Física Experimental IV

Segundo semestre de 2019

Aula 5 - Experimento III - semana 1

Página da disciplina:
https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=70354

22 de outubro de 2019


Não Polarizada
Polarizada

Sumário

1. Experimento
   - Experimento III
   - Polarização
   - Ferramenta de cálculo: as matrizes de Jones
   - Birrefringência e Placas de Onda
   - O isolador ótico do experimento

Sumário

1 Experimento
- Experimento III
- Polarização
- Ferramenta de cálculo: as matrizes de Jones
- Birrefringência e Placas de Onda
- O isolador ótico do experimento

1. Experimento
   - Experimento III
   - Polarização
   - Ferramenta de cálculo: as matrizes de Jones
   - Birrefringência e Placas de Onda
   - O isolador ótico do experimento

Objetivos do experimento

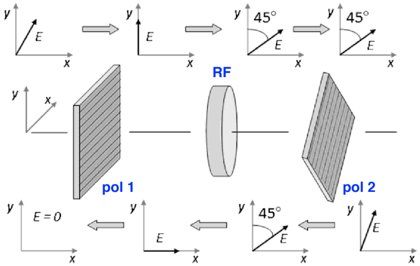
- Polarização linear, circular, elíptica
- A reflexão e a polarização: reflexão na interface com dielétricos e com superfícies metálicas
- Dielétricos que mudam o estado de polarização: as placas $\frac{1}{2}$ onda e $\frac{1}{4}$ de onda
- Construir um isolador ótico e caracterizá-lo

O que é um isolador ótico?

- É um problema comum em ótica impedir que a luz “volte” para a fonte.
  - A maioria dos lasers sofre interferência (no mínimo a amplitude flutua) se luz coerente, exatamente com a frequência dele, re-entra na cavidade
- Para evitar isso é usado um dispositivo chamado isolador ótico, que, usando as propriedades da polarização, absorve ou desvia a luz refletida que está se propagando no sentido contrário.

O que é um isolador ótico?

- O principio básico de um isolador ótico é o seguinte
  - O feixe incidente é polarizado linearmente (por exemplo no sentido 'y') pelo polarizador **pol 1**
  - Cruza um elemento ótico (**RF**) que muda a direção da polarização de 45°
  - Passa sem atenuação por um polarizador colocado a 45° (**pol 2**)
  - O feixe, propagando no sentido oposto, (por exemplo voltando depois de uma reflexão), adquire uma polarização de 45° no polarizador **pol 2**
  - Cruzando novamente o elemento **RF** ganha mais 45°
  - O feixe de retorno está agora polarizado no sentido 'x' e é suprimido no polarizador **pol 1**



Cronograma

- 6 semanas
- SuperGrupos de até 9 integrantes (Grupões)
- Os SuperGrupos não podem misturar turmas (professores)
- Atividades (mínimas, não necessariamente na ordem, a serem executadas ...)
  - Estudar como muda o estado de polarização depois de uma reflexão para:
    - interface entre dois dielétricos
    - superfície metálica (espelho)
  - Estudo e caracterização de laminas $\lambda/2$ e $\lambda/4$
  - Construção e análise de um isolador ótico

Avaliação - IMPORTANTE!

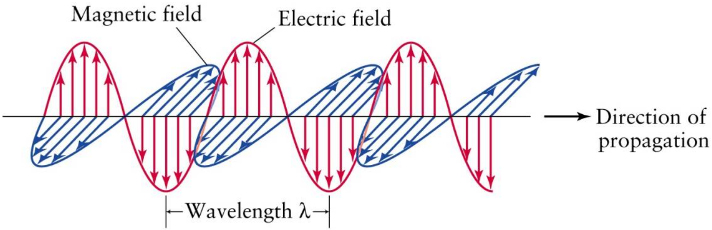
- Síntese da semana
  - Apresentação nas aulas das terças-feiras (limite de 20 minutos)
  - Fazer o upload da apresentação, em pdf, até:
    - Diurno: 18h00 da segunda-feira
    - Noturno: 08h00 da terça-feira
    - Upload no site de reservas como "síntese"
  - A apresentação deve estar no formato paisagem, razão 4:3 e na primeira página deve conter o nome dos grupos e seus membros
- Apresentação final do experimento (até 6 pontos): Dia 03/12

