Física Experimental IV

https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=90535

2º Semestre 2021

Exp. 3 – Polarização

Atividade 2 – Reflexão em espelho

Semana 11 - 25/Novembro

Prof. Henrique Barbosa

hbarbosa@if.usp.br

http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa

Exp. 3 – Polarização

- Objetivos
  - Estudar a polarização linear, circular, e elíptica
  - A reflexão e a polarização: reflexão na interface com dielétricos e com superfícies metálicas
  - Dielétricos que mudam o estado de polarização: as placas ½ onda e ¼ de onda

Cronograma

- 4 atividades:
  - **Atividade 1:** Fenômenos de polarização da luz - Lei de Malus
  - **Atividade 2:** Polarização após reflexão em dielétrico
  - **Atividade 3:** Polarização após reflexão em espelho
  - **Atividade 4:** Alteração da polarização por placa de onda

Estados possíveis de polarização

Há vários estados possíveis de polarização:

1. **Plano polarizada** ou **linearmente polarizada** quando o campo elétrico é sempre paralelo a um plano definido, chamado plano de polarização da onda

2. **Circularmente polarizada** quando o campo elétrico da onda gira em torno da direção de propagação, tendo módulo constante. Nesse caso, pode-se dizer que, numa dada posição o vetor campo elétrico realiza um movimento circular uniforme.

3. **Elipticamente polarizada** quando o vetor campo elétrico descreve uma elipse

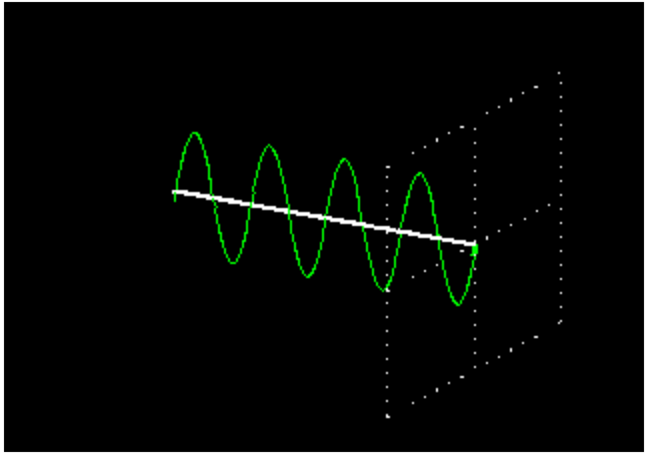
Polarização descrita por um vetor

- Onda linearmente polarizada

$$\vec{E}(z,t) = E_0 \cos(kz - \omega t)\left[\cos\theta\hat{i} + \sin\theta\hat{j}\right]$$

- Ou mais genericamente:

$$\vec{E}(z,t) = E_0 e^{i(kz-\omega t)}\begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix}$$



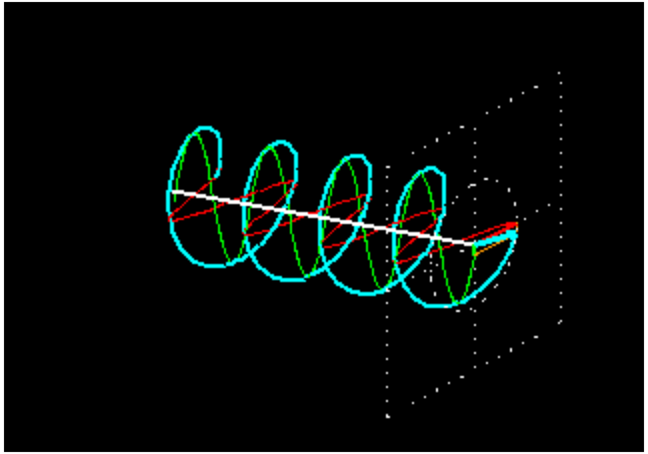
Polarização descrita por um vetor

- Onda circularmente polarizada

$$\vec{E}(z,t) = E_0\left[\cos(kz-\omega t)\hat{i} + \sin(kz-\omega t)\hat{j}\right]$$

- Ou mais genericamente:

$$\vec{E}(z,t) = E_0 e^{i(kz-\omega t)} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$$



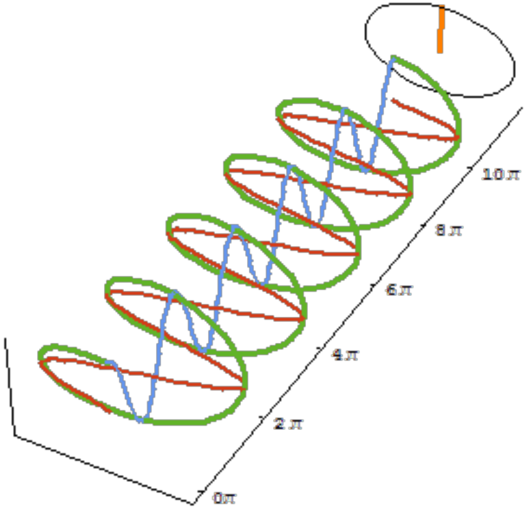
Polarização descrita por um vetor

- Onda <u>elipticamente</u> polarizada (superposição de 2 campos linearmente polarizados, defasados de 90º)

$$\vec{E}(z,t) = E_{0i}\cos(kz - \omega t)\,\hat{i} + E_{0j}\sin(kz - \omega t)\,\hat{j}$$

- Ou mais genericamente:

$$\vec{E}(z,t) = e^{i(kz-\omega t)}\begin{bmatrix} E_{0i} \\ -iE_{0j} \end{bmatrix}$$

