

Ellipsometrie

Základní principy optiky

- Elipsometrie je optická technika pro analýzu povrchu a tenkých vrstev. Je založena na měření změny stavu polarizace světelného paprsku způsobené odrazem na povrchu materiálu nebo prostupem materiálem.
- Ze změny stavu polarizace lze odvodit tloušťku filmu a optické vlastnosti materiálu. Princip byl objeven již před více než stoletím.
- Nicméně, v průběhu posledních několika desetiletí technika pokročila rychle díky dostupnost počítačů a tím automatizace vyhodnocení elipsometrie.
- Oblast použití je široká: mikroelektronika, displej, optoelektronika, fotovoltaika, chemie, hutnictví atd.
- Ellipsometrie je zvláště vhodná pro charakteristiky polovodičů, tenkých vrstev rozsahu od několika nanometrů do desítek mikrometrů a také vícevrstevných struktur.
- Kromě toho je elipsometrie rychlá a nedestruktivní technika, která umožňuje sledování růstu filmu v reálném čase jak ve vakuu, tak na vzduchu nebo i kapalině.

Co lze určit

- Z naměřených lze vhodným modelováním určit optické a strukturní vlastnosti vzoparametrů Ψ a Δ rku.
- Typické parametry, které lze určit:
 - optické konstanty v blízkém UV, viditelném a blízkém IR rozsahu vlnových délek
 - jedno- nebo vícevrstvá tloušťka
 - tloušťka vrstev v supermřížkové struktuře
 - drsnost povrchu a rozhraní
 - Anizotropie
 - gradient optických konstant v jednotlivých vrstvách

Elipsometrie je vysoce přesná a přesná metrologická technika, protože měří změnu stavu polarizace (vyjádřenou poměrem velikostí koeficientu odrazu a rozdílu ve fázové změně) spíše než jednoduše intenzitu (ale i to lze).

Typické problémy

Velmi drsné a nehomogenní vzorky je obtížné analyzovat elipsometrií.

Hlavní omezující faktory pocházejí ze stavu povrchu vzorku. Elipsometrie vylučuje všechny rozptylové efekty a zabývá se pouze zrcadlovým odrazem.

Proto drsnost povrchu a také rozhraní mezi dvěma médii nesmí překročit vlnovou délku světla. Jinak dochází k nezrcadlovému rozptylu dopadajícího paprsku, který způsobí depolarizaci odraženého světelného paprsku.

Tloušťka filmu musí mít malé odchylky přes šířku světelné skvrny, jinak již neplatí předpoklad paralelních rozhraní; to znamená, že povrch musí být co nejrovnější.

Proto se nesmí zanedbávat různé kroky přípravy povrchu. S předpokladem dokonalého optického povrchu souvisí minimální tloušťka filmu, kterou lze určit, s danou citlivostí elipsometru.

To je v rozsahu sub-monovrstvy. Maximální tloušťka filmu, kterou lze určit, závisí hlavně na rozsahu vlnových délek a použitém spektrálním rozlišení. Typicky lze analyzovat filmy až do několika desítek μm .

Co jsou základní měřené parametry

Ellipsometrie měří změnu stavu polarizace světelného paprsku způsobenou odrazem na povrchu vzorku (nebo prostupem přes vzorek). Měřenými parametry jsou tzv. elipsometrické úhly Ψ a Δ .

Vztahují se k poměru komplexních Fresnelových koeficientů odrazu r_s a r_p .

r_s je tedy koeficient odrazu pro světlo polarizované kolmo (německy: „senkrecht“) k rovině dopadu a

r_p je koeficient odrazu pro světlo polarizované rovnoběžně s rovinou dopadu.

To je vyjádřeno základní rovnicí elipsometrie:

Co jsou základní měřené parametry

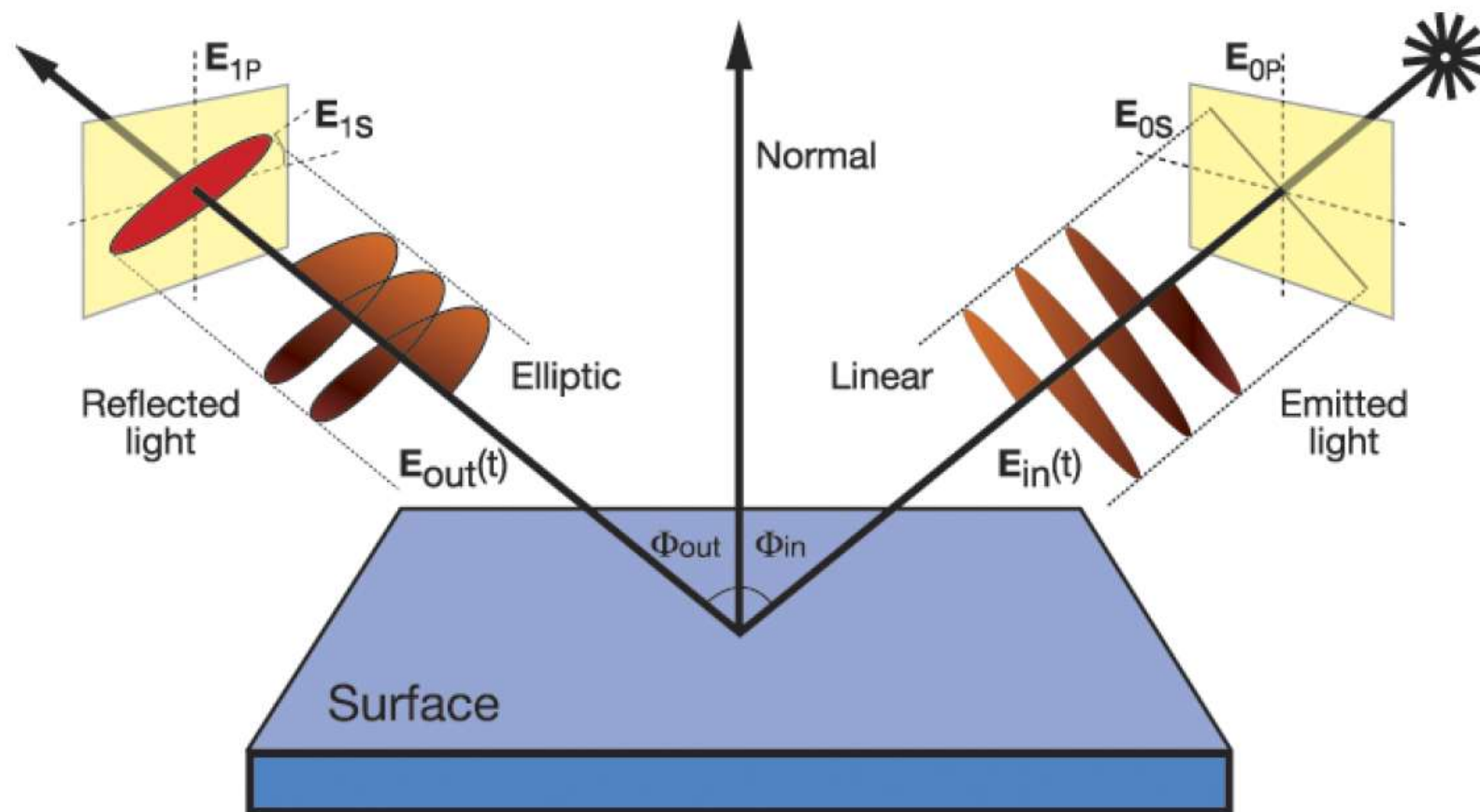
To je vyjádřeno základní rovnicí elipsometrie:

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan\Psi e^{i\Delta}$$

$$\tan\Psi = \frac{|r_p|}{|r_s|} \quad 0^\circ \leq \Psi \leq 90^\circ$$

$$\Delta = \delta_p - \delta_s \quad 0^\circ \leq \Delta \leq 360^\circ$$

Schéma typického měření na odraz



Jak měřit

Elipsometrický experiment probíhá vždy stejným postupem:

1. měření elipsometrem poskytuje elipsometrické úhly Ψ a Δ , nikoli požadované parametry vzorku, jako je tloušťka a optické konstanty.
2. Pro stanovení parametrů vzorku je nutné vytvořit model vzorku.
3. Jakmile je model sestaven, vypočítaná data musí být přizpůsobena experimentálním datům a musí být nalezena nejlepší shoda mezi dvěma soubory.
4. Uživatel musí vyhodnotit nejvhodnější model, aby mohl rozhodnout, zda je prediktivní model fyzikálně přiměřený a zda jsou různé parametry jedinečné a nekorelované.

Vlastnosti

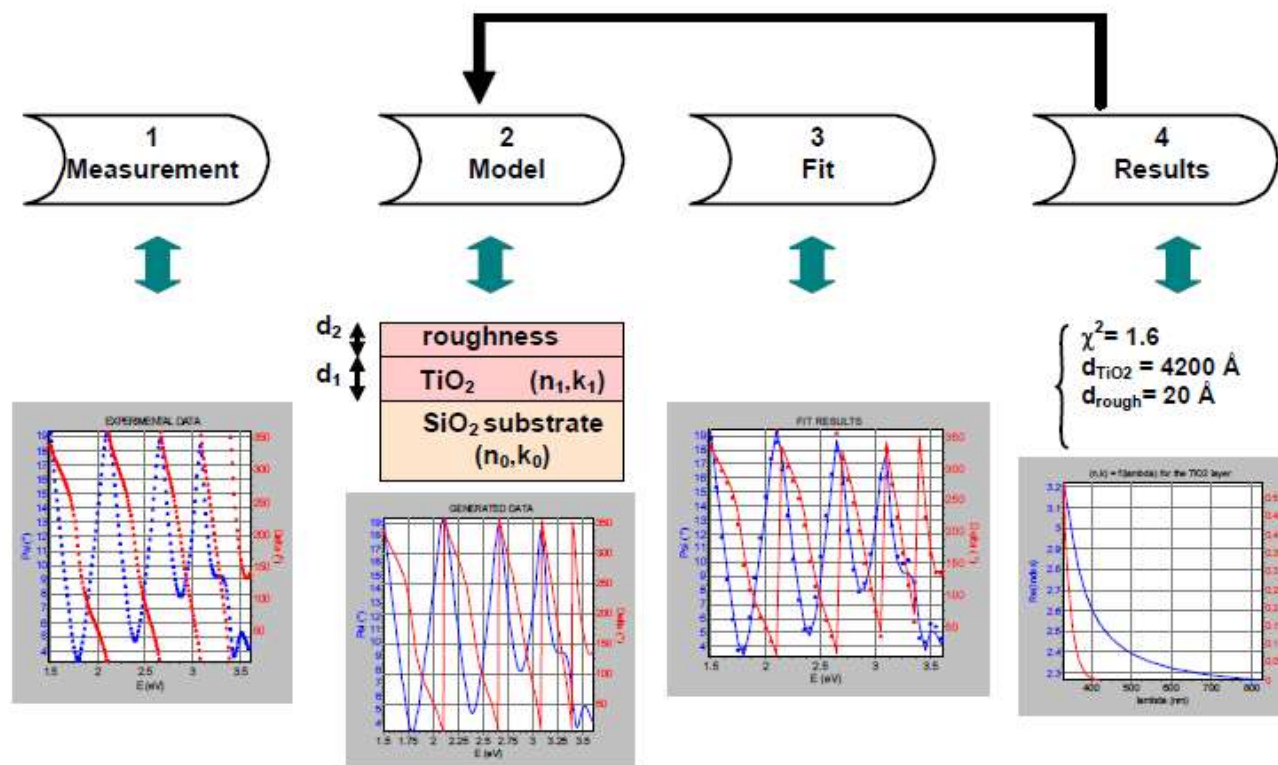
Elipsometrie je velmi citlivá a reprodukovatelná technika. Je však velmi obtížné určit absolutní přesnost elipsometru. Jedním ze způsobů je porovnání výsledků s certifikovanými standardními vzorky.

Tloušťka těchto vzorků však obvykle není lepší než ± 5 Å. Tyto hodnoty jsou výrazně nad citlivostí elipsometru. Dalším způsobem je srovnání výsledků s doplňkovými metodami, jako je AFM nebo RBS mikroskopie.

Často se používá přirozený oxid na povrchu leštěného Si, který bývá tlustý cca 2 nm.

Postup zpracování dat

SE data analysis flowchart:



Světlo – fyzikální popis

- Elektromagnetické vlny popsatelné pomocí Maxwelllovo rovnic

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} - \frac{\mu\epsilon}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0$$

E – vektor elektrického pole

B – vektor magnetické indukce, C rychlost světla, μ permeability, ϵ dielektrická konstanta

Světlo – fyzikální popis

- Pak lze světlo popsat

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

- S optickou impedancí

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$

- A elemag. rovinnou vlnu jako

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \exp\left(\frac{i2\pi \cdot \tilde{n}}{\lambda} \vec{q} \cdot \vec{r}\right) \exp(-i\omega \cdot t)$$

- \vec{r} je směrový vektor šíření, komplexní index lomu je

$$\tilde{n} = n + ik$$

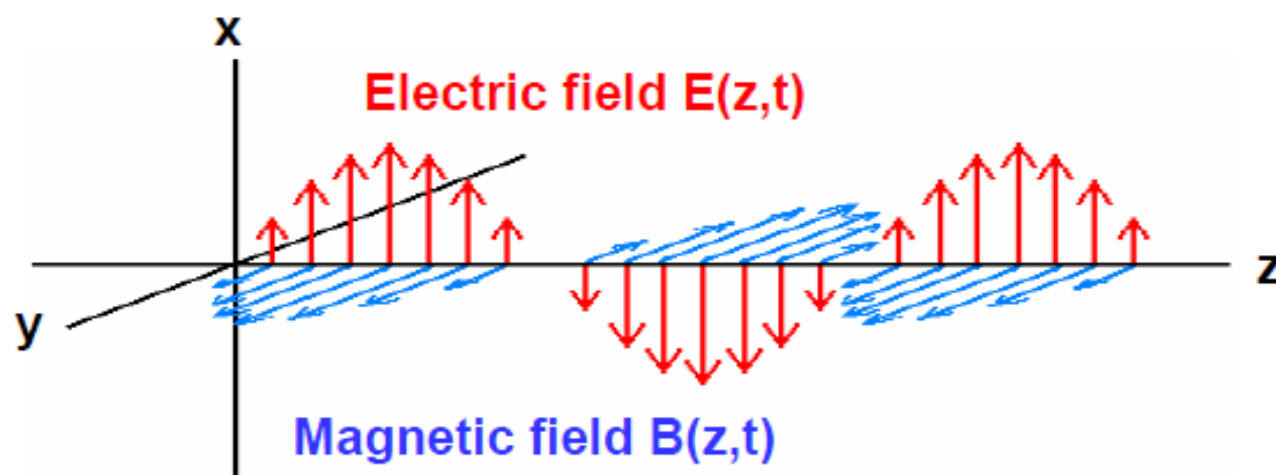
- ω je vlnová délka a E_0 konstantní vektor určující amplitudu a polarizaci

Světlo – fyzikální popis

- Úprava pro směr v ose z

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_0 \exp\left(\frac{i2\pi \cdot \tilde{n}}{\lambda} q_z z\right) \exp(-i\omega \cdot t)$$