Sumário

1 Experimento
- Experimento III
- Polarização
- Ferramenta de cálculo: as matrizes de Jones
- Birrefringência e Placas de Onda
- O isolador ótico do experimento

Ondas transversais

- São aquelas nas quais as suas vibrações são perpendiculares à direção de propagação
- A luz é formada por campos elétrico e magnético transversais e variantes no tempo

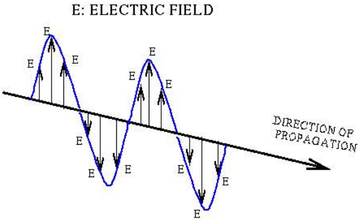


Polarização da luz

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

Polarização linear

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



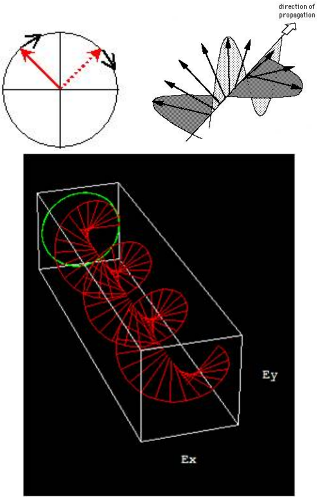
- No caso de uma onda de frequência bem definida, podemos escrever o campo elétrico como:

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

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

$$\omega = 2\pi f$$

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

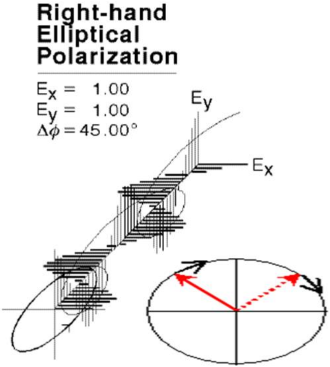


- No caso da polarização circular, podemos escrever o campo elétrico como a superposição de dois campos linearmente polarizados, defasados de 90°, ou seja:

$$\vec{E}(z,t) = E_0 \begin{bmatrix} \mathrm{sen}(kz - \omega t)\hat{\imath} \\ + \\ \cos(kz - \omega t)\hat{\jmath} \end{bmatrix}$$

Polarização elíptica

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



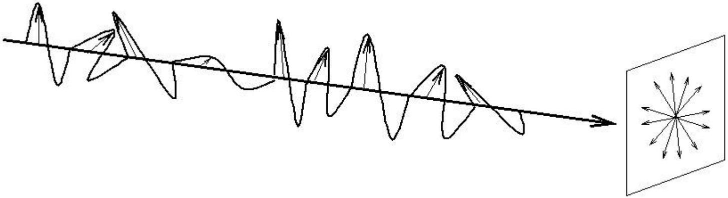
- No caso da polarização elíptica, podemos escrever o campo elétrico como a superposição de dois campos linearmente polarizados, defasados de 90°, mas com amplitudes diferentes, ou seja:

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

Luz não polarizada

- Tanto a intensidade como a direção do campo elétrico variam de forma incoerente no tempo
- Contudo, podemos sempre escrever que o campo elétrico possui componentes $\imath$ e $\jmath$

$$\vec{E}(z,t) = E(z,t)\left[\mathrm{sen}(\theta_{\text{aleatório}}(z,t))\hat{\imath} + \cos(\theta_{\text{aleatório}}(z,t))\hat{\jmath}\right]$$

