

Spektroskopinė elipsometrija

Dainius Perednis



Elipsometrija

- Bekontaktinis, medžiagos neardantis optinių parametru matavimo metodas, kuris remiasi poliarizuotos šviesos bangos poliarizacijos pokyčiu, susidarančiu atsispindint nuo medžiagos paviršiaus
- Naudojama plonų sluoksnių ir daugiasluoksnių sistemų tyrimuose
- Svarbiausia užduotis elipsometrijoje yra Ψ ir Δ parametru priklausomybės nuo sluoksnio storio ir lūžio rodiklio modeliavimas

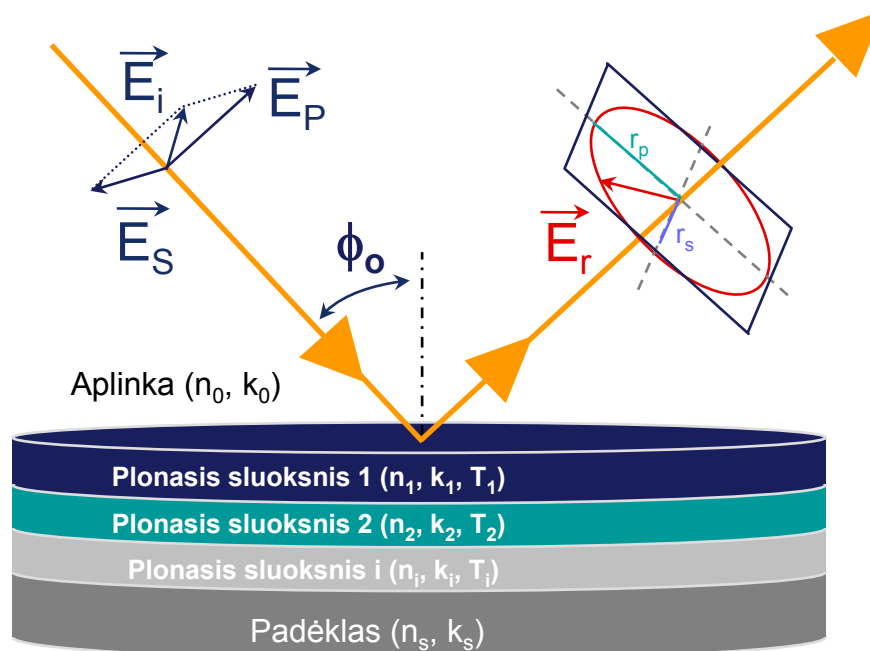
Elipsometrijas rūšys

- Nulinė elipsometrija
- Spektroskopinė elipsometrija
- ir kitos (fazės moduliacinė,...)

Spektroskopinė Elipsometrija

- Spektroskopinėje elipsometrijoje Ψ ir Δ parametrai yra matuojami kaip bangos ilgio funkcija
- Tai duoda daugiau informacijos apie bandinį palyginus su matavimu viename dažnyje
- Sudėtingesnė matavimo rezultatų analizė. Iš eksperimentinių duomenų modeliavimo būdu yra nustatoma lūžio rodiklio priklausomybė nuo bangos ilgio
- Daugiasluoksnėse sistemose analizė tampa dar sudėtingesnė