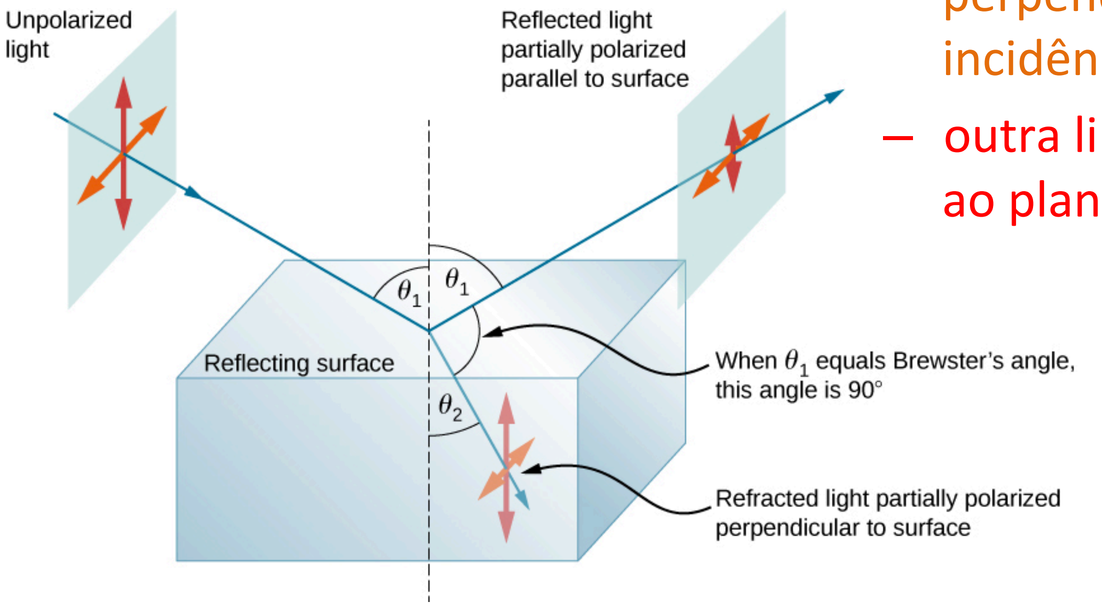


Polarização por reflexão

- O método mais direto de obter luz polarizada a partir de fontes luminosas comuns é por meio de reflexão em meios dielétricos.
- A luz refletida em janelas de vidro, na superfície polida de objetos plásticos, em bolas de bilhar, folhas de papel com um pouco de brilho e até no asfalto, é sempre parcialmente polarizada.

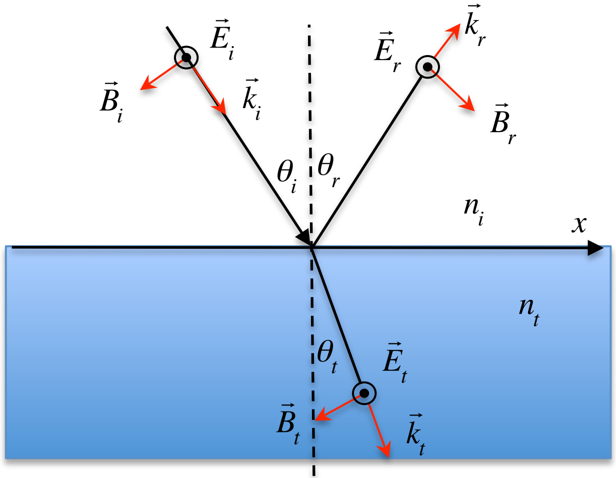
Modelo dos elétrons osciladores

- A onda que incide no material tem 2 componentes:
  - uma linearmente polarizada perpendicularmente ao plano de incidência
  - outra linearmente polarizada paralela ao plano de incidência.



Componente perpendicular (s)

- Condições de contorno na superfície
  - Continuidade dos campos E e B tangenciais à superfície
  - Ver capítulo 3 do livro: *Physics of Light and Optics* – Peatross & Ware
  - Devido a estas condições, temos que



- Quando o raio muda de meio, muda o λ
- Lei de Snell
- Ângulo de incidência = reflexão

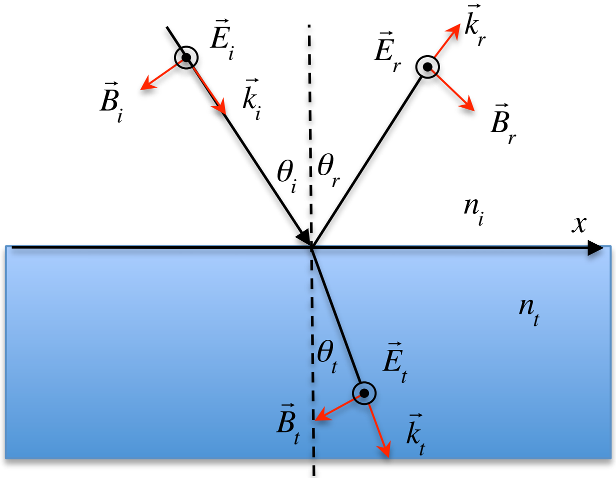
$$E^1_{\tan} = E^2_{\tan} \qquad B^1_{\tan} = B^2_{\tan}$$

$$E_i + E_r = E_t \qquad -B_i \cos\theta_i + B_r \cos\theta_r = -B_t \cos\theta_t$$

Componente perpendicular (s)

- Define-se os coeficientes de Fresnel $r = \dfrac{E_r}{E_i}$ $\quad n = \dfrac{c}{v} \quad B = \dfrac{E}{v}$

- Portanto, para a perpendicular (s) $r_s = \dfrac{n_i \cos\theta_i - n_t \cos\theta_t}{n_i \cos\theta_i + n_t \cos\theta_t}$

