

Física Experimental IV

Segundo semestre de 2020

Experimento III - Atividade 4

Página da disciplina:

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

2020

Experimento III - Estudos de polarização



- 1 Experimento
 - Experimento III
 - Birrefringência e Placas de Onda
 - Análise da polarização após a passagem por uma placa de onda
 - Atividade 4

- 1 Experimento
 - Experimento III
 - Birrefringência e Placas de Onda
 - Análise da polarização após a passagem por uma placa de onda
 - Atividade 4

1 Experimento

- Experimento III
 - Birrefringência e Placas de Onda
 - Análise da polarização após a passagem por uma placa de onda
 - Atividade 4

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

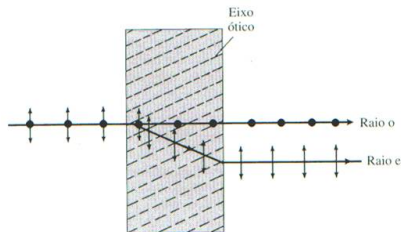
- ▶ Atividade 4

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

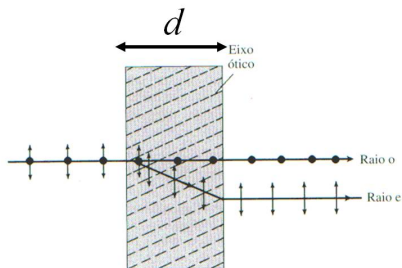
1 Experimento

- Experimento III
- Birrefringência e Placas de Onda
- Análise da polarização após a passagem por uma placa de onda
- Atividade 4

- Alguns materiais, principalmente cristais, possuem índices de refração que dependem da polarização da luz
- Assim, uma luz tem o seu feixe dividido em dois, um para cada componente de polarização
 - ▶ *o* - raio ordinário
 - ▶ *e* - raio extraordinário



- São placas confeccionadas a partir de materiais birrefringentes cujo objetivo é alterar as fases entre as componentes o e e da luz incidente
- Seja uma placa de espessura d . Qual é a diferença de fase entre as duas componentes após sair da placa?



Placas de onda

- Índice de refração para cada componente

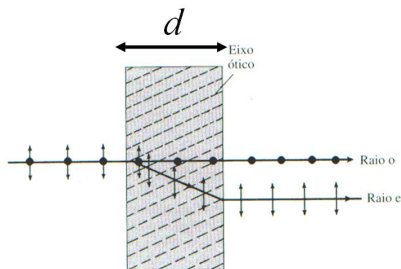
$$n_o = \frac{c}{v_o} \quad n_e = \frac{c}{v_e}$$

- Tempo que cada componente leva para atravessar a placa

$$t_o = \frac{d}{v_o} = d \frac{n_o}{c} \quad t_e = d \frac{n_e}{c}$$

- Diferença de tempo entre as duas ondas

$$\Delta t = t_o - t_e = \frac{d}{c}(n_o - n_e)$$



Placas de onda

- Diferença de tempo entre as duas ondas

$$\Delta t = t_o - t_e = \frac{d}{c}(n_o - n_e)$$

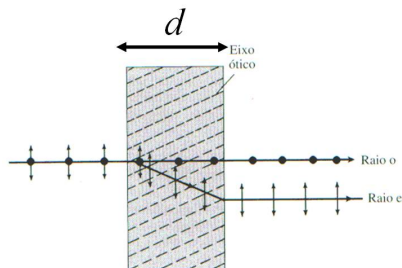
- Diferença de fase

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{\Delta t}{T}, \quad T = \frac{\lambda}{c}$$

- ▶ λ - comprimento de onda da luz incidente

- Substituindo

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{d}{\lambda}(n_o - n_e)$$



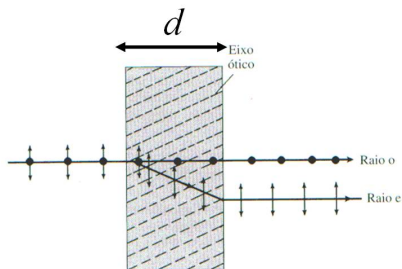
Placas de $\frac{1}{2}$ onda

- A placa de $\frac{1}{2}$ onda é aquela na qual a diferença de fase obtida entre as duas componentes é $\frac{1}{2}$ do período, ou seja, π

$$\Delta\phi = (2m + 1)\pi$$

- Isto somente ocorre quando a espessura da placa está bem relacionada com o comprimento de onda, de tal forma que

