

# Física Experimental IV

Segundo semestre de 2020

## Experimento III - Atividade 3

Página da disciplina:

<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=82701>

2020

# Experimento III - Estudos de polarização



## 1 Experimento

- Experimento III
- Polarização da luz
- Polarização
- Elipsometria
- Atividade 3

## 1 Experimento

- Experimento III
- Polarização da luz
- Polarização
- Elipsometria
- Atividade 3

## 1 Experimento

- Experimento III
- Polarização da luz
- Polarização
- Elipsometria
- Atividade 3

# Objetivos do experimento

- Polarização linear, circular, elíptica
- A reflexão e a polarização: reflexão na interface com dielétricos e com superfícies metálicas
- Dielétricos que mudam o estado de polarização: as placas  $\frac{1}{2}$  onda e  $\frac{1}{4}$  de onda

- 4 atividades

- ▶ Atividade 1

- ★ Fenômenos de polarização da luz - Lei de Malus

- ▶ Atividade 2

- ★ Determinação de estados de polarização após reflexão por um dielétrico em diferentes ângulos

- ▶ Atividade 3

- ★ Determinação de estados de polarização após reflexão pelo espelho em diferentes ângulos

- ▶ Atividade 4

- ★ Alteração da polarização da luz utilizando uma placa de onda

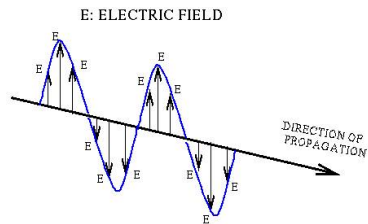
## 1 Experimento

- Experimento III
- Polarização da luz
- Polarização
- Elipsometria
- Atividade 3



- Efeito característico de ondas transversais
- No caso da luz, a direção de polarização é aquela do campo elétrico
- Tipos de polarização:
  - ▶ Linear
  - ▶ Circular ou elíptica
  - ▶ Não polarizada

- A direção do campo elétrico não se altera com o tempo, somente a sua intensidade



- No caso de uma onda de frequência bem definida, podemos escrever o campo elétrico como:

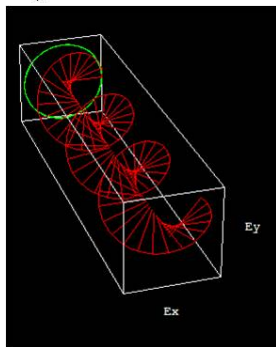
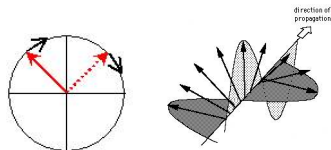
$$\vec{E}(z, t) = E_0 \cos(kz - \omega t) \hat{j}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\omega = 2\pi f$$

# Polarização circular

- A direção do campo elétrico depende do tempo mas sua intensidade é constante



- No caso da polarização circular, podemos escrever o campo elétrico como a superposição de dois campos linearmente polarizados, defasados de  $90^\circ$ , ou seja:

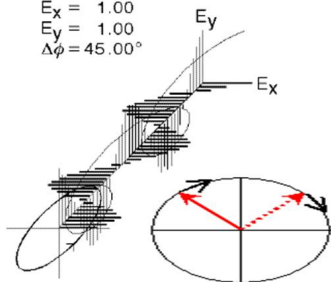
$$\vec{E}(z, t) = E_0 \begin{bmatrix} \text{sen}(kz - \omega t)\hat{i} \\ + \\ \text{cos}(kz - \omega t)\hat{j} \end{bmatrix}$$

# Polarização elíptica

- A direção do campo elétrico depende do tempo, bem como a sua intensidade

## Right-hand Elliptical Polarization

$$\begin{aligned}E_x &= 1.00 \\E_y &= 1.00 \\ \Delta\phi &= 45.00^\circ\end{aligned}$$



- No caso da polarização elíptica, podemos escrever o campo elétrico como a superposição de dois campos linearmente polarizados, defasados de  $90^\circ$ , ou seja:

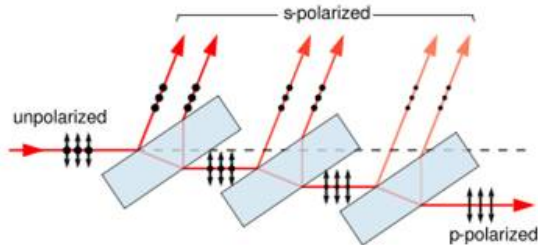
$$\vec{E}(z, t) = \begin{bmatrix} E_0^i \sin(kz - \omega t)\hat{i} \\ + \\ E_0^j \cos(kz - \omega t)\hat{j} \end{bmatrix}$$

## 1 Experimento

- Experimento III
- Polarização da luz
- **Polarização**
- Elipsometria
- Atividade 3

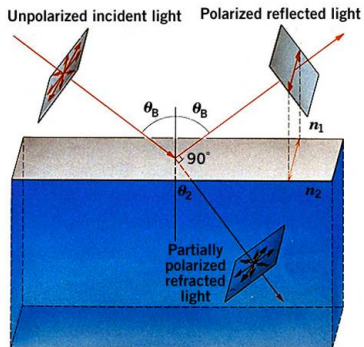
# Polarizador por reflexão

- Ao incidir sobre uma superfície refratora/refletora, dependendo do ângulo de incidência, a luz refletida e refratada são polarizadas



# Polarização por reflexão

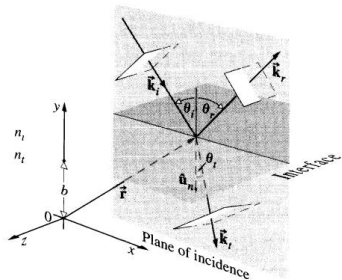
- Onda não polarizada incidente em uma superfície
- As ondas refletida e refratada possuem diferentes graus de polarização, dependendo das condições de contorno
  - ▶ Ângulo de incidência
  - ▶ Índices de refração