- Lineárně polarizovaná rovinná vlna ve směru osy z



Interakce světla s prostředím

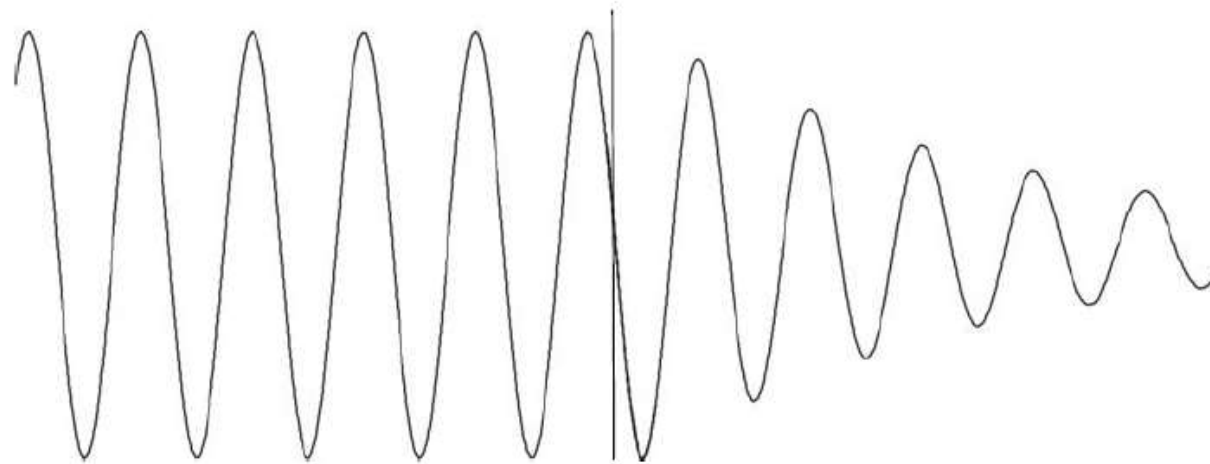
- Popisujeme pomocí indexu lomu, ale tohoto $\tilde{n} = n + ik$
- Kde n je index lomu a k je extinkční koeficient
- Pozor, n i k jsou funkce vlnové délky !!!
-

0: Transparent medium

$$\hat{n}_0 = n_0$$

1: Absorbing medium

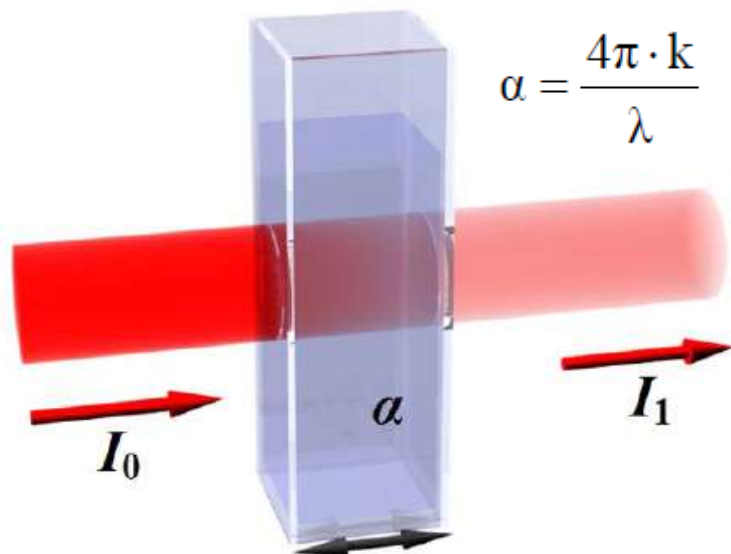
$$\hat{n}_1 = n_1 - ik_1$$



Interakce světla s prostředím

- Jaké je hloubka vniku světla D_p ?
- Absorpční médium popíšeme obecně pomocí

$$I = I_0 \exp(-\alpha \cdot z)$$



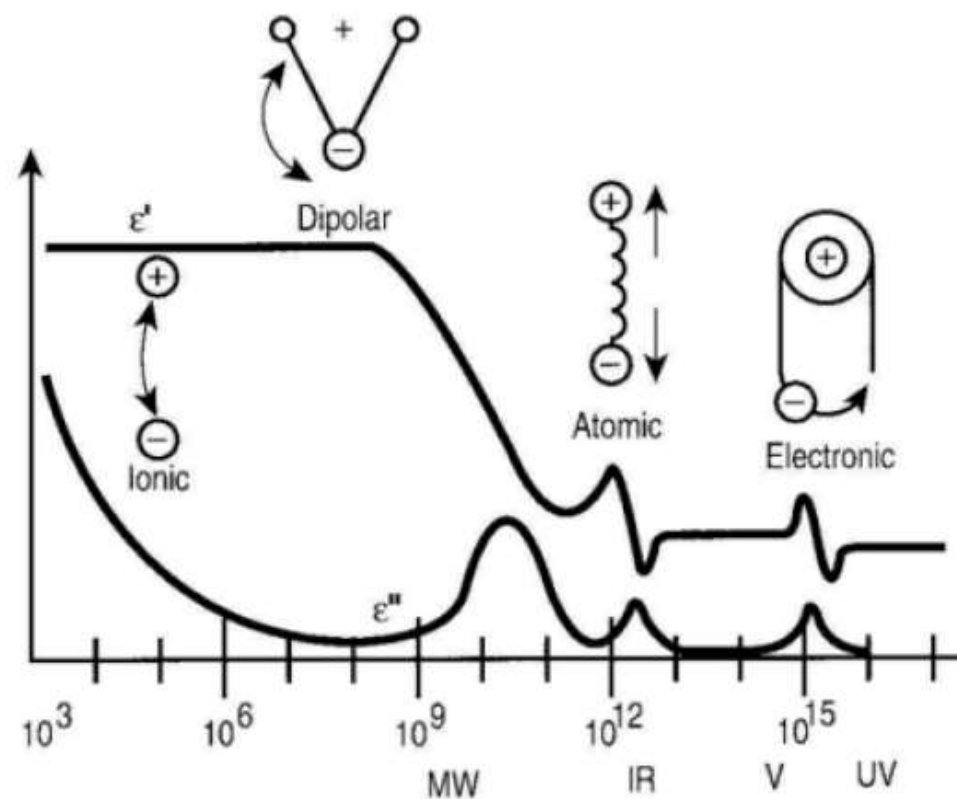
$$D_p = \frac{\lambda}{4\pi \cdot k}$$

- Vrstvy tlustší než cca $4 \times D_p$ lze považovat za substrát (neprůhledné) a nemůžeme určit jejich tloušťku, ale stále lze určit n a k

Interakce světla s prostředím

Máme hlavní tři procesy způsobující interakci světla s prostředím:

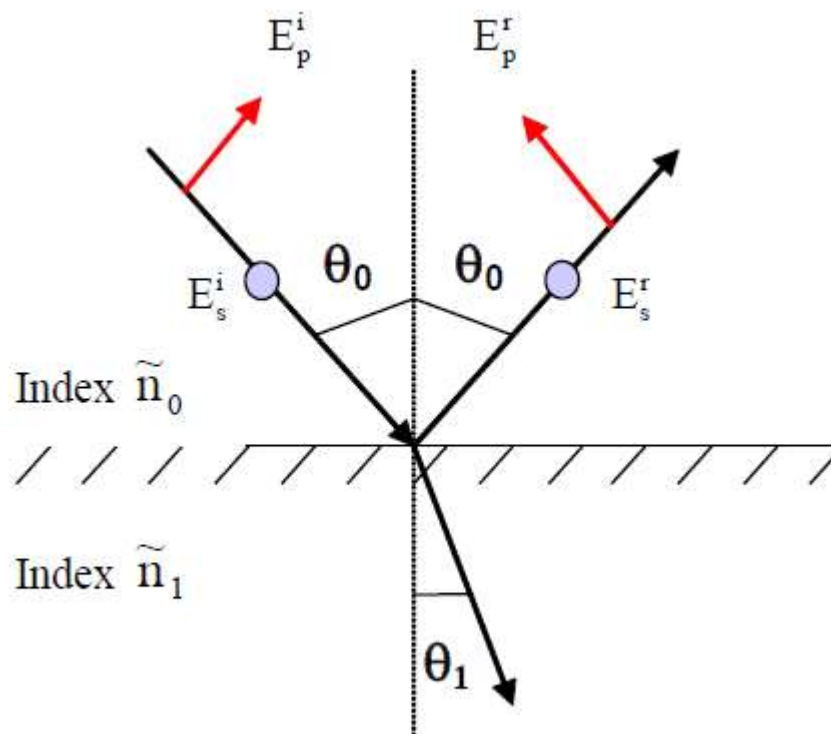
1. elektronické přechody
2. molekulární nebo mřížkové vibrace
3. volná absorpce nosiče



Světlo a rozhraní prostředí

- Snell-Descartův zákon
- Jaká tam máme n ?

$$\tilde{n}_0 \sin \theta_0 = \tilde{n}_1 \sin \theta_1$$



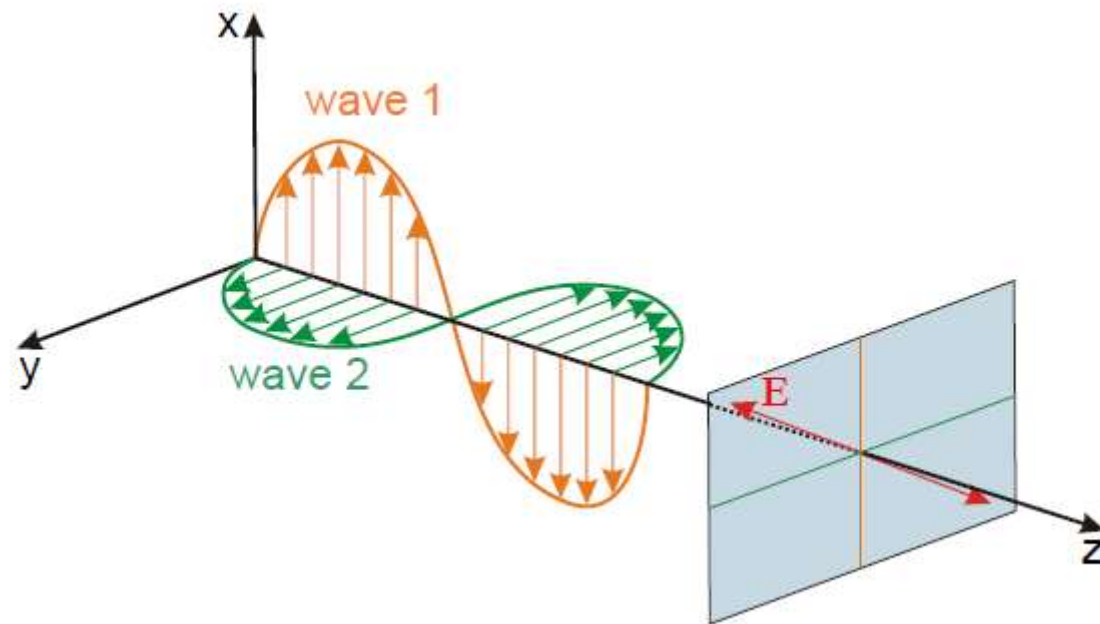
Světlo a polarizace

- Polarizace vlastně popisuje to jak budeme pozorovat časovou změnu vektoru elektrického pole v daném místě.

Světlo a polarizace

Lineární polarizace

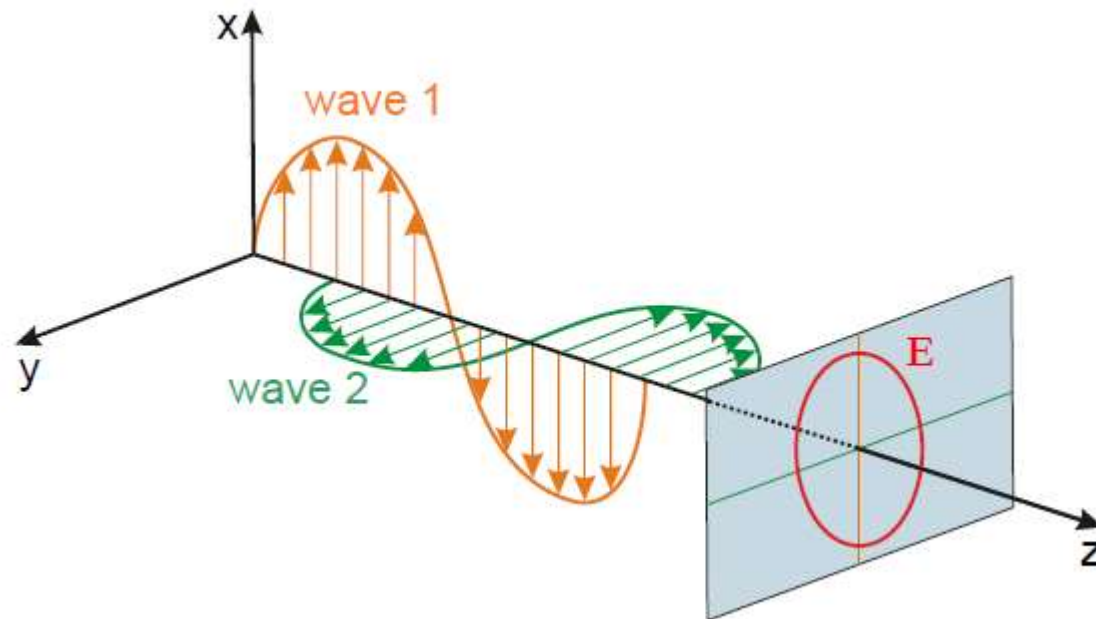
- lineárně polarizované světlo - vektor E kmitá stále v jedné přímce
- Vektor E má tedy stále stejný směr, případně opačný.



Světlo a polarizace

Kruhová polarizace

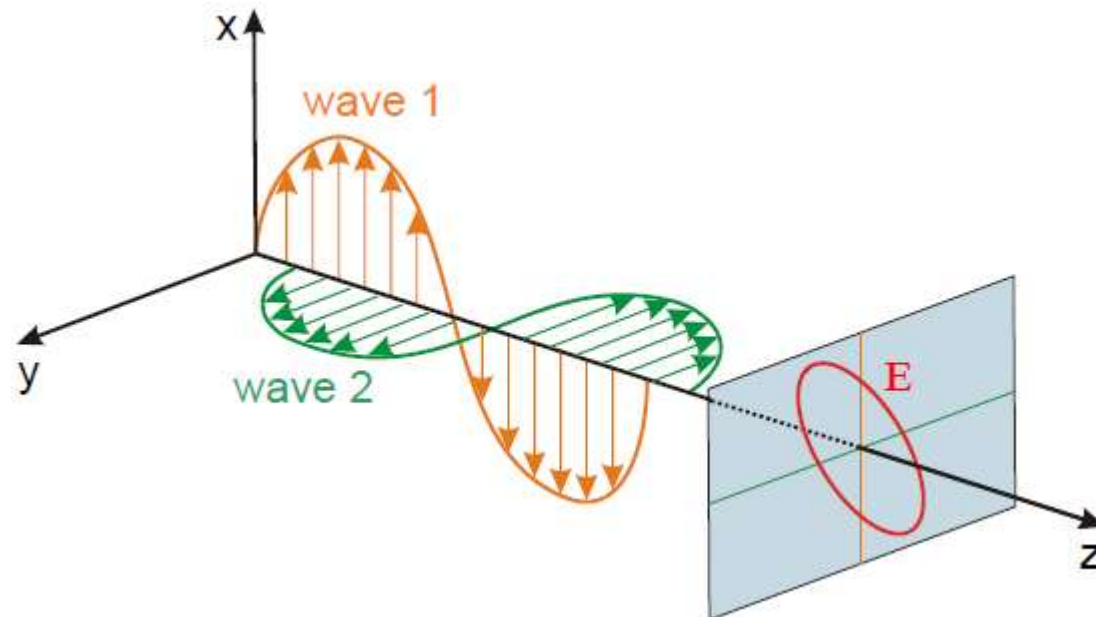
- konce vektoru E opisují kruh, tj. velikost tohoto vektoru je konstantní, ale mění se jeho směr



Světlo a polarizace

Eliptická polarizace

- konce vektoru E opisují elipsu (jedná o obecný typ polarizace) v tomto případě mění vektor E jak svojí velikost, tak i směr.