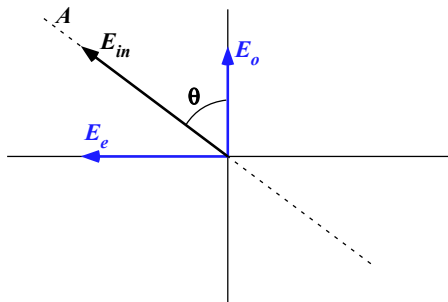
$$d = \frac{(2m + 1)}{2(n_o - n_e)}\lambda$$



- Componentes do campo elétrico na entrada da placa
 - O campo elétrico está sempre oscilando ao longo da linha A
 - O campo elétrico pode, em qualquer instante de tempo, ser escrito como

$$\vec{E}_{in} = E_o \cos(kx - \omega t) \hat{o} + E_e \cos(kx - \omega t) \hat{e}$$

- A placa de $\frac{1}{2}$ onda introduz uma fase de π na componente e



Placas de $\frac{1}{2}$ onda

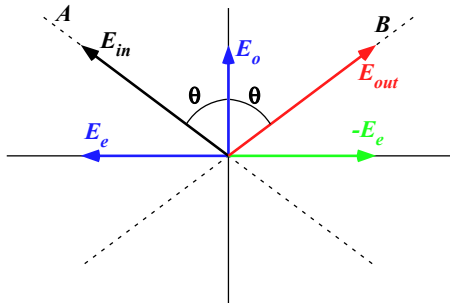
- O Campo elétrico na saída da placa será

$$\vec{E}_{out} = E_o \cos(kx - \omega t) \hat{o} + E_e \cos(kx - \omega t + \pi) \hat{e}$$

- Ou seja

$$\vec{E}_{out} = E_o \cos(kx - \omega t) \hat{o} - E_e \cos(kx - \omega t) \hat{e}$$

- Na saída a componente e está defasada de meia onda relativamente à componente o
 - ▶ O campo elétrico vai oscilar ao longo da reta B
 - ▶ Ou seja, a placa de $\frac{1}{2}$ onda gira o campo elétrico de 2θ



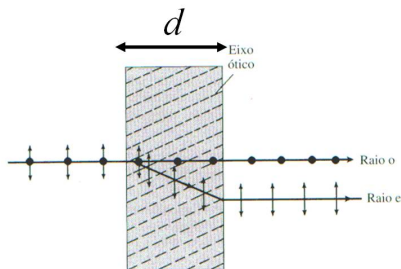
Placas de $\frac{1}{4}$ de onda

- A placa de $\frac{1}{4}$ de onda é aquela na qual a diferença de fase obtida entre as duas componentes é $\frac{1}{4}$ do período, ou seja, $\frac{\pi}{2}$

$$\Delta\phi = (4m + 1)\frac{\pi}{2}$$

- Isto somente ocorre quando a espessura da placa está bem relacionada com o comprimento de onda, de tal forma que

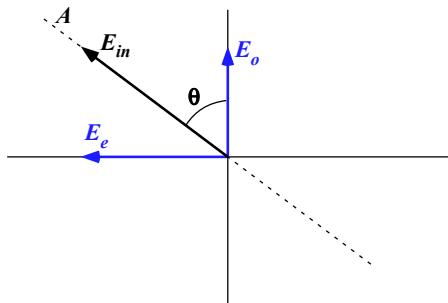
$$d = \frac{(4m + 1)}{4(n_o - n_e)}\lambda$$



- Componentes do campo elétrico na entrada da placa
 - ▶ O campo elétrico está sempre oscilando ao longo da linha A
 - ▶ O campo elétrico pode, em qualquer instante de tempo, ser escrito como

$$\vec{E}_{in} = E_o \cos(kx - \omega t) \hat{o} + E_e \cos(kx - \omega t) \hat{e}$$