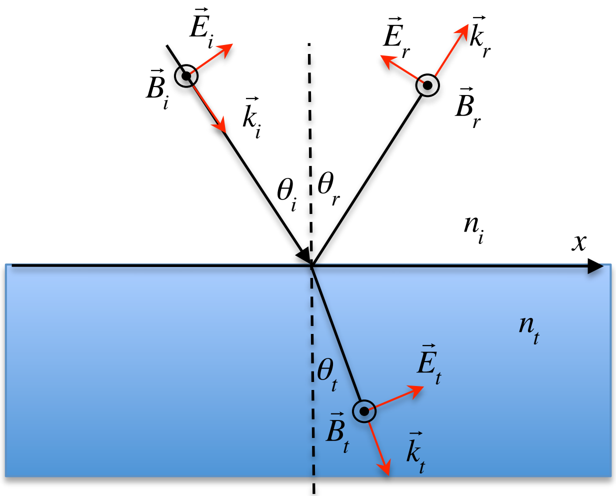


Usando a Lei de Snell, chegamos em:

$$r_s = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$

Componente paralela (p)

- Condições de contorno na superfície
  - Continuidade dos campos E e B tangenciais à superfície
  - Note a mudança na orientação de E e B



$$B_{\tan}^{1} = B_{\tan}^{2} \qquad E_{\tan}^{1} = E_{\tan}^{2}$$

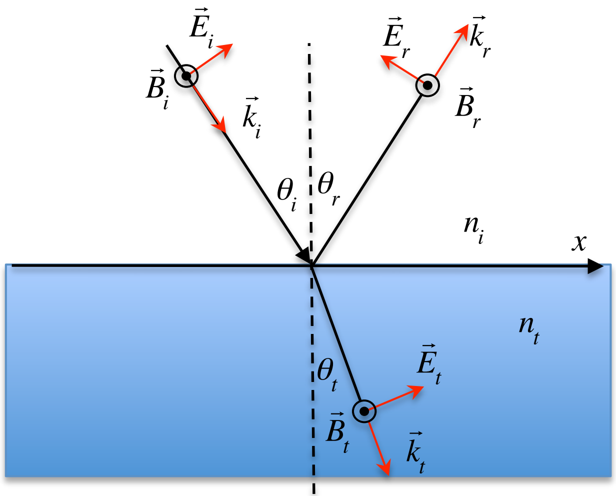
$$B_i + B_r = B_t \qquad E_i \cos\theta_i - E_r \cos\theta_r = E_t \cos\theta_t$$

$$n = \frac{c}{v} \qquad B = \frac{E}{v}$$

Componente paralela (p)

- Podemos calcular o coeficiente de Fresnel para esta componente:

$$r_p = \frac{n_t \cos\theta_i - n_i \cos\theta_t}{n_t \cos\theta_i + n_i \cos\theta_t}$$

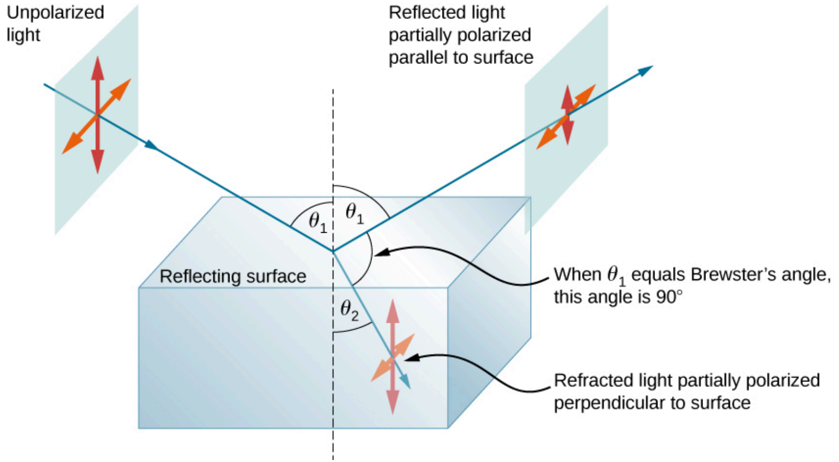


- Note que os índices de refração estão trocados em relação ao caso anterior
- Usando a Lei de Snell:

$$r_p = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)}$$

Coeficientes de Reflexão

- Os **coeficientes de reflexão** para polarização perpendicular ao plano de incidência (**p**) e paralela (**s**) são dados por:



Intensidade:

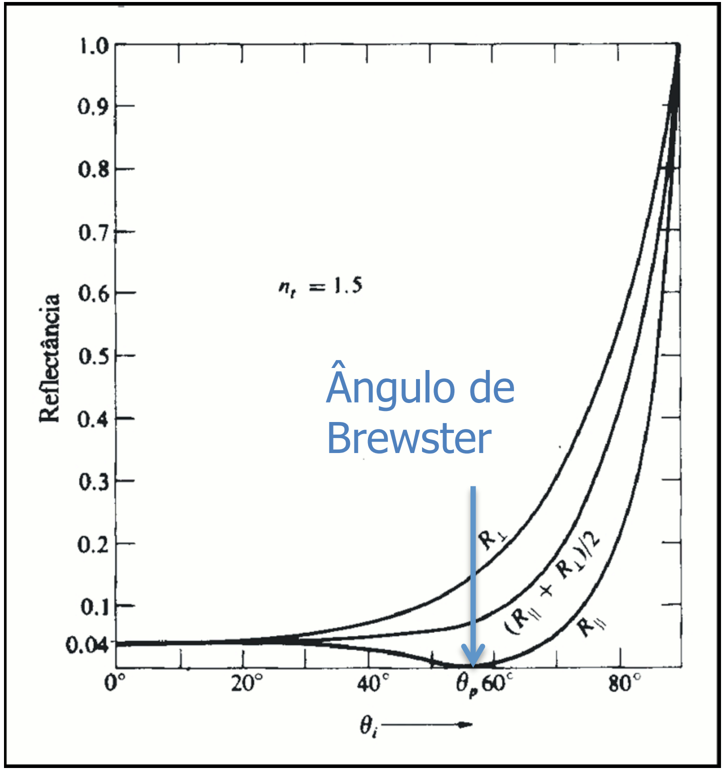
$$R_s = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)}$$