Světlo a polarizace

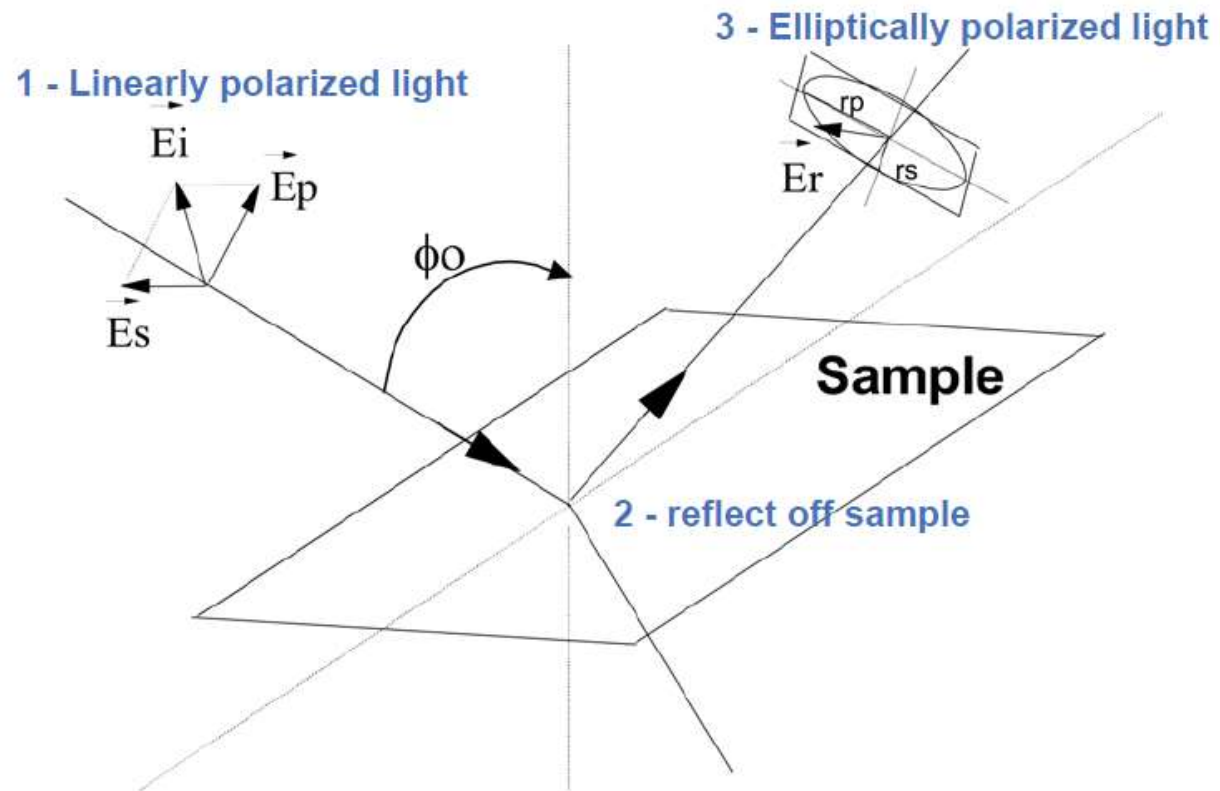
- Částečná polarizace

Elektrická pole fotonů emitovaných žárovkovým světelným zdrojem jsou orientována ve všech různých směrech. Tomu se říká nepolarizované světlo.

Obecně se elektrické pole mění způsobem, který není ani zcela pravidelný, ani zcela nepravidelný, je částečně polarizovaný.

Tuto částečnou polarizaci lze vyjádřit stupněm polarizace.

Světlo může interakcí s prostředím změnit svojí polarizaci



Fresnelovy koeficienty

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.

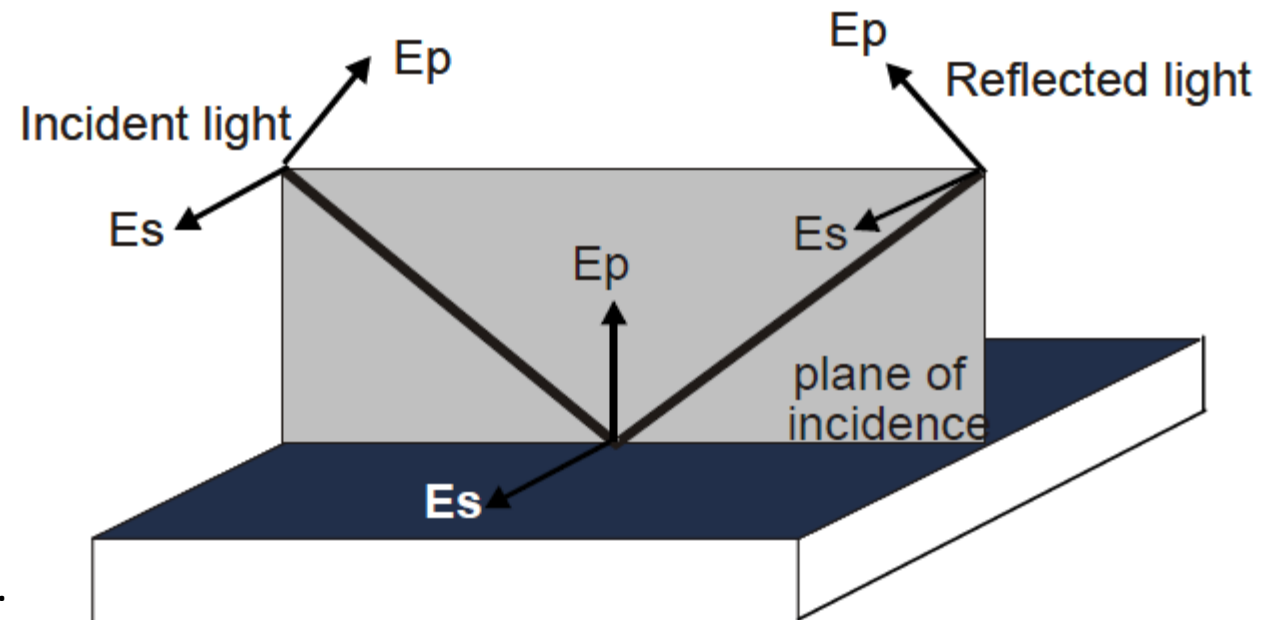
Fresnelovy koeficienty

Za předpokladu, že na povrch vzorku dorazí rovinná vlna, jedna část vlny se odrazí a druhá část je přenášena. Vektor elektrického pole lze rozložit na dvě složky, jak je uvedeno výše, na složku E_s kolmou k rovině dopadu (s – např. německý „senkrecht“) a ve složce E_p rovnoběžné s rovinou dopadu.

$$r_p = \frac{E_p^r}{E_p^i} = |r_p| \exp(i\delta_p)$$

$$r_s = \frac{E_s^r}{E_s^i} = |r_s| \exp(i\delta_s)$$

A tohle měříme, viz základní vzorec elipsometrie dříve.



Co jsou základní měřené parametry

To je vyjádřeno základní rovnicí elipsometrie:

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan\Psi e^{i\Delta}$$

$$\tan\Psi = \frac{|r_p|}{|r_s|} \quad 0^\circ \leq \Psi \leq 90^\circ$$

$$\Delta = \delta_p - \delta_s \quad 0^\circ \leq \Delta \leq 360^\circ$$

Tyto dva úhly jsou nazývané elipsometrické úhly a lze z nich určit optické parametry prostředí.

Fresnelovy koeficienty a prostředí

- Vyjdeme ze Snellova zákona: $\tilde{n}_0 \sin\theta_0 = \tilde{n}_1 \sin\theta_1$
- Kde θ_0 je úhel dopadu, θ_1 je úhel odrazu a n_0 je index lomu prostředí a n_1 je index lomu zkoumaného vzorku

- Pak lze vyjádřit pro odraz

$$r_p = \frac{\tilde{n}_1 \cos\theta_0 - \tilde{n}_0 \cos\theta_1}{\tilde{n}_0 \cos\theta_0 + \tilde{n}_1 \cos\theta_1}$$

$$r_s = \frac{\tilde{n}_0 \cos\theta_0 - \tilde{n}_1 \cos\theta_1}{\tilde{n}_0 \cos\theta_0 + \tilde{n}_1 \cos\theta_1}$$

- A pro lom

$$t_p = \frac{2\tilde{n}_0 \cos\theta_0}{\tilde{n}_1 \cos\theta_0 + \tilde{n}_0 \cos\theta_1}$$

$$t_s = \frac{2\tilde{n}_0 \cos\theta_0}{\tilde{n}_0 \cos\theta_0 + \tilde{n}_1 \cos\theta_1}$$

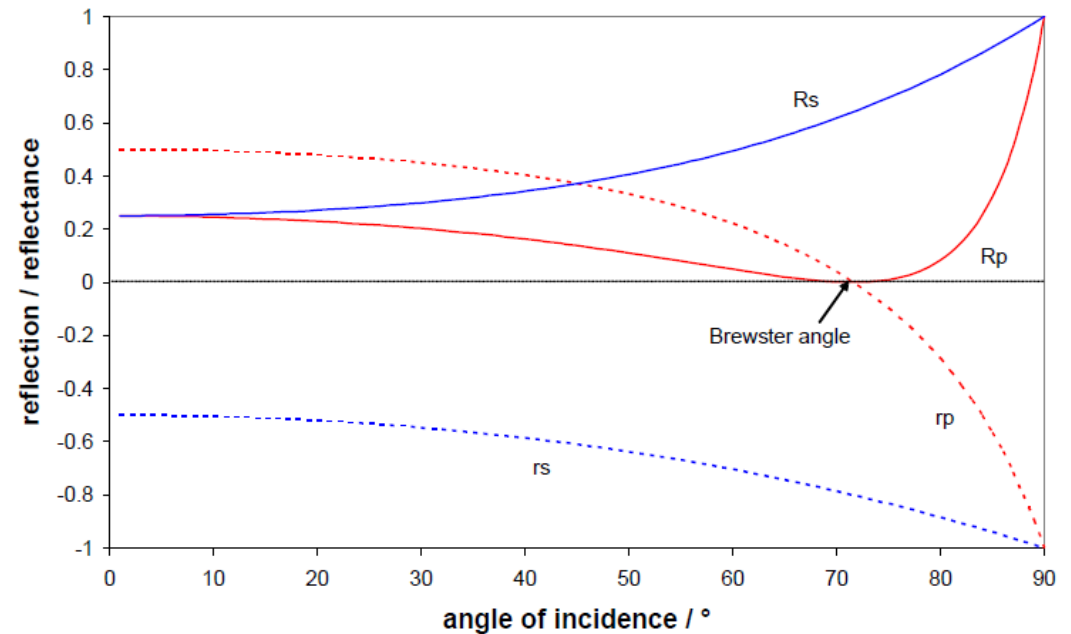
- Pro nekonečný vzorek lze spočítat dielektrickou funkci materiálu

$$\tilde{\varepsilon} = \tilde{n}_1^2 = \tilde{n}_0^2 \sin^2\theta_0 \left[1 + \left(\frac{1-\rho}{1+\rho} \right)^2 \tan^2\theta_0 \right] \quad \rho = r_p/r_s:$$

Fresnelovy koeficienty a prostředí

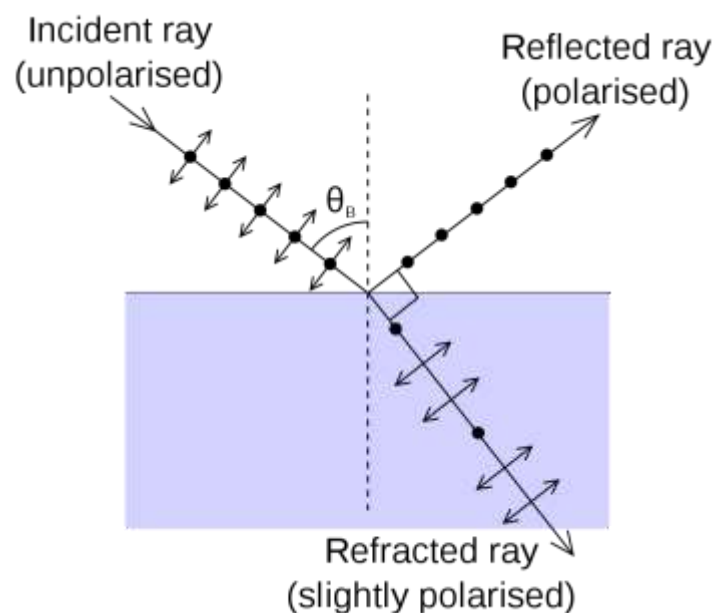
- Odrazivost (reflectance) je pak: $R^S = |r^S|^2$ and $R^P = |r^P|^2$
- Ale obě r jsou funkcí úhlu dopadu
- Existuje úhel, kdy $R_p = 0$.
- A tento úhel je nazván
- Brewsterův úhel
- A lze ho spočítat i