- A placa de $\frac{1}{4}$ de onda introduz uma fase de $\frac{\pi}{2}$ na componente e



Placas de $\frac{1}{4}$ de onda

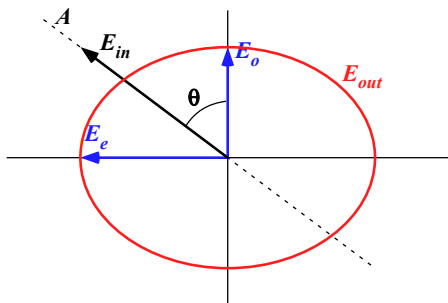
- Assim, o campo elétrico na saída da placa é

$$\vec{E}_{out} = E_o \cos(kx - \omega t) \hat{o} + E_e \cos(kx - \omega t + \frac{\pi}{2}) \hat{e}$$

- Ou seja

$$\vec{E}_{out} = E_o \cos(kx - \omega t) \hat{o} - E_e \sin(kx - \omega t) \hat{e}$$

- A onda que era inicialmente linearmente polarizada torna-se elipticamente polarizada



As matrizes de Jones para as placas de $\frac{1}{2}$ e de $\frac{1}{4}$ de onda

- Uma placa de $\frac{1}{2}$ de onda introduz um espelhamento do vetor campo elétrico com referência ao eixo ordinário da placa. Se o eixo ordinário é alinhado com o eixo x , o efeito da placa de $\frac{1}{2}$ de onda é inverter a componente y .

$$\mathbf{WP} \left(\frac{\lambda}{2} \right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

- Uma placa de $\frac{1}{4}$ de onda introduz um atraso de 90° na fase da componente do vetor campo elétrico alinhada com o eixo 'lento' da placa. Se o eixo 'rápido' é alinhado com o eixo x , o efeito da placa de $\frac{1}{4}$ de onda é descrito por:

$$\mathbf{WP} \left(\frac{\lambda}{4} \right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix}$$

É se a placa não é nem de $\frac{1}{2}$ nem de $\frac{1}{4}$ de onda?

- Uma placa de $\frac{1}{2}$ onda introduz um atraso de fase de π na componente ao longo do eixo extraordinário.

$$\mathbf{WP}\left(\frac{\lambda}{2}\right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\pi} \end{pmatrix}$$

- Uma placa de $\frac{1}{4}$ de onda introduz um atraso de fase de $\frac{\pi}{2}$ na componente ao longo do eixo extraordinário.

$$\mathbf{WP}\left(\frac{\lambda}{4}\right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\pi}{2}} \end{pmatrix}$$

- Em geral uma placa birrefringente vai atrasar de uma quantidade Γ a componente extraordinária

$$\mathbf{WP}(\Gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\Gamma} \end{pmatrix}$$

Matriz de Jones para uma placa birrefringente rotacionada

- Para uma placa birrefringente, com o eixo ordinário rotacionado de um ângulo α com relação ao eixo x do sistema, devemos aplicar uma rotação

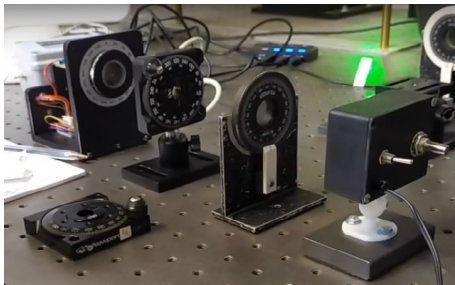
$$\mathbf{WP}(\Gamma, \alpha) = \mathbf{R}(\alpha)\mathbf{WP}(\Gamma, 0^\circ)\mathbf{R}(-\alpha)$$

