



INSTITUTO
TECNOLÓGICO
DE AERONÁUTICA



www.lpp.ita.br

www.ita.br



Óptica de Filmes Finos

Análise Prática por Elipsometria Espectroscópica

Douglas M G Leite

leite@ita.br

André L J Pereira

andreljp@ita.br

Sumário do Curso

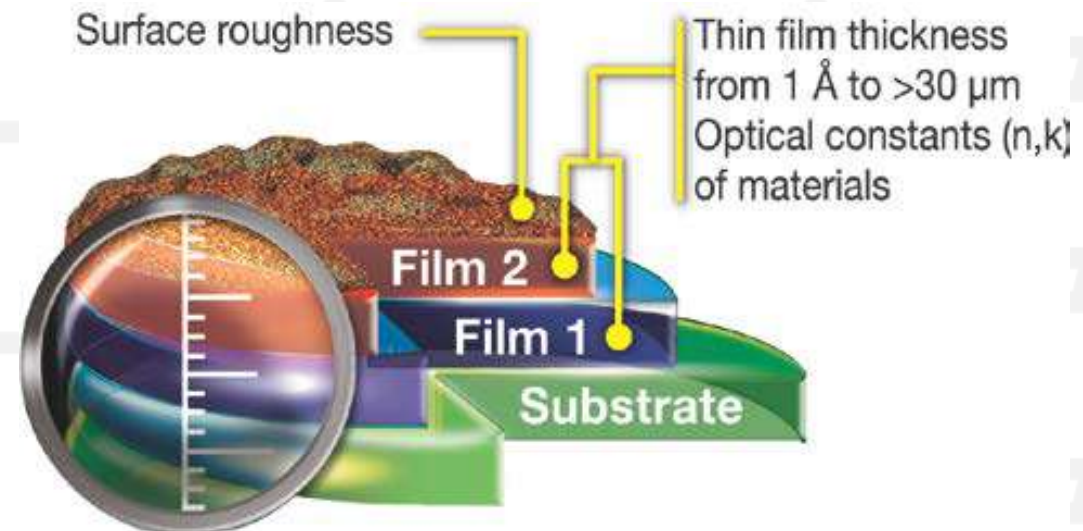
- Introdução
- Polarização da Luz
- Coeficientes de Fresnel
- A Técnica de Elipsometria
- Aparato Experimental
- Elipsometria Espectroscópica
- Realizando Medidas
- Construindo Modelos Matemáticos
- Obtenção das Grandezas Ópticas
- Casos e Exemplos Práticos

Aula 1 – Prof. Douglas Leite

Aula 2 – Prof. André Pereira

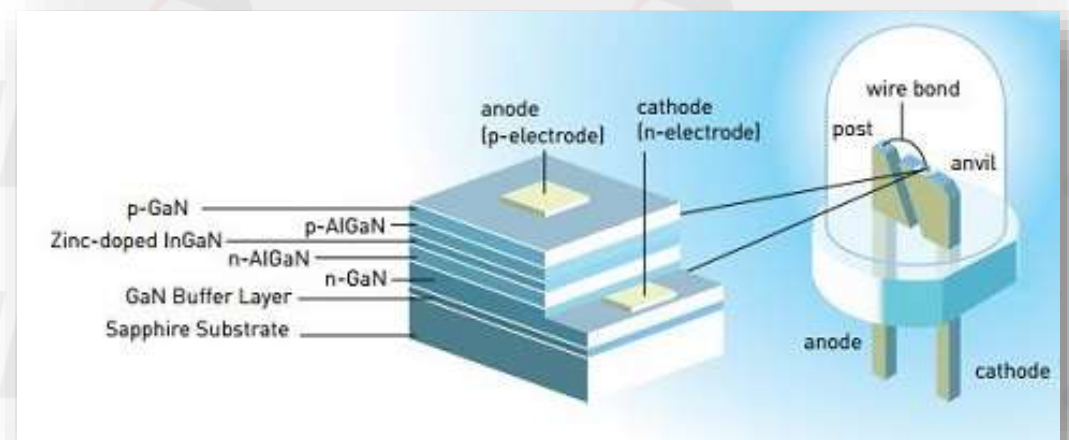
O que é Filme Fino?

- Camada(s) de material com interface bem definida com seu substrato
- Espessuras de 0,1nm a 10 μ m



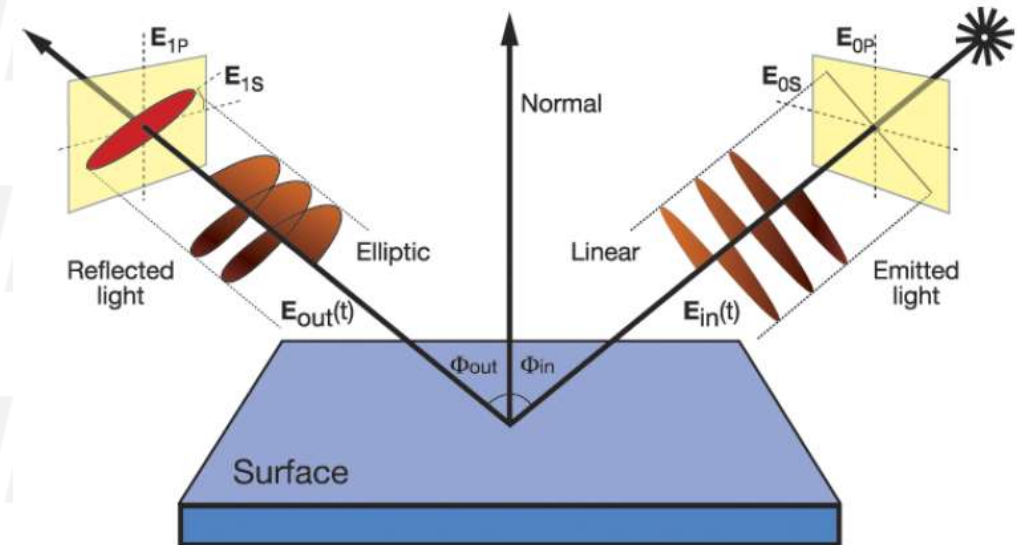
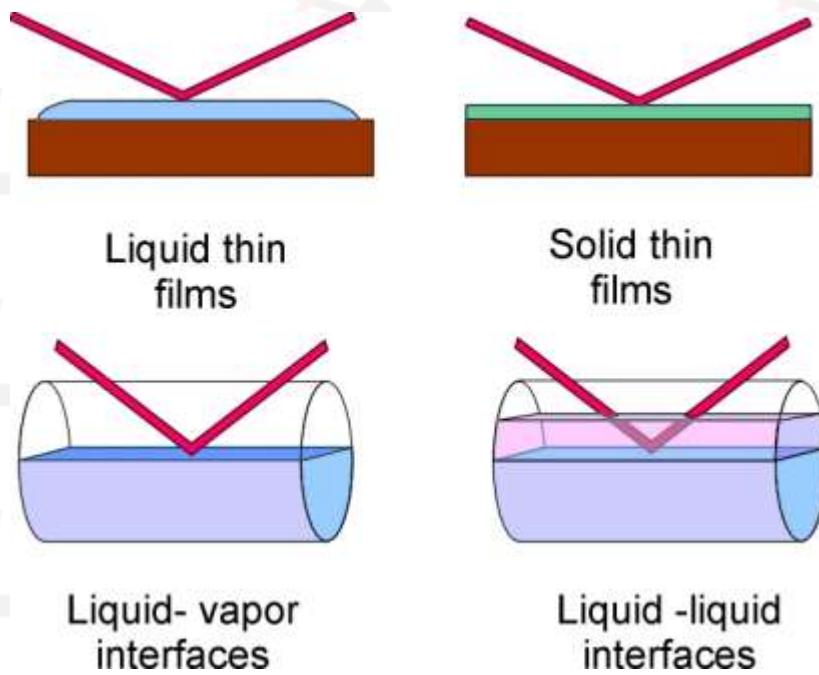
O que é Filme Fino?

- Camada(s) de material com interface bem definida com seu substrato
- Espessuras de 0,1nm a 10 μ m
- Aplicações:
 - Lentes, óptica em geral
 - Optoeletrônica (LEDs)
 - Microeletrônica (processadores)
 - Fotônica
 - Camadas protetivas
 - Células solares
 - Sensores e Biossensores
 - ...



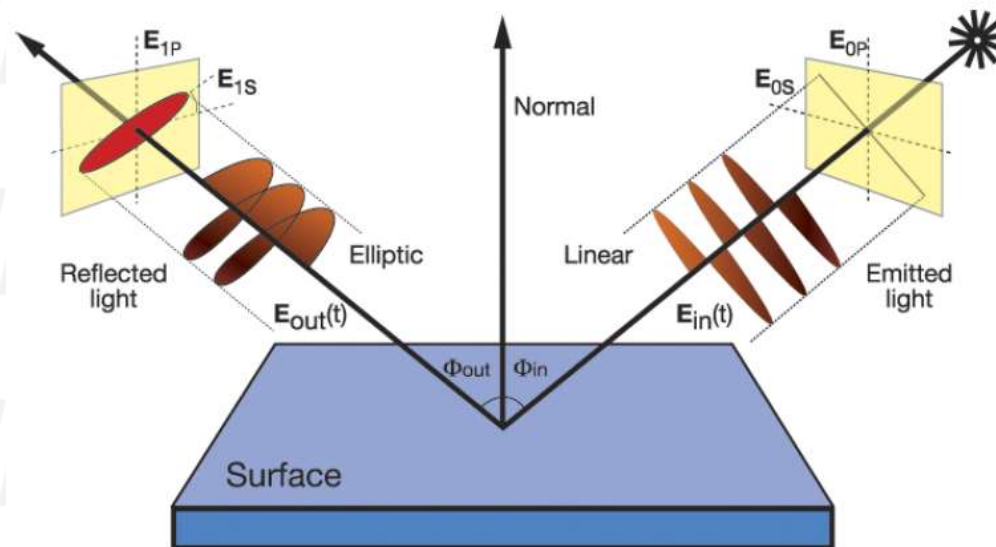
O que é Elipsometria?

- Técnica óptica para análise de filmes e superfícies, inclusive multicamadas
- Baseada na mudança de polarização da luz na reflexão/transmissão em superfícies e interfaces
- Pode ser usada para camadas gasosas, líquidas e sólidas



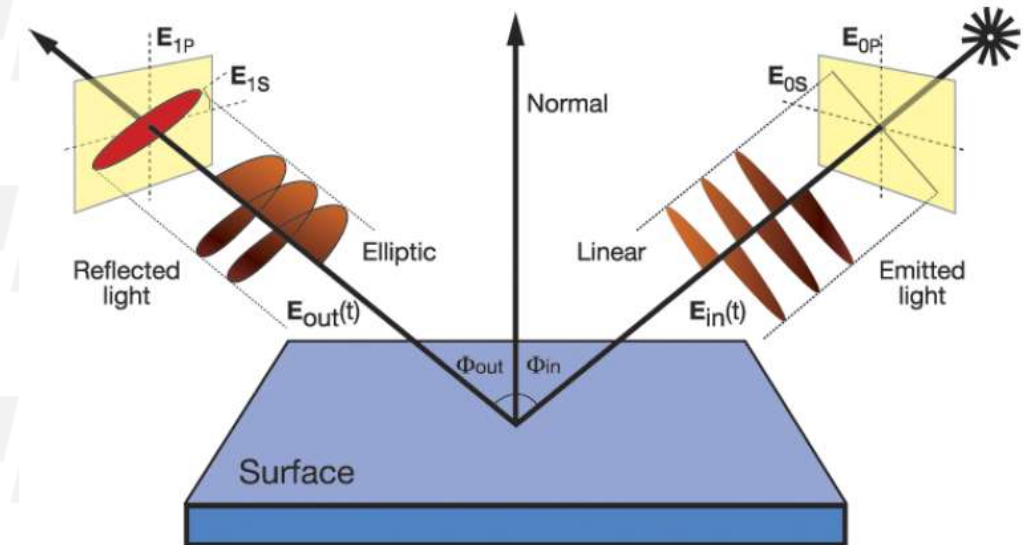
O que é Elipsometria?

- Consegue determinar:
 - n = índice de refração (curva de dispersão)
 - k = coeficiente de extinção (curva de absorção)
 - d = espessura do filme ou de multicamadas
 - E_g = Energia de gap
 - ϵ = Função dielétrica (complexa)
 - Rugosidade superficial e interfacial
 - Composição/fases/substâncias
 - Gradiente composicional
 - Anisotropia óptica
 - Densidade
 - Porosidade
 - (...)



O que é Elipsometria?

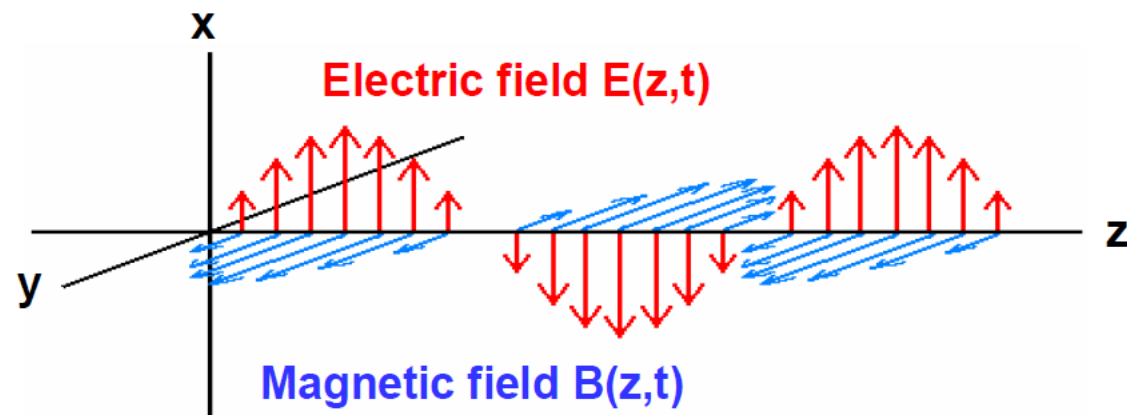
- Limitações:
 - Superfícies e interfaces “lisas” e planas (reflexão especular)
 - Espessuras camadas: 1 angstrom – 10 microns
 - Filmes transparentes ou semitransparentes



Natureza da Luz

- Onda Plana se propagando na direção z (solução da E.O.):

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



Natureza da Matéria

- A resposta elétrica/óptica do material é descrito por sua função dielétrica complexa:

$$\tilde{\varepsilon}(\lambda) = \varepsilon'(\lambda) + i\varepsilon''(\lambda)$$

- Ou ainda pela sua função índice de refração complexa:

$$\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda)$$

- As quais se relacionam por:

$$\tilde{\varepsilon}(\lambda) = \tilde{n}(\lambda)^2$$

Interação Luz-Matéria

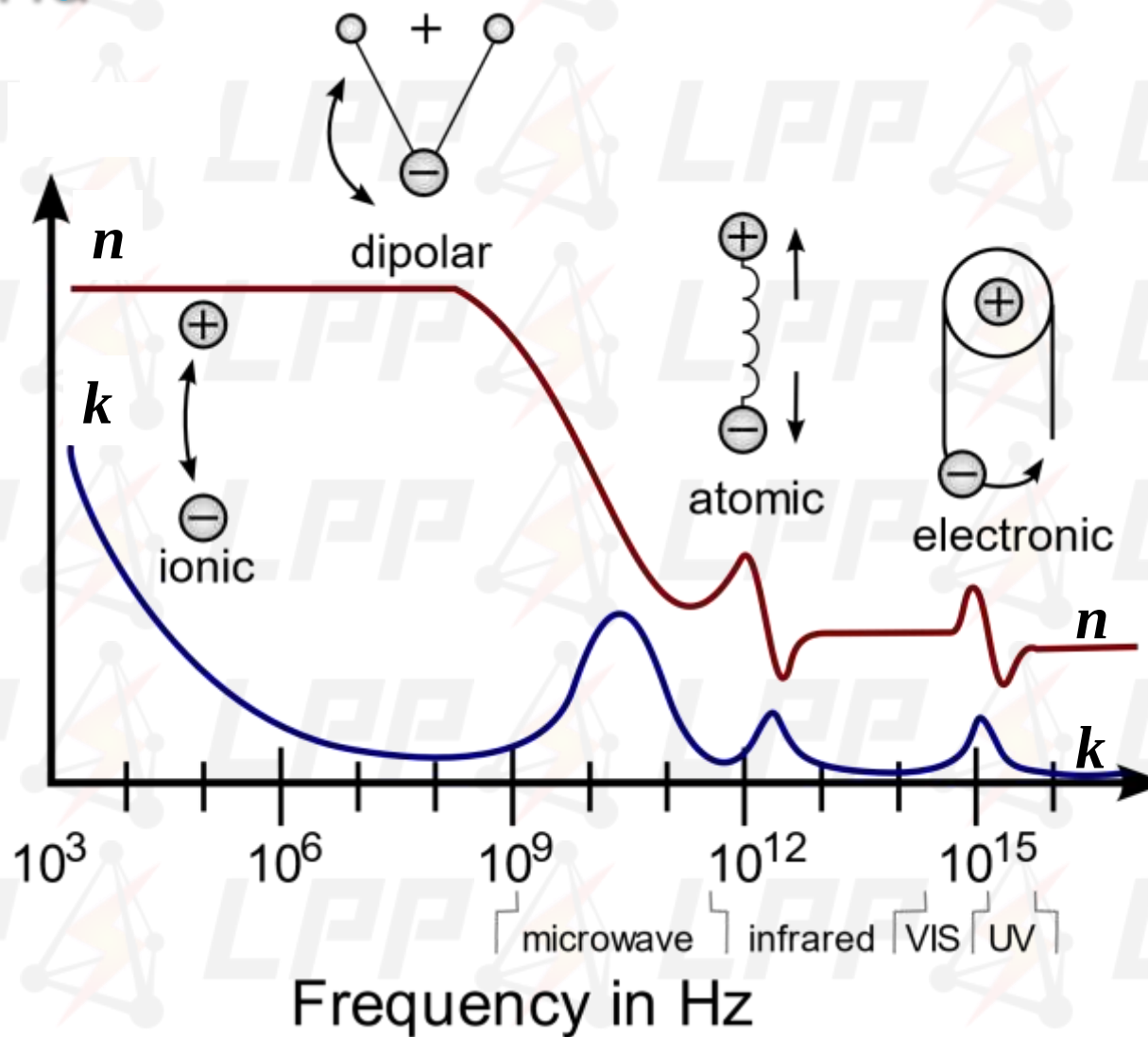
➤ Processos Possíveis

- Reflexão
- Refração
- Absorção
- Espalhamento
- Difração
- Mudança na polarização
- ...