$$\tan\theta_B = \frac{n_1}{n_0}$$

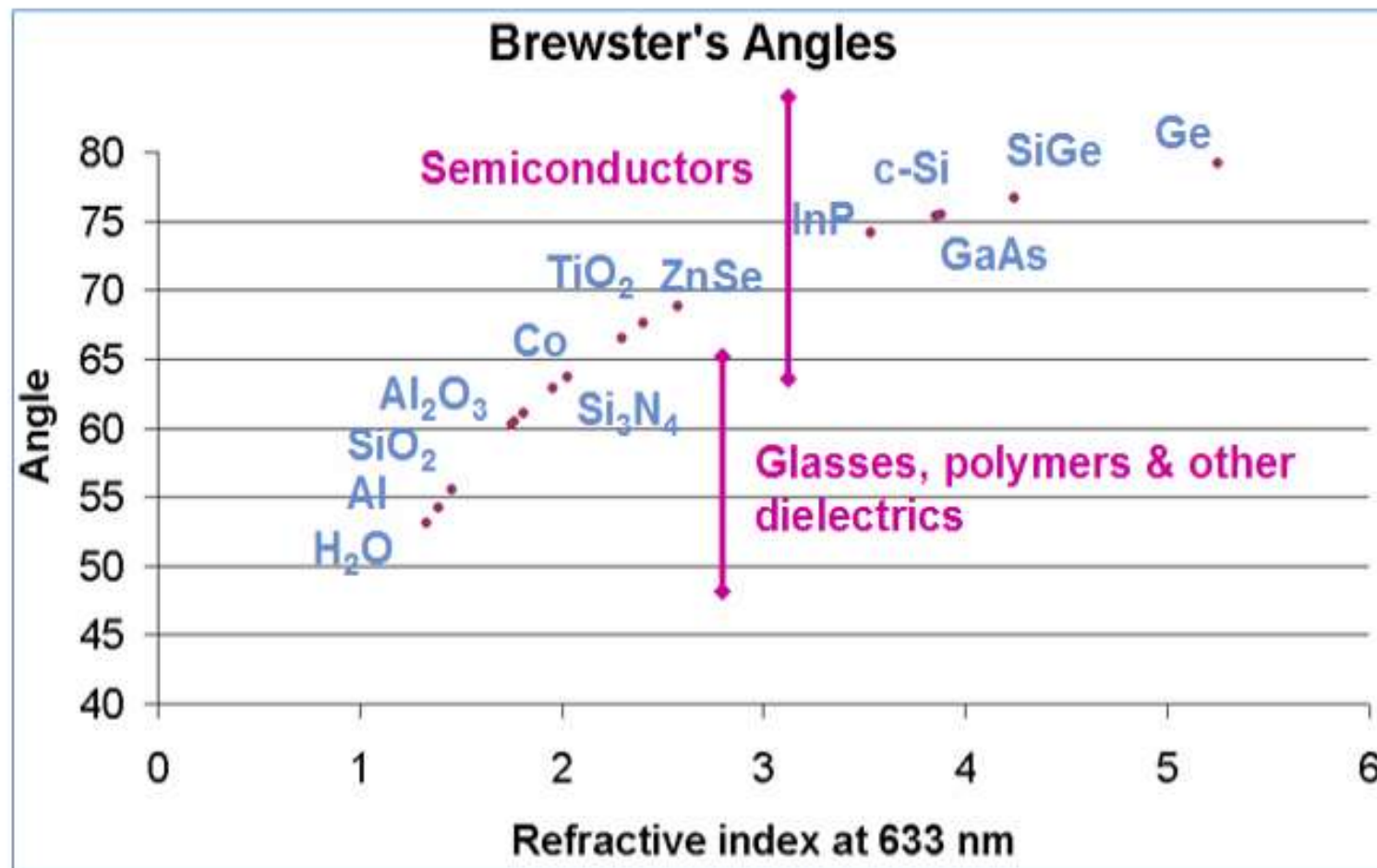


Brewsterův úhel

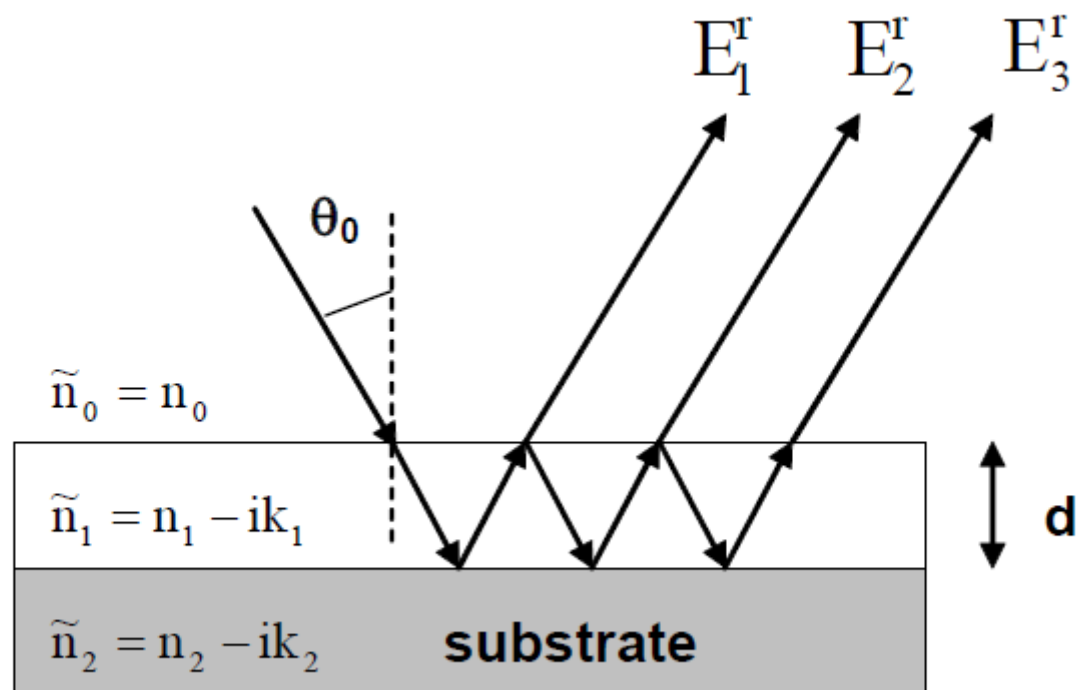
- Brewsterův úhel (též polarizační úhel) je úhel dopadu světla na rozhraní dvou opticky různých nevodivých prostředí, při kterém dochází k úplnému průchodu polarizovaného světla do druhého prostředí bez jakéhokoli odrazu. Pro nepolarizované světlo to znamená, že odražená složka bude dokonale polarizována.



Brewsterův úhel



Odraz světla v případech s tenkou vrstvou



Odraz světla v případech s tenkou vrstvou

V případě vrstvy nanesené na substrát nelze část světla, která je propuštěna, ignorovat, jako je tomu v případě objemového materiálu, protože se odráží na rozhraní fólie-substrát.

Výsledná odražená vlna vracející se do prostředí 0 je složena ze světla, které se odráží od prvního rozhraní, jakož i ze světla procházejícího prvním rozhraním, odraženého druhým a následně přenášeného prvním rozhraním atd.

Za předpokladu, že předchozí odvození pro Fresnelovy koeficienty odrazu a prostupu objemovým materiálem je lokálně platné pro odraz a přenos paprsku z libovolného rozhraní, můžeme nyní vypočítat Fresnelovy koeficienty, které jsou funkcemi optických vlastností filmu a okolního prostředí.

Výpočet koeficientu pro p-polarizaci je nezávislý na výpočtu pro s-polarizaci; jakýkoli libovolný dopadající světelný paprsek lze popsat jako lineární kombinaci dvou polarizačních stavů.

Odraz světla v případech s tenkou vrstvou

Pro jednu vrstvu je poměr amplitudy výstupní výsledné vlny k amplitudě příchozího světelného paprsku definován jako celkový koeficient odrazu:

$$\Gamma_{\text{total}}^p = \frac{E_p^r}{E_p^i} = \frac{r_{01}^p + r_{12}^p \exp(-i \cdot 2\beta)}{1 + r_{01}^p r_{12}^p \exp(-i \cdot 2\beta)}$$

$$\Gamma_{\text{total}}^s = \frac{E_s^r}{E_s^i} = \frac{r_{01}^s + r_{12}^s \exp(-i \cdot 2\beta)}{1 + r_{01}^s r_{12}^s \exp(-i \cdot 2\beta)}$$

A základní rovnici lze zapsat jako $\beta = \left(\frac{2\pi \cdot d}{\lambda} \right) \tilde{n}_1 \cos\theta_1$

Vliv tloušťky vrstvy

Pro kolmý dopad je dán celkový koeficient odrazu pro jednu vrstvu na substrátu takto:

$$r_{total} = \frac{r_{01} + r_{12} \exp(-i \cdot 2\beta)}{1 + r_{01} r_{12} \exp(-i \cdot 2\beta)}$$

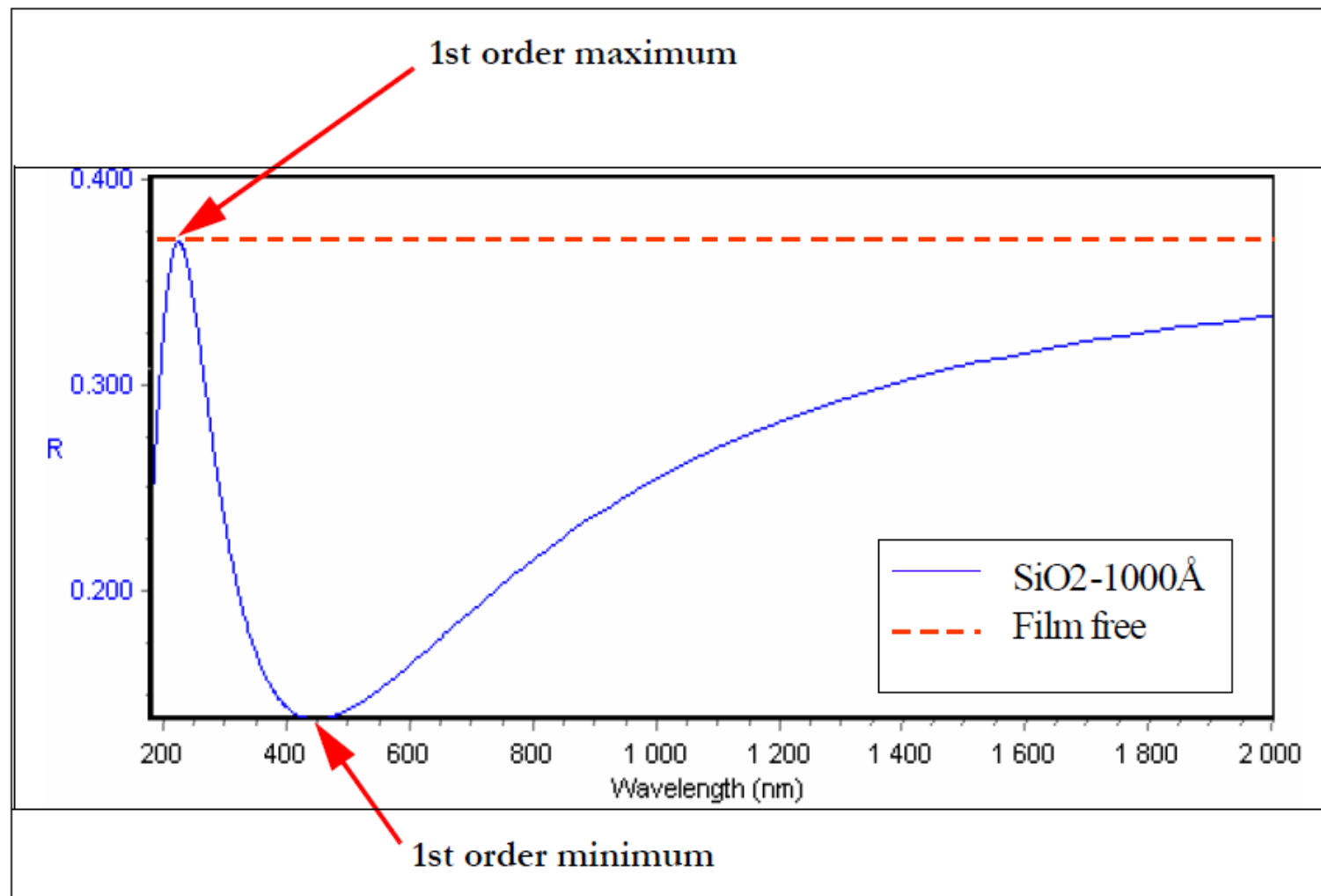
Vliv tloušťky vrstvy

Když tloušťka a vlnová délka jsou takové, že se světlo odráží od horního povrchu a světlo odrážející se od rozhraní vrstva-substrát nebo vrstva1-vrstva2 jsou o 180° mimo fáze, což je ekvivalent $2\beta = \pi$, exponenciální člen odrazivosti je -1 a máme největší množství destruktivního rušení. Výsledkem je minimum prvního řádu na spektru odrazivosti. Když $2\beta = 2\pi$, hodnota exponenciálního členu je $+1$, odrazivost je stejná jako odrazivost substrátu bez filmu a máme maximum prvního řádu.

Minima nastávají pro $2\beta = \pi, 3\pi, 5\pi, 7\pi\dots$ a maxima nastávají pro $2\beta = 2\pi, 4\pi, 6\pi, 8\pi\dots$

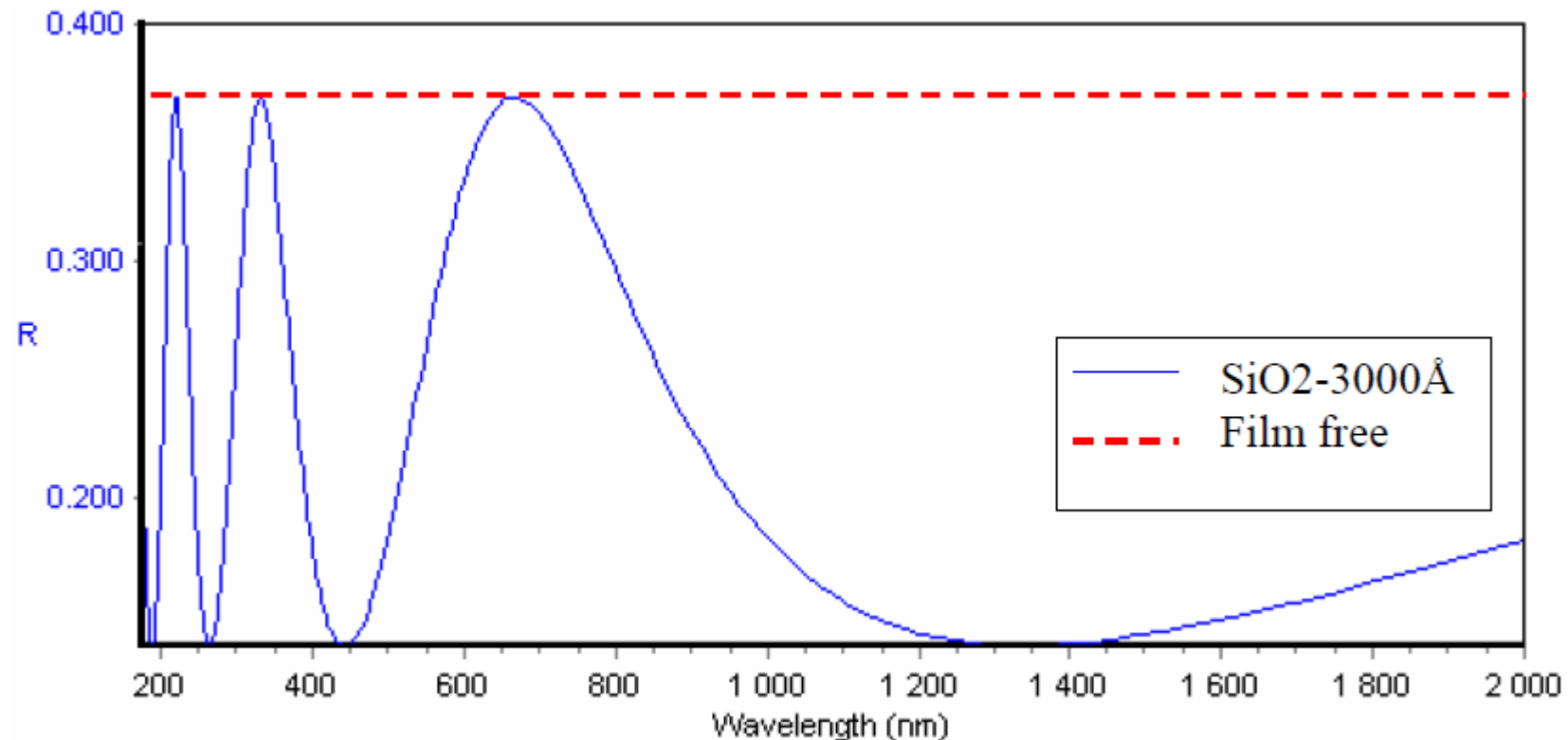
Pro následující ilustraci jsme vynesli odrazivost 1000 \AA silné vrstvy SiO_2 na substrát, jehož index lomu „ n “ je $3,87$ a jehož extinkční koeficient „ k “ je $0,0165$.

Vliv tloušťky vrstvy



Vliv tloušťky vrstvy

- Pokud zvětšíme tloušťku vrstvy SiO₂, objeví se postupně několik maxim a minim vyššího řádu. Spektrum odrazivosti vrstvy SiO₂ 3000 Å na stejném substrátu jako výše je znázorněno zde.

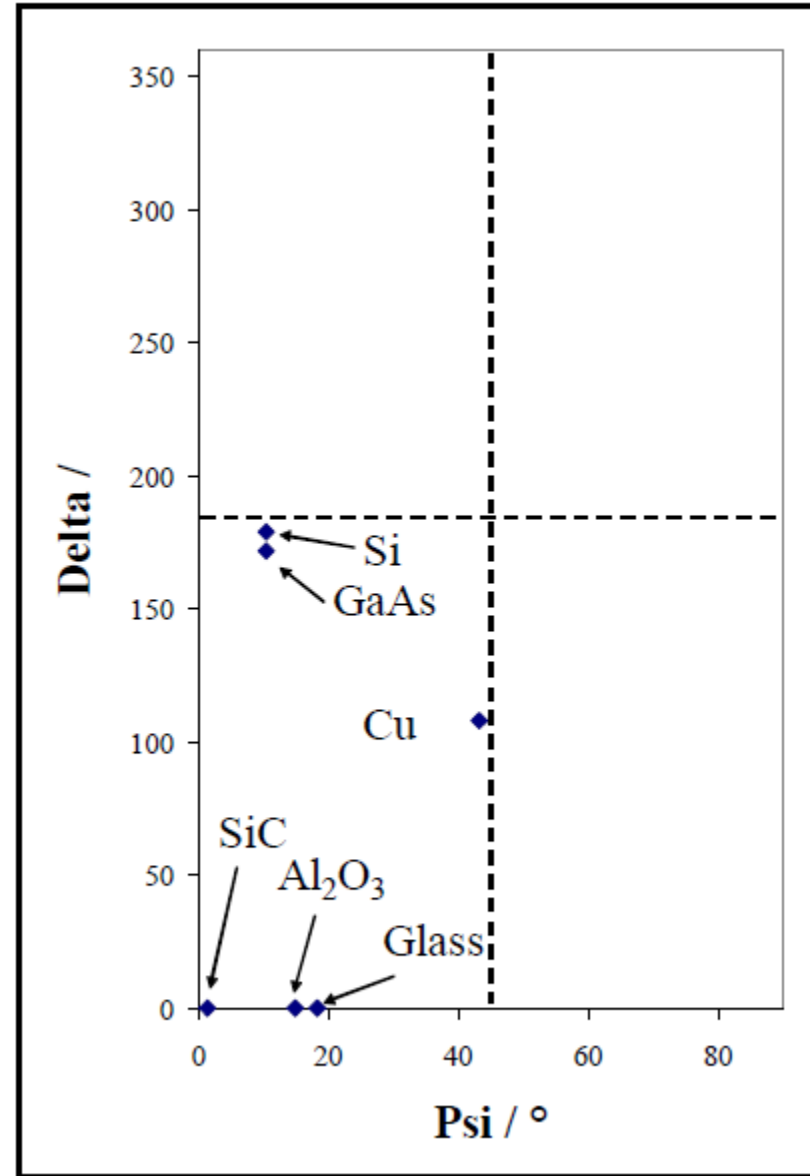


Vliv tloušťky vrstvy

- Pozorujeme, že:
 - vzdálenost mezi maximy a minimy se zvyšuje s vlnovou délkou
 - zvýšení tloušťky způsobí, že se všechny polohy maxim a minim posunou směrem k kratší vlnové délce
 - tlustší vrstvy poskytují více maxim a minim než tenčí vrstvy pro jakýkoli rozsah vlnových délek