$$R_p = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)}$$

Coeficientes de Reflexão

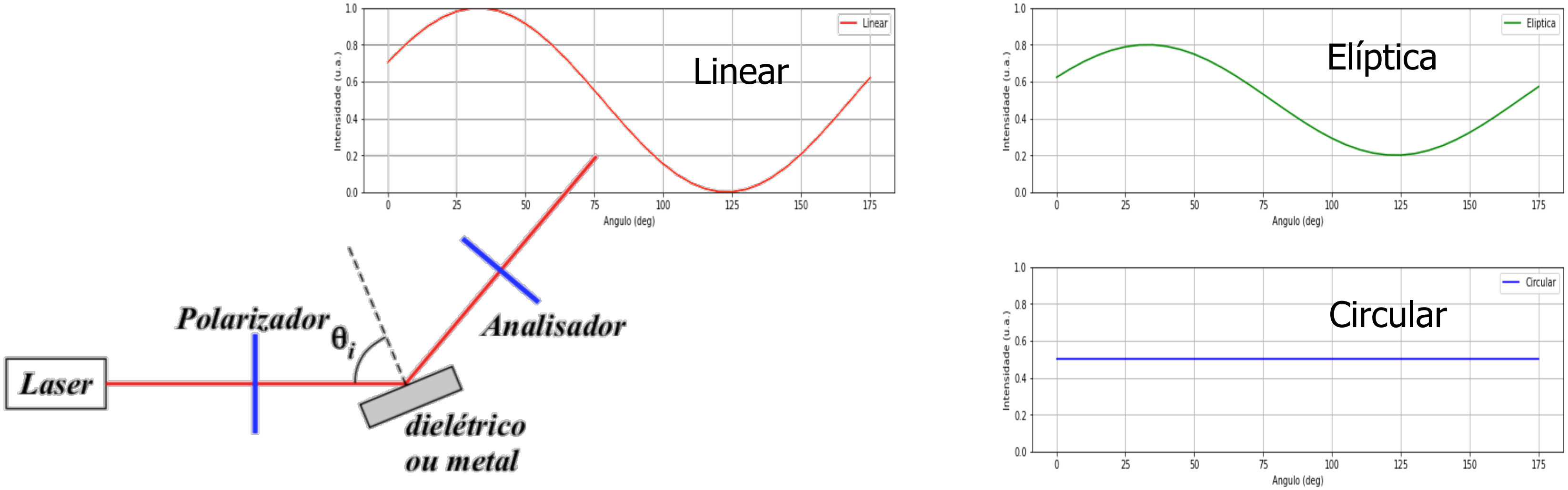
Se medirmos a refletância paralela e perpendicular (ao plano de incidência), em função do ângulo de incidência, vamos obter o gráfico ao lado.

- Poderíamos medir ***n*** medindo a curva toda, e encontrando o ângulo de Brewster.
- Ou podemos usar poucos ângulos, mas várias polarizações (Elipsometria)



Elipsometria

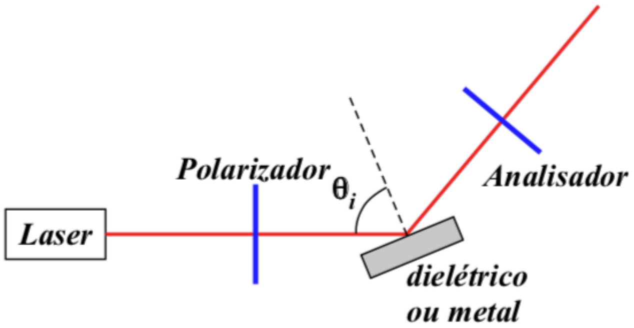
- Podemos analisar a polarização da luz refletida por um material para estudar as suas propriedades ópticas.
- Qual o estado de polarização da luz após a reflexão?



Elipsometria

- Vetor de Jones para a luz que chega no detector

$$\begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} -r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{bmatrix}$$



Intensidade medida

- Temos que multiplicar as matrizes:

$$\begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} -r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} -r_p\cos\alpha \\ r_s\sin\alpha \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -r_p\cos\alpha\cos^2\theta + r_s\sin\alpha\sin\theta\cos\theta \\ -r_p\cos\alpha\sin\theta\cos\theta + r_s\sin\alpha\sin^2\theta \end{bmatrix}$$

Intensidade medida

- A intensidade é o campo elétrico ao quadrado, portanto:

$$I \propto \left| -r_p \cos\alpha \cos^2\theta + r_s \sin\alpha \sin\theta \cos\theta \right|^2 + \left| -r_p \cos\alpha \sin\theta \cos\theta + r_s \sin\alpha \sin^2\theta \right|^2$$

Índice de refração

- Sabemos que:

$$n = \frac{c}{\upsilon} = \frac{c}{\lambda f} = \frac{kc}{2\pi f} = \frac{kc}{\omega}$$

- Um meio que atenua a luz tem ñ=Re(ñ) + i Im(ñ*)*, portanto número de onda imaginário:

$$\vec{E} = E_0 e^{i(\tilde{k}x - \omega t)} = E_0 e^{i([k + i\kappa]x - \omega t)} = E_0 e^{i(kx - \omega t)} e^{-\kappa x}$$

- Portanto, r_s e r_p também são (podem ser) imaginários

Intensidade medida

- A intensidade é o campo elétrico ao quadrado, portanto:

$$I \propto \left|-r_p \cos\alpha \cos^2\theta + r_s \sin\alpha \sin\theta \cos\theta\right|^2 + \left|-r_p \cos\alpha \sin\theta \cos\theta + r_s \sin\alpha \sin^2\theta\right|^2$$

