'	17
P2'	158,4

Průměrné hodnoty

A	17,05
P	158,45

Výsledná tloušťka vrstvy d:	155,4
------------------------------------	--------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 02.05.2016

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	AlF ₃	
	materiál	index lomu
Substrát:	B270	1,5212
Tenká vrstva:	AlF ₃	1,36

úhel dopadu:	65
--------------	----

A1	26,5
P1	147,9

180	A1+A2(180)
-----	------------

A2	153,5
P2	57,9

90	P1-P2(90)
----	-----------

A2'	26,5
P2'	147,9

Průměrné hodnoty

A	26,5
P	147,9

Výsledná tloušťka vrstvy d:	157,4
------------------------------------	--------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 02.05.2016

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	AlF ₃	
	materiál	index lomu
Substrát:	B270	1,5212
Tenká vrstva:	AlF ₃	1,36

úhel dopadu:	70
--------------	----

A1	34
P1	142,7

180,5	A1+A2(180)
-------	------------

A2	146,5
P2	52,5

90,2	P1-P2(90)
------	-----------

A2'	33,5
P2'	142,5

Průměrné hodnoty

A	33,75
P	142,6

Výsledná tloušťka vrstvy d:	156
------------------------------------	------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 02.05.2016

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	MgF ₂	
	materiál	index lomu
Substrát:	B270	1,5212
Tenká vrstva:	MgF ₂	1,377

úhel dopadu:	40
--------------	----

A1	28,5
P1	133,9

180	A1+A2(180)
-----	------------

A2	151,5
P2	44,4

89,5	P1-P2(90)
------	-----------

A2'	28,5
P2'	134,4

Průměrné hodnoty

A	28,5
P	45,85

Výsledná tloušťka vrstvy d:	172
------------------------------------	------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 02.05.2016

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	MgF ₂	
	materiál	index lomu
Substrát:	B270	1,5212
Tenká vrstva:	MgF ₂	1,377

úhel dopadu:	50
--------------	----

A1	14,7
P1	143,8

180	A1+A2(180)
-----	------------

A2	165,3
P2	53,9

89,9	P1-P2(90)
------	-----------

A2'	14,7
P2'	143,9

Průměrné hodnoty

A	14,7
P	36,15

Výsledná tloušťka vrstvy d:	169,6
------------------------------------	--------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 02.05.2016

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	MgF ₂	
	materiál	index lomu
Substrát:	B270	1,5212
Tenká vrstva:	MgF ₂	1,377

úhel dopadu:	60
--------------	----

A1	14,56
P1	159,65

180	A1+A2(180)
-----	------------

A2	165,44
P2	69

90,65	P1-P2(90)
-------	-----------

A2'	14,56
P2'	159

Průměrné hodnoty

A	14,56
P	159,325

Výsledná tloušťka vrstvy d:	168,8
------------------------------------	--------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 02.05.2016

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	MgF ₂	
	materiál	index lomu
Substrát:	B270	1,5212
Tenká vrstva:	MgF ₂	1,377

úhel dopadu:	65
--------------	----

A1	24,65
P1	148,25

180	A1+A2(180)
-----	------------

A2	155,35
P2	58,25

90	P1-P2(90)
----	-----------

A2'	24,65
P2'	148,25

Průměrné hodnoty

A	24,65
P	148,25

Výsledná tloušťka vrstvy d:	169
------------------------------------	------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 02.05.2016

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	MgF ₂	
	materiál	index lomu
Substrát:	B270	1,5212
Tenká vrstva:	MgF ₂	1377

úhel dopadu:	70
--------------	----

A1	32,9
P1	142,5

180	A1+A2(180)
-----	------------

A2	147,1
P2	52,5

90	P1-P2(90)
----	-----------

A2'	32,9
P2'	142,5

Průměrné hodnoty

A	32,9
P	142,5

Výsledná tloušťka vrstvy d:	170,4
------------------------------------	--------------

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Datum měření: 02.05.2016

Měření vzorku na elipsometru ELOI-44

Vzorek:	MgF ₂	
	materiál	index lomu
Substrát:	B270	1,5212
Tenká vrstva:	MgF ₂	1,377

úhel dopadu:	80
--------------	----

A1	45,45
P1	43

190,1	A1+A2(180)
-------	------------

A2	144,65
P2	133

90	P1-P2(90)
----	-----------

A2'	35,35
P2'	43

Průměrné hodnoty

A	40,4
P	137

Výsledná tloušťka vrstvy d:	169,2
------------------------------------	--------------