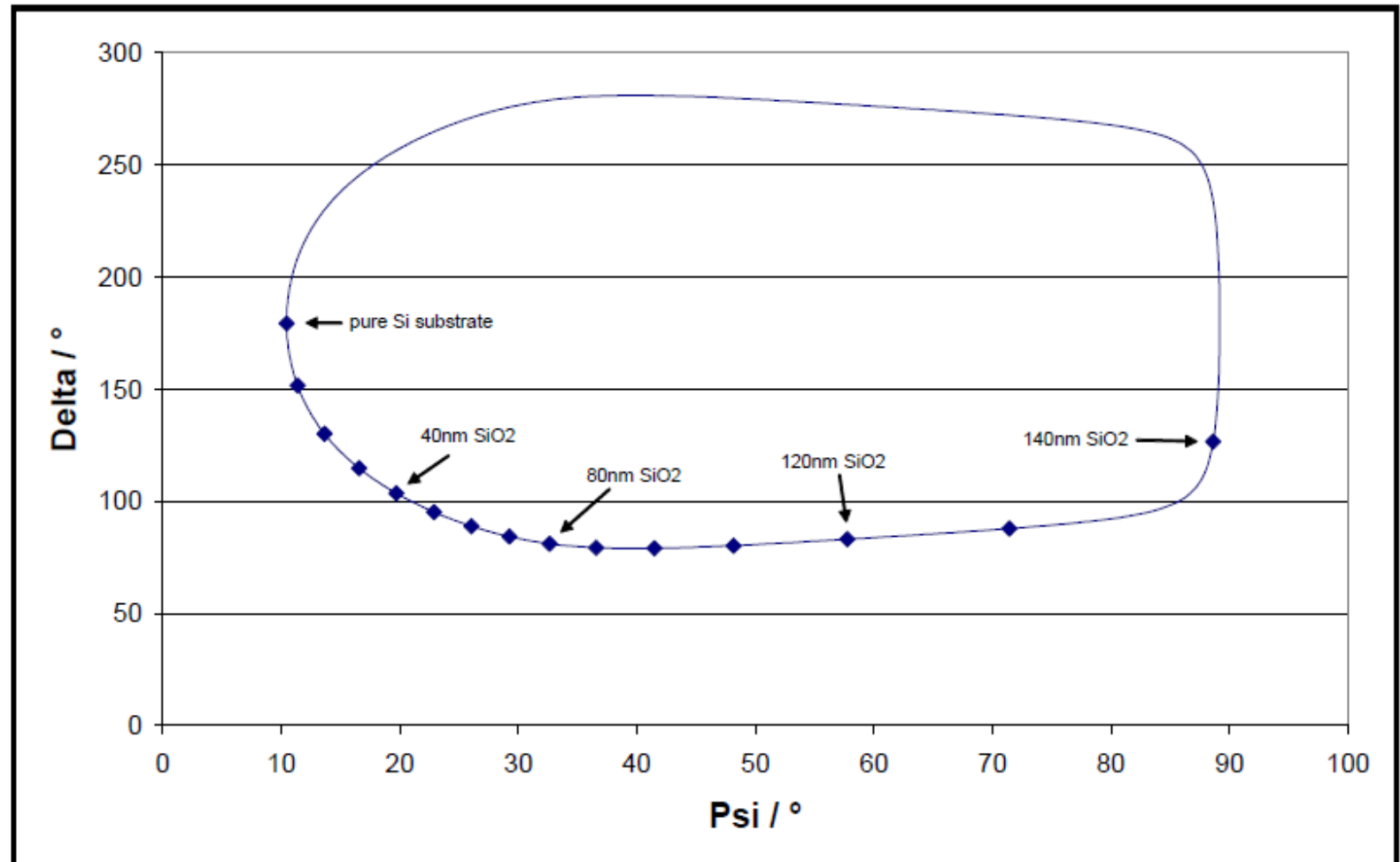
Základy elipsometrie

- Základní rovnici a úhly už známe, úhly jsou závislé na druhu vzorku
- Vše pro jednu vlnovou délku



Tloušťka a elipsometické úhly

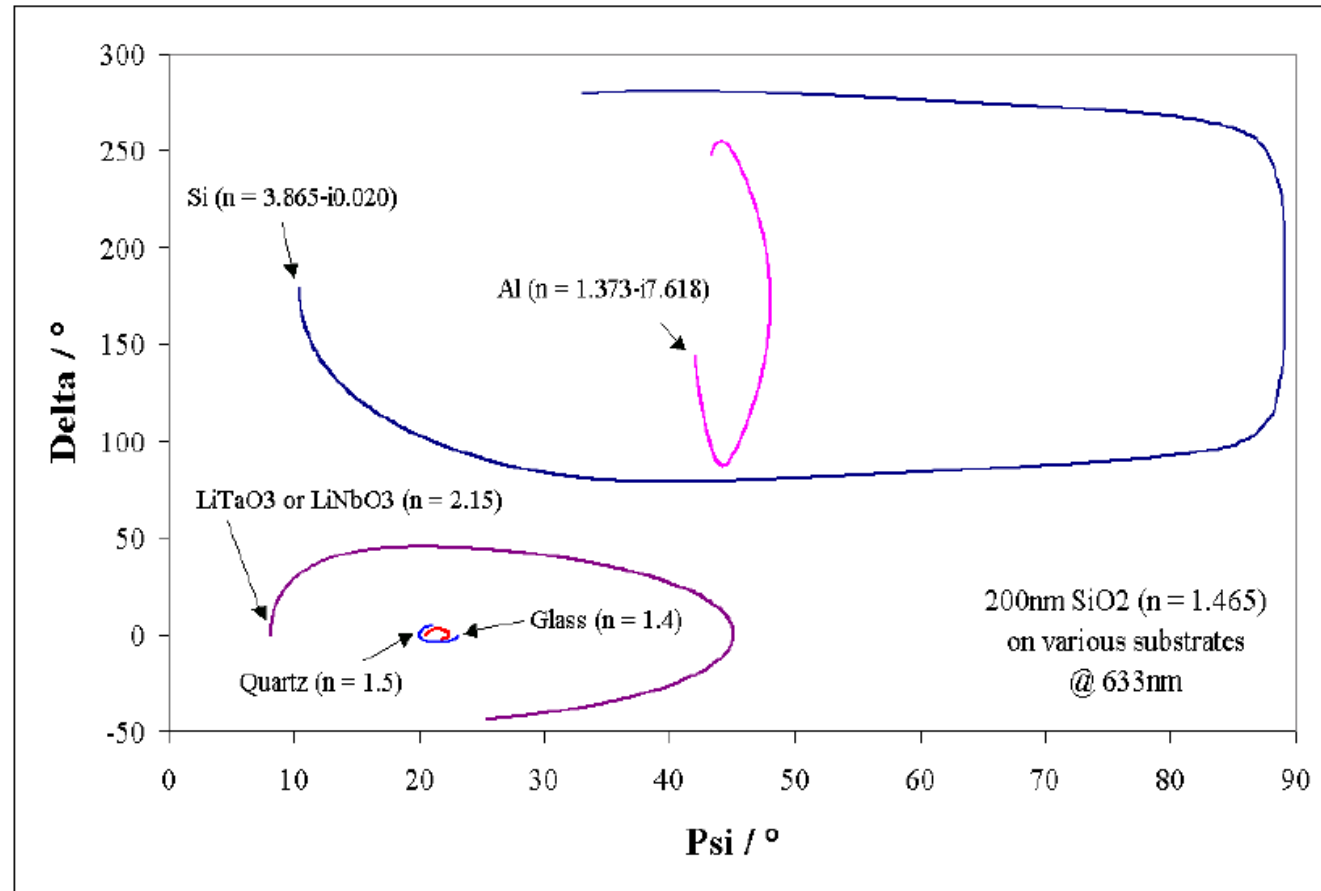
- Pro transparentní vzorky lze pozorovat uzavřenou křivku
- V případě jedné vrstvy
- Pro SiO₂ na Si substrátu
- (AOI = 70°, 633nm) je
- perioda cca. 280 nm.
- Takže vlastně není možné rozlišit vrstvu SiO₂ o určité tloušťce t a vrstvu o tloušťce $t + nP$. Například následující vrstvy SiO₂ by poskytly stejné - hodnoty: 20nm, 300nm, 580nm, Tomu se říká „problém periody“ elipsometrie jedné vlnové délky.



Tloušťka, materiál a elipsometické úhly

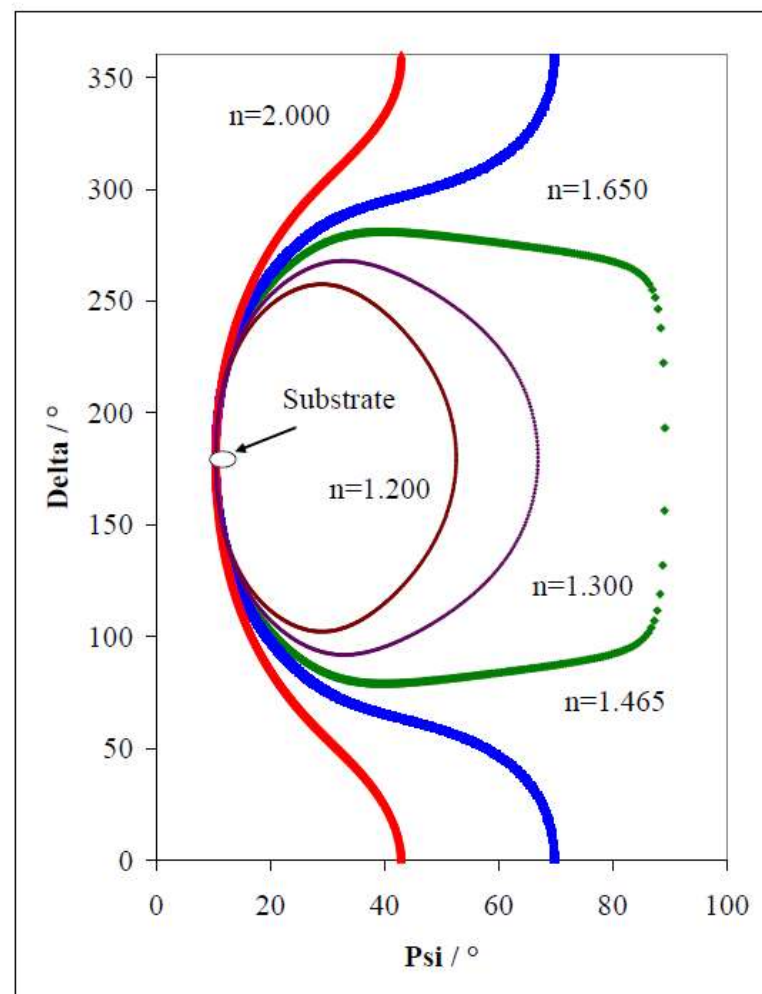
- Perioda závisí na vlnové délce, úhlu dopadu (AOI) a indexu lomu materiálu

$$P = \frac{\lambda}{2\sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2(AOI)}}$$