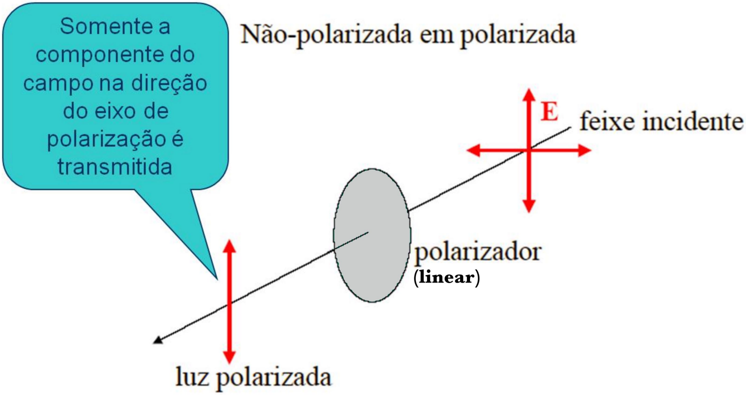


O polarizador

- Instrumento ótico capaz de polarizar a luz em uma dada direção pré-definida
- Todo polarizador é caracterizado por um eixo de polarização
  - Este eixo representa a direção da componente do campo elétrico que será transmitida

- Vários tipos de polarizador
  - **Absorção:** Absorve a componente dos campos EM em uma dada direção
  - **Birrefringentes:** O índice de refração pode depender da polarização da luz
  - **Reflexão:** A luz refletida, dependente do ângulo, favorece a polarização em uma direção

Efeito de um polarizador na luz



Luz linearmente polarizada ao atravessar um polarizador

- Campo elétrico com direção fixa

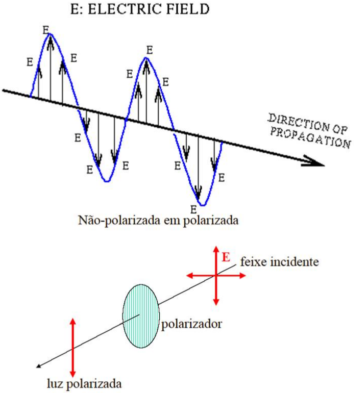
$$\vec{E} = E(z,t)\left[\mathrm{sen}(\theta)\hat{\imath} + \cos(\theta)\hat{\jmath}\right]$$

onde

$$E(z,t) = E_0 \cos(kz - \omega t + \delta)$$

- Agora a direção θ é fixa porque a luz está polarizada. Novamente, a intensidade luminosa é:

$$I_0 \propto E^2$$



- Se o polarizador tiver direção j somente o campo E_j é transmitido (Lei de Malus)

$$\vec{E}_{\text{depois}} = E(z,t)\cos(\theta)\hat{\jmath}$$

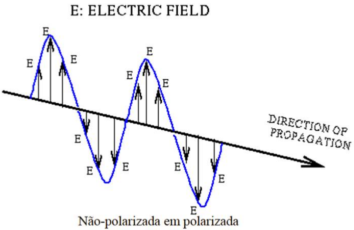
sempre tendo

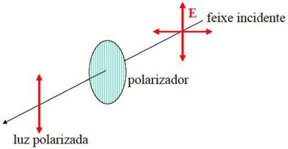
$$E(z,t) = E_0\cos(kz - \omega t + \delta)$$

- A intensidade transmitida é

$$I \propto E^2_{\text{depois}}$$

$$I = I_0\cos^2(\theta)$$





- Se a polarização é circular o campo é

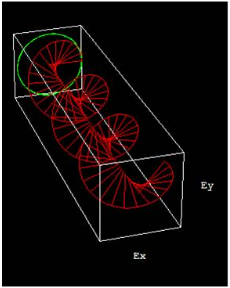
$$\vec{E}(z,t) = E_0 \begin{bmatrix} \mathrm{sen}(kz-\omega t)\hat{\imath} \\ + \\ \cos(kz-\omega t)\hat{\jmath} \end{bmatrix}$$

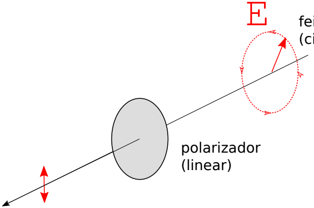
só a componente j é transmitida, assim

$$\vec{E}_{\text{depois}} = E_0 \cos(kz-\omega t)\hat{\jmath}$$

- A intensidade transmitida é

$$I \propto E^2_{\text{depois}} \Rightarrow I = \frac{1}{2} I_0$$





Sumário

1 Experimento
- Experimento III
- Polarização
- Ferramenta de cálculo: as matrizes de Jones
- Birrefringência e Placas de Onda
- O isolador ótico do experimento

Estado de polarização descrito por um vetor

- Onda linearmente polarizada

$$\vec{E}(z,t) = E_0 \cos(kz - \omega t)\left[\cos(\theta)\hat{\imath} + \mathrm{sen}(\theta)\hat{\jmath}\right]$$

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

Estado de polarização descrito por um vetor

- Onda circularmente polarizada

$$\vec{E}(z,t) = E_0\left[\cos(kz-\omega t)\hat{\imath} + \operatorname{sen}(kz-\omega t)\hat{\jmath}\right]$$

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

Estado de polarização descrito por um vetor

$$\begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \mathrm{sen}(\theta) \end{pmatrix} \quad \text{e} \quad \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -\mathrm{i} \end{pmatrix}$$

- São chamados vetores de Jones
- Como sempre, quando é usada a notação complexa, o campo 'físico' que é medido é só a parte real das expressões
- No caso da luz, só a intensidade é medida, a quantidade física (intensidade) é proporcional ao produto do campo pelo seu conjugado transposto.

Polarizador descrito por uma matriz: caso linear

- Se no polarizador (orientado horizontalmente ($\hat{\imath}$)) chega luz com direção de polarização θ, só a componente $\hat{\imath}$ sobrevive

$$\vec{E}_{\text{antes}} = E(z,t)\left[\cos(\theta)\hat{\imath} + \text{sen}(\theta)\hat{\jmath}\right] \Rightarrow \vec{E}_{\text{depois}} = E(z,t)\cos(\theta)\hat{\imath}$$

- Escrevendo a polarização com a notação dos vetores do Jones

$$\vec{E}_{\text{antes}} = E_0 \mathrm{e}^{i(kz-\omega t)} \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \text{sen}(\theta) \end{pmatrix} \Rightarrow \vec{E}_{\text{depois}} = E_0 \mathrm{e}^{i(kz-\omega t)} \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ 0 \end{pmatrix}$$

- Por praticidade, vamos a partir de agora omitir o termo $\mathrm{e}^{i(kz-\omega t)}$, mas é preciso lembrar que ele está sempre lá!

$$\vec{E}_{\text{antes}} = E_0 \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \text{sen}(\theta) \end{pmatrix} \Rightarrow \vec{E}_{\text{depois}} = E_0 \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Polarizador descrito por uma matriz: caso linear

Polarizador no sentido 'horizontal'

- Já calculamos que:

$$\vec{E}_{\text{antes}} = E_0 \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \text{sen}(\theta) \end{pmatrix} \Rightarrow \vec{E}_{\text{depois}} = E_0 \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ 0 \end{pmatrix}$$

- Queremos escrever algo como:

$$\vec{E}_{\text{depois}} = \mathbf{POL}\, \vec{E}_{\text{antes}}$$

- É fácil ver que a matriz precisa ser:

$$\mathbf{POL} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

- Como E_0 é uma constante:

$$\vec{E}_{\text{depois}} = E_0 \left(\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \text{sen}(\theta) \end{pmatrix} \right) = E_0 \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Polarizador descrito por uma matriz