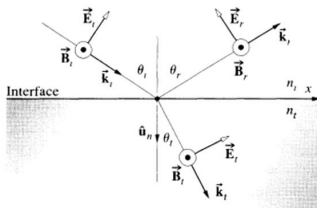
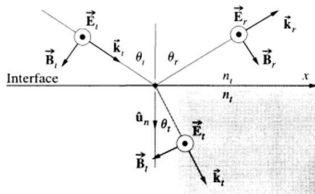
Copyright John Wiley & Sons

# Motivação teórica: ver Hecht - seção 4.6

- Uma onda não polarizada pode ser decomposta em duas componentes:



Campo transversal ao plano

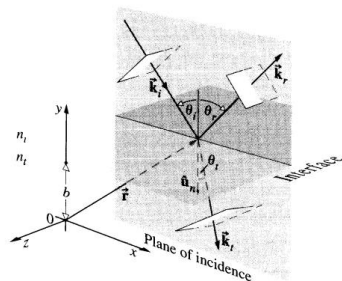


Campo paralelo ao plano



## Motivação teórica: ver Hecht - seção 4.6

- Mostramos que para uma luz incidente com polarização genérica, temos:



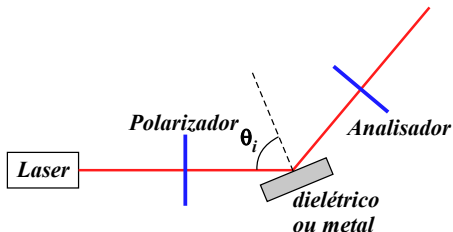
$$r_s = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$

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

## 1 Experimento

- Experimento III
- Polarização da luz
- Polarização
- **Elipsometria**
- Atividade 3

- Podemos analisar a polarização da luz refletida por um material para estudar as suas propriedades ópticas



- Vetor de Jones para a luz que chega no detector

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

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

$$I \propto |-r_p \cos \alpha \cos^2 \theta + r_s \sin \alpha \sin \theta \cos \theta|^2 + |-r_p \cos \alpha \sin \theta \cos \theta + r_s \sin \alpha \sin^2 \theta|^2 = \\ = |r_p|^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \theta + |r_s|^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \theta - \frac{(r_p r_s^* + r_s r_p^*)}{4} \sin 2\alpha \sin 2\theta$$

$$I = |r_p|^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \theta + |r_s|^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \theta - \frac{(r_p r_s^* + r_s r_p^*)}{4} \sin 2\alpha \sin 2\theta$$

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

- Fazendo essa substituição podemos escrever

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

- onde

$$\eta \equiv 2 \frac{\tan \Psi \cos \Delta \tan \alpha}{\tan^2 \Psi + \tan^2 \alpha} \quad e \quad \xi = \frac{\tan^2 \Psi - \tan^2 \alpha}{\tan^2 \Psi + \tan^2 \alpha}$$

- Os dados de intensidade podem ser ajustados através da expressão

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

- Determinando-se os valores de  $I_0$ ,  $\eta$  e  $\xi$  podemos determinar

$$\tan \Psi = \sqrt{\frac{1 + \xi}{1 - \xi}} |\tan \alpha| \quad e \quad \cos \Delta = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \xi^2}} \text{sinal}(\alpha)$$

- e com isso podemos obter

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

- Obtendo  $\Psi$  e  $\Delta$  e usando

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

$$r_p = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \quad \text{e} \quad r_s = -\frac{\text{sen}(\theta_i - \theta_t)}{\text{sen}(\theta_i + \theta_t)}$$

- e a Lei de Snell

$$n_i \text{sen } \theta_i = n_t \text{sen } \theta_t$$

- podemos obter o índice de refração do meio

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

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

- $n_t = n - ik$  onde  $n$  é o índice de refração e  $k$  o coeficiente de extinção
- assim  $n_t^2 = n^2 - i2nk - k^2$  e

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

$$nk = \frac{n_i^2 \sin^2 \theta_i \tan^2 \theta_i \sin 2\Psi \cos 2\Psi \sin \Delta}{(1 + \sin 2\Psi \cos \Delta)^2}$$



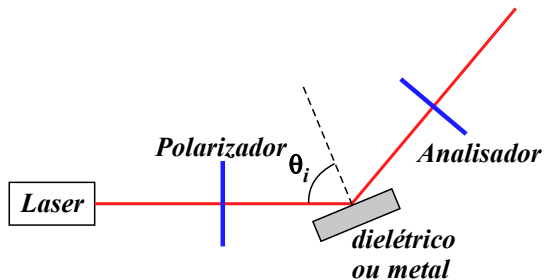
## 1 Experimento

- Experimento III
- Polarização da luz
- Polarização
- Elipsometria
- Atividade 3

# Objetivo da atividade

- Estudar como a luz pode ser polarizada por reflexão na superfície de um metal
- Determinar o índice de refração e o coeficiente de extinção do metal

# Arranjo experimental



- O polarizador na frente do laser foi colocado em  $\alpha = 45^\circ$

# Atividades para polarização por reflexão

- Foram medidas as intensidades de reflexão através do polarizador analisador para três ângulos de incidência
  - ▶  $\theta_i = 47, 67$  e  $76$  graus
- Ajuste as curvas medidas e determine os valores de  $\eta$  e  $\xi$  para cada ângulo de incidência
- Utilize esses valores na planilha “CÁLCULO 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 valores obtidos e determine esses valores