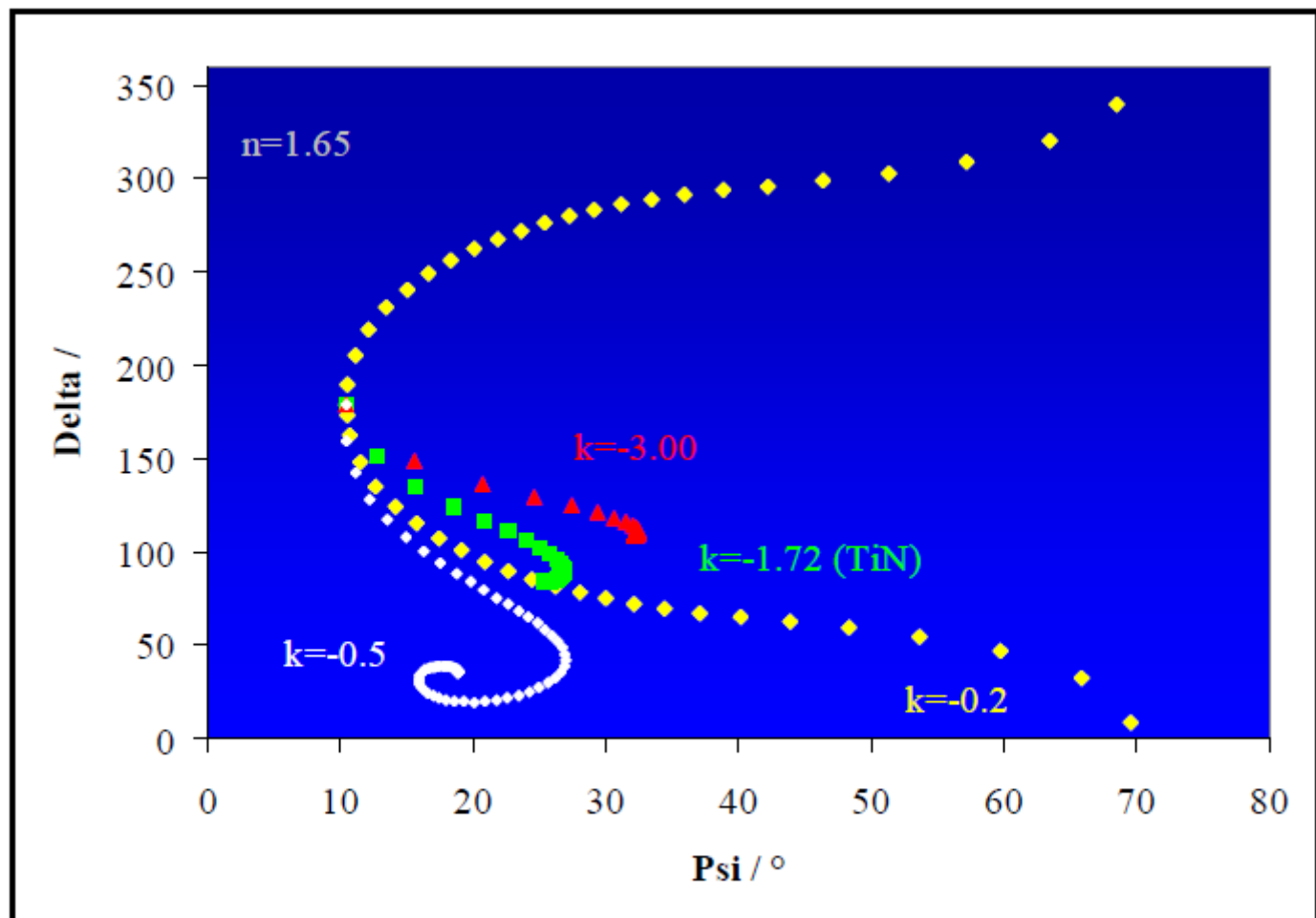


Jedna vrstva, ale různá n

- Pro k blízka 0

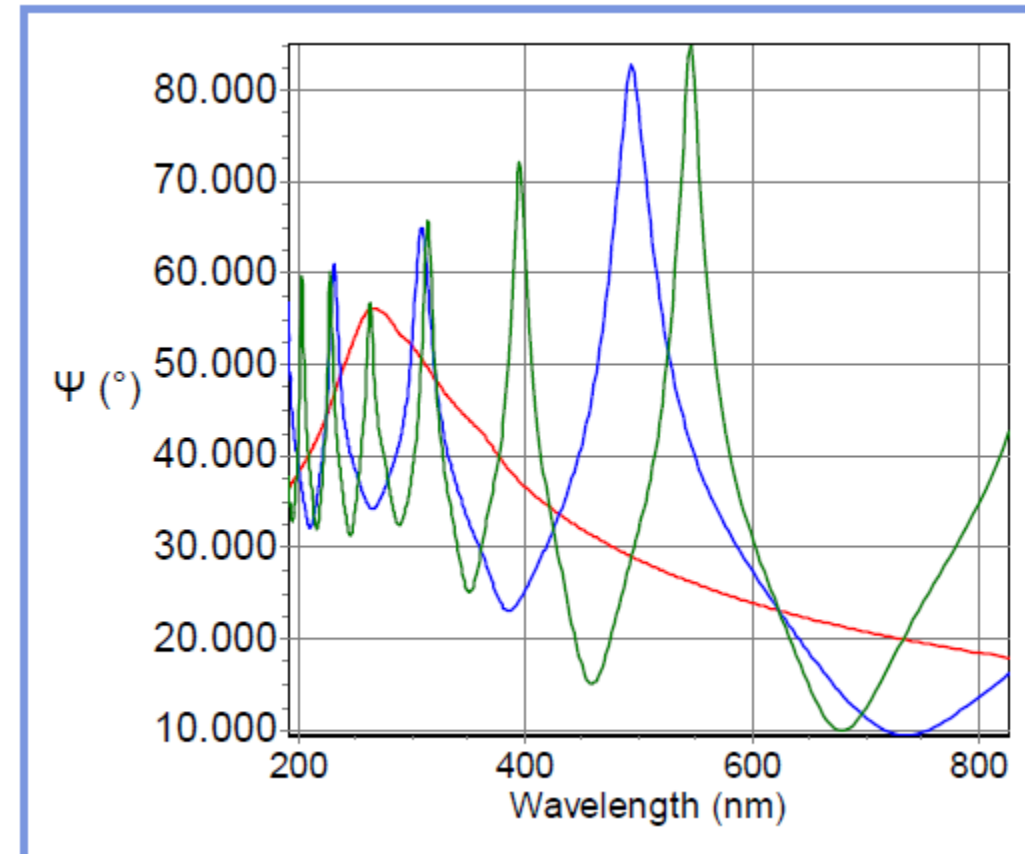


Jedna vrstva, ale různá k



Řešení problému periodicity

- Měříme na více než jedné vlnové délce
- Následující graf ukazuje Ψ -hodnoty SiO_2 filmů na Si substrátu (červená: 50nm, modrá: 330nm, zelená: 610nm) při AOI = 70° :



Druhy přístrojů

Existují tři hlavní techniky měření elipsometrických úhlů Ψ a Δ :

- nulová elipsometrie
- analyzátor s rotujícími prvky
- polarizační modulační elipsometr

Všechny typy elipsometrů se skládají z určitého druhu zdroje světla, zařízení, které definuje stav polarizace před dopadem světla na vzorek, a zařízení, které určuje stav polarizace po odrazu.

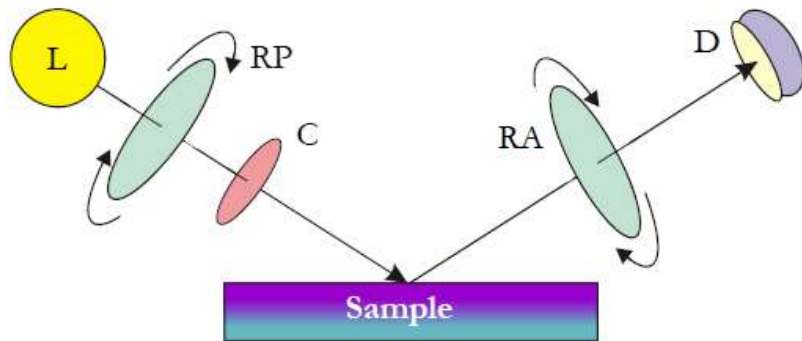
Nulová elipsometrie

Tento druh elipsometru je založen na principu minimalizace signálu. Azimuty polarizátoru a analyzátoru jsou ručně nastavitelné, aby se dosáhlo konfigurace, kde je detekovaná intenzita světla minimalizována.

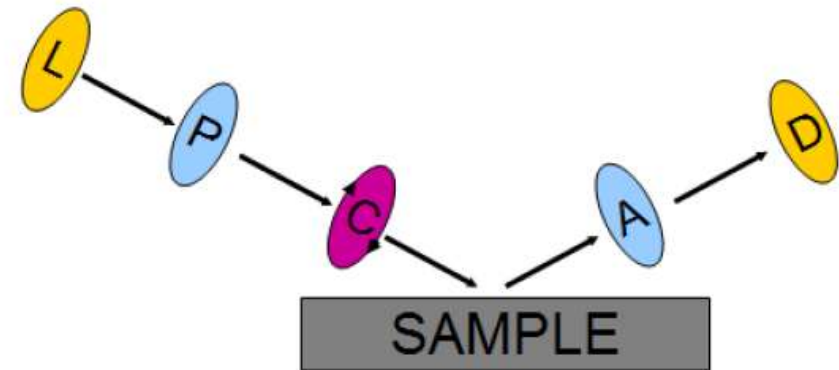
S rotujícími prvky

Jedná se o velmi běžný typ elipsometru. Jeden z polarizačních prvků (polarizátor, analyzátor nebo kompenzátor) rotuje s frekvencí cca. 10 až 300 Hz. To již vede ke zlepšení doby akvizice ve srovnání s nulovými elipsometry, ale akvizice je stále poměrně pomalá. Rozsah frekvencí je náchylný k šumu způsobenému mechanickými vibracemi.

Rotating polarizer (RP) or analyzer (RA) with compensator (C)

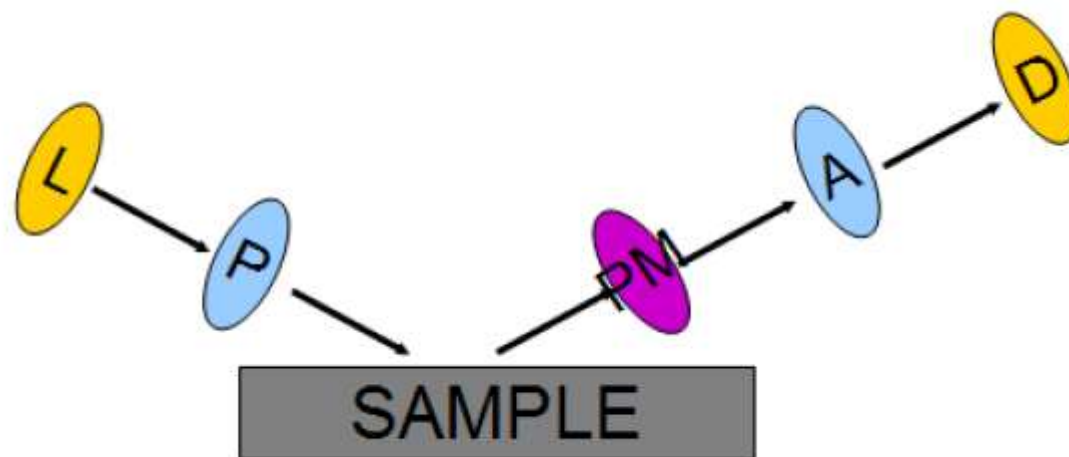


Rotating compensator (RC)

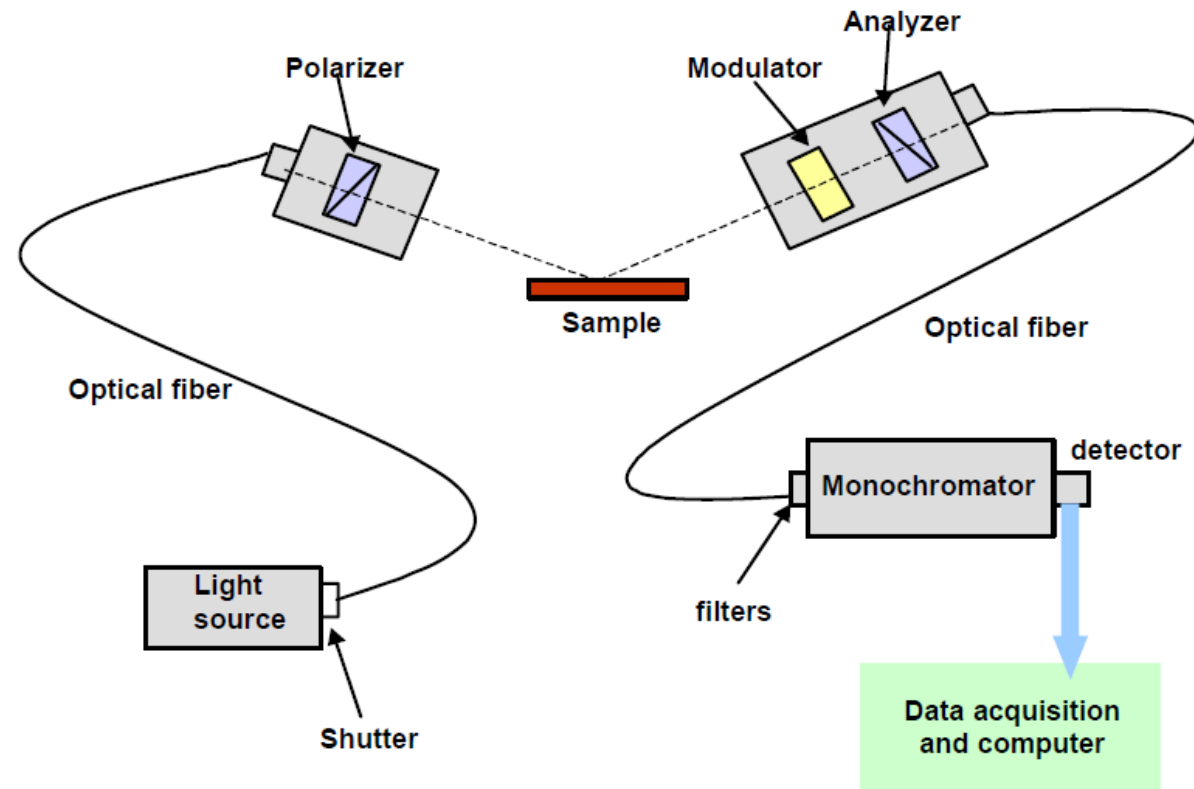


Polarizační modulační elipsometr

Tento elipsometr ukazuje optimalizovanou rychlost snímání a velký spektrální rozsah od IR po UV. Vysoká rychlost snímání je způsobena přítomností fotoelastického modulátoru (PEM), jehož frekvence snímání je kolem 50 kHz. Nevýhody tohoto elipsometru jsou chromatické chování modulátoru a sofistikované optické kalibrace.



Náš přístroj



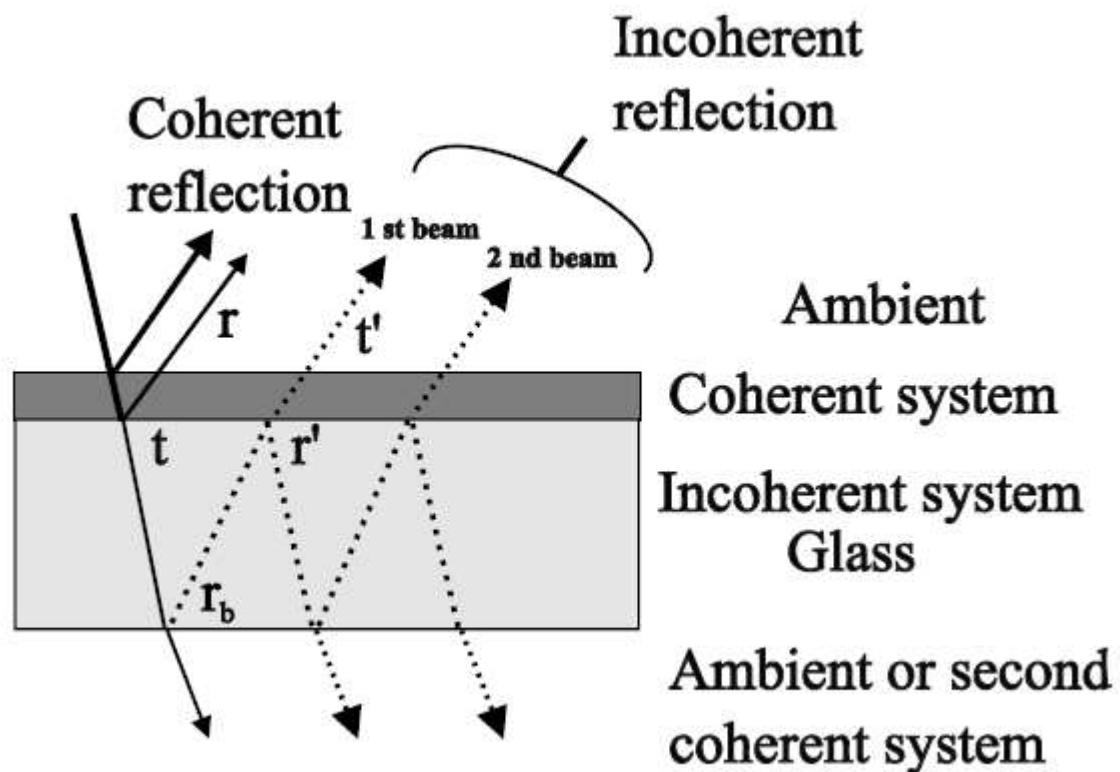
Zdroje polarizovaného světla a polarizace

Polarizované světlo lze získat následujícími způsoby:

- **odrazem** – Při odrazu světla dochází k částečné polarizaci, tedy k tomu, že jeden směr vektorů **E** převažuje. Při jednom konkrétním úhlu (Brewsterův úhel) však může dojít k polarizaci úplné. Brewsterův úhel závisí na indexu lomu prostředí a z toho důvodu je závislý i na vlnové délce.
- **lomem** – Při lomu světla dochází, podobně jako při odrazu, k částečné polarizaci. Ovšem při lomu světla se jedná vždy o polarizaci neúplnou.
- **dvojlomem** – Některé krystaly (např. islandský vápenec) jsou anizotropní, tedy jejich optické vlastnosti ([index lomu](#)) jsou závislé na směru procházejícího paprsku. Když na takový krystal dopadne paprsek světla, dojde k lomu na dva paprsky (dvojlomu). Jeden paprsek, tzv. řádný paprsek, se řídí zákonem lomu, tedy prochází jako kdyby index lomu nezávisel na směru. Druhý paprsek, tzv. mimořádný paprsek, se zákonem lomu v základním tvaru neřídí, index lomu, který v zákonu lomu vystupuje, zde totiž není konstantní, závisí na úhlu, pod jakým mimořádný paprsek prochází prostředím. Oba tyto paprsky jsou lineárně polarizované a jejich vektory **E** jsou na sebe kolmé.
- **polaroidem** – Polaroid (polarizační filtr) je představitelem tzv. absorpčních polarizátorů. Základem jsou rovnoběžně uspořádané podlouhlé, v praxi např. molekuly herapatitu (perjodid síranu chininového). Mechanisticky si to můžeme představit jako hustý plaňkový plot. Pokud prochází takovýmto prostředím světlo, jehož vektor **E** je rovnoběžný s dlouhými osami molekul, částečně prochází. Pokud ale prochází světlo, jehož vektor **E** není s dlouhými osami molekul rovnoběžný, je takové světlo plně absorbováno.