$$\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda)$$

Interação Luz-Matéria

➤ Respostas do Material



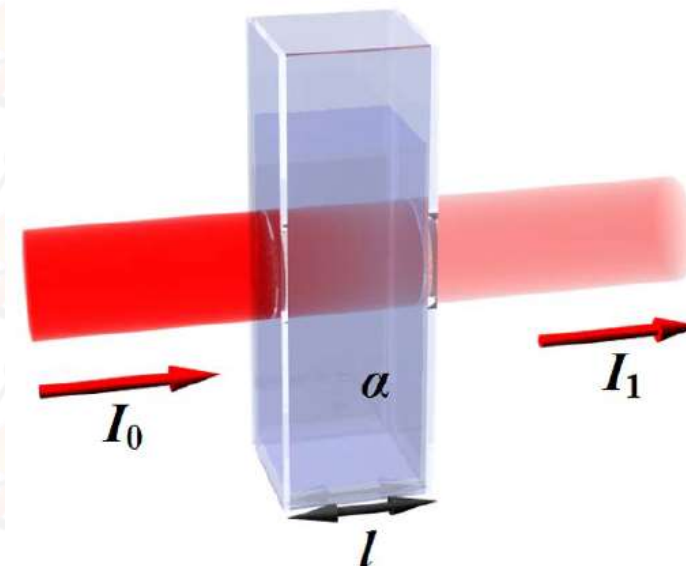
Interação Luz-Matéria

- Absorção (Lei de Beer-Lambert-Bouguer):

$$I = I_0 \exp(-\alpha \cdot z) \quad \alpha = \frac{4\pi \cdot k}{\lambda}$$

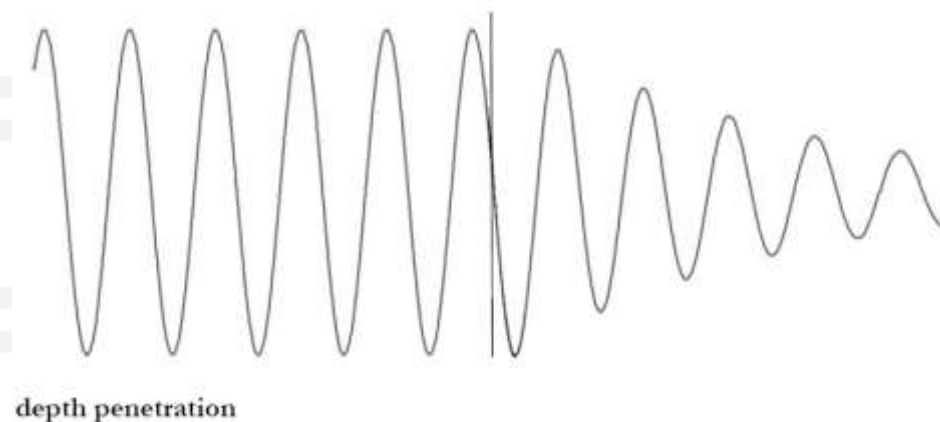
- Índice de refração complexo:
(em meio transparente, $k = 0$)

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



0: Transparent medium
 $\hat{n}_0 = n_0$

1: Absorbing medium
 $\hat{n}_1 = n_1 - ik_1$

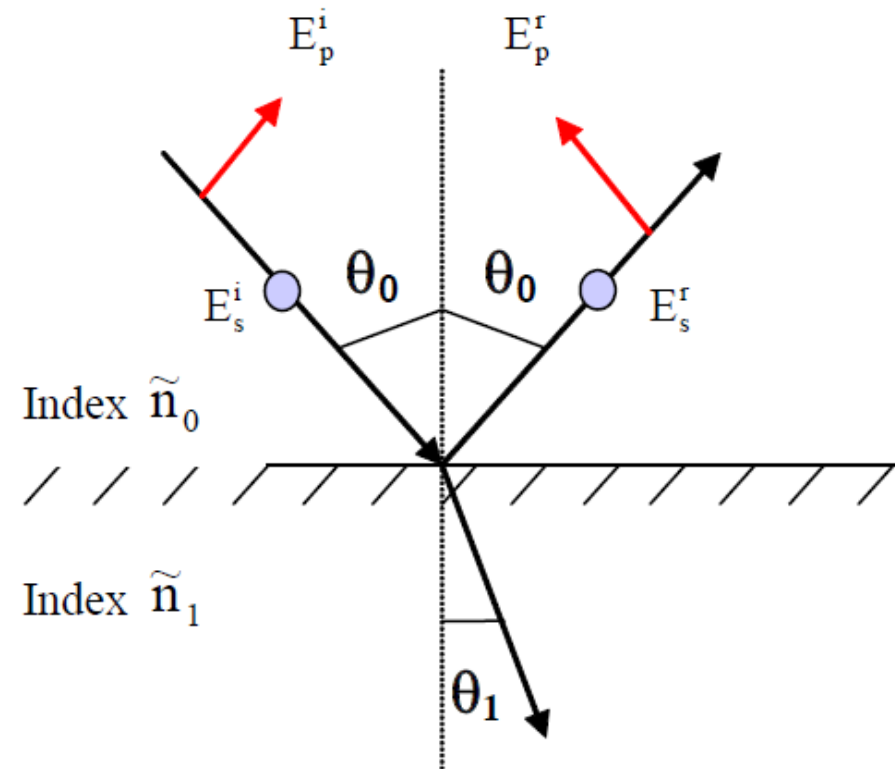


Interação Luz-Matéria

- Refração (Lei de Snell-Descartes - material homogêneo)

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

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



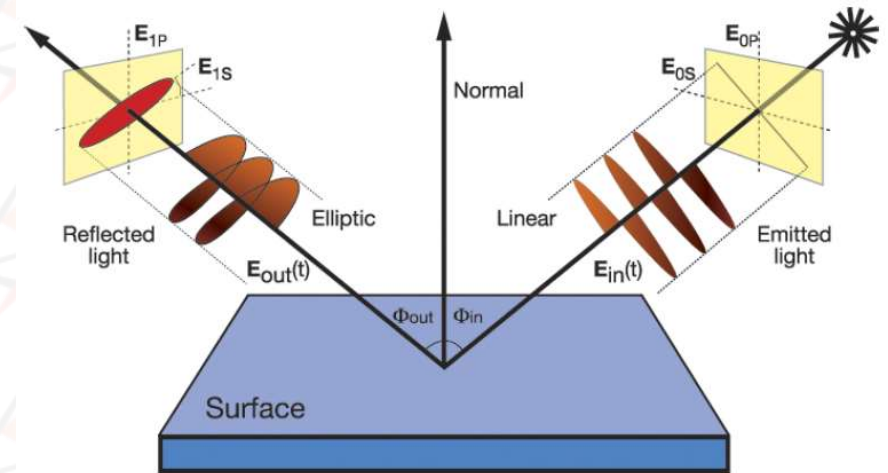
Interação Luz-Matéria

- Mudança na Polarização (Incidente **Polarização Linear** → Refletida **Polarização Elíptica**)
- Elipse refletida definida por:

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

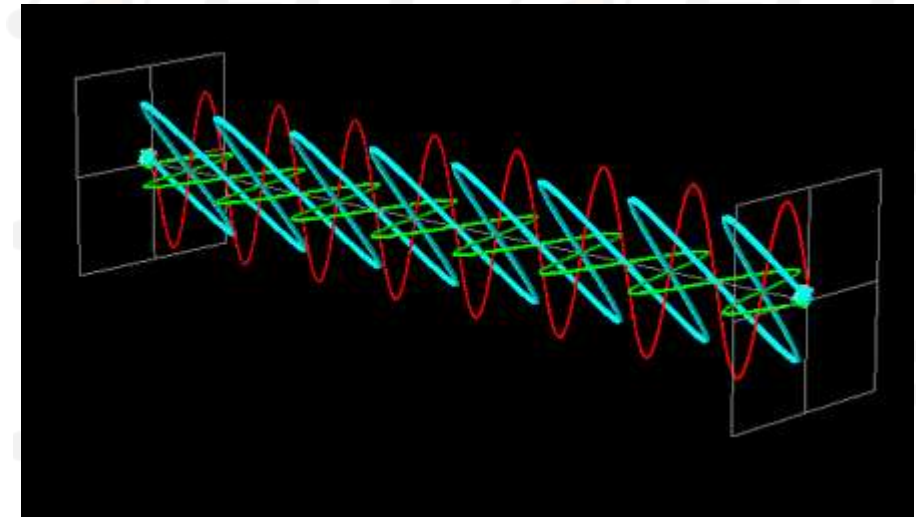
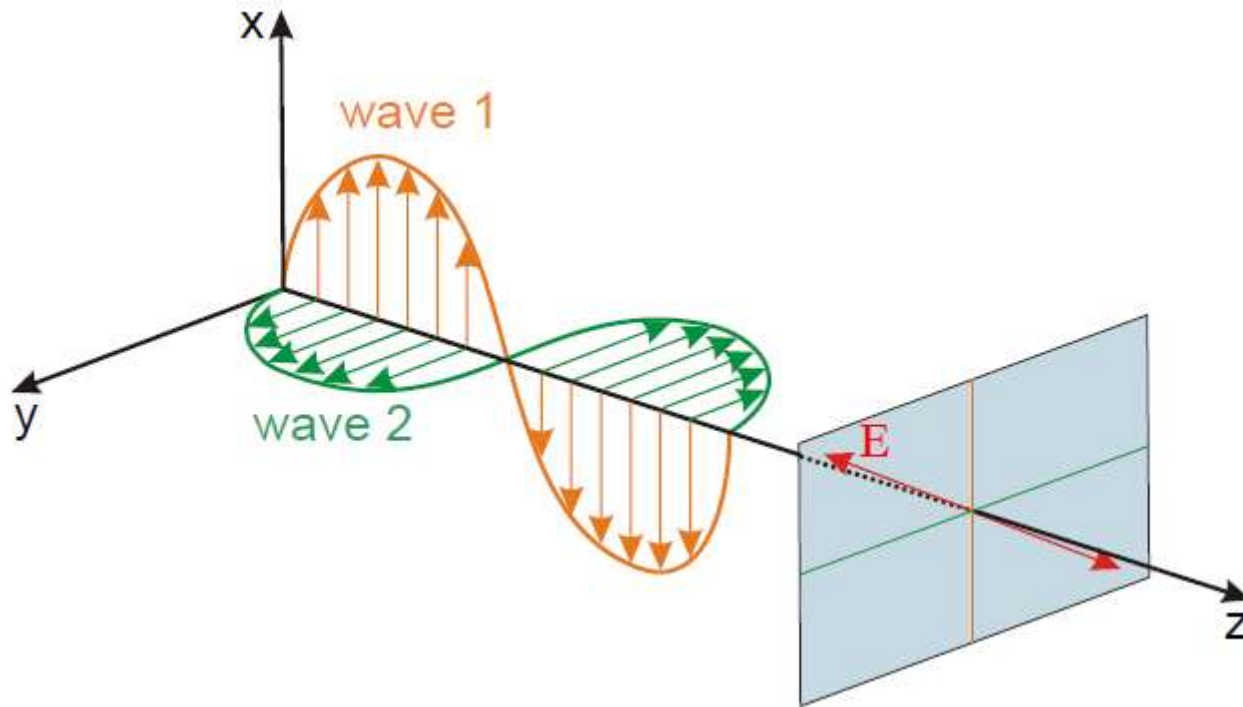
- A qual se relaciona com as propriedades da superfície por:

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



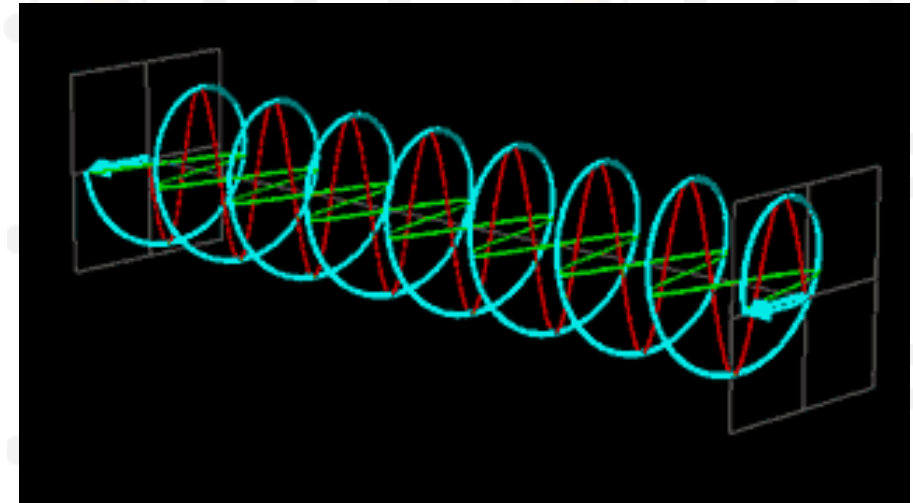
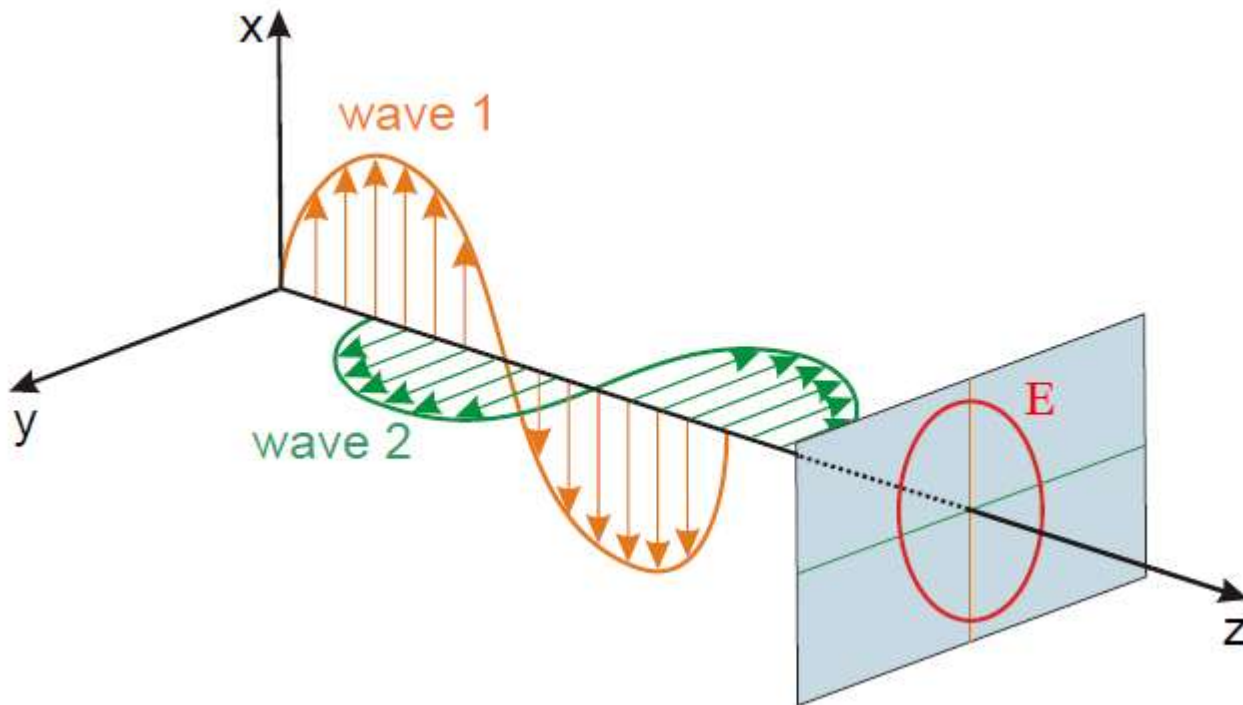
Polarização