- Como r_s e r_p podem ser imaginários:

$$= \left|r_p\right|^2 \cos^2\alpha \cos^2\theta - \frac{r_p r_s^* + r_s r_p^*}{4} \sin 2\alpha \sin 2\theta + \left|r_s\right|^2 \sin^2\alpha \sin^2\theta$$

Mudança de variável

- Para simplificar

$$r_p = |r_p| e^{i\varphi_p}$$

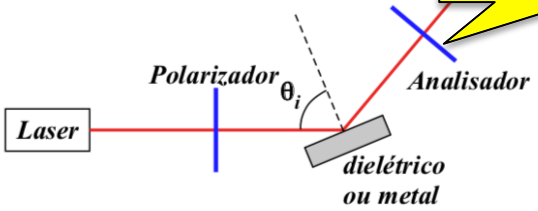
$$r_s = |r_s| e^{i\varphi_s}$$

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

- E podemos escrever que:

$$I = I_0(1 - \eta \sin(2\theta) + \xi \cos(2\theta))$$

θ é o ângulo do analisador



- Onde:

$$\eta = 2\frac{\tan\psi\cos\Delta\tan\alpha}{\tan^2\psi + \tan^2\alpha} \qquad \xi = \frac{\tan^2\psi - \tan^2\alpha}{\tan^2\psi + \tan^2\alpha}$$

Ajuste da intensidade

- Os dados de intensidade podem ser ajustados através da expressão

$$I = I_0(1 - \eta \sin(2\theta) + \xi \cos(2\theta))$$

- Determinando-se I_0, η, e ξ, conseguimos determinar

$$\tan\psi = \sqrt{\frac{1+\xi}{1-\xi}}\left|\tan\alpha\right| \qquad \cos\Delta = \frac{\eta}{\sqrt{1-\xi^2}}\frac{\alpha}{\left|\alpha\right|}$$

Propriedades ópticas

- Combinando:

$$\frac{r_p}{r_s} = \tan\psi e^{i\Delta} \qquad r_s = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \qquad r_p = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)}$$

- E a Lei de Snell: $n_i \sin(\theta_i) = n_t \sin(\theta_t)$

- Podemos obter o índice de refração do meio:

$$n_t^2 = n_i^2 \sin^2\theta_i \left[1 + \tan^2\theta_i \left\{ \frac{\cos(2\psi) - i\sin(2\psi)\sin\Delta}{1 + \sin(2\psi)\cos\Delta} \right\}^2 \right]$$

Dielétrico (Aula Passada)

$$n_t^2 = n_i^2 \sin^2\theta_i \left[1 + \tan^2\theta_i \left\{ \frac{\cos(2\psi) - i\sin(2\psi)\sin\Delta}{1+\sin(2\psi)\cos\Delta} \right\}^2 \right]$$

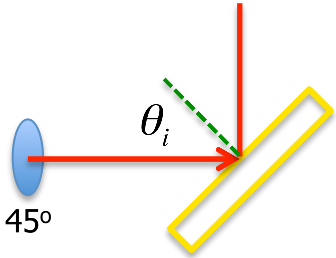
- n_t é real => $\sin(\Delta)=0$
- $\Delta=\pi$ se $\theta_i<\theta_B$
- $\Delta=0$ se $\theta_i>\theta_B$

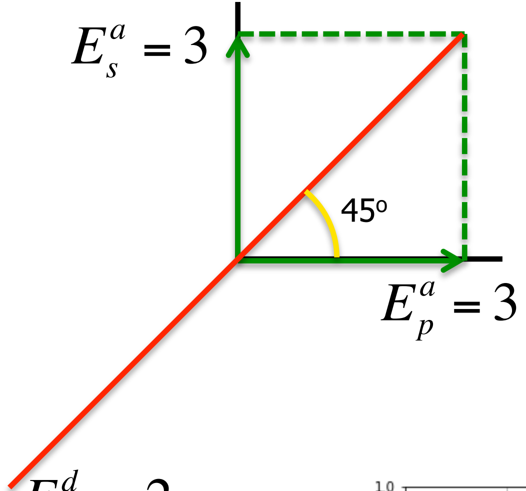
$$n_t^2 = n_i^2 \sin^2\theta_i \left[1 + \tan^2\theta_i \left\{ \frac{\cos(2\psi)}{1+\sin(2\psi)\cos\Delta} \right\}^2 \right]$$

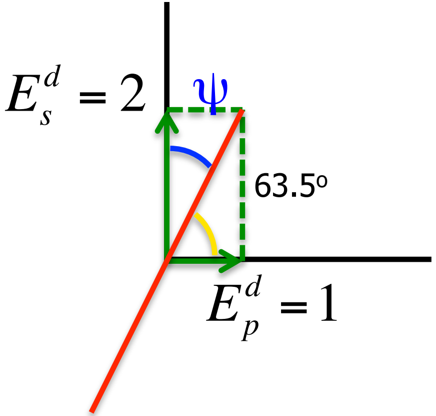
Atividades (Aula Passada)

- Foram medidas as intensidades de reflexão através do polarizador analisador para três ângulos de incidência
  - θi =35, 50 e 70 graus
- Ajuste as curvas medidas e determine os valores de η e ε para cada ângulo de incidência
- Utilize esses valores na planilha “CALCULO DE n DIELETRICO EXP” e determine o índice de refração do dielétrico
- Qual o tipo de polarização da onda refletida? Qual a mudança na polarização com a variação do ângulo de incidência?
- Avalie a compatibilidade dos índices obtidos e determine o seu valor
- Utilize o valor do índice de refração e determine o ângulo de Brewster do material

Exemplo (Aula Passada)