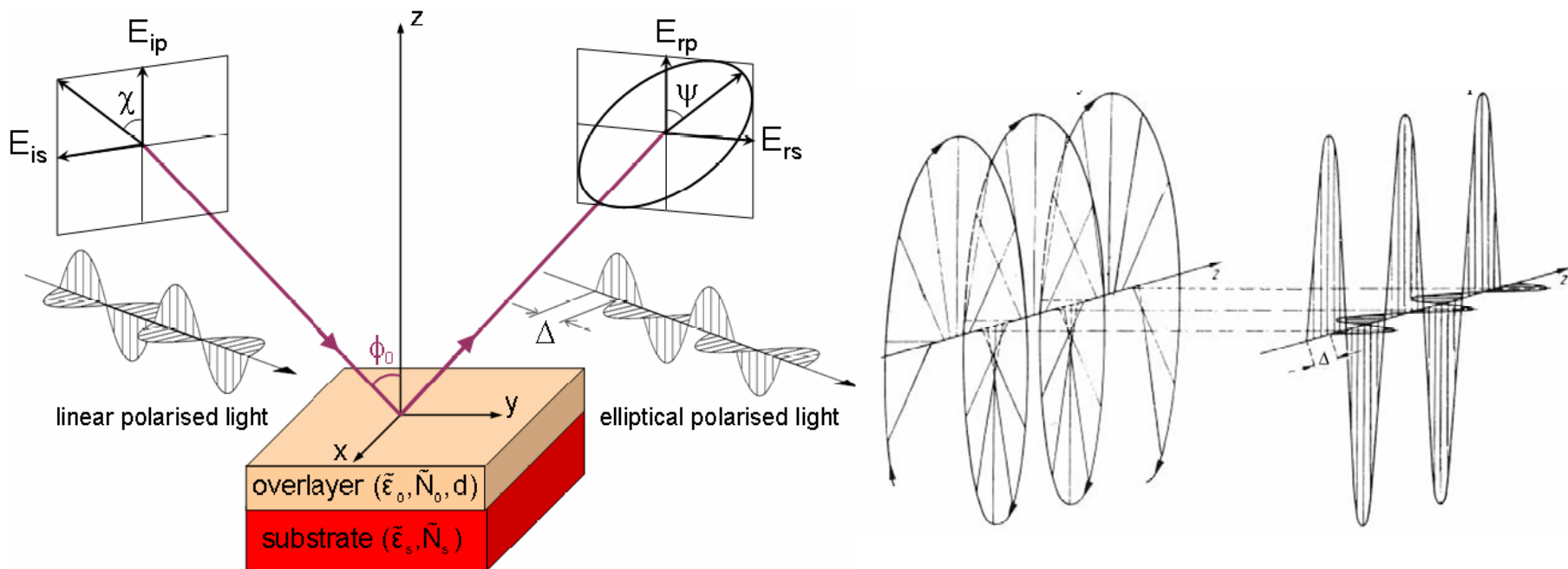
Spektroskopinēs elipsometrijas princips



$$r = \frac{r_p}{r_s} = \tan(\Psi) \cdot e^{j(\Delta)} = f(n_i, k_i, T_i)$$

tanΨ and **cosΔ** matuojami kaip bangos ilgio funkcija

Spektroskopinės elipsometrijos (SE) matavimo principas

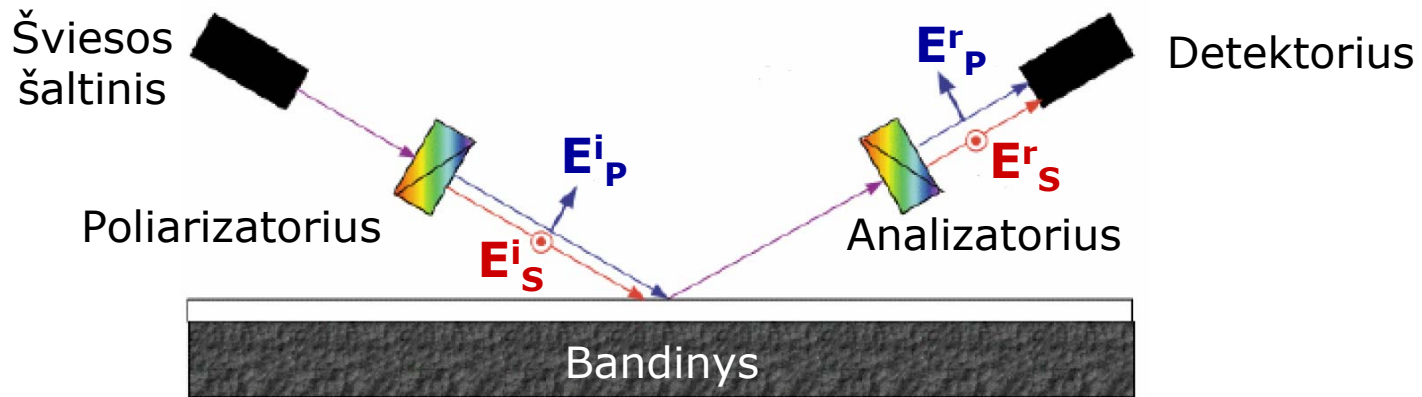


Po atspindžio polarizacijos pokytis matuojamas naudojant elipsometrinius kampus Ψ ir Δ .

$$\tan\Psi = r_p / r_s$$

$$\Delta = \delta_{r_p} - \delta_{r_s}$$

Matematinis aprašymas: Jones formalizmas



$$\underbrace{\begin{pmatrix} E_{dp} \\ E_{ds} \end{pmatrix}}_{\text{Detektorius}} = \underbrace{\begin{pmatrix} \cos A & -\sin A \\ \sin A & \cos A \end{pmatrix}}_{\text{Besisukantis analizatorius}} \underbrace{\begin{pmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{pmatrix}}_{\text{Bandinys}} \underbrace{\begin{pmatrix} \cos P & \sin P \\ -\sin P & \cos P \end{pmatrix}}_{\text{Besisukantis polarizatorius}} \underbrace{\begin{pmatrix} E_p \\ E_s \end{pmatrix}}_{\text{Šviesos šaltinis}}$$

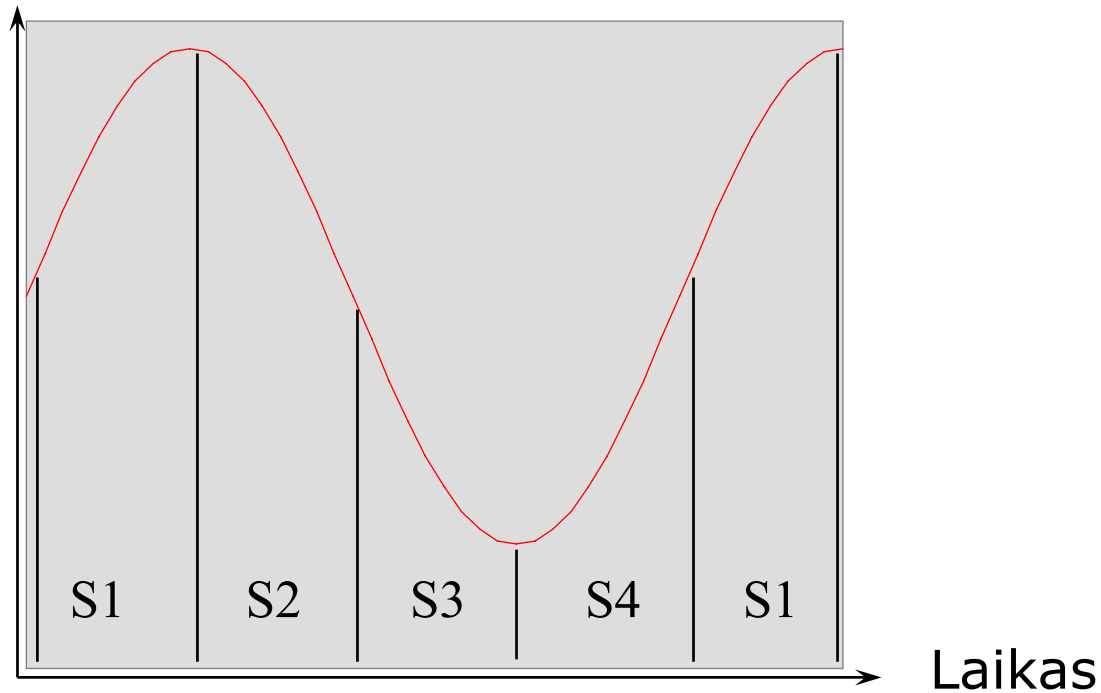
$$I = E_{dp} \cdot E_{dp}^* + E_{ds} \cdot E_{ds}^*$$

$$I = I_0 \cdot (1 + \alpha \cos 2 P(t) + \beta \sin 2 P(t))$$

A: Analizatoriaus kampas
 P(t): Poliarizatoriaus kampas

Hadamart transformacija

Intensyvumas



$$\alpha = \frac{[S_1 - S_2 - S_3 + S_4]}{2 I_0}$$

$$\beta = \frac{[S_1 + S_2 - S_3 - S_4]}{2 I_0}$$

$$I_0 = \frac{[S_1 + S_2 + S_3 + S_4]}{\pi}$$

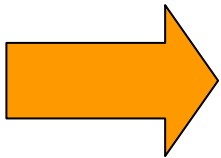
Hadamart transformacija (tęsinys)

Elipsometrinių parametų apskaičiavimas:

$$I_0 = \frac{\cos^2 A}{\tan^2 \Psi + \tan^2 A}$$

$$\alpha = \frac{\tan^2 \Psi - \tan^2 A}{\tan^2 \Psi + \tan^2 A}$$

$$\beta = \frac{2 \cos \Delta \cdot \tan \Psi \cdot \tan A}{\tan^2 \Psi + \tan^2 A}$$