Průhledný substrát konečné tloušťky

- Back reflection lze eliminovat rozptylem světla nebo zahrnout do modelu (někdy tenký leštěný substrát)



Rady jak měřit

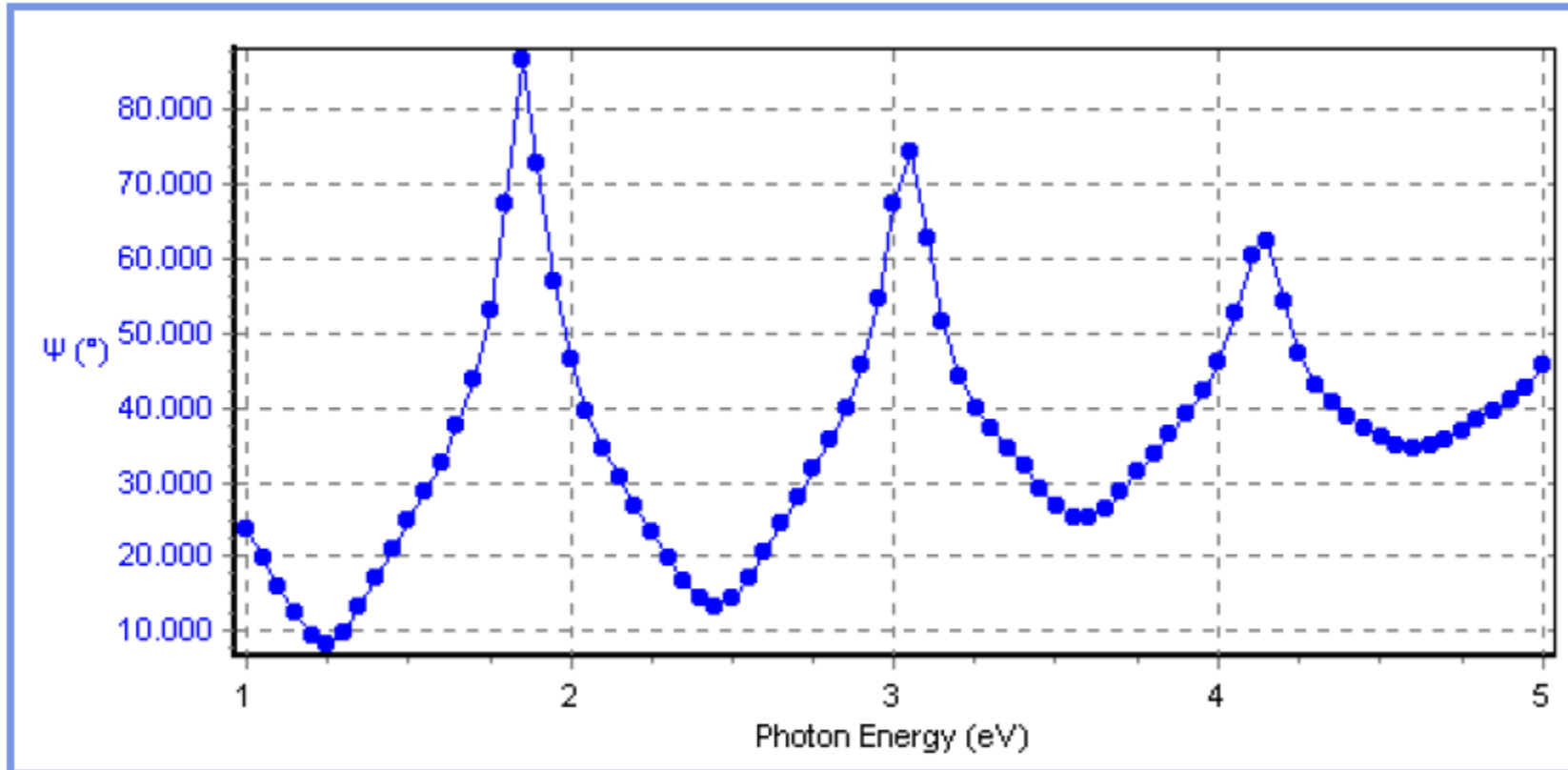
MATERIALS	TYPES	SPECTRAL RANGE
Dielectrics	High-k	IR to deep UV
	Low-k	IR to near UV
Semiconductors	Crystalline	Below band gap Low absorption
	Amorphous	Below band gap broad band of absorption
Metals	$\omega < \omega_p$	Highly absorbing in IR and VIS
	$\omega > \omega_p$	Less absorptive in UV
Glasses	Normal	IR to visible
	Float glasses	Absorbing
Plastics	PET, PEN, PP, PC	Transparent VIS
Transparent conducting oxides		Transparent in Vis
Carbon	Diamond	IR to UV
	DLC	Transparent Below band gap: IR to UV
	GLC	Transparent Below band gap: IR to VIS

Film thickness	Step size (eV)	Step size (nm)
0nm to 200nm	0.1eV	20nm
200nm to 500nm	0.05eV	10nm
500nm to 800nm	0.025eV	5nm, well resolved for wavelengths > 300nm
800nm to 1.2 μ m	0.02eV	5nm, well resolved for wavelengths > 800nm
1.2 μ m to 2 μ m	0.01eV	2nm, well resolved for wavelengths > 400nm
2 μ m to 30 μ m	0.005eV	2nm, well resolved for wavelengths > 500nm

$$E(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})}$$

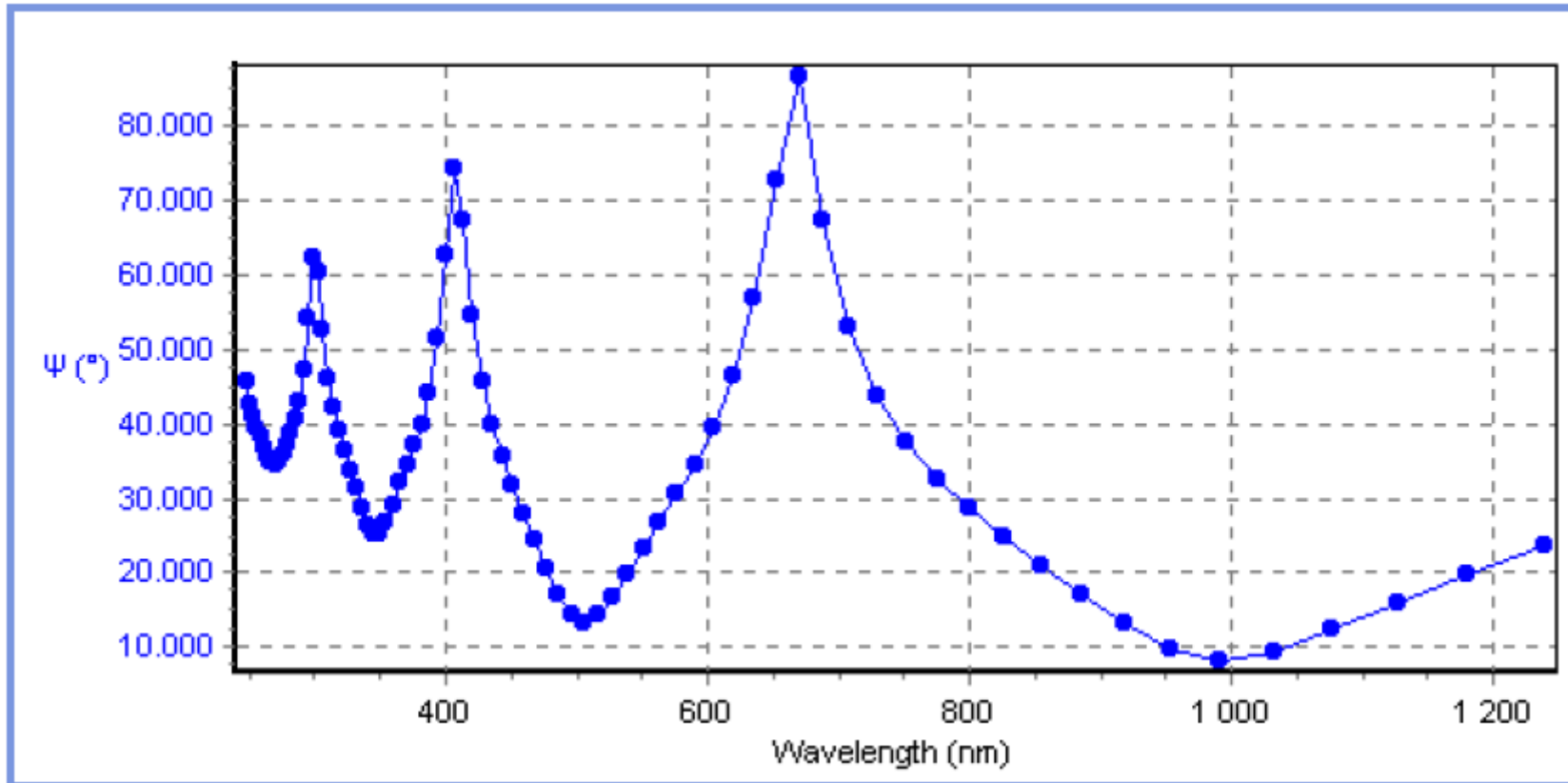
eV nebo nm – je to rozdíl

- 450 nm SiO₂/Si v 1eV až 5eV, krok 0.05eV



eV nebo nm – je to rozdíl

- 450 nm SiO_2/Si v 1eV až 5eV, krok 0.05eV – jen zobrazeno v nm



Rady

Sample	Features	Optimal units choice
Thick, transparent films	Rapidly changing features in Ψ and Δ at short wavelengths	Best to measure in terms of eV
Thick, UV absorbing films	Data features flat at short wavelengths.	Best to measure in terms of nm
Very thick and transparent films	Difficult to resolve short wavelength features	Measure only long wavelengths in terms of nm

AOI - rady

Cílem je pracovat co nejbliže Brewsterovu úhlu (BA) na substrátu, protože tam lze dosáhnout nejvyšší citlivosti. BA lze určit výpočtem nebo sledováním Ψ jako funkce AOI, protože $\Psi = 0$ na BA! (Funkce energie).

Samples	Combinations
Thin films on Si	65°, 70°, 75°
Thick films on Si	60°, 70°, 75° or 55°, 65°, 75°
Other films on glass	55°, 65°, 75°
Films on metals	70°, 80°
Anisotropic and graded films	55°, 65°, 75° or 45°, 60°, 75°

Měnitelný úhel dopadu

Proměnné úhly spojené se spektroskopickou elipsometrií se používají ke sběru velkého množství dat.

Uživatel však musí brát tyto informace s jistou opatrností, zvláště v případě vzorků s překryvnou vrstvou nebo drsnou vrstvou, protože snímání s proměnlivými úhly ne vždy poskytuje zcela nezávislé informace. Pozor na změnu průmětu stopy svazku.

Výhody tohoto režimu jsou:

- pro danou vlnovou délku mohou akvizice při různých úhlech dopadu poskytnout nezávislé informace a umožnit snížení šumu měření (zlepšení S/N).
- doplňková data statisticky zlepšují stanovení mezí spolehlivosti
- variace úhlu umožňuje určit úhel, pro který jsou hodnoty Ψ a Δ nejcitlivější.

Jak měřit

Sample type	Spectral range/ Step size	AOI	General settings	Additional measurements
Thin transparent layer/Si	UV-VIS/0.1eV	70°	IT = 200ms	
Thick transparent layer/Si	VIS-IR/0.005eV	70°	IT = 200ms	
Absorbing layer/Si	Transparent region	70°	IT = 200ms	

Multilayer/Si	UV-VIS/0.05eV	70°	IT = 200ms	VASE: 65°, 75° R
Organic layer/Si	UV-VIS-IR/0.05eV	70°	IT = 200ms	VASE: 65°, 75° R
Glass substrate	UV-VIS-IR/0.1eV	ca. 55° (BA)	IT = 1000ms	
Thin layer/glass	UV-VIS/0.1eV	ca. 55° (BA)	IT = 1000ms	
Multilayer/glass	UV-VIS-IR/0.05eV	ca. 55° (BA)	IT = 1000ms	VASE: 60°, 65° T
Organic layer/glass	UV-VIS-IR/0.05eV	ca. 55° (BA)	IT = 1000ms	VASE: 60°, 65° T
Metal substrate	UV-VIS/0.05eV	70°	IT = 200ms	VASE: 65°, 75°
Thin Transparent layer/metal	UV-VIS/0.05eV	70°	IT = 200ms	VASE: 65°, 75°
Thick Transparent layer/metal	VIS-IR/0.005eV	70°	IT = 200ms	
Plastic substrate	UV-VIS/0.05eV	ca. 62° (BA)	IT = 1000ms Config. II	VASE: 60°, 65° T
Polymer/plastic	UV-VIS/0.05eV	ca. 62° (BA)	IT = 1000ms Config. II	VASE: 60°, 65° T

Nastavitelná velikost svazku

Funkce Micro-spot umožňuje uživateli nastavit velikost průměru dopadajícího paprsku.

V našem HORIBA jsou na výběr stopy 1200, 250, 120 μm . Zmenšením velikosti bodu se signál sníží, i když malá velikost bodu může být potřeba pro malé nebo strukturované vzorky.

Základ modelování

Typicky s dodaným software pomocí předpřipravených modelů.

Lze zohlednit i z jiných zdrojů známé parametry vzorku.

Shromážděná data elipsometrického měření jsou intenzity harmonických odraženého nebo přenášeného signálu v předem definovaném spektrálním rozsahu. Tyto harmonické funkce jsou matematicky zpracovány, aby se extrahovaly hodnoty I_s a I_c pro každou zvolenou vlnovou délku, čímž se získají spektra $I_s = f(\lambda)$ a $I_c = f(\lambda)$.

Tyto hodnoty nejsou materiálovými parametry nebo tloušťkami, takže elipsometrie je nepřímá technika měření.

Počínaje hodnotami I_s a I_c může software vypočítat sledované veličiny, jako jsou Ψ a Δ .

Základ modelování

Pro extrakci sledovaných parametrů, jako jsou optické konstanty a tloušťka z měření, je třeba sestavit model, který umožňuje teoretický výpočet I_s a I_c (nebo Ψ a Δ atd.).

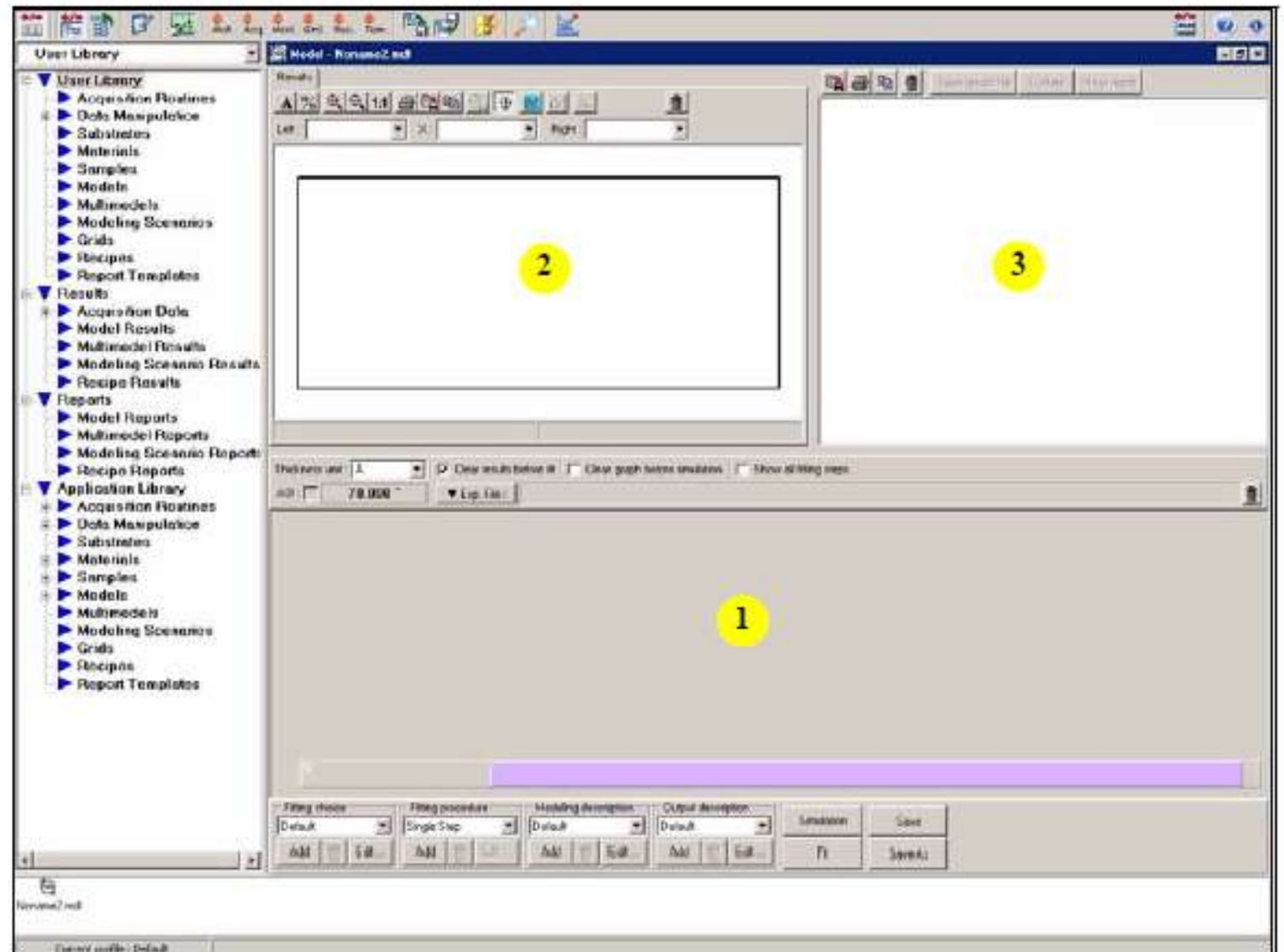
Parametry, které nás zajímají, jsou určeny porovnáním teoretických a experimentálních dat.