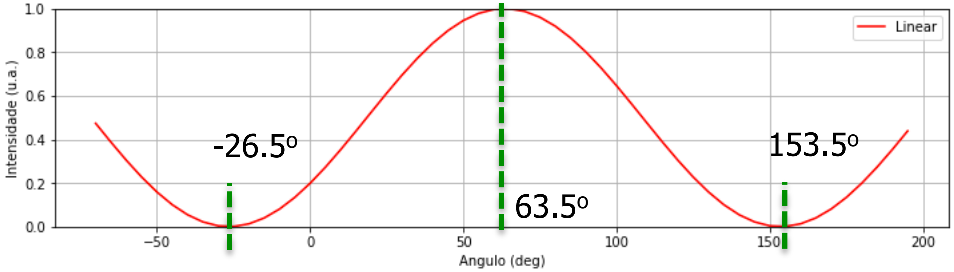




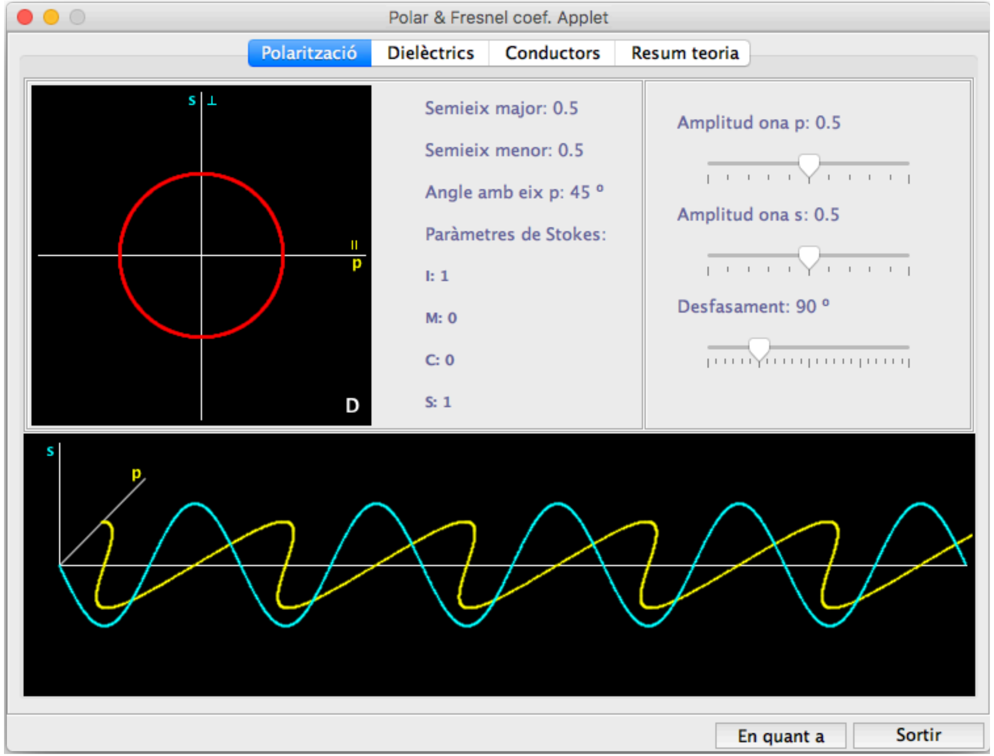


$$r_p = \frac{E_p^d}{E_p^a} = \frac{1}{3} \qquad r_s = \frac{E_s^d}{E_s^a} = \frac{2}{3}$$