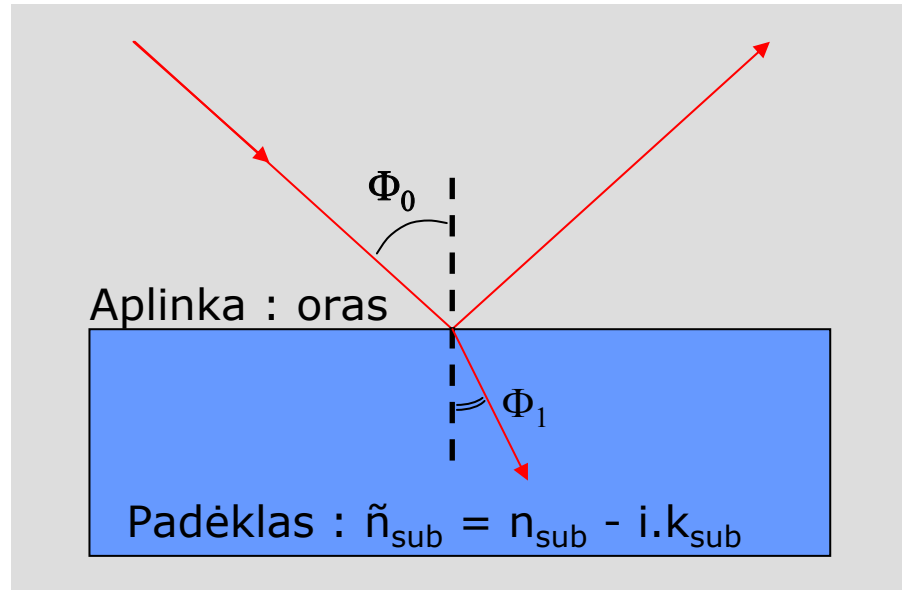
$$\tan \Psi = \tan A \cdot \sqrt{\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha}}$$

$$\cos \Delta = \frac{\beta}{\sqrt{1 - \alpha^2}}$$

Pamatavom $\cos\Delta$ ir $\tan\Psi$

Kas toliau?

Padėklo lūžio rodiklio matavimas



$\tilde{n}_{sub} = n_{sub} - i.k_{sub}$ gali būti tiesiogiai nustatytas:

FRESNEL atspindžio koeficientai:

$$\tilde{r}_p = (\cos \Phi_0 - \tilde{n}_{sub} \cdot \cos \Phi_1) / (\tilde{n}_{sub} \cdot \cos \Phi_0 + \cos \Phi_1)$$

$$\tilde{r}_s = (\cos \Phi_0 - \tilde{n}_{sub} \cdot \cos \Phi_1) / (\cos \Phi_0 + \tilde{n}_{sub} \cdot \cos \Phi_1)$$

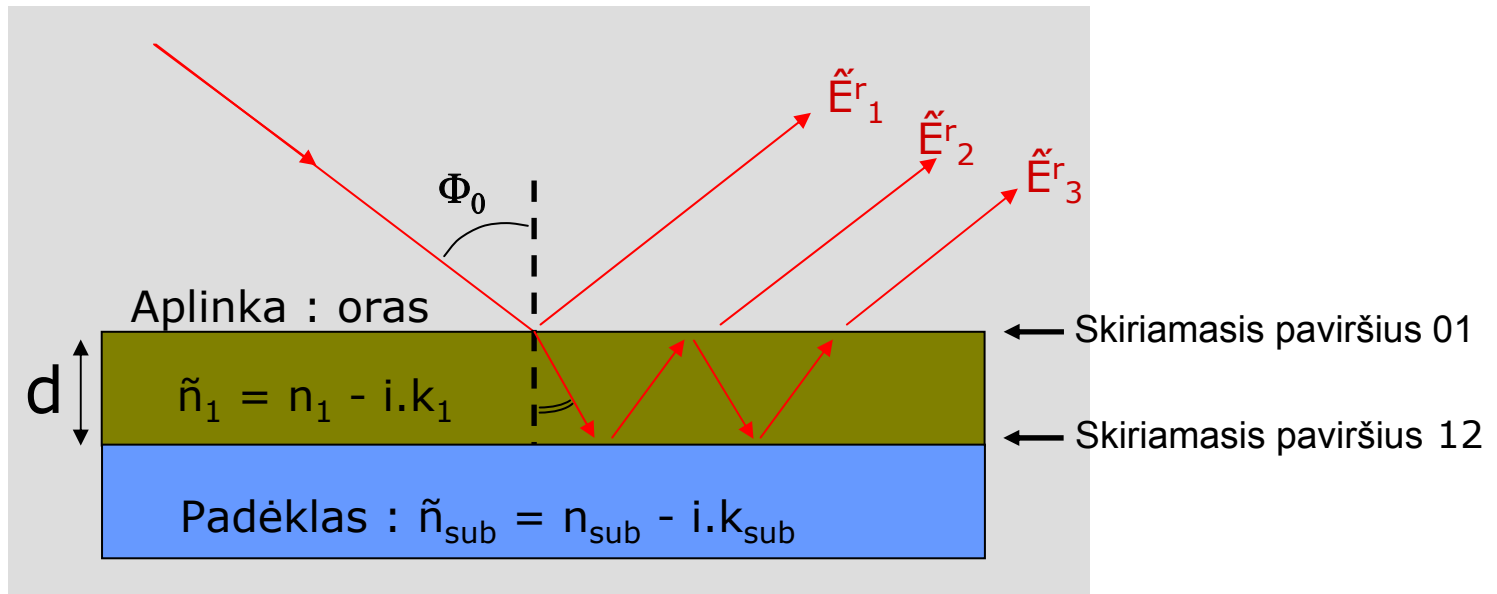


$$\tilde{\rho} = \frac{\tilde{r}_p}{\tilde{r}_s} = \tan \Psi \cdot e^{i\Delta}$$

tada:

$$\tilde{n}_{sub}^2 = \sin^2 \Phi_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{1 - \tilde{\rho}}{1 + \tilde{\rho}} \right)^2 \cdot \tan^2 \Phi_0 \right]$$

Vienasluoksnēs struktūros matavimas



Atspindžio koeficientas:

$$\tilde{R}_{P,S} = \frac{\tilde{r}_{P,S}^{01} + \tilde{r}_{P,S}^{12} \cdot e^{-i2\delta}}{1 + \tilde{r}_{P,S}^{01} \cdot \tilde{r}_{P,S}^{12} \cdot e^{-i2\delta}}$$

kur: $\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \tilde{n} \cdot \cos \Phi_1$