- Polarização Linear (sem diferença de fase entre as componentes do campo E)



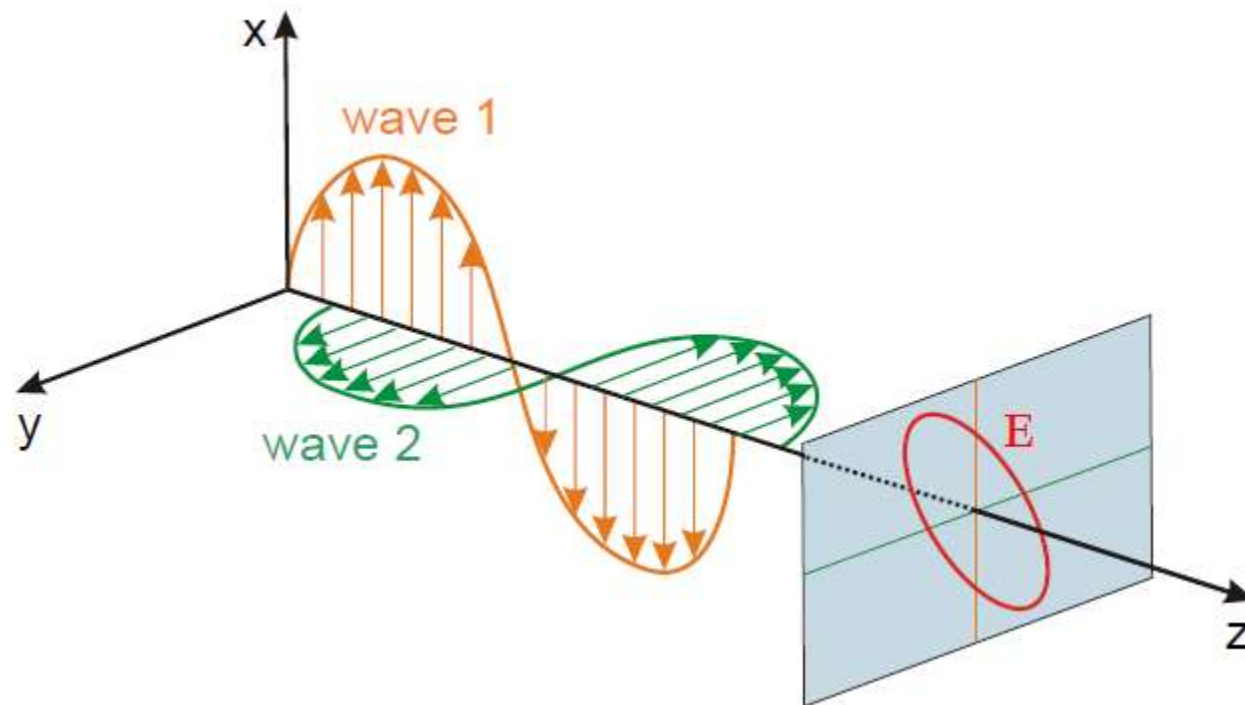
Polarização

- Polarização Circular (diferença de fase = 90 graus)



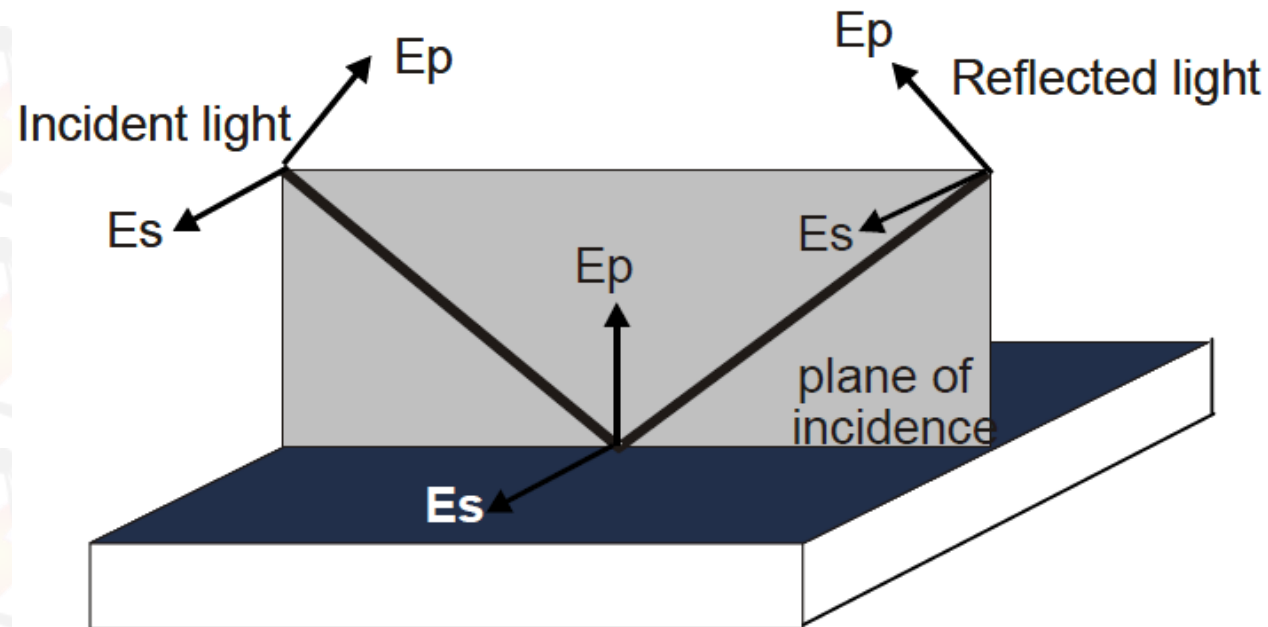
Polarização

- Polarização Elíptica (qualquer diferença de fase)



Coeficientes de Fresnel

- Sistema de coordenadas referentes ao plano de incidência
 - **E_p** = componente paralela ao plano de incidência ($p \rightarrow$ paralelo)
 - **E_s** = componente perpendicular ao plano de incidência ($s \rightarrow$ “senckresht” - alemão)

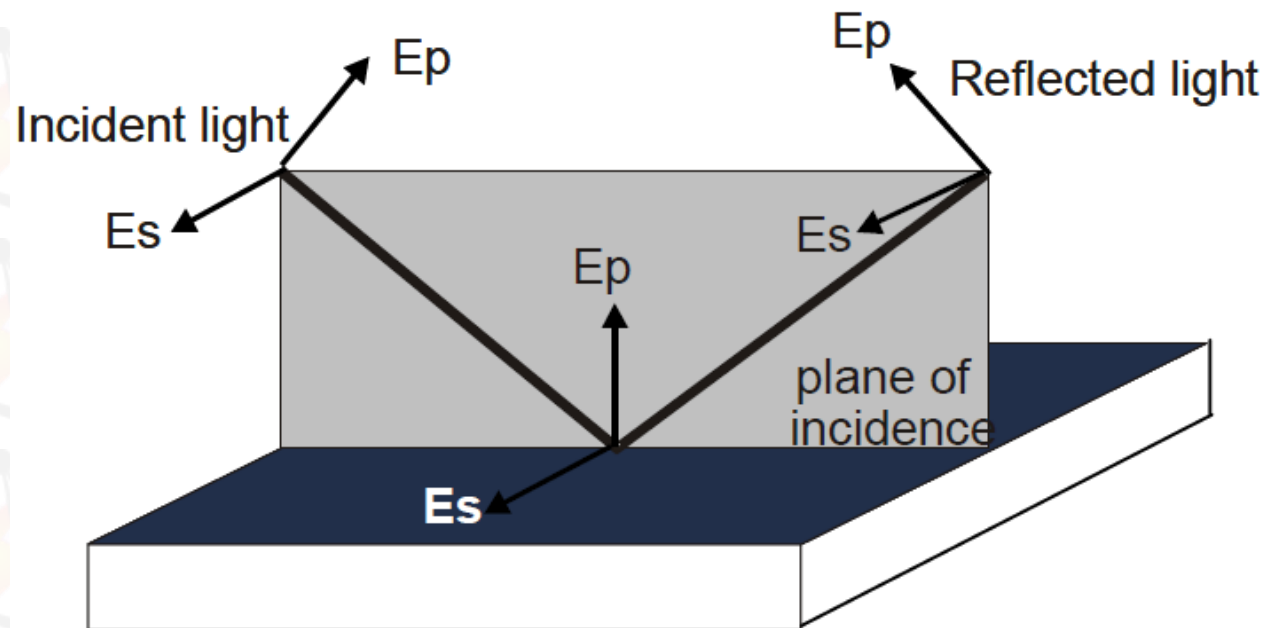


Coeficientes de Fresnel

- Os coeficientes de Fresnel (coeficientes de reflexão) são definidos como:

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

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



Coeficientes de Fresnel

- Os coeficientes de Fresnel (coeficientes de reflexão) são definidos como:

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

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

- A Refletância, que só trás informação de **intensidade relativa**, pode ser obtida a partir de:

$$R_P = |r_p|^2$$

$$R_S = |r_s|^2$$

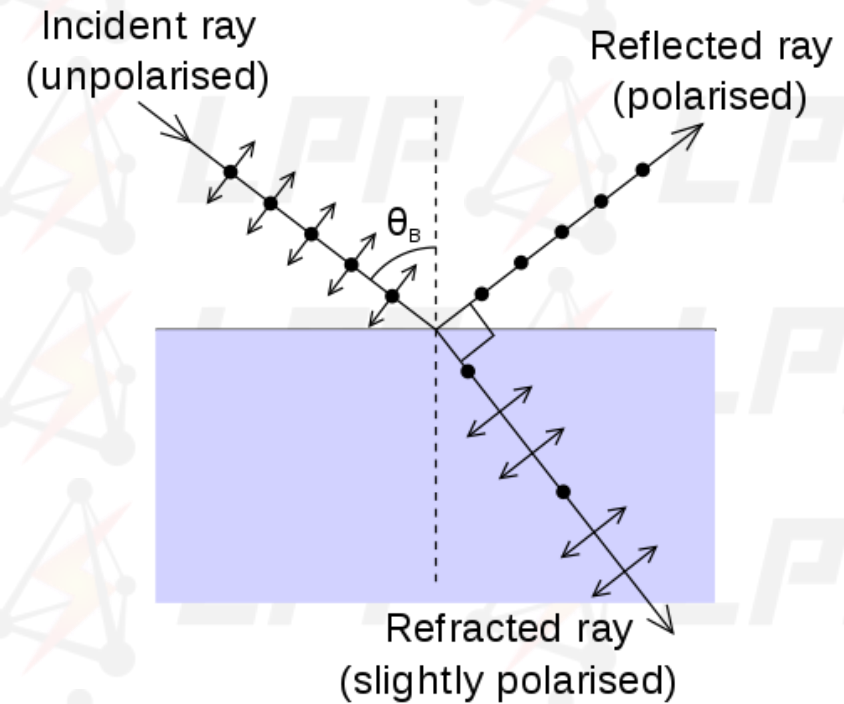
- Já as informações de **fase** se encontram em δ_p e δ_s , que representam o atraso de fase de cada componente após a reflexão

Coeficientes de Fresnel

➤ Em geral, temos:

➤ $R_S > R_P$

- maior atenuação na componente perpendicular à superfície (r_p)
- Aplicação prática: óculos polarizados



Visão com Lentes Polarizadas



Visão sem lentes polarizadas

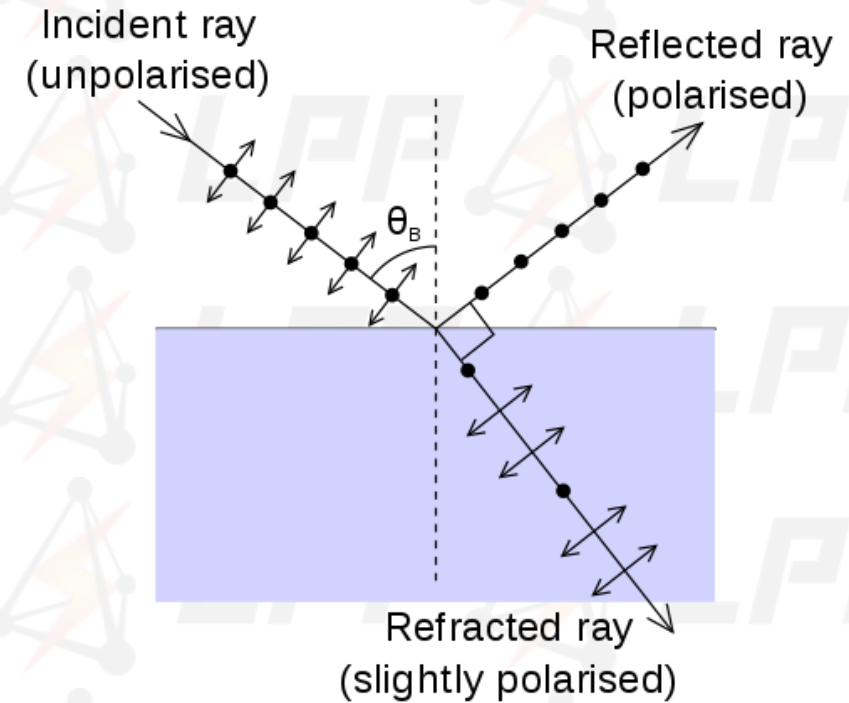
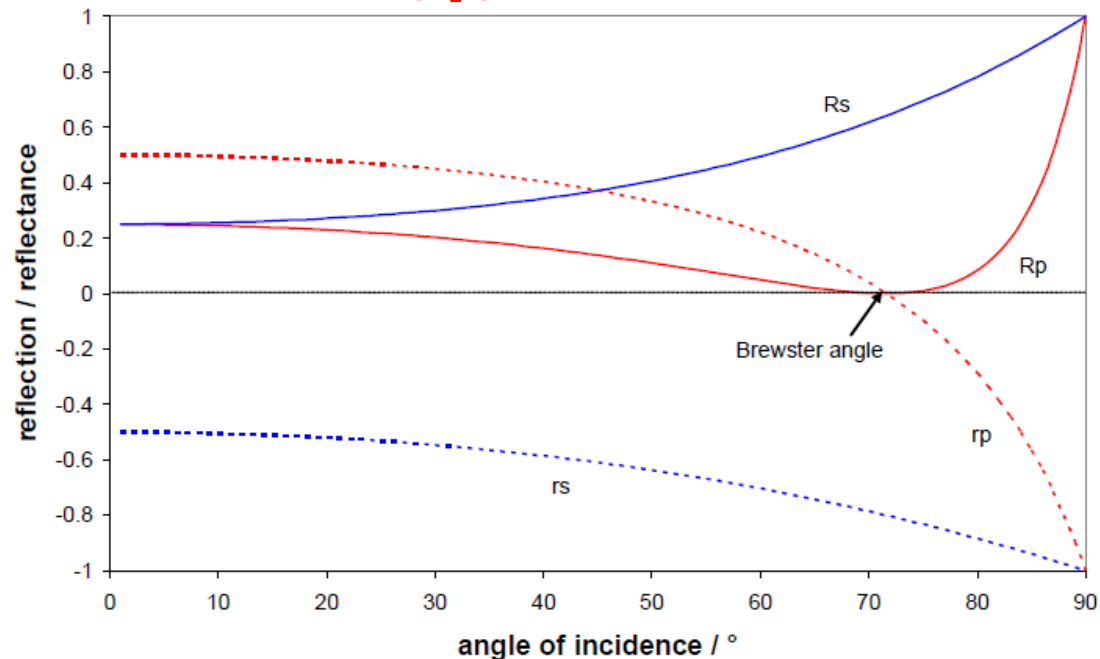
Coeficientes de Fresnel

➤ Em geral, temos:

➤ $R_S > R_P$

$$R_P = |r_p|^2$$

$$R_S = |r_s|^2$$



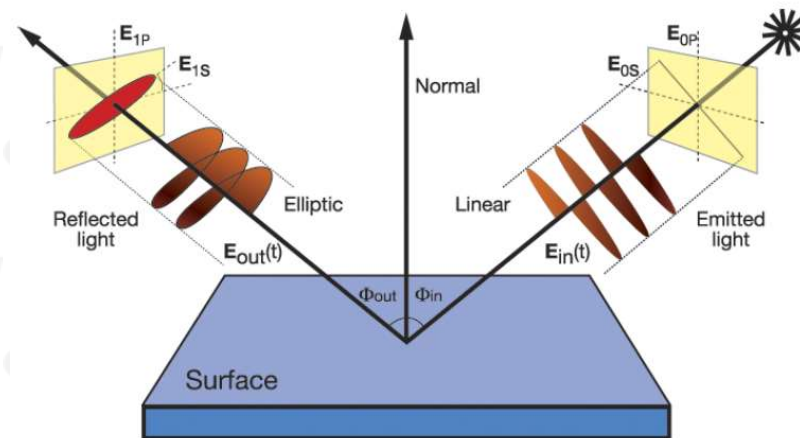
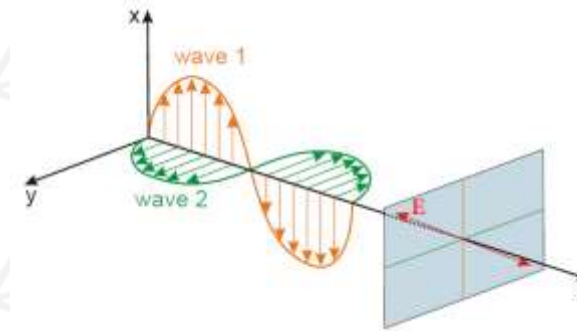
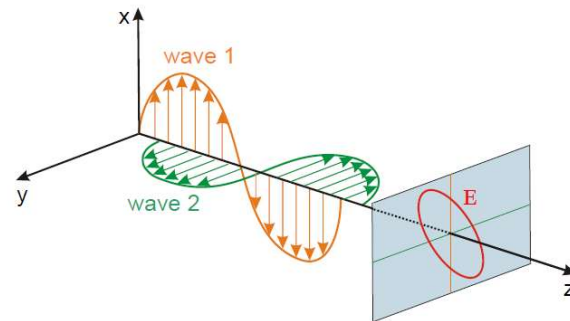
➤ No **Ângulo de Brewster** (θ_B), a componente perpendicular à superfície (R_p) chega a ser totalmente anulada.