$$\tan\psi = \frac{r_p}{r_s} = \frac{1}{2} \Rightarrow \psi = 26.5^o$$



Applet
Dielétrico

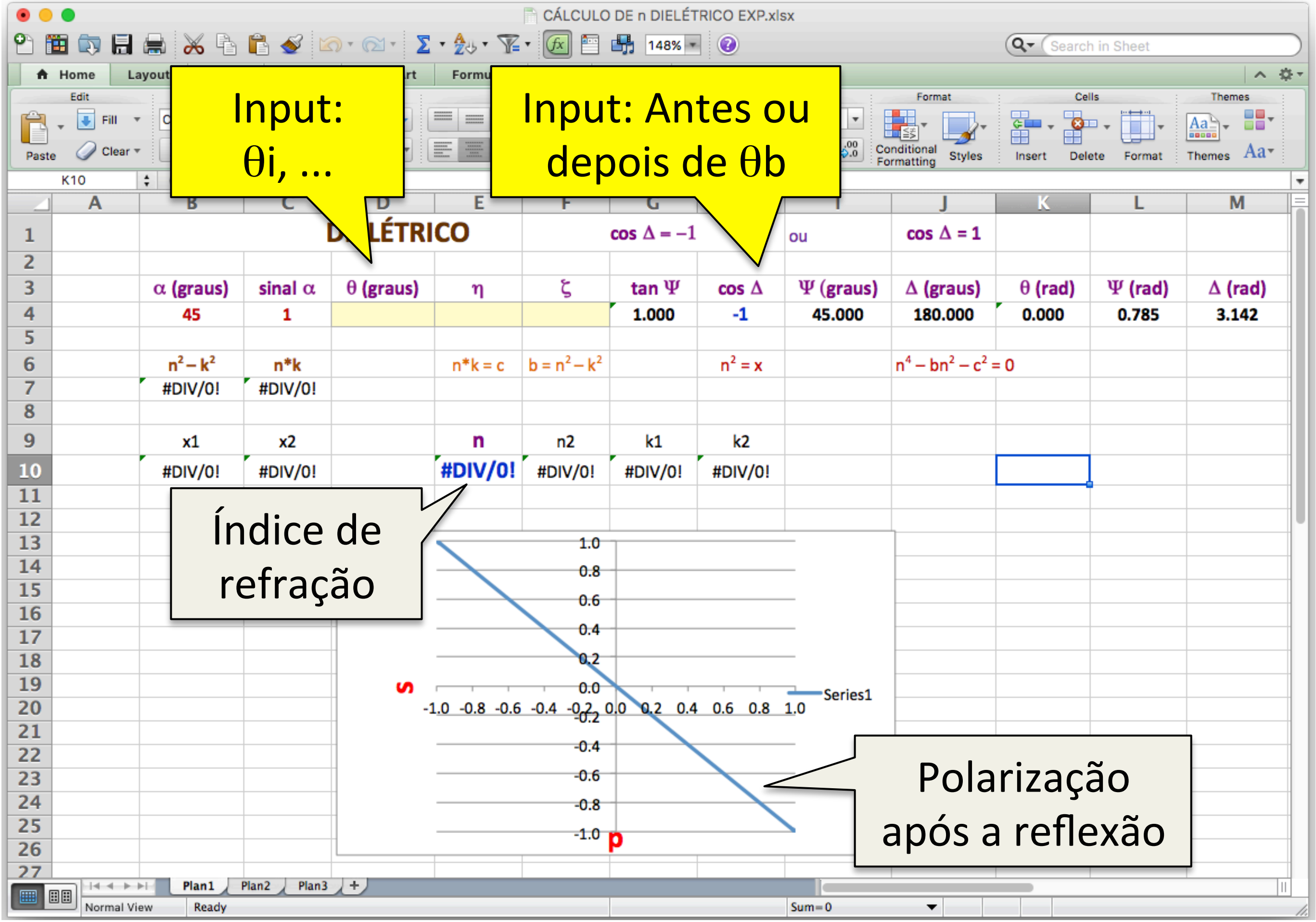


Lembrar de comparar o experimental com o simulado.

No Mac: http://www.ub.edu/javaoptics/applets/polar.jar (Catalão)

No Windows (ok): http://www.ub.edu/javaoptics/applets/polarEn.jnlp (Inglês)

Planilha



Então vocês terão 3 valores de **n** para discutir e achar o ângulo de Brewster.

Como estimar a incerteza em cada n?

Qual seria o efeito do ângulo inicial não ser 45°?

Metal (Aula de Hoje)

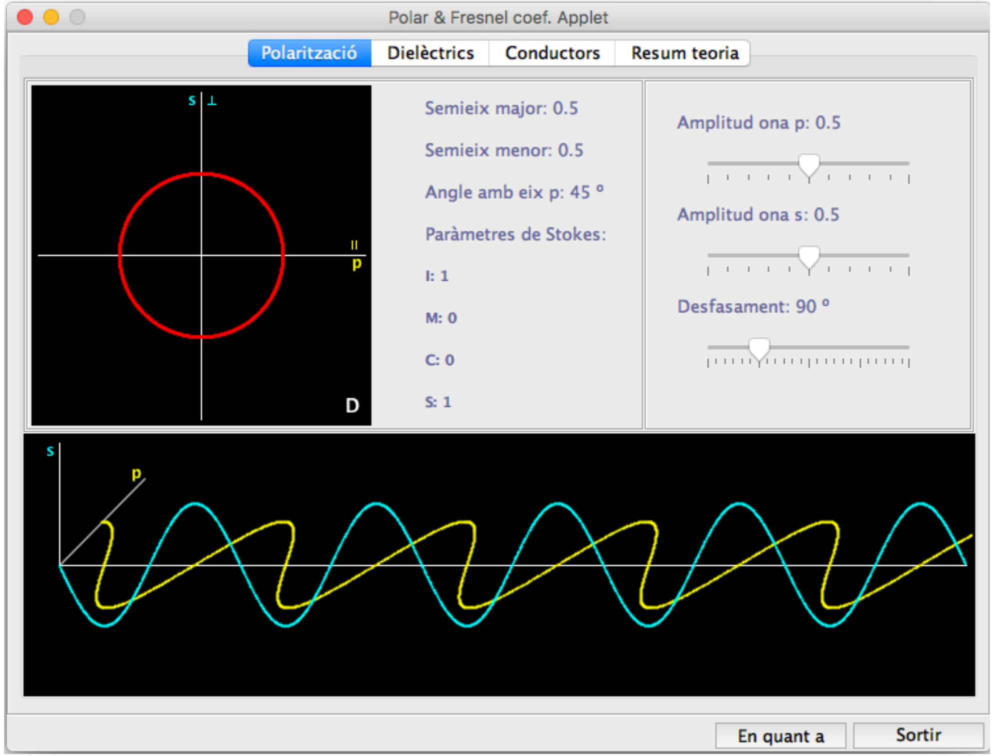
$$n_t^2 = n_i^2 \sin^2\theta_i \left[1 + \tan^2\theta_i \left\{ \frac{\cos(2\psi) - i\sin(2\psi)\sin\Delta}{1+\sin(2\psi)\cos\Delta} \right\}^2 \right]$$

- ñ$_t$ = n - iκ, é imaginário, assim: $\tilde{n}_t^2 = n^2 - i2n\kappa - \kappa^2$

$$n^2 - \kappa^2 = n_i^2 \sin^2\theta_i \left[1 + \tan^2\theta_i \frac{\cos^2(2\psi) - \sin^2(2\psi)\sin^2\Delta}{\left(1+\sin(2\psi)\cos\Delta\right)^2} \right]$$

$$n\kappa = n_i^2 \sin^2\theta_i \tan^2\theta_i \frac{\cos(2\psi)\sin(2\psi)\sin\Delta}{\left(1+\sin(2\psi)\cos\Delta\right)^2}$$

Applet
Condutor



Lembrar de comparar o experimental com o simulado.