Skaidrus sluksnis: $k_1 = 0$

➡ n_1 ir d gali būti nustatyti iš:

$$\tilde{\rho} = \frac{\tilde{R}_P}{\tilde{R}_S} = \tan \Psi \cdot e^{i\Delta}$$

GES 5 elipsometras

- ❑ Bangų diapazonas:
 - DUV: 190 – 210 nm
 - VIS: 210 – 900 nm
 - NIR: 900 – 2000 nm

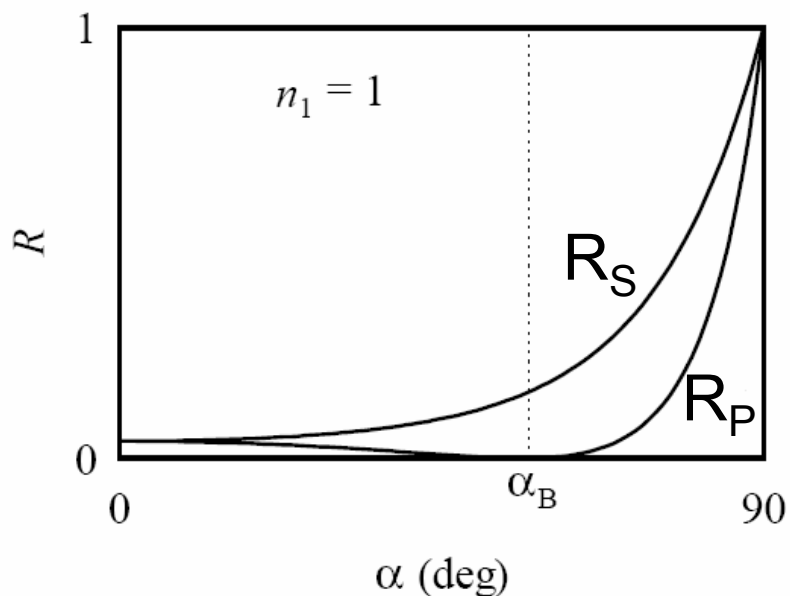
- ❑ Kompensatorius: tikslesniems $\cos\Delta$ matavimams

- ❑ XY platforma: paviršiaus homogeniškumo tyrimams

Kritimo kampas

Optimalus kritimo kampas yra nustatomas iš padėklo Brewsterio kampo:

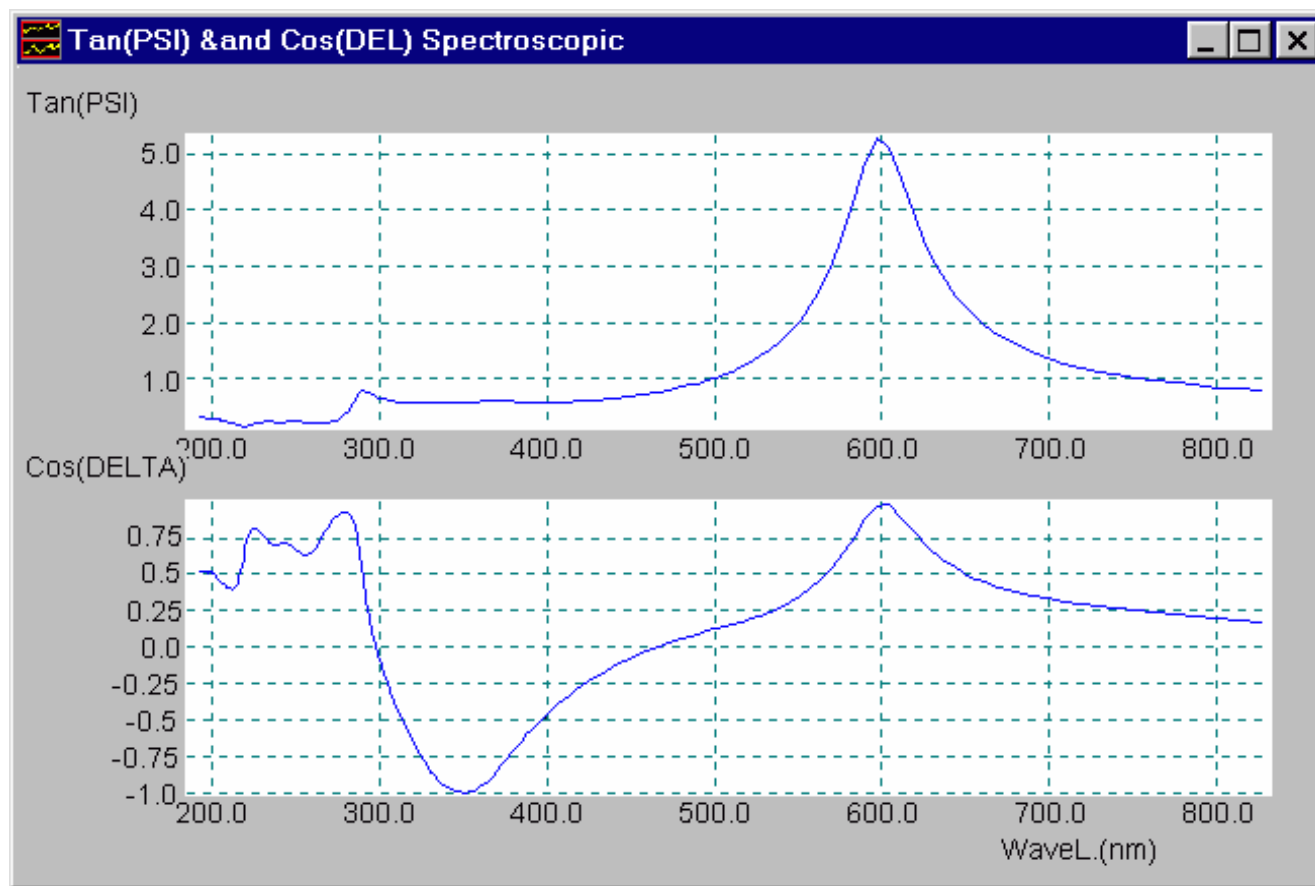
- Si padėklui ($n=3.5$) paprastai pasirenkamas 75° kritimo kampas
- Stiklo padėklui ($n=1.5$) 56° kritimo kampas gali būti pasirinktas