➤ Neste ângulo temos:
$$\tan \theta_B = \frac{n_1}{n_0}$$

Coeficientes de Fresnel

➤ Em geral, temos:

➤ $\delta_p \neq \delta_s$

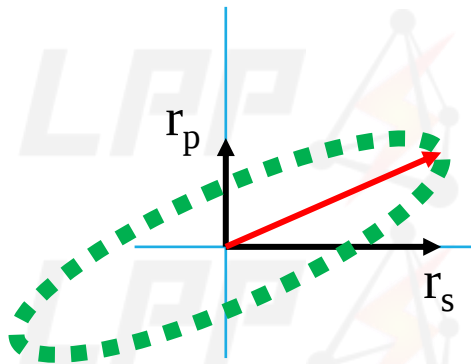


Elipsometria

- Os coeficientes de Fresnel definem uma Elipse Relativa

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

Elipse Relativa

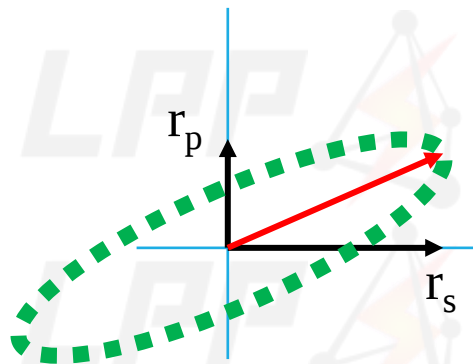


Elipsometria

- Os coeficientes de Fresnel definem uma Elipse Relativa
- Esta Elipse traz as informações da RELAÇÃO entre a elipse da luz refletida e a luz linear incidente

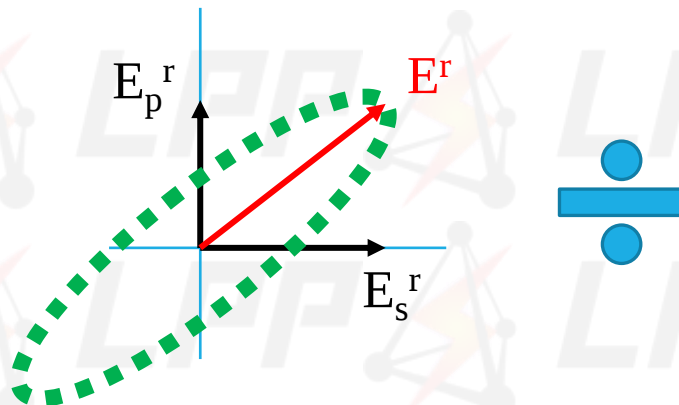
$$r_p = \frac{E_p^r}{E_p^i} = |r_p| \exp(i\delta_p)$$

Elipse Relativa

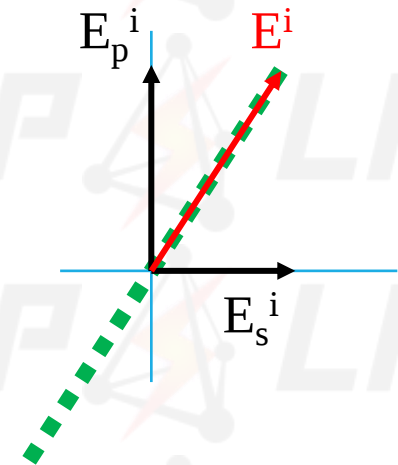


$$r_s = \frac{E_s^r}{E_s^i} = |r_s| \exp(i\delta_s)$$

Elipse Refletida

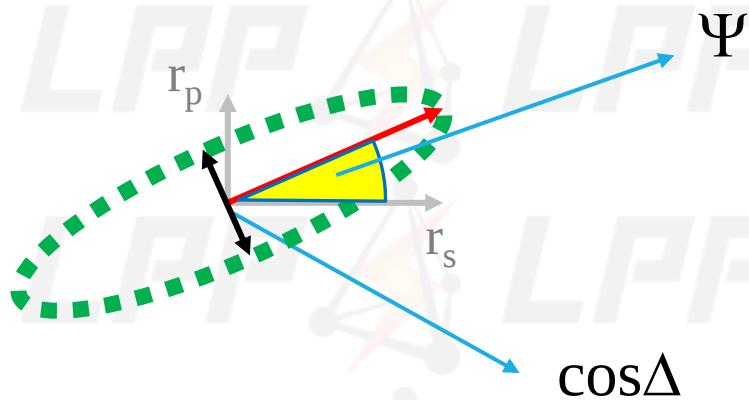


Luz Linear Incidente



Elipsometria

- Esta Elipse Relativa pode ser caracterizada pelos **ângulos elipsométricos** Ψ e Δ , de forma que:
 - Ψ = ângulo do eixo principal (entre 0 a 90°)
 - $\cos\Delta$ = excentricidade (Δ entre 0 a 360°)



Elipsometria

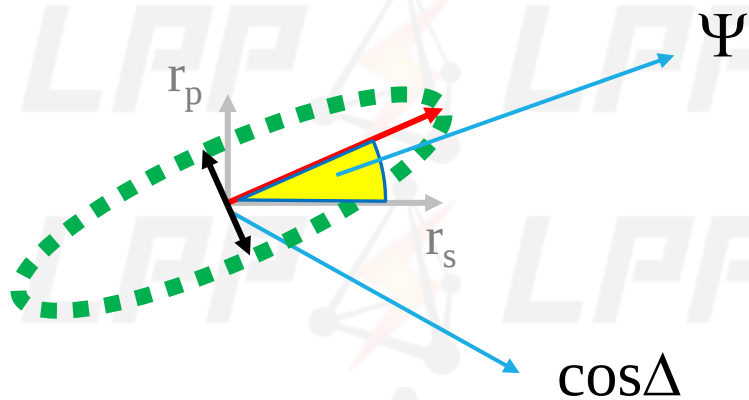
➤ Ao confrontar as definições de Ψ e Δ com r_s e r_p , temos:

■ $\tan\Psi$ = atenuação relativa

$$\tan\Psi = \frac{|r_p|}{|r_s|}$$

■ Δ = diferença entre as defasagens

$$\Delta = \delta_p - \delta_s$$



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

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

Elipsometria

➤ Ao confrontar as definições de Ψ e Δ com r_s e r_p , temos:

■ $\tan\Psi$ = atenuação relativa

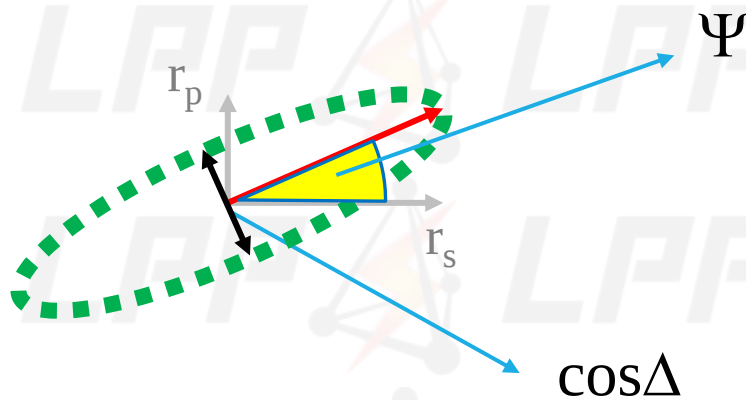
■ Δ = diferença entre as defasagens

$$\tan\Psi = \frac{|r_p|}{|r_s|}$$

$$\Delta = \delta_p - \delta_s$$



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



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

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

Elipsometria

- O Elipsômetro mede as grandezas Ψ e Δ , que se relacionam com $\mathbf{r}_p$ e $\mathbf{r}_s$ por:

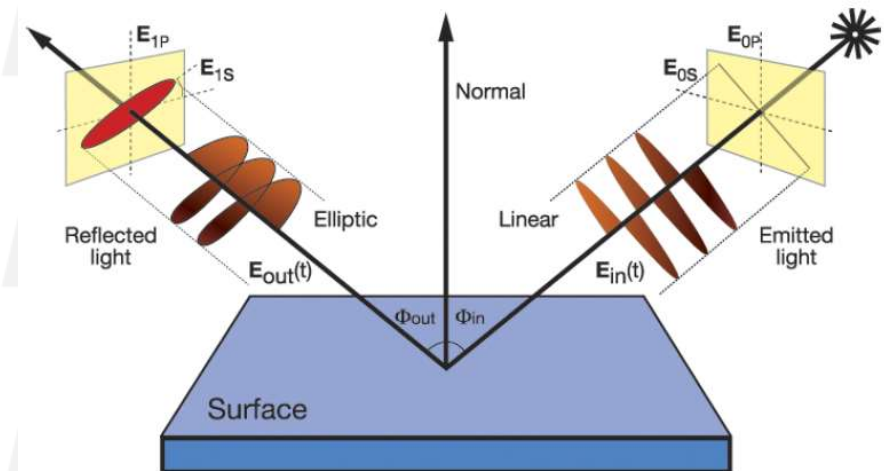
$$\rho = \frac{\mathbf{r}_p}{\mathbf{r}_s} = \tan\Psi e^{i\Delta}$$

→ Equação Fundamental da Elipsometria

→ Coeficiente complexo de reflexão

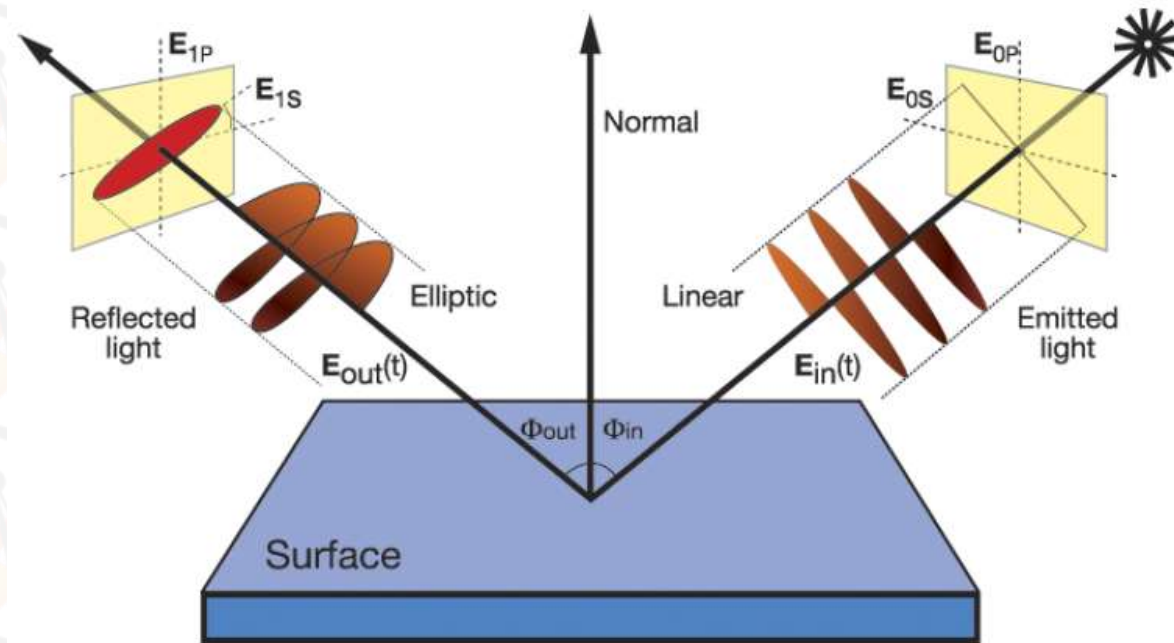
- E ρ se relaciona com as propriedades da superfície/interfaces por:

$$\tilde{\epsilon} = \tilde{n}_1^2 = \tilde{n}_0^2 \sin^2\theta_0 \left[1 + \left(\frac{1-\rho}{1+\rho} \right)^2 \tan^2\theta_0 \right]$$



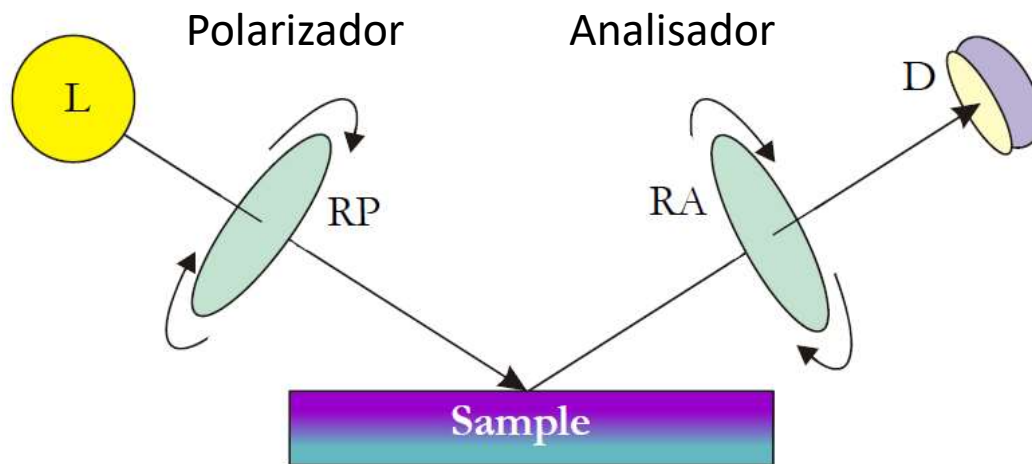
Aparato Experimental

- Princípios Básicos:
 - Incidir luz polarizada linearmente
 - Medir os ângulos Ψ e Δ que definem a elipse resultante



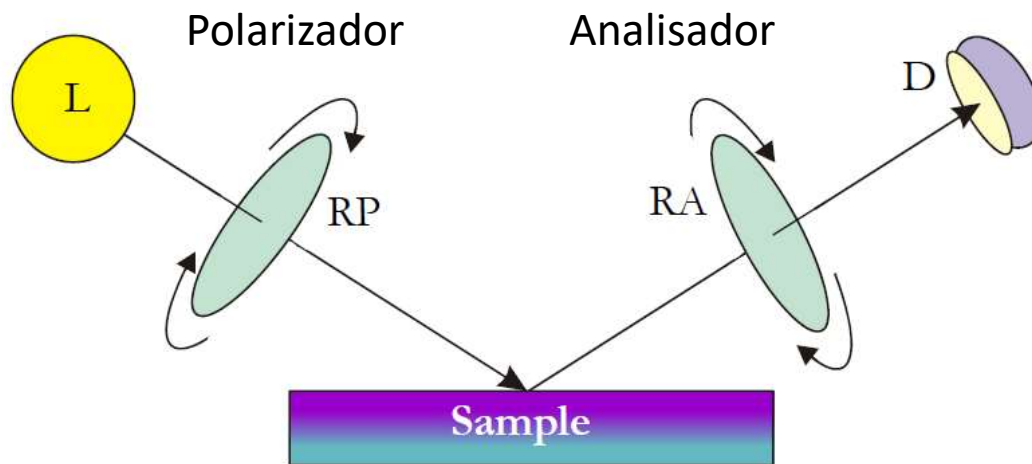
Aparato Experimental

- 1- Elipsômetro de Elemento Rotativo – Mapeamento da Elipse rotacionando P e A
 - Polarizador: Define o estado de polarização linear inicial da luz (sem polarização → polarização linear)
 - Analisador: Projeta a elipse em seu eixo (polarização elíptica → polarização linear)
 - Máxima intensidade obtida quando eixo do Analisador coincide com eixo da elipse (Ψ)
 - Relação entre intensidade máxima e mínima revela a excentricidade da elipse ($\cos\Delta$)