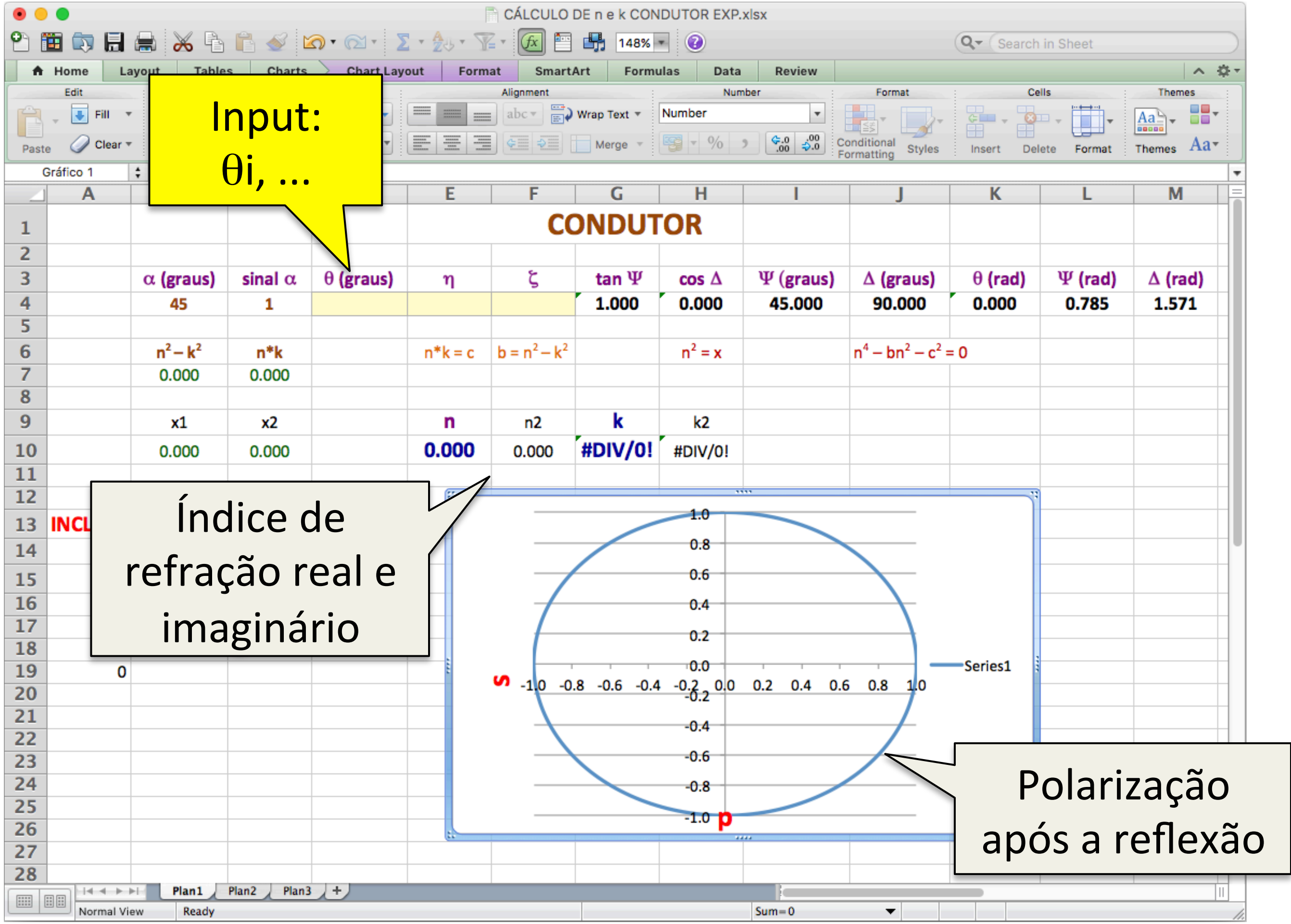
No Mac: http://www.ub.edu/javaoptics/applets/polar.jar (Catalão)

No Windows (ok): http://www.ub.edu/javaoptics/applets/polarEn.jnlp (Inglês)

Planilha

Como é a polarização após a reflexão?

Dá para saber apenas olhando para a curva de Malus?

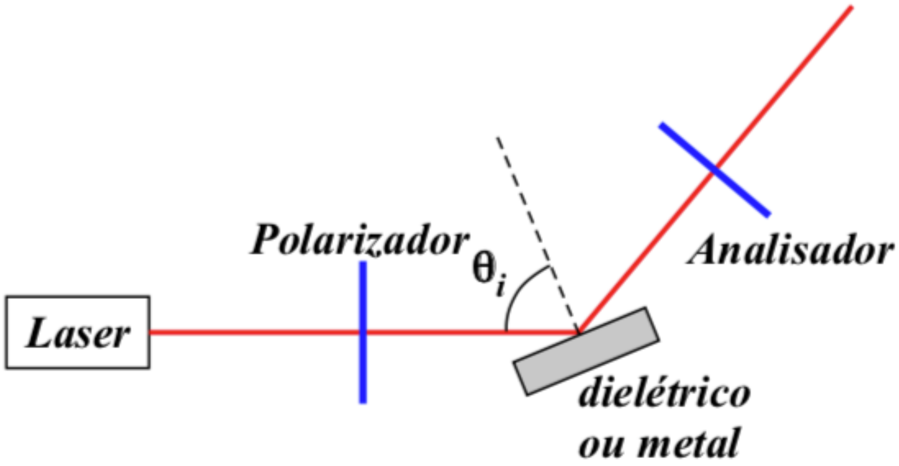


Objetivo da atividade

- Estudar como a luz pode ser polarizada por reflexão na superfície de um metal

- Determinar o índice de refração real (n) e o imaginário (coeficiente de extinção, κ) do metal.

Arranjo experimental



- O polarizador na frente do laser foi colocado em 45º

Atividades

- Foram medidas as intensidades de reflexão através do polarizador analisador para três ângulos de incidência
  - θi =47, 67 e 76 graus
- Ajuste as curvas medidas e determine os valores de η e ε para cada ângulo de incidência
- Utilize esses valores na planilha "CALCULO DE n e k CONDUTOR EXP" e determine o índice de refração e o coeficiente de extinção do metal
- Qual o tipo de polarização da onda refletida? Qual a mudança na polarização com a variação do ângulo de incidência?
- Avalie a compatibilidade dos índices obtidos e determine esses valores