α_B : Brewsterio kampas

Jei $\alpha = \alpha_B$ tada $R_P = 0$

Matavimo pavyzdys



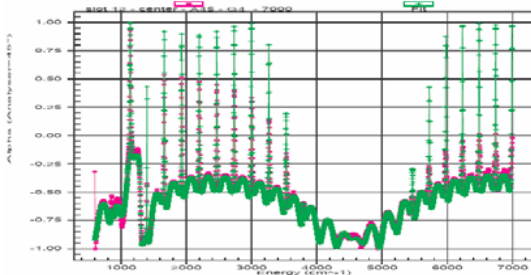
DUV UV

VISIBLE

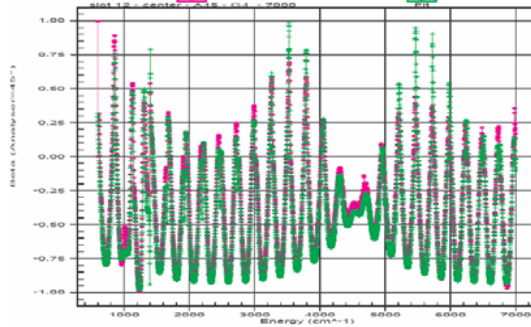
NIR

Analizė

Eksperimentiniai duomenys



$\tan\Psi$



$\cos\Delta$

Regresija

**Eksperimentas
=
Modelis ?**

Modelio koregavimas
kol χ^2 priartėja prie 1

Modelis

Apytikrė dangos struktūra

Layer	Description	Thickness (nm)	Optical index
Ambient	Void		nk file
1	SICRIR	5517.83	nk file
2	SiO2IR	997.19	nk file
Substrat	SICRIR		nk file

Vidutinės kvadratinės paklaidos nustatymas

$$\chi^2 = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^N \left(\left(\frac{\Psi_{t,i} - \Psi_{e,i}}{\sigma_{\Psi}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_{t,i} - \Delta_{e,i}}{\sigma_{\Delta}} \right)^2 \right)$$

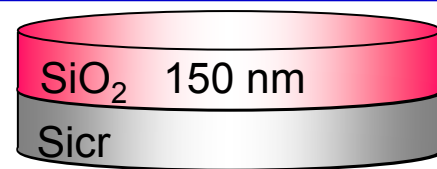
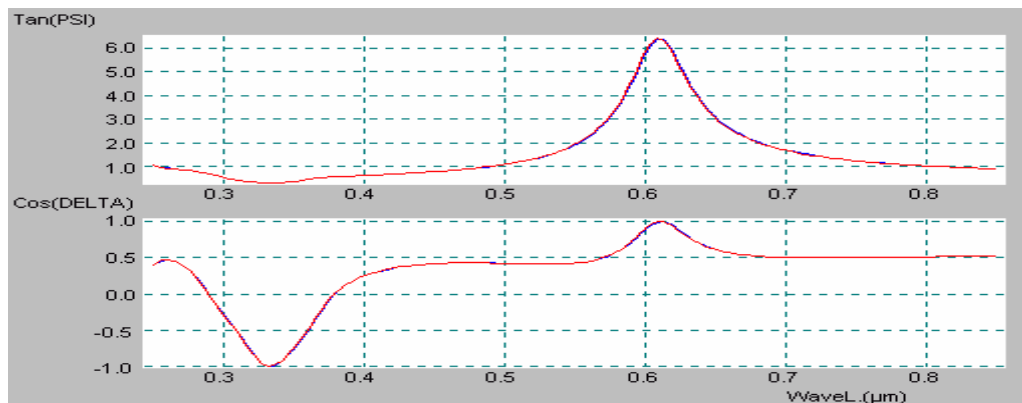
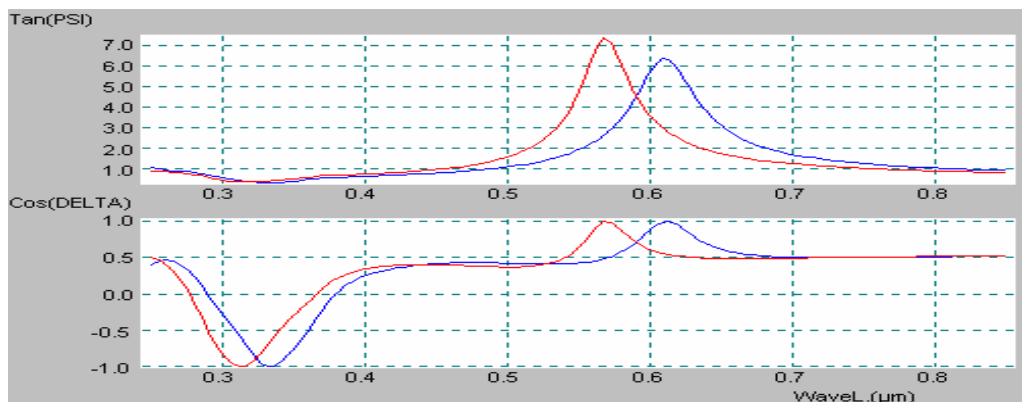
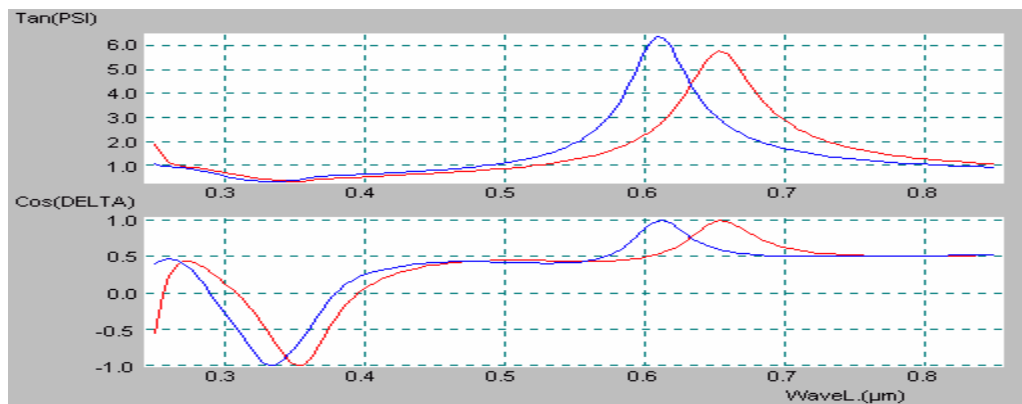
NE

Ar fizikinis
sprendinys?