Model vrstvy může obsahovat:

- struktura vrstev: holý substrát, jedno- nebo vícevrstvé, super mřížky...
- optické disperze pro každý materiál: hodnoty z literatury, disperzní vzorce, slitiny
- tloušťka různých vrstev
- optická anizotropie, indexové gradienty,...

Modelování

- Existuje knihovna materiálů a lze si případně materiál upravit



- 1 Sample Structure area
- 2 Results Graphics display area
- 3 Fitting Results area

Modeling screen layout

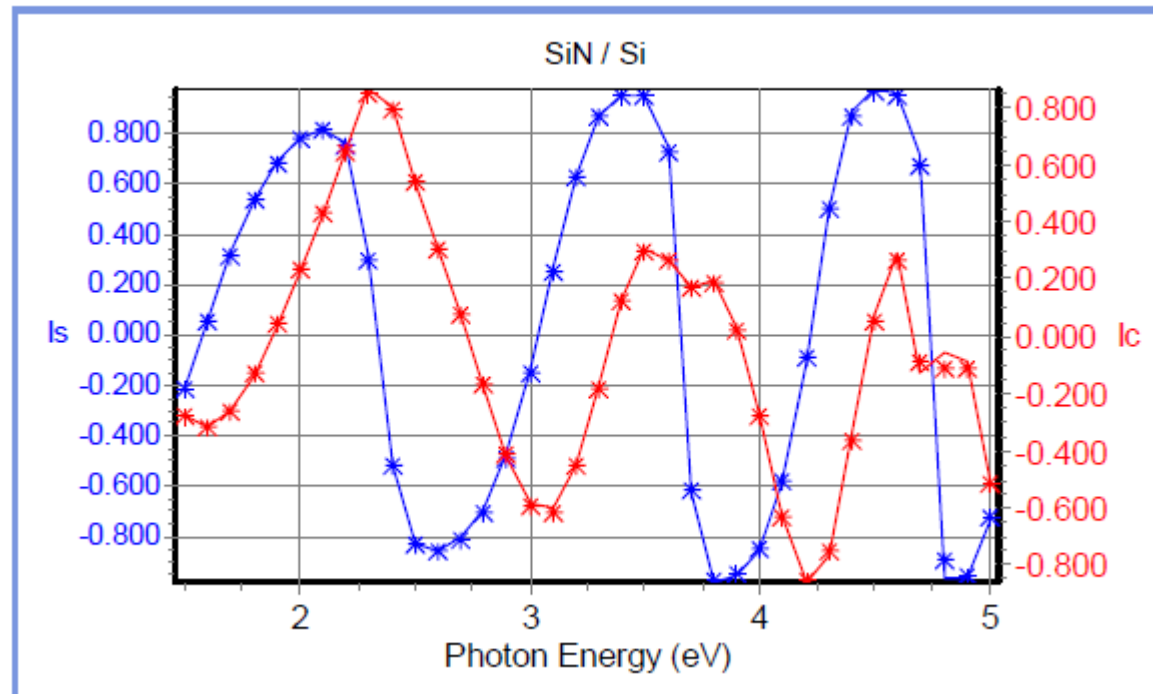
Fitování – iterační mechanismus

Odhad parametrů (napr. tloušťka) může proces urychlit

$$\chi^2 = \min \sum_{i=1}^n \left[\frac{(\Psi_{\text{th}} - \Psi_{\text{exp}})_i^2}{\Gamma_{\Psi,i}} + \frac{(\Delta_{\text{th}} - \Delta_{\text{exp}})_i^2}{\Gamma_{\Delta,i}} \right]$$

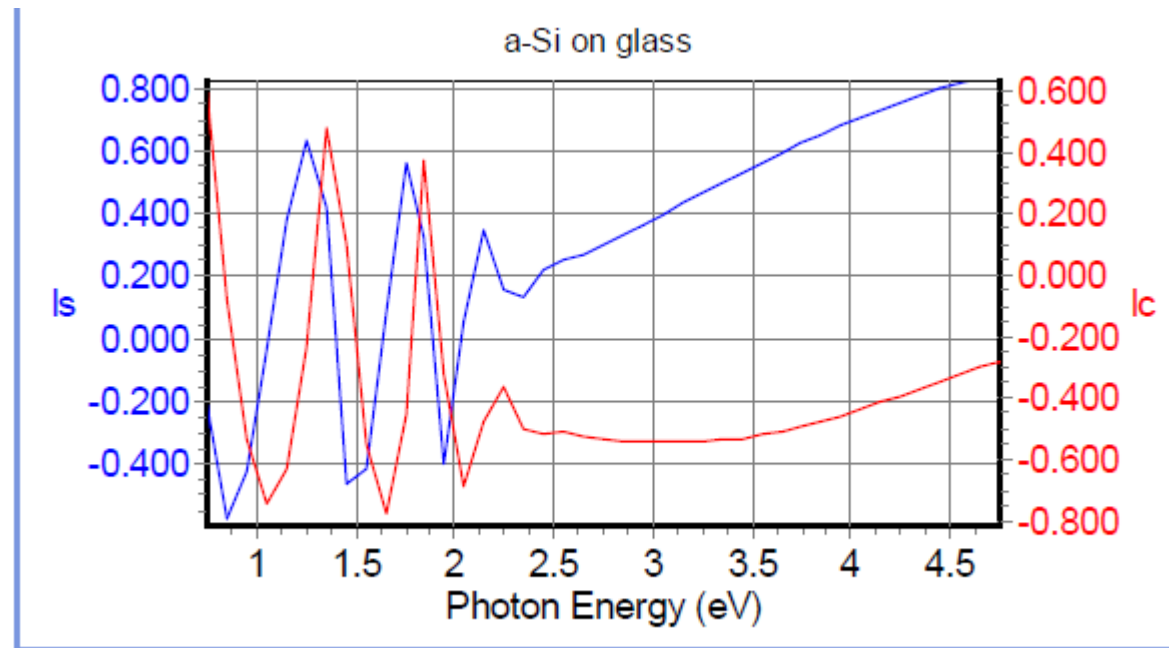
Samples	χ^2
SiO ₂ 20Å on Si	$\chi^2 < 0.20$
SiO ₂ 2000Å on Si	$\chi^2 < 2$
PZT 5500Å on Pt	$\chi^2 < 10$
TiO ₂ 5500Å on Si	$\chi^2 < 10$
AlN 25000Å on Si	$\chi^2 < 15$

Příklad SiN/Si



2	F	26.5	%	F	SiN formation.dsp	50.00 %	x	Void.ref	50.00 %	x	x
1	F	2512.1		F	SiN formation.dsp					x	x
S					Csi_uv.ref					x	

Příklad a-Si/glass

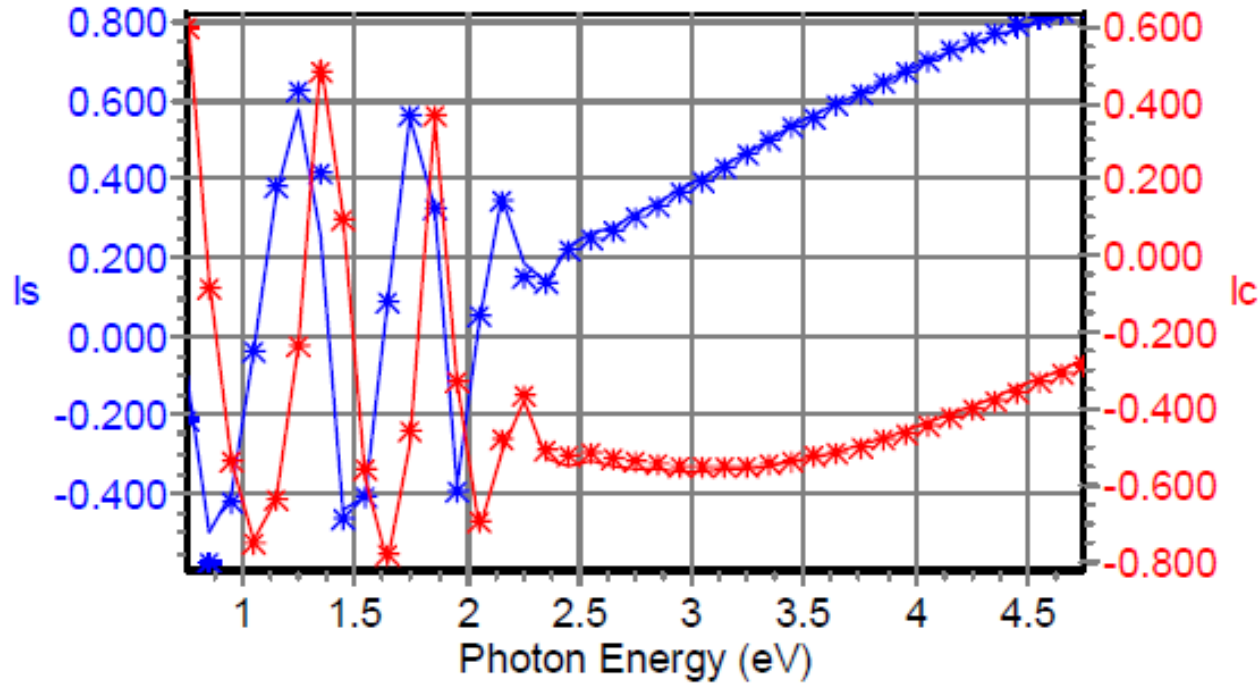


A-Si průhledné do cca 2.5 eV, nad je pak vidět spíše skleněný substrát

3	40.9	%	asi formation.dsp	50.00 %	Void.ref	50.00 %	x
2	2370.4		asi formation.dsp				x
1	10000000.0		1737.dsp				x
S			Void.ref				x

Model a výsledky

Fit result: a-Si on glass



$$E_g = 1.672\text{eV}$$

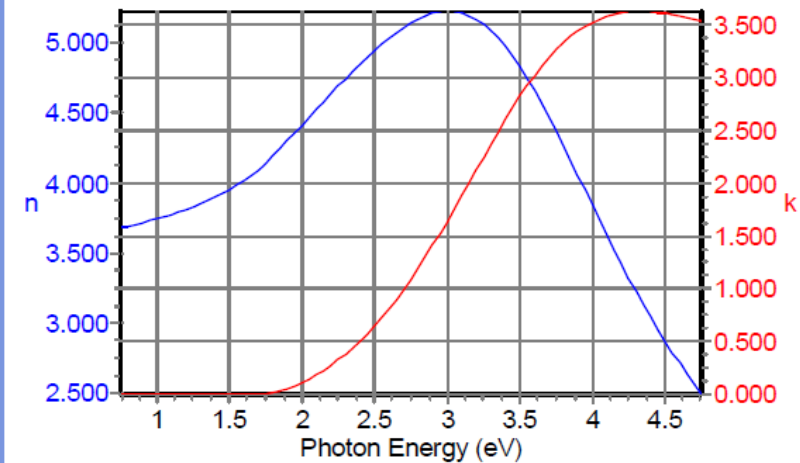
$$\epsilon_\infty = 0.764$$

$$A = 222.674$$

$$E_0 = 3.609$$

$$\chi^2 = 2.272$$

(n,k)=f(E) for a-Si



Aplikační návody

TiO₂ / c-Si Substrate

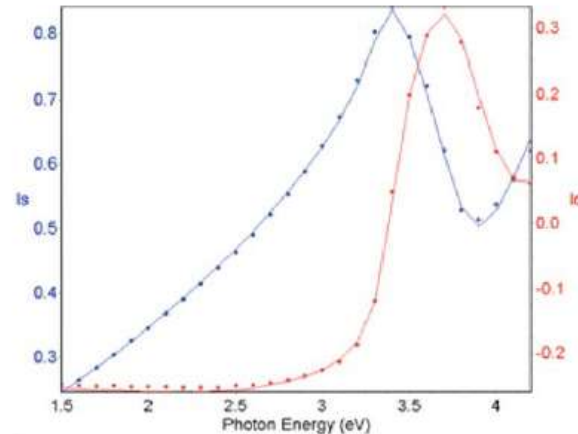
Model

1	F	167.1	F tio2.dsp	X	X
S			Csi_wor.ref	X	

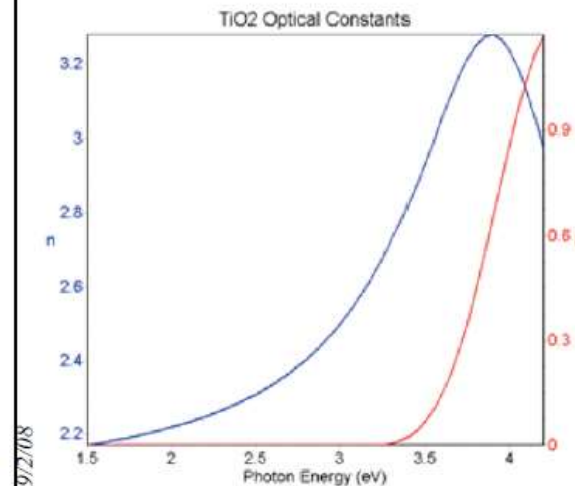
Fit Conditions

- Spectral range : 1.5-4.2 eV
- Step size: 0.1 eV
- Angle of incidence : 70°
- Fit parameters
 - Thickness : layer 1
 - Optical constants: TiO₂
- Materials
 - c-Si: Reference library
 - TiO₂: New amorphous formula

Fit Results



Optical constants of TiO₂



χ^2 minimization on Is, Ic
 $I_s = \sin(2\psi) \times \sin(\Delta)$, $I_c = \sin(2\psi) \times \cos(\Delta)$
 $\chi^2 = 0.501521$
 Iterations Number = 7

Parameters

1)	L1 Thickness [Å]	=	167.086 ± 0.753
2)	tio2 n [∞]	=	2.0373 ± 0.0296
3)	tio2 ωg	=	3.2193 ± 0.0333
4)	tio2 fj	=	0.4781 ± 0.0388
5)	tio2 ωj	=	3.9600 ± 0.0267
6)	tio2 Γj	=	0.5786 ± 0.0211

Correlation matrix

=1=	=2=	=3=	=4=	=5=	=6=
1.000	-0.497	-0.318	-0.179	0.210	0.129
	1.000	0.612	0.024	-0.458	-0.704
		1.000	0.653	-0.828	-0.528
			1.000	-0.850	0.292
				1.000	0.123
					1.000

References

- 1) H.M. Rosenberg, The Solid State, Oxford University Press.
- 2) F. Wooten, Optical Properties of Solids, Academic Press (1972).
- 3) Eugene Hecht, Optics, Addison-Wesley, NY (1997)
- 4) <http://www.ifm.liu.se/~boser/surfacemodes/L3.pdf>
- 5) langley.atmos.colostate.edu/at622/notes/at622_sp06_sec13.pdf
- 6) F. Wooten, Optical Properties of Solids, Academic Press (1972)
- 7) H. M. Rosenberg, The Solid State, Oxford University Press (1988)
- 8) J. M. Cazaux, Introduction a la physique du Solide, Masson (199)
- 9) E. Hecht, Optics, Chap. 3, Hardcover (2001)
- 10) www.ece.tamu.edu/People/bios/hemmer_files/15-dispersion.ppt