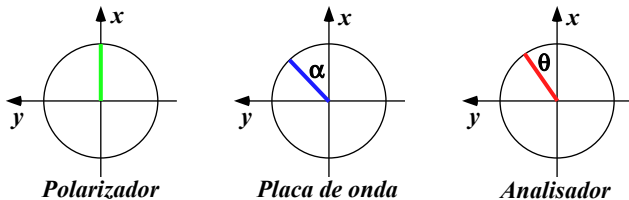
$$\mathbf{WP}(\Gamma, \alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\Gamma} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{WP}(\Gamma, \alpha) = \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha e^{-i\Gamma} & \sin \alpha \cos \alpha - \sin \alpha \cos \alpha e^{-i\Gamma} \\ \sin \alpha \cos \alpha - \sin \alpha \cos \alpha e^{-i\Gamma} & \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha e^{-i\Gamma} \end{pmatrix}$$

- 1 Experimento
 - Experimento III
 - Birrefringência e Placas de Onda
 - Análise da polarização após a passagem por uma placa de onda
 - Atividade 4

- O sistema consiste de um laser, o primeiro polarizador que define o ângulo de polarização linear da luz incidente, a placa de onda e o polarizador de análise





- Considerando a configuração de medida, a matriz que descreve o sistema será dada por:

$$\begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \text{sen } \theta \cos \theta \\ \text{sen } \theta \cos \theta & \text{sen}^2 \theta \end{pmatrix} \mathbf{WP}(\Gamma, \alpha) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \text{sen } \theta \cos \theta \\ \text{sen } \theta \cos \theta & \text{sen}^2 \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha + \text{sen}^2 \alpha e^{-i\Gamma} & \text{sen } \alpha \cos \alpha - \text{sen } \alpha \cos \alpha e^{-i\Gamma} \\ \text{sen } \alpha \cos \alpha - \text{sen } \alpha \cos \alpha e^{-i\Gamma} & \text{sen}^2 \alpha + \cos^2 \alpha e^{-i\Gamma} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

- Calculando a intensidade obtemos (ver “Artigo sobre birrefringência e placas de onda” no site):

$$I = \frac{1}{2} I_0 \left[1 + (\cos^2 2\alpha + \cos \Gamma \text{sen}^2 2\alpha) \cos 2\theta + \text{sen}^2 \left(\frac{\Gamma}{2} \right) \text{sen } 4\alpha \text{sen } 2\theta \right]$$

1 Experimento

- Experimento III
- Birrefringência e Placas de Onda
- Análise da polarização após a passagem por uma placa de onda
- Atividade 4

Objetivos da semana

- Verificar se, com uma placa de $\frac{1}{2}$ onda conseguimos girar o eixo de polarização da onda incidente (que faz um ângulo α com o eixo óptico da placa) em 2α
- Verificar se, com uma placa de $\frac{1}{4}$ de onda, conseguimos transformar uma onda linearmente polarizada em elipticamente (circularmente) polarizada

Atividades - placa de $\frac{1}{2}$ onda

- O arranjo foi montado inicialmente com uma placa de $\frac{1}{2}$ onda.
- Foram realizadas sete medidas, com o eixo da placa de $\frac{1}{2}$ onda sendo colocado em diferentes ângulos α com relação ao eixo de polarização do polarizador inicial.
- Faça o ajuste de cada curva utilizando a expressão para a intensidade apresentada acima.
- Verifique, para essas medidas, se a polarização inicial foi girada de 2α
 - ▶ A placa é de fato de $\frac{1}{2}$ onda (Γ compatível com π)?
 - ▶ Qual o tipo de polarização observada?
- Discutir os resultados.

Atividades - placa de $\frac{1}{4}$ onda

- O arranjo experimental foi modificado trocando-se a placa de $\frac{1}{2}$ onda por uma placa de $\frac{1}{4}$ de onda.
- Foram realizada novamente sete medidas, com o eixo da placa de $\frac{1}{4}$ de onda sendo colocado em diferentes ângulos α com relação ao eixo de polarização do polarizador inicial.
- Faça o ajuste de cada curva utilizando a expressão para a intensidade apresentada acima.
 - ▶ A placa é de fato de $\frac{1}{4}$ de onda (Γ compatível com $\frac{\pi}{2}$)?
 - ▶ Qual o tipo de polarização observada?
- Discutir os resultados.