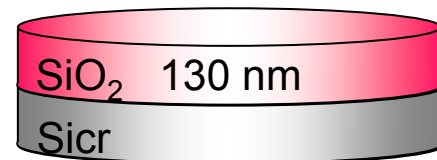
TAIP

**Sluoksnio storis,
n & k**

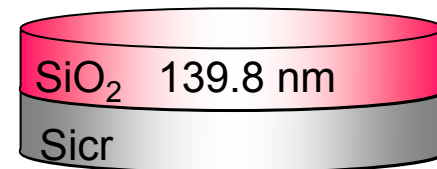
Regresijos pavyzdys



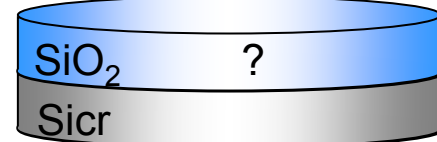
\neq



\neq



$=$



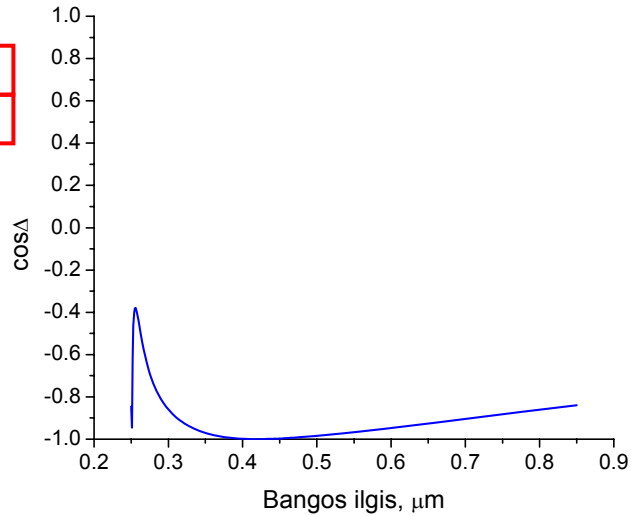
T=139.8 nm

Taikymai

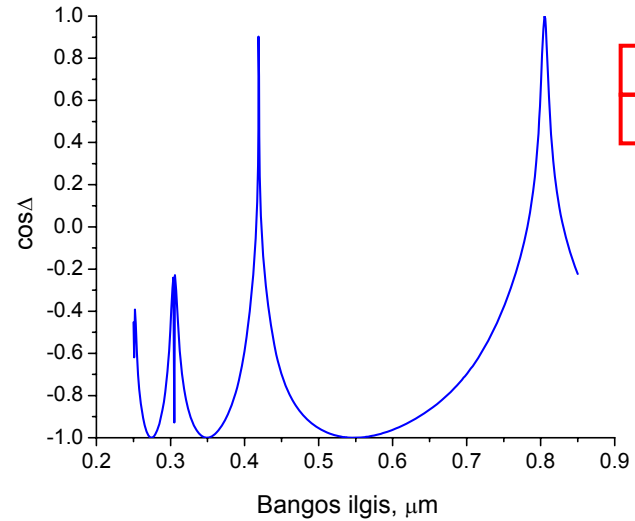
- Optinės konstantos
- Sluoksnių storis
- Mikrostruktūros
- Paviršiaus grublėtumas
- Anizotropija

Sluoksnio storis

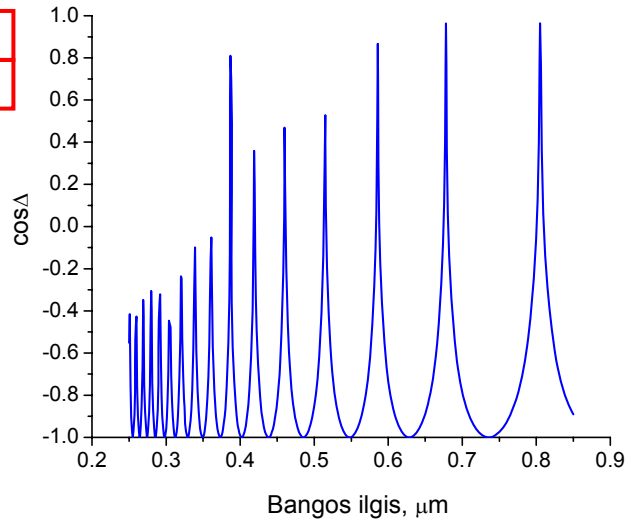
ZrO₂ 50 nm
stiklas



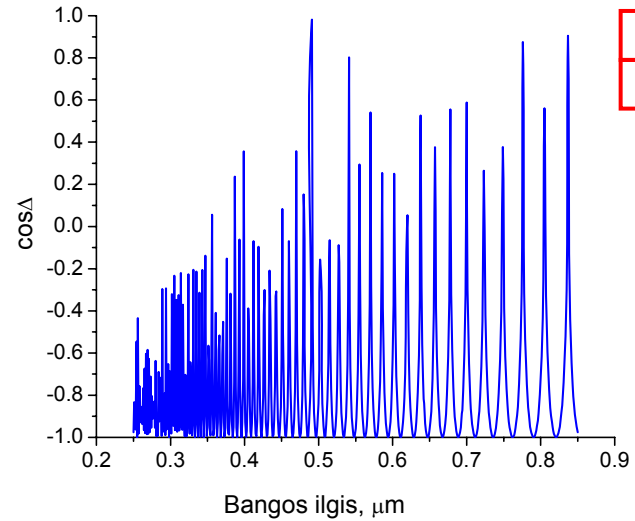
ZrO₂ 200 nm
stiklas



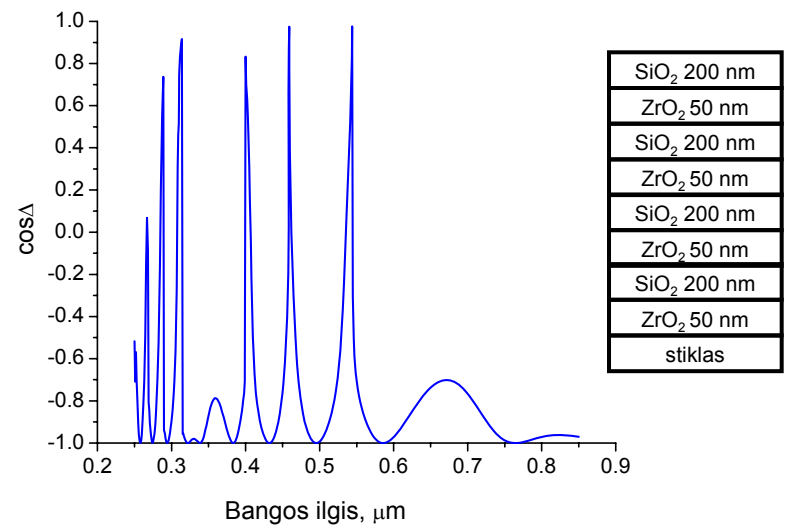
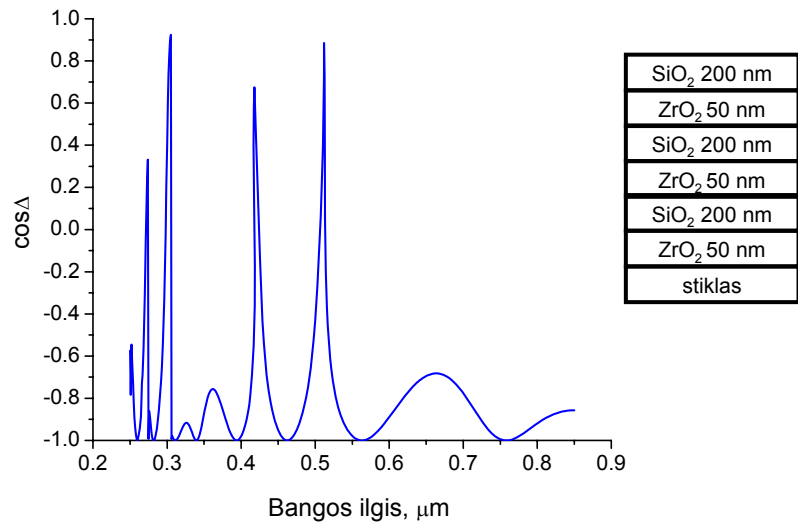
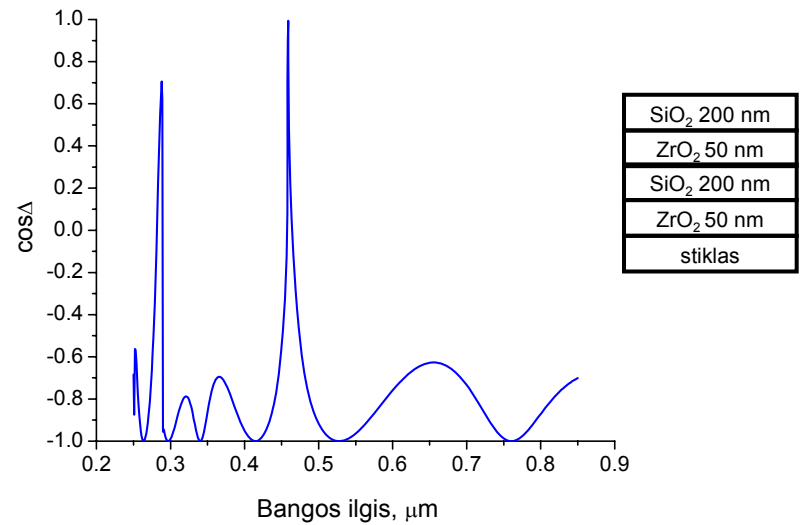
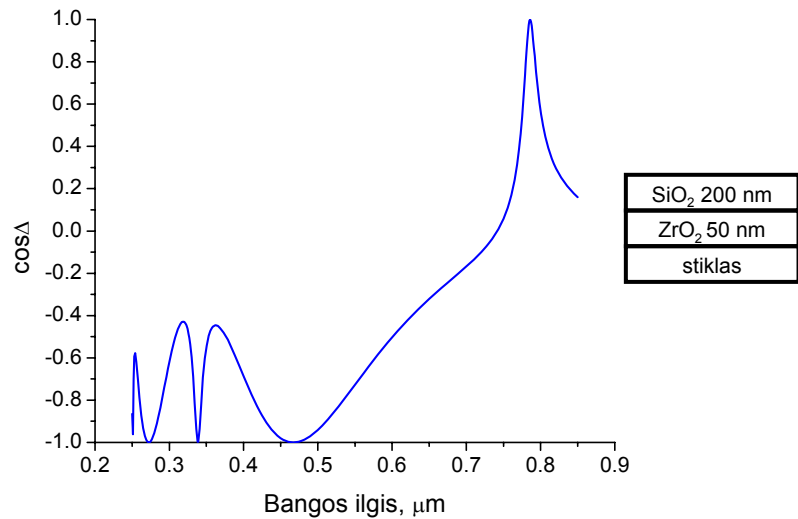
ZrO₂ 1000 nm
stiklas



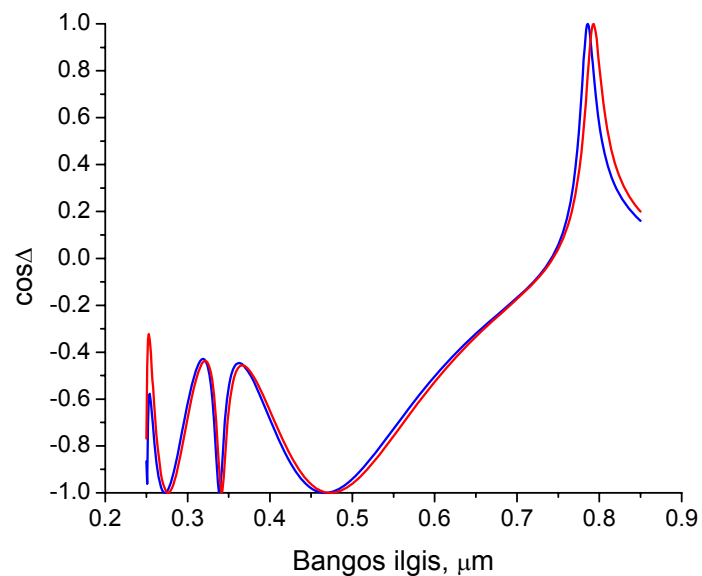
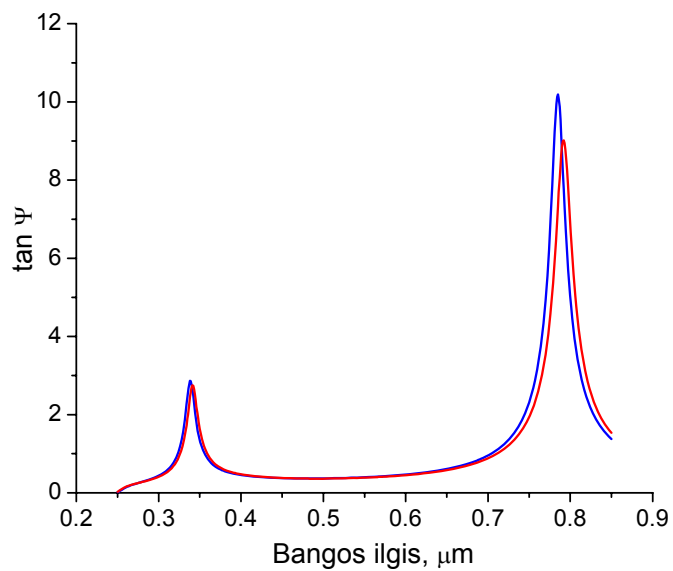
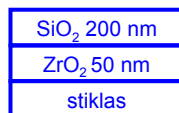
ZrO₂ 5000 nm
stiklas