Aparato Experimental

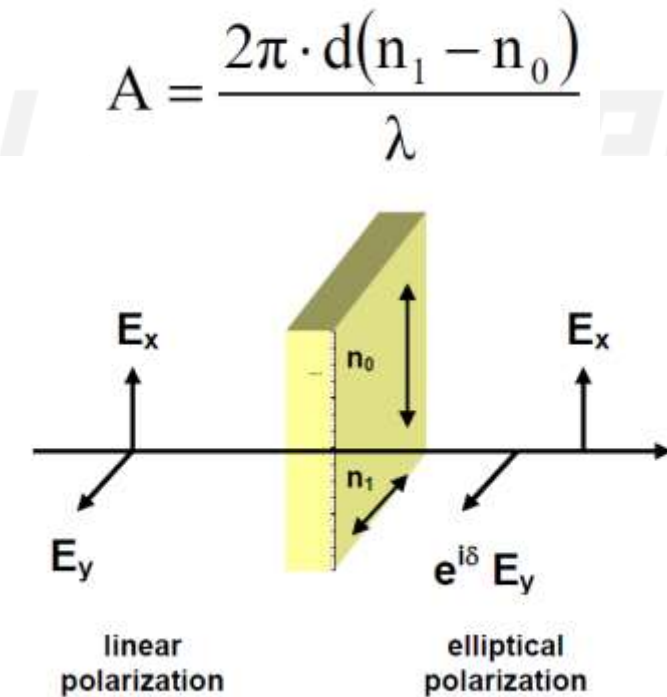
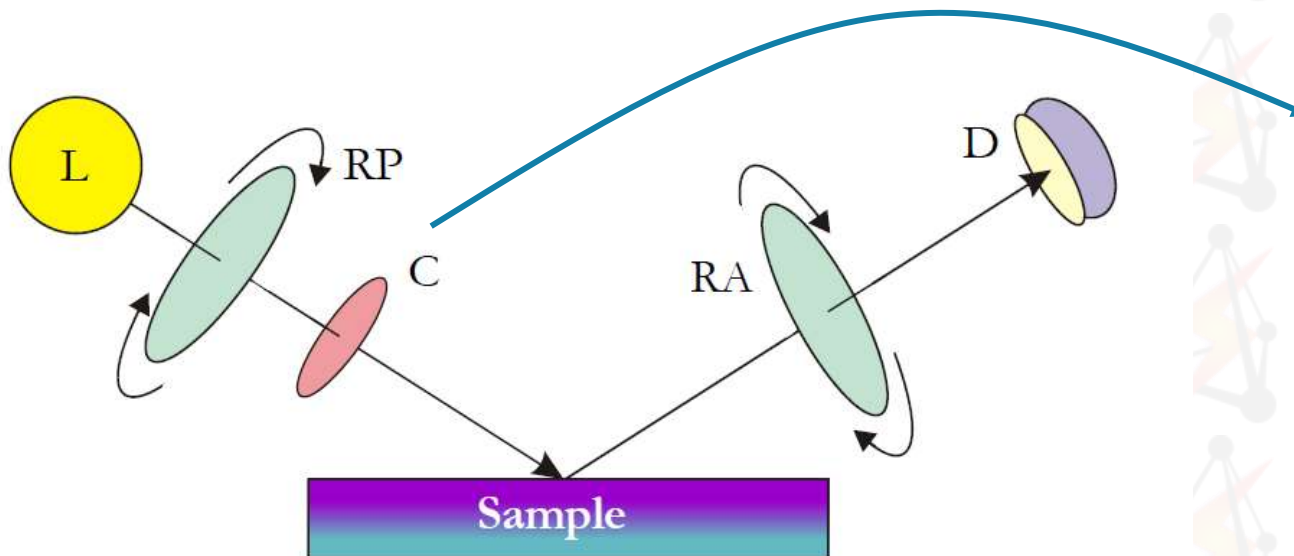
- 1- Elipsômetro de Elemento Rotativo – Mapeamento da Elipse rotacionando P e A
 - Óptica simples e de fácil calibração
 - Impreciso (procura de máximos e mínimos - o sinal nunca é zerado)
 - Processo de medida muito lento



Aparato Experimental

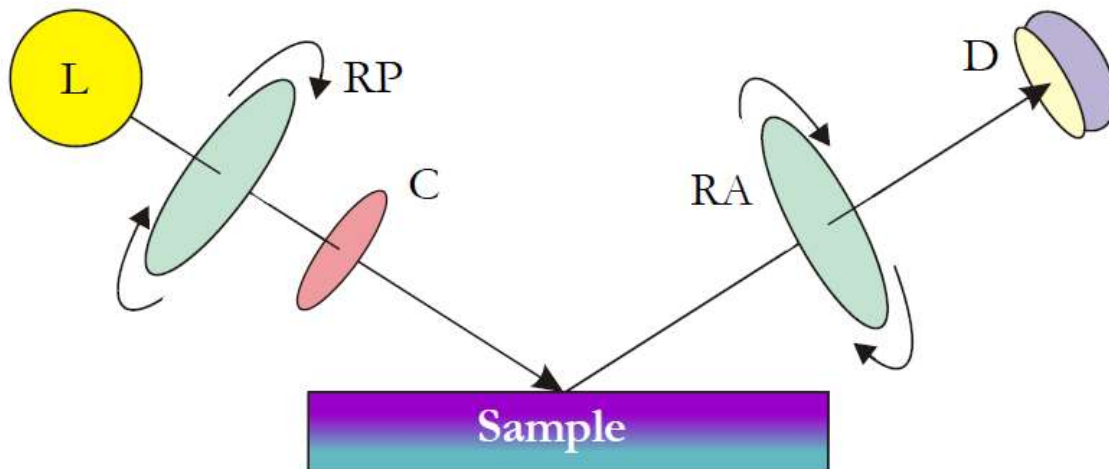
➤ 2- Elipsômetro de Elemento Rotativo com Compensador – Null Ellipsometer

- O compensador (material birrefringente) compensa a defasagem ocorrida na amostra
- Luz no analisador está polarizada linearmente → ao anular o sinal no detector encontra-se Ψ
- Conhecendo a defasagem (A) do compensador, determina-se Δ



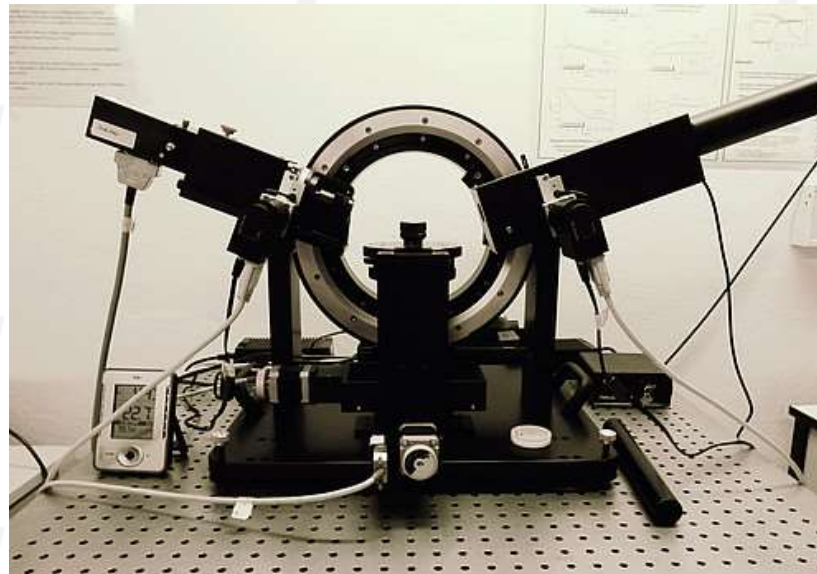
Aparato Experimental

- 2- Elipsômetro de Elemento Rotativo com Compensador – Null Ellipsometer
 - Maior precisão
 - Processo de medida ainda muito lento



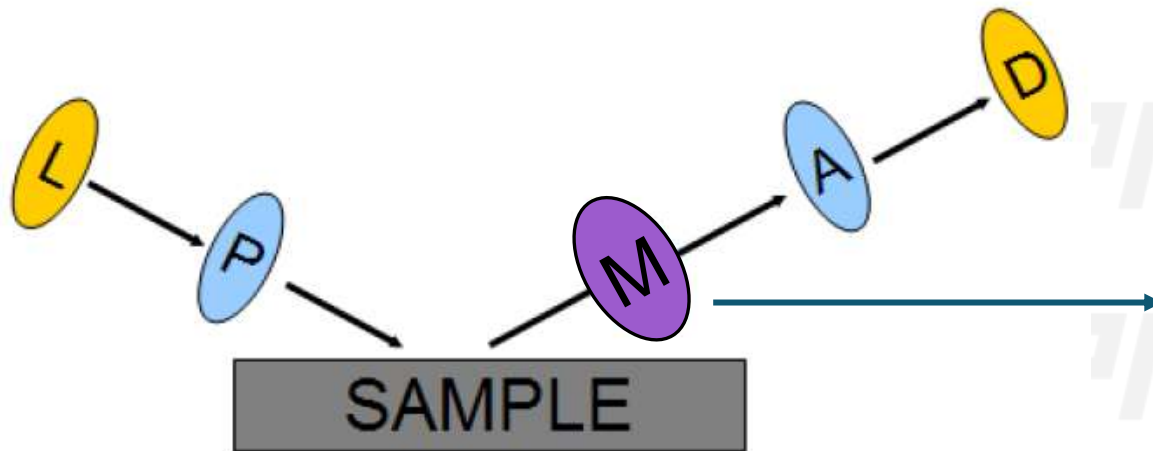
Aparato Experimental

- 2- Elipsômetro de Elemento Rotativo com Compensador – Null Ellipsometer
 - Maior precisão
 - Processo de medida ainda muito lento
 - Sistema automatizado → medidas monocromáticas rápidas / possibilita medidas espectroscópicas (lentas)

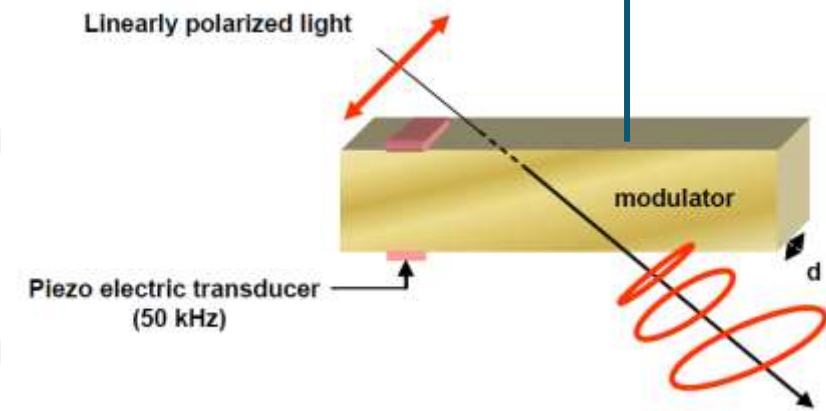
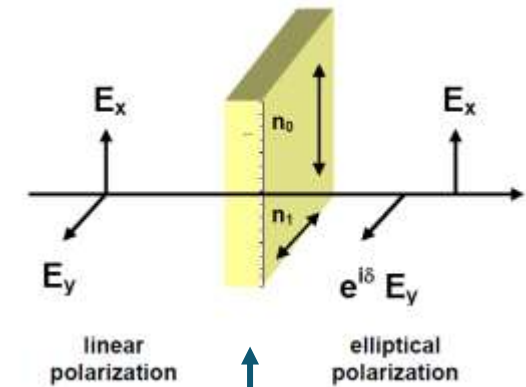


Aparato Experimental

- 3- Elipsômetro de Modulador de Polarização (PME)
 - Polarizador (P) e Analisador (A) Fixos em posições configuráveis
 - Modulador (M) = Compensador Fotoelástico (varia birrefringência por pressão)
 - Adiciona um retardo de fase $\delta(t) = A \sin(\omega t)$, com $\omega = 50\text{kHz}$



$$A = \frac{2\pi \cdot d(n_1 - n_0)}{\lambda}$$



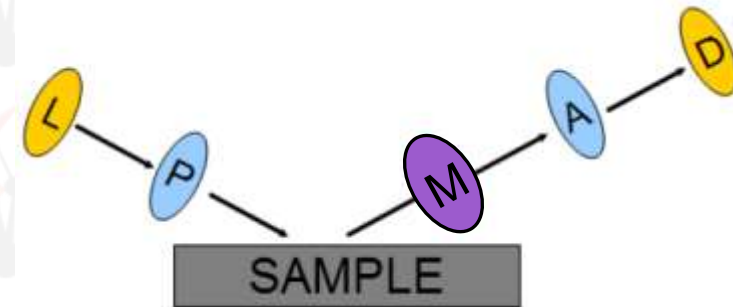
Aparato Experimental

- 3- Elipsômetro de Modulador de Polarização (PME) – o SINAL
 - O sinal (S) obtido no detector é:

$$S(t) = S_0 [1 + I_s \sin(\delta(t)) + I_c \cos(\delta(t))],$$

$$I_c = \sin[2(A-M)] [\sin 2M (\cos 2\Psi \cos 2P) + \sin 2P \cos 2M \sin 2\Psi \cos \Delta]$$

$$I_s = \sin[2(A-M)] \sin 2P \sin 2\Psi \sin \Delta$$



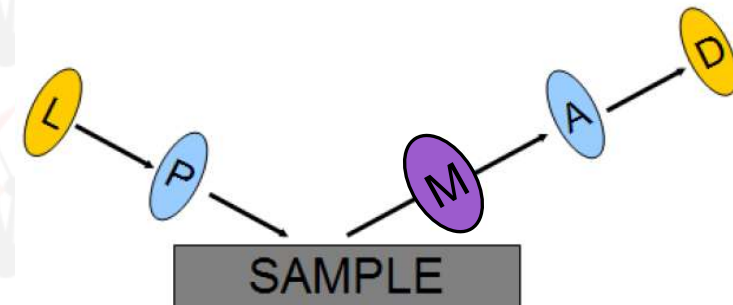
Aparato Experimental

- 3- Elipsômetro de Modulador de Polarização (PME) – o SINAL
 - O sinal (S) obtido no detector é:

$$S(t) = S_0 [1 + I_s \sin(\delta(t)) + I_c \cos(\delta(t))],$$

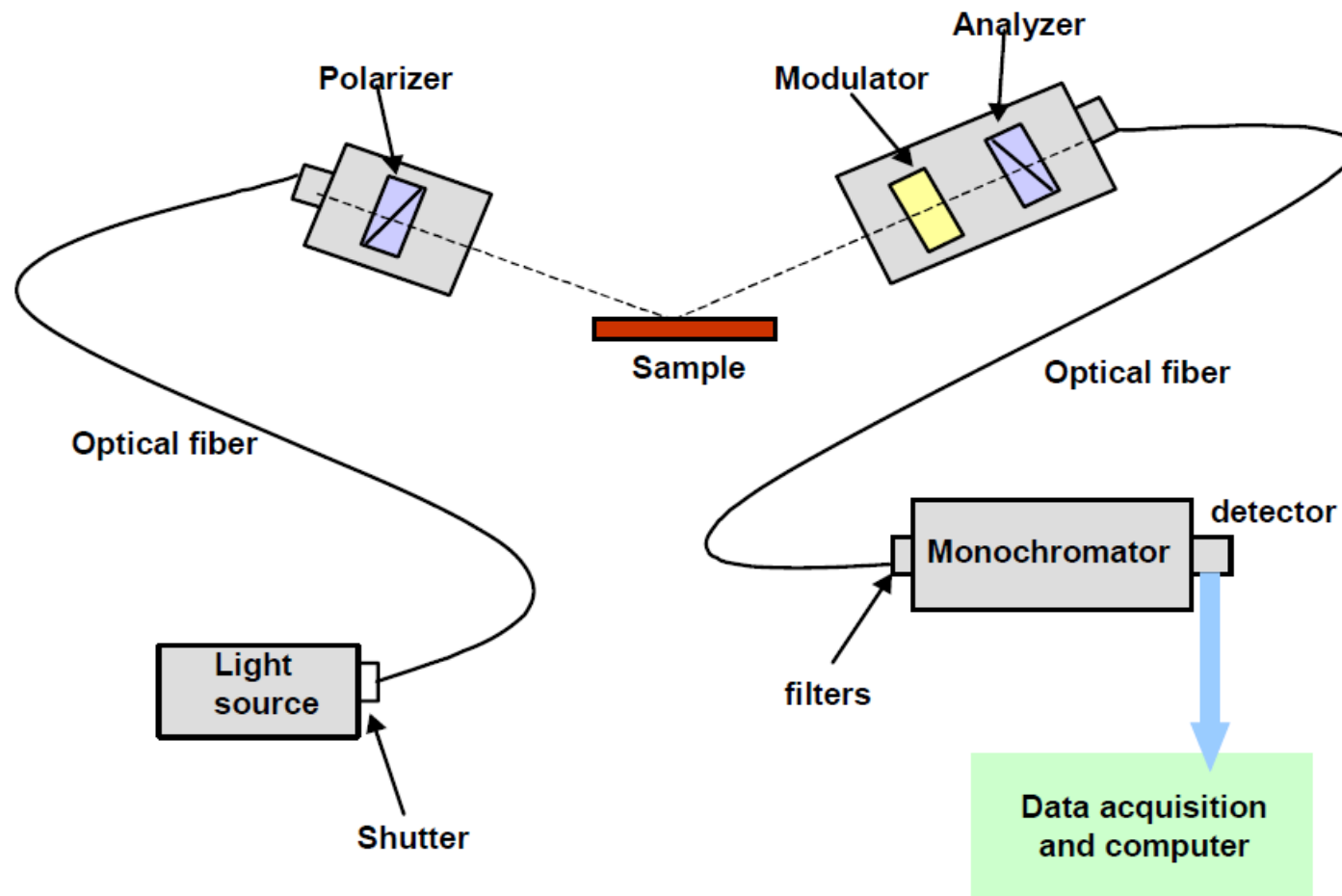
$$M=0^\circ, A=45^\circ, P=45^\circ \rightarrow I_c = \sin 2\Psi \cos \Delta$$

$$I_s = \sin 2\Psi \sin \Delta,$$



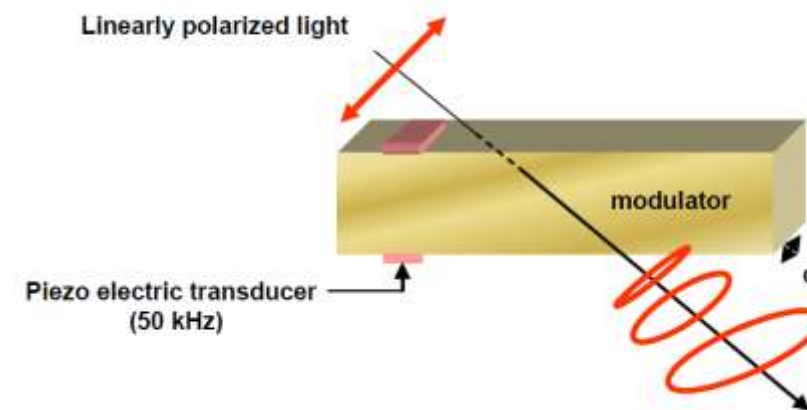
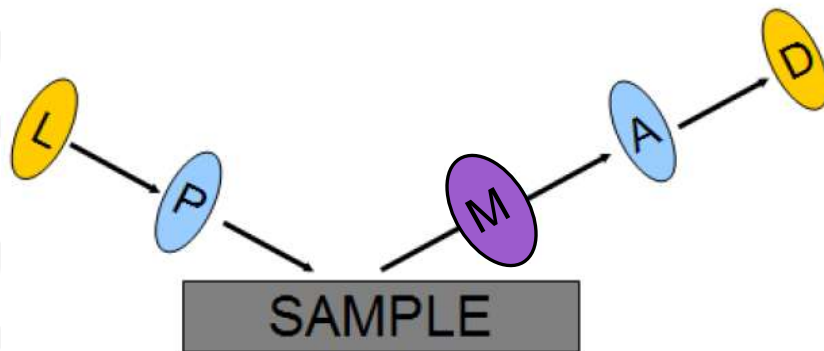
Aparato Experimental

➤ 3- Elipsômetro de Modulador de Polarização (PME) – o SETUP



Aparato Experimental

- 3- Elipsômetro de Modulador de Polarização (PME)
 - Rápido, confiável e preciso
 - Possibilita medidas mais complexas → mais informações/propriedades
 - **Necessita de sofisticado aparato de automação**
 - **Calibração complexa**
 - \$\$\$\$\$\$



Resultado da Medida

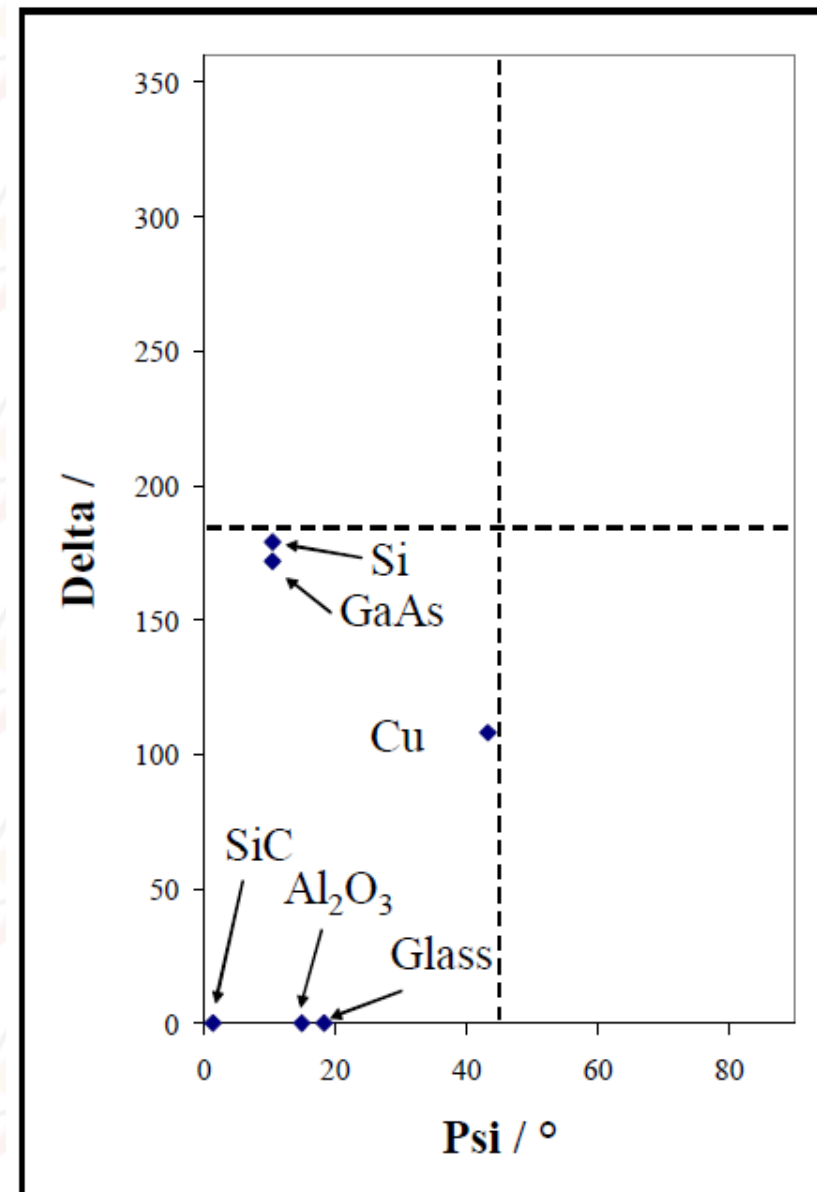
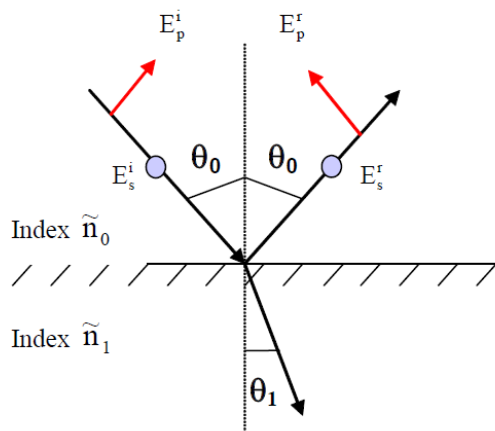
- Para comprimento de onda fixo e superfície simples:

$$0 \leq \Psi \leq 45^\circ \quad (R_S > R_P)$$

$$0 \leq \Delta \leq 180^\circ$$

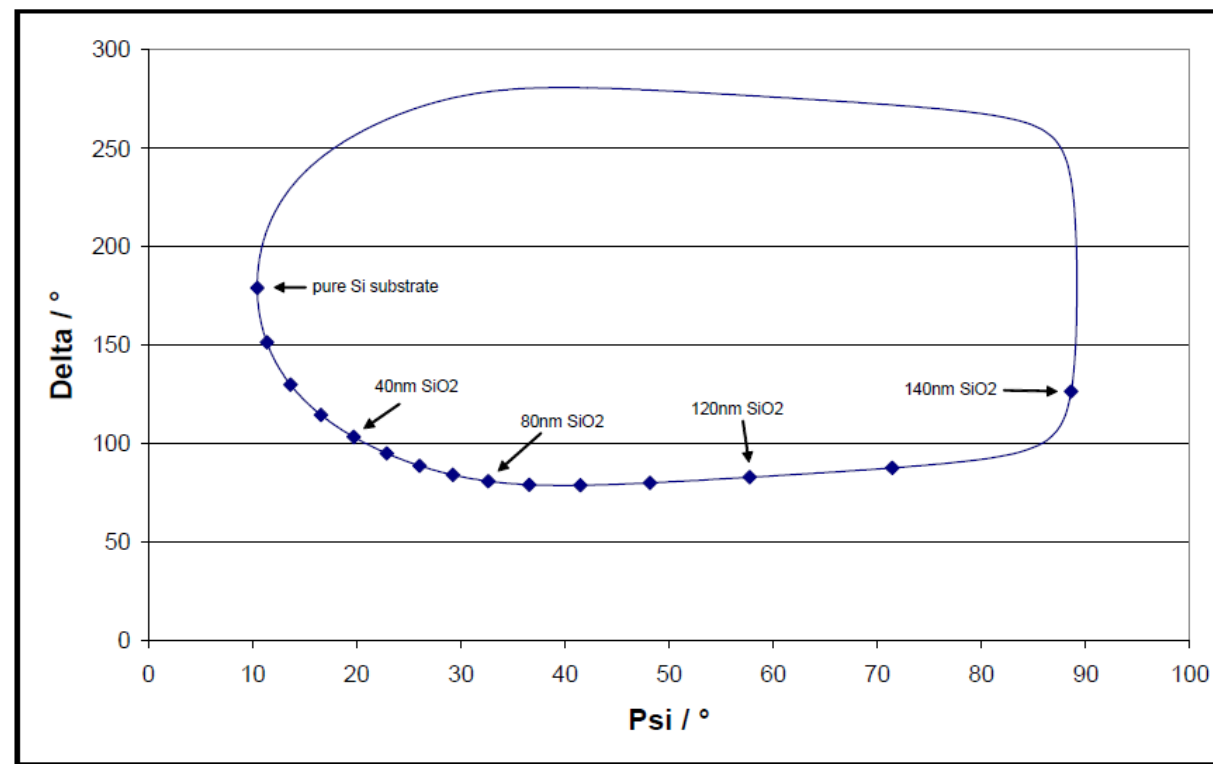
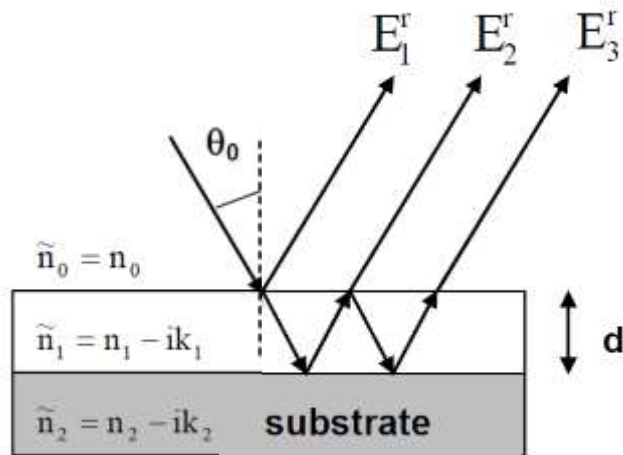
$$\rho = \tan \psi e^{i\Delta}$$

$$\varepsilon = n^2 = \sin^2 \theta_0 \left[1 + \tan^2 \theta_0 \frac{(1 - \rho)^2}{(1 + \rho)^2} \right]$$



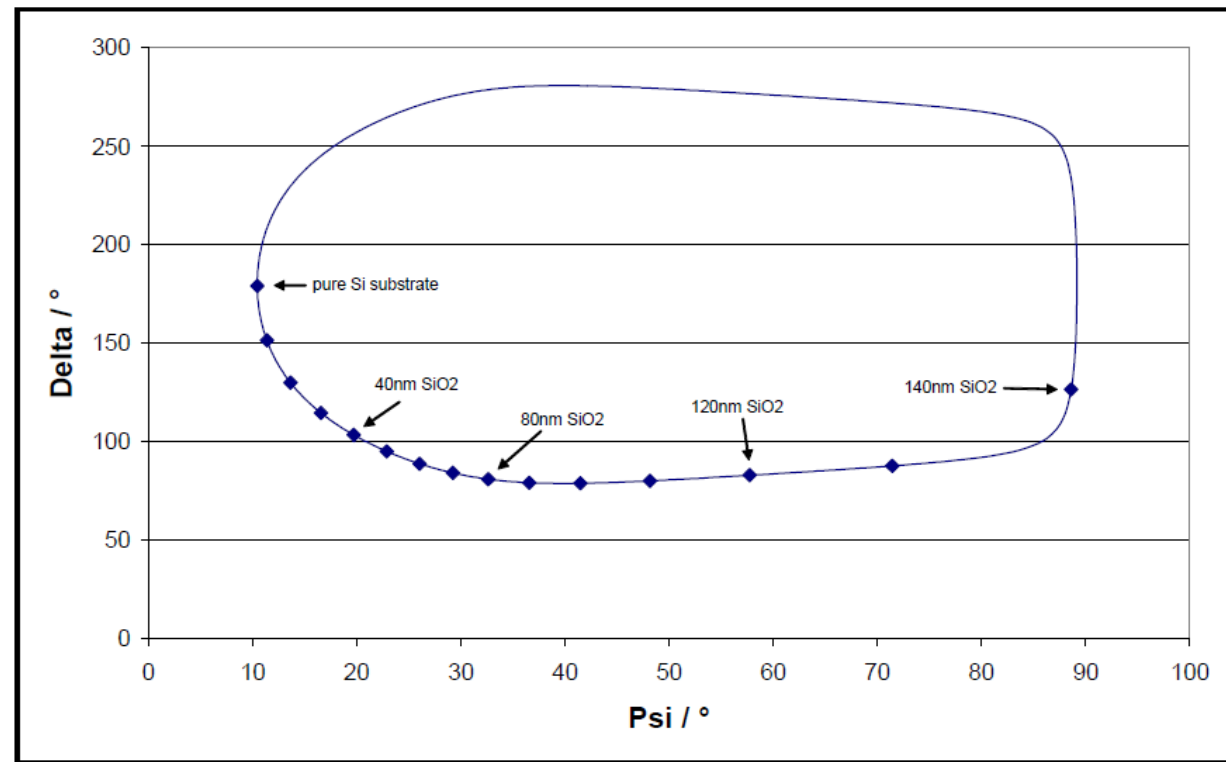
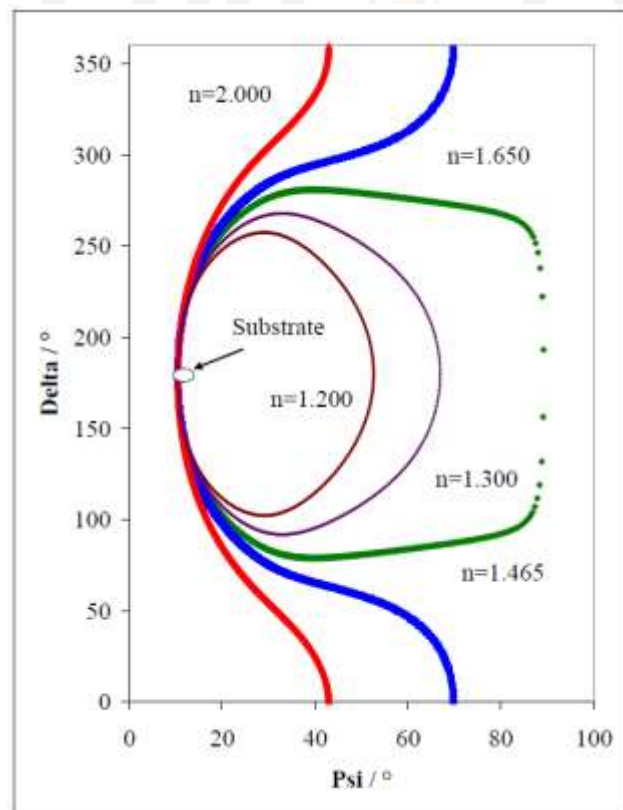
Resultado da Medida

- Para comprimento de onda fixo e um **filme em crescimento** (variação de espessura):
 - Filme transparente ($k = 0$) mostrará curva fechada no diagrama Ψ, Δ



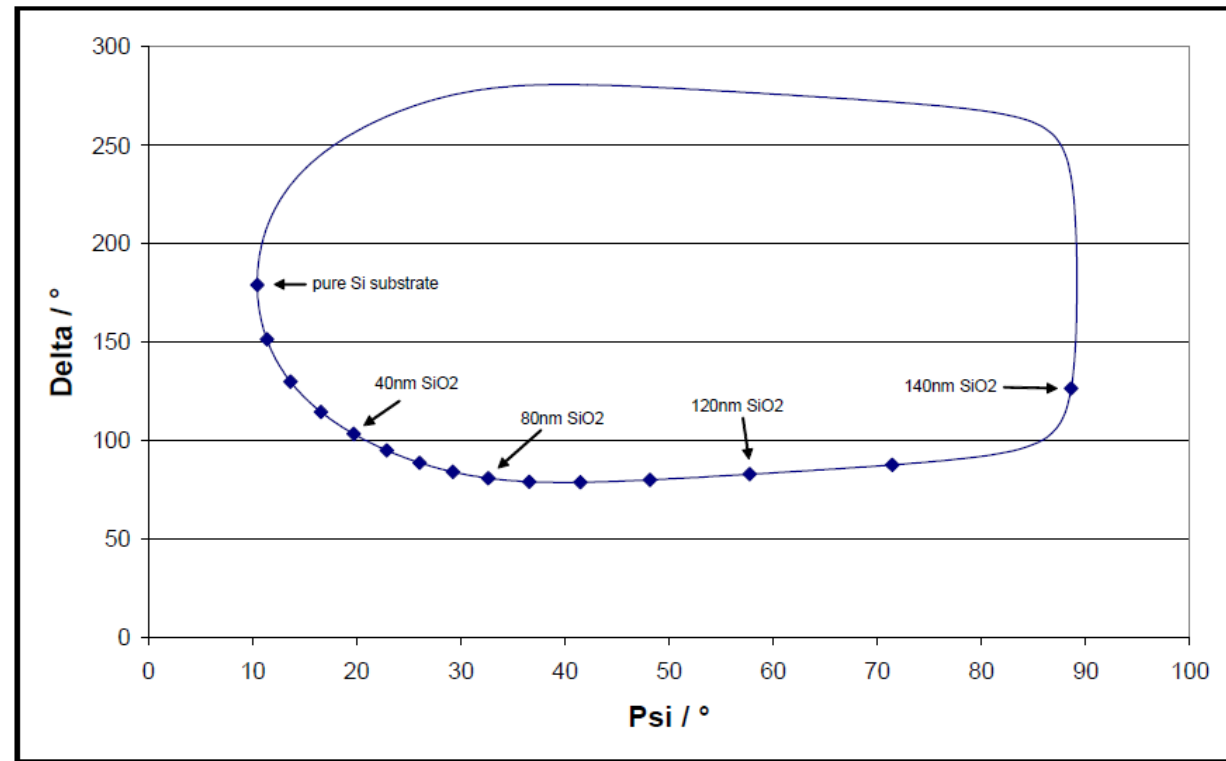
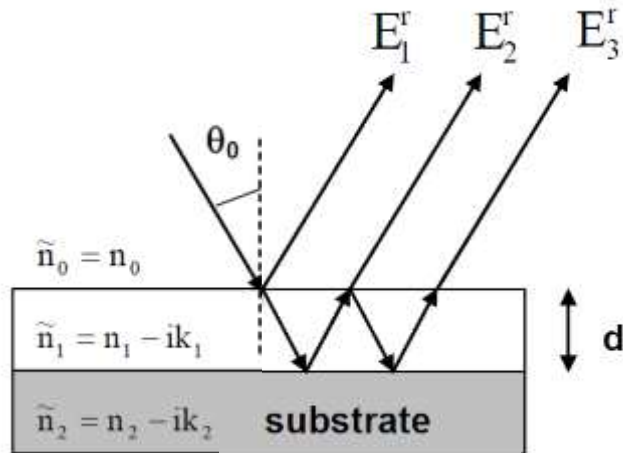
Resultado da Medida

- Para comprimento de onda fixo e um **filme em crescimento** (variação de espessura):
 - Filme transparente ($k = 0$) mostrará curva fechada no diagrama Ψ, Δ
 - Diferentes n refletirão em diferentes raios de curvatura



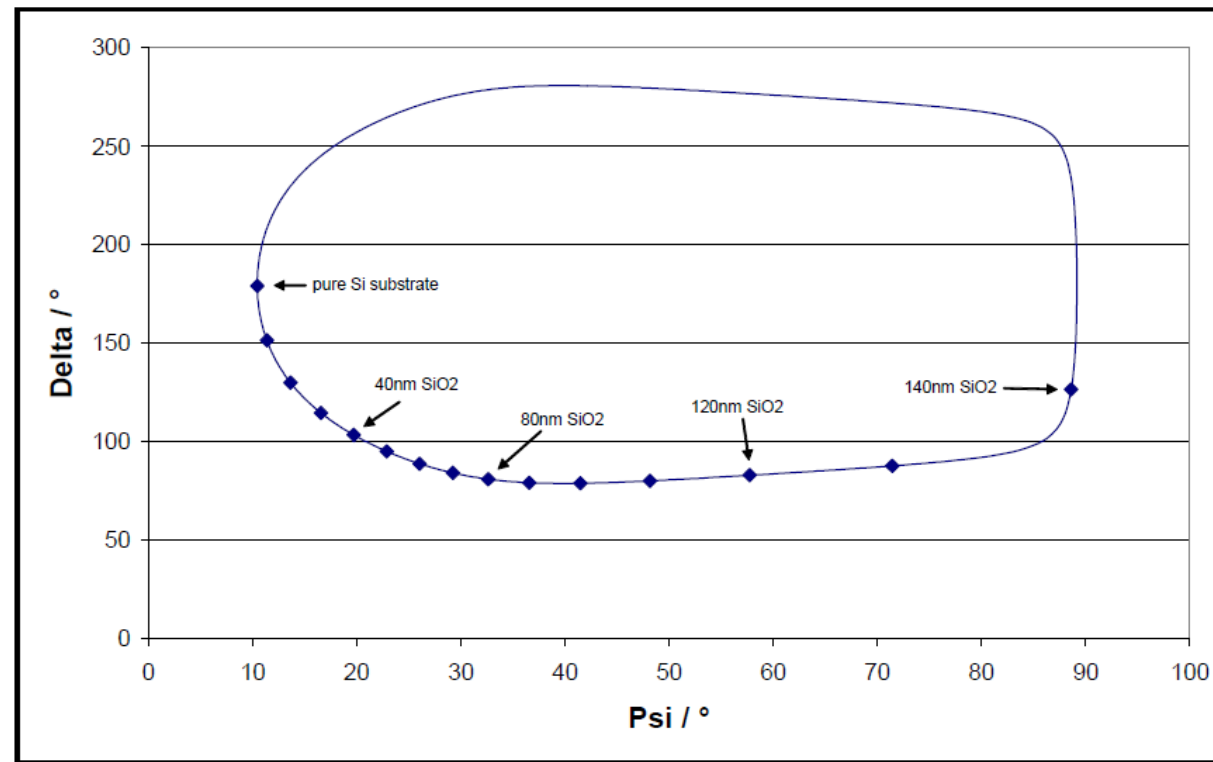
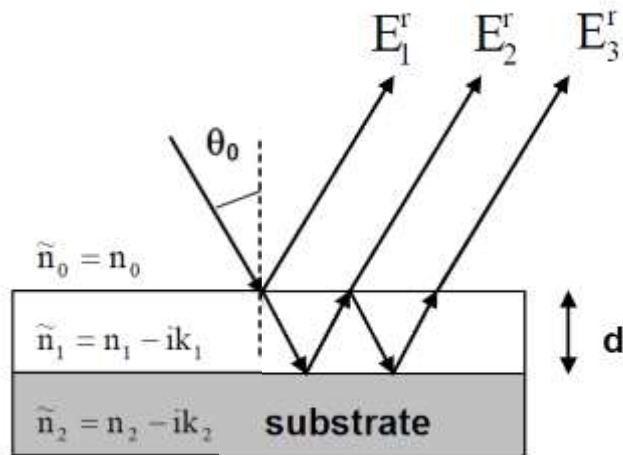
Resultado da Medida

- Para comprimento de onda fixo e um **filme em crescimento** (variação de espessura):
 - Período (P) do ciclo depende do λ e do ângulo de incidência (AOI)
 - P do SiO_2/Si (AOI = 70° , $\lambda = 633\text{nm}$) $\approx 280\text{nm}$



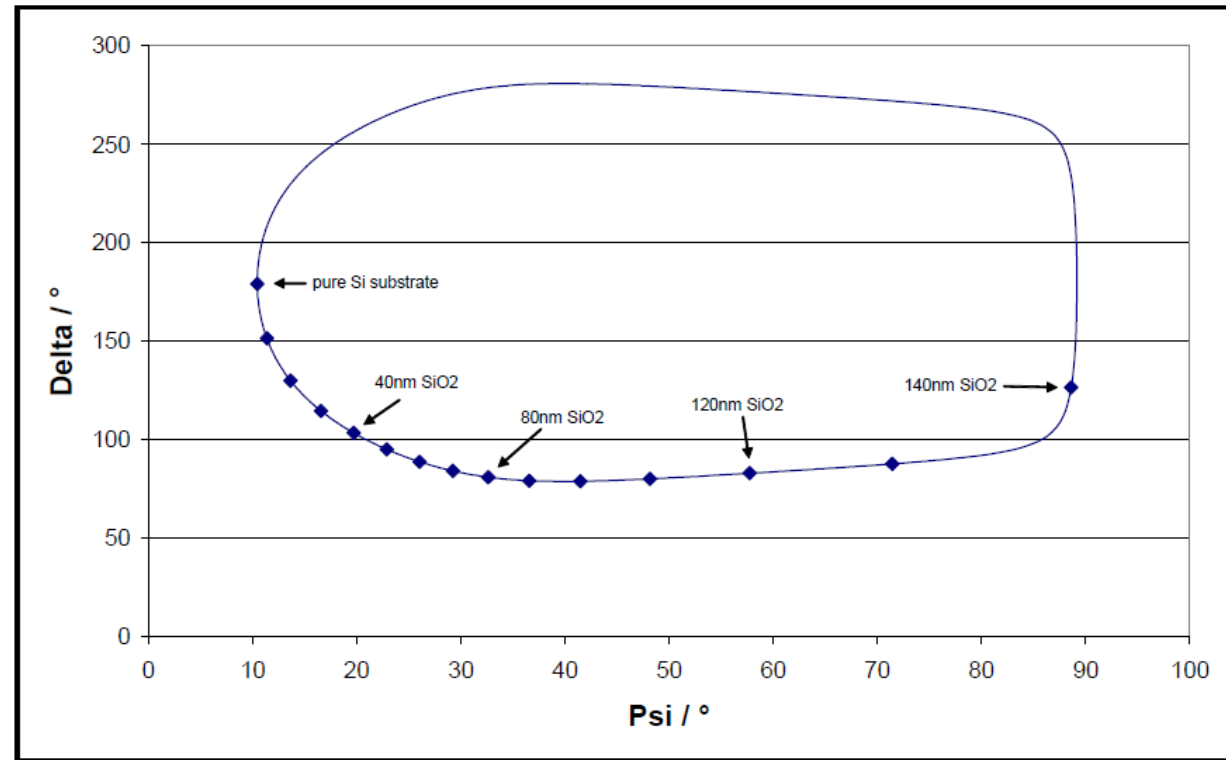
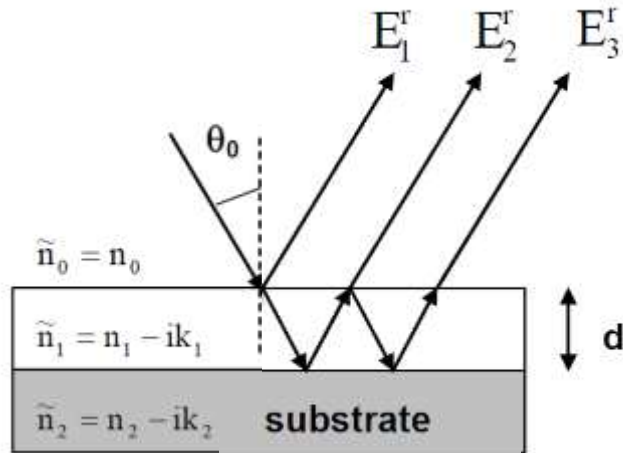
Resultado da Medida

- Para comprimento de onda fixo e um **filme em crescimento** (variação de espessura):
 - Aplicação direta em monitoramento IN SITU de crescimento



Resultado da Medida

- Para comprimento de onda fixo e um **filme com espessura fixa**:
 - **Problema:** SiO₂/Si com espessura $d = d_0 + nP$ resultará no mesmo ponto! (n e d estão correlacionados!)
 - Ex: será impossível distinguir um filme com 40nm de um com 320nm de espessura!



Elipsometria Espectroscópica

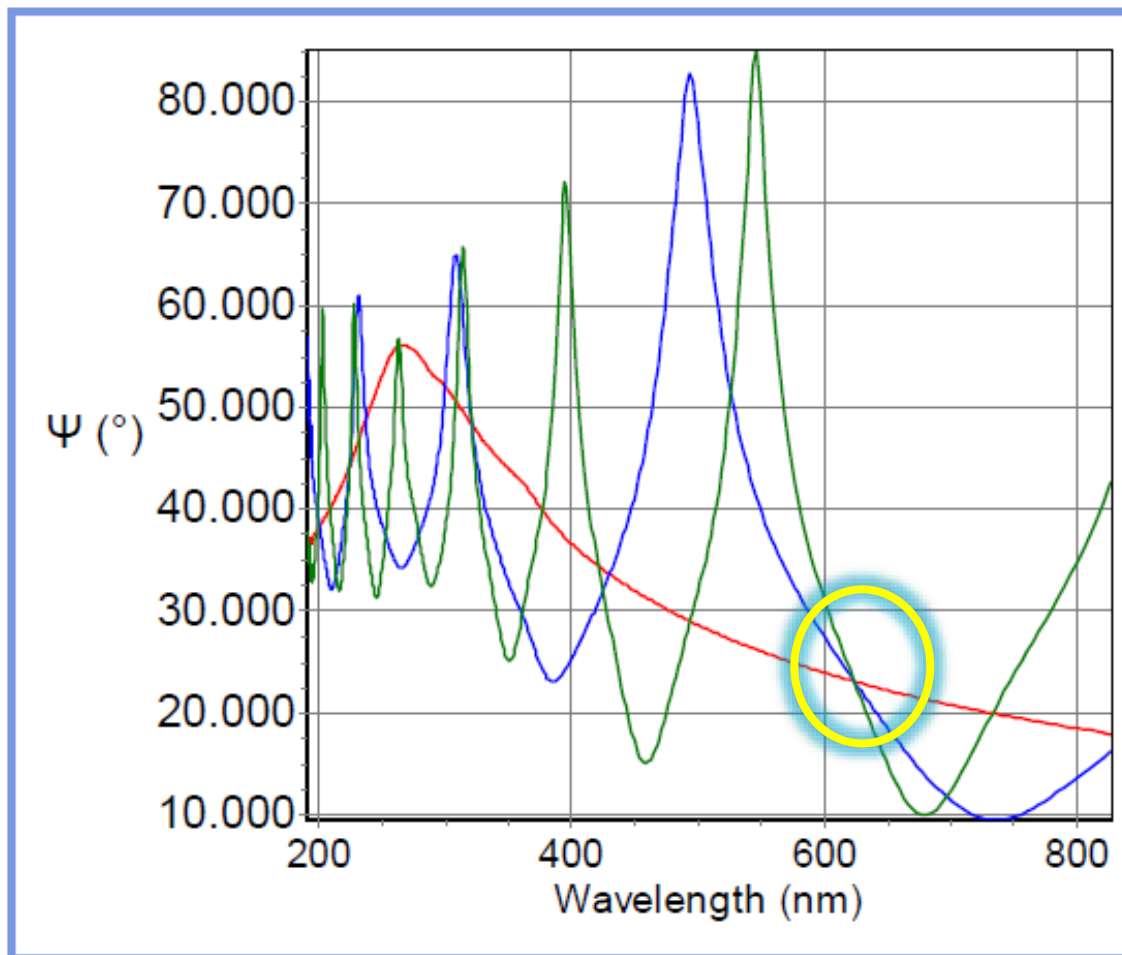
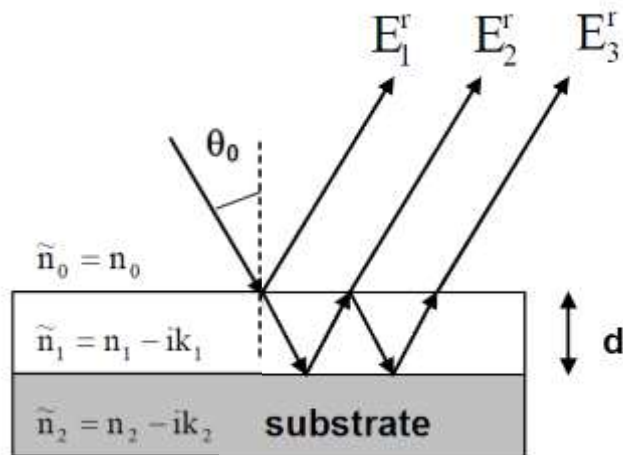
➤ Adicionando uma nova variável: λ

➤ Exemplo SiO_2/Si

■ $d = 50 \text{ nm}$

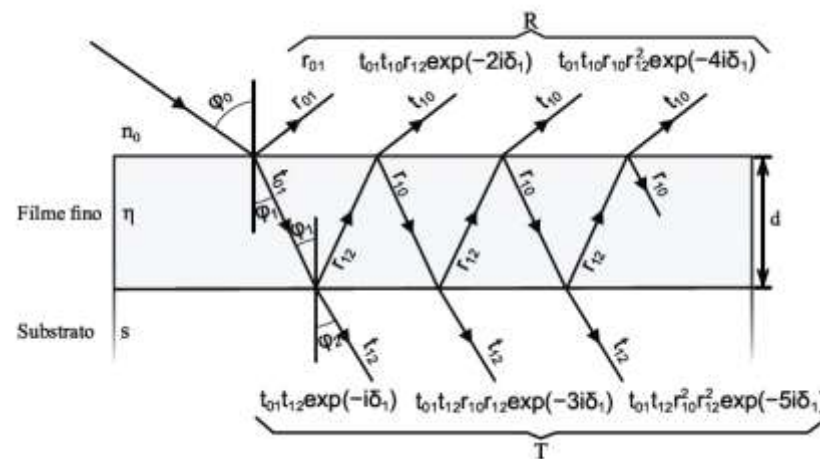
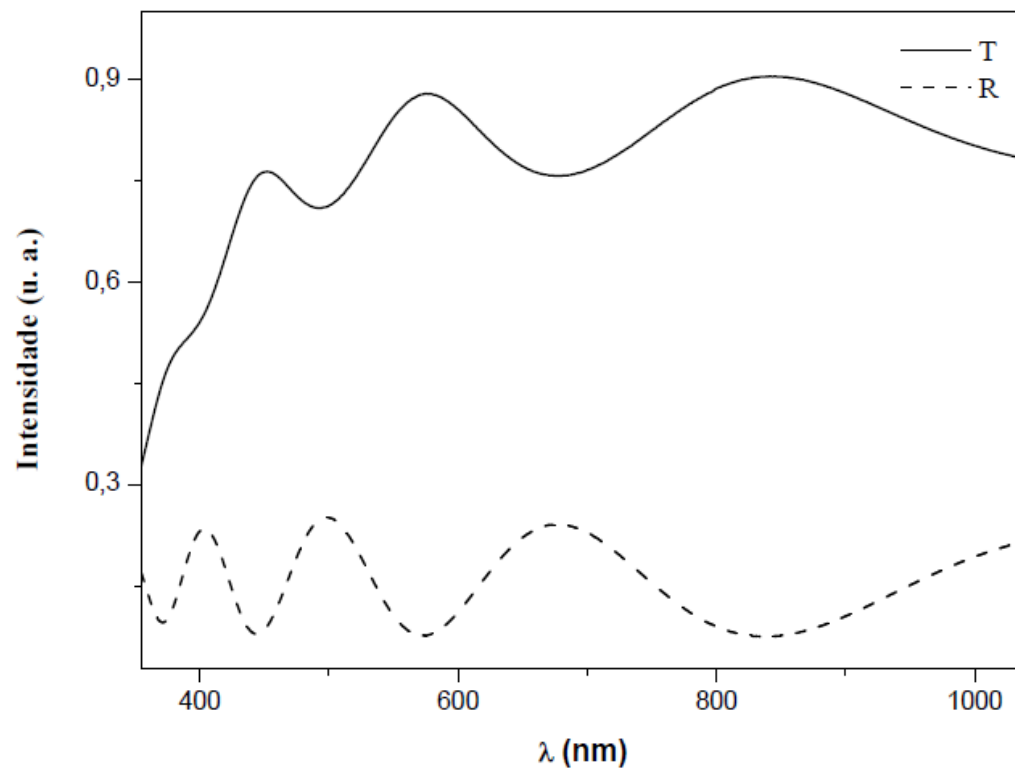
■ $d = 330 \text{ nm}$

■ $d = 610 \text{ nm}$



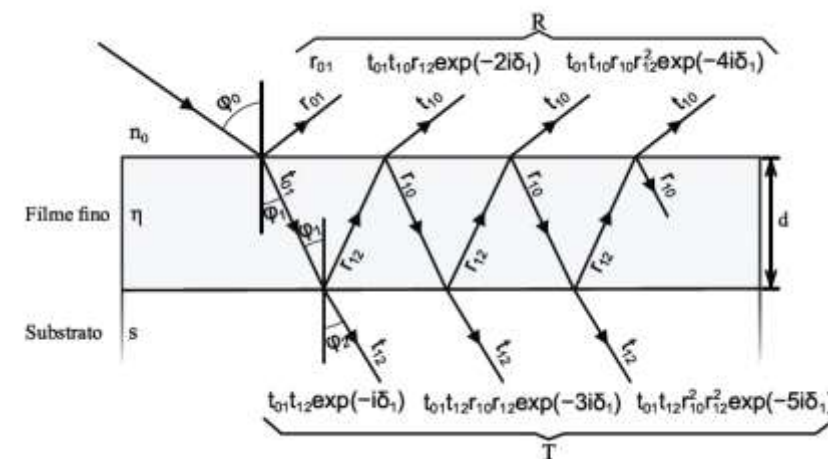
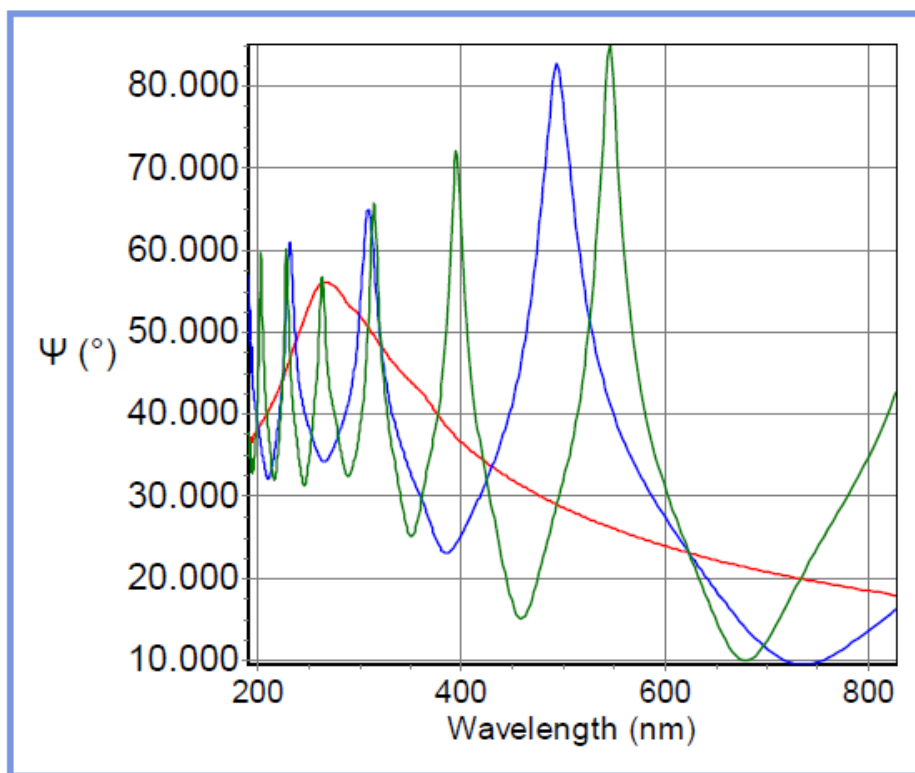
Elipsometria Espectroscópica

- Interferência e o efeito da espessura do filme
- Transmitância Total VS Refletância Total: interferência complementar



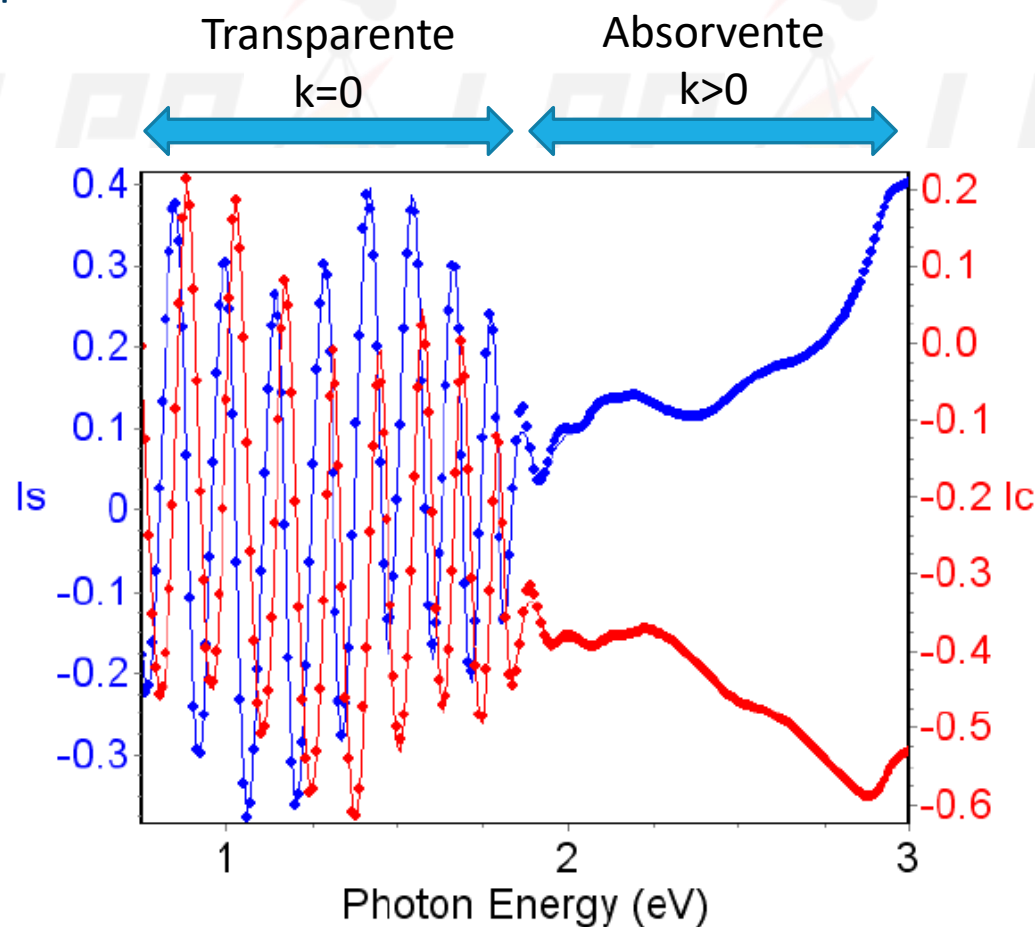
Elipsometria Espectroscópica

- Interferência e o efeito da espessura do filme
- Elipsometria



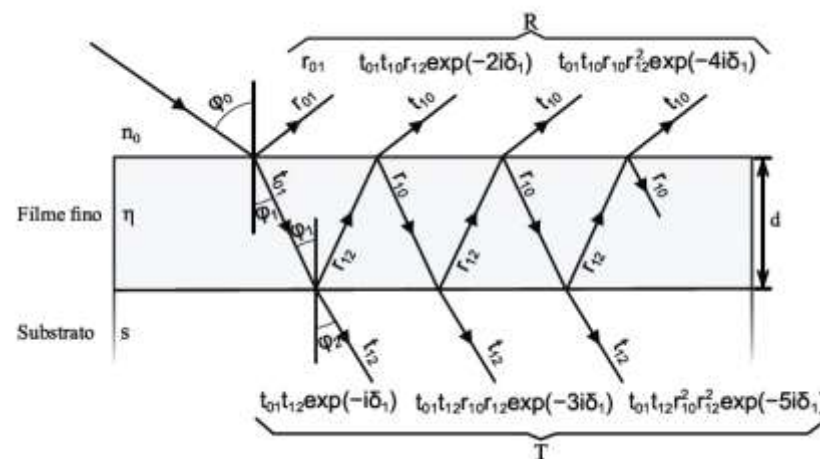
Elipsometria Espectroscópica

- Interferência e o efeito da espessura do filme
- Elipsometria



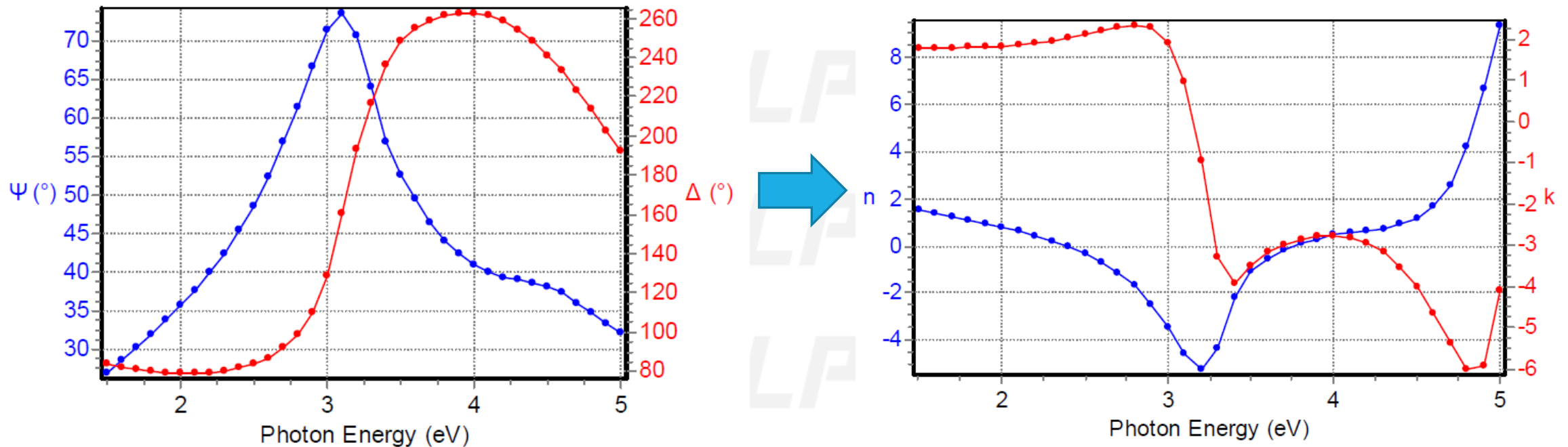
$$I_c = \sin 2\Psi \cos \Delta$$

$$I_s = \sin 2\Psi \sin \Delta$$



Elipsometria Espectroscópica

- Recapitulando: Elipsômetro fornece as curvas medidas $\Psi(\lambda)$ e $\Delta(\lambda)$



- Falta saber como transformar $\Psi(\lambda)$, $\Delta(\lambda) \rightarrow n(\lambda)$, $k(\lambda)$ ou curvas de $\varepsilon_r(\lambda)$ e $\varepsilon_i(\lambda)$

Continua... amanhã mesmo horário...

- Site do Minicurso com esta apresentação e demais materiais:

- www.lpp.ita.br/leite

- Cursos → Elipsometria - minicurso

- Visite também o site do Laboratório de Plasmas e Processos (LPP):

- www.lpp.ita.br

- Palestras 2a e 2b amanhã de manhã (Prof. Rodrigo Sávio e Prof. Gilberto Petraconi)

- visita virtual sexta-feira às 14hs

- Recomendação de Livro (óptica de filmes finos)

- CISNEROS J.I, Ondas eletromagnéticas – Fundamentos e aplicações, Unicamp, Campinas 2001