- Construímos a matriz **POL** discutindo a polarização linear. Vamos verificar que ela está correta aplicando-a a um feixe incidente com polarização circular.

$$\vec{E}_{\text{depois}} = \mathbf{POL}\ \vec{E}_{\text{antes}}$$

$$\mathbf{POL} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{E}_{\text{depois}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{E_0}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -\mathrm{i} \end{pmatrix} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$I_0 \propto \frac{E_0^2}{2} \begin{pmatrix} 1 & +\mathrm{i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ -\mathrm{i} \end{pmatrix} = E_0^2$$

$$I \propto \frac{E_0^2}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{E_0^2}{2} \quad \Rightarrow \quad I = \frac{1}{2} I_0$$

Polarizador com orientação arbitraria θ

- Qual é a matriz que descreve um polarizador com orientação θ?
- É só aplicar uma rotação à matriz

$$\mathbf{POL}(\theta) = \mathbf{R}(\theta)\mathbf{POL}(0^\circ)\mathbf{R}(-\theta)$$

$$\mathbf{POL}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\mathrm{sen}(\theta) \\ \mathrm{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \mathrm{sen}(\theta) \\ -\mathrm{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{POL}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos^2(\theta) & \mathrm{sen}(\theta)\cos(\theta) \\ \mathrm{sen}(\theta)\cos(\theta) & \mathrm{sen}^2(\theta) \end{pmatrix}$$

- Cuidado: $\theta = 0$ na direção de $\hat{\imath}$

Polarizador com orientação arbitraria θ

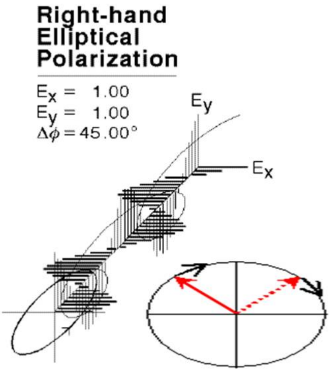
- O que acontece se a luz tem polarização horizontal e o polarizador está em um angulo θ?

$$\begin{pmatrix} \cos^2(\theta) & \mathrm{sen}(\theta)\cos(\theta) \\ \mathrm{sen}(\theta)\cos(\theta) & \mathrm{sen}^2(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2(\theta) \\ \mathrm{sen}(\theta)\cos(\theta) \end{pmatrix}$$

- Verificar que do resultado acima (elevado ao quadrado) é obtida a lei de Malus ($I = I_0 \cos^2(\theta)$); são necessárias algumas manipulações ...

Polarização elíptica

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



- No caso da polarização elíptica, podemos escrever o campo elétrico como a superposição de dois campos linearmente polarizados, defasados de 90°, mas com amplitudes diferentes, ou seja:

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

Polarização elíptica e formalismo de Jones

- A expressão para uma onda elíptica (com eixos da elipse alinhados com os eixos x e y) é

$$\vec{E}(z,t) = \left[\begin{array}{c} E_0^i \,\mathrm{sen}(kz - \omega t)\hat{\imath} \\ + \\ E_0^j \cos(kz - \omega t)\hat{\jmath} \end{array} \right]$$

- Pode ser descrita com o seguinte vetor de Jones (não normalizado)

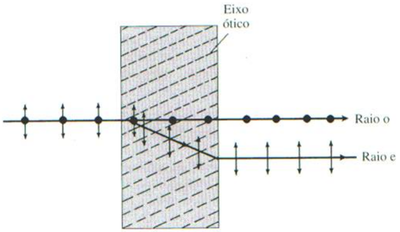
$$\left(\begin{array}{c} \mathrm{a} \\ -\mathrm{ib} \end{array} \right)$$

Sumário

1. Experimento
   - Experimento III
   - Polarização
   - Ferramenta de cálculo: as matrizes de Jones
   - Birrefringência e Placas de Onda
   - O isolador ótico do experimento