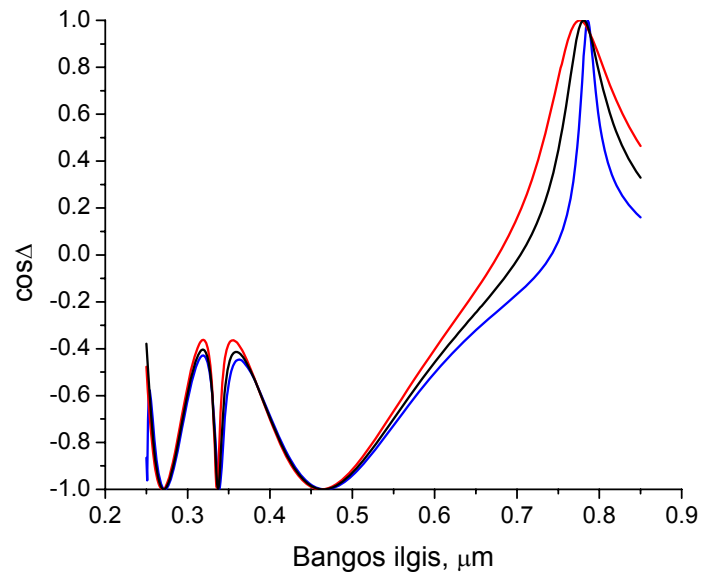
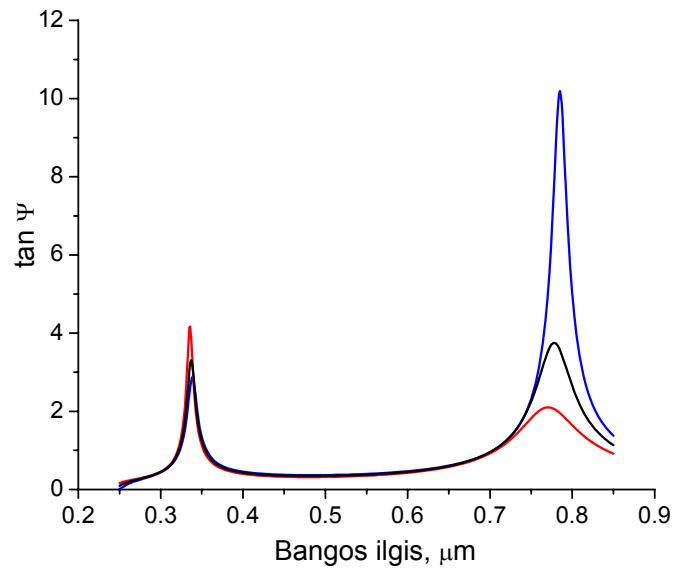
Sluoksnių skaičius



Paviršiaus grublėtumas



Sluoksnio porėtumas



SiO_2 200 nm
ZrO_2 50 nm
stiklas

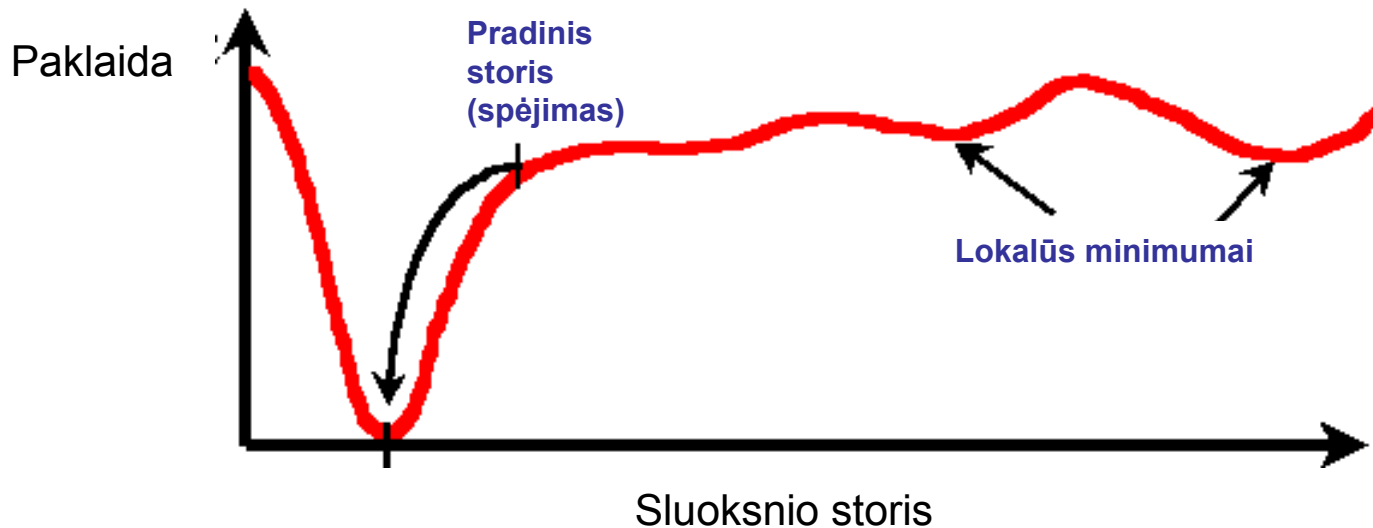
0% ZrO_2 porėtumas

SiO_2 200 nm
ZrO_2 50 nm
stiklas

5% ZrO_2 porėtumas

SiO_2 200 nm
ZrO_2 50 nm
stiklas

10% ZrO_2 porėtumas



Nefizikiniai sprendiniai

- sluoksniu storis mažesnis už nulį
- n nemažėja didėjant λ , kai $k=0$
- koncentracija didesnė už 1

Fizikiniai, bet nelogiški sprendiniai

- labai ploni sluoksniai (apie 1-2 nm)
- per didelis porėtumas (>30%)
- paviršiaus grublėtumas didesnis už sluoksniu storį

Ačiū už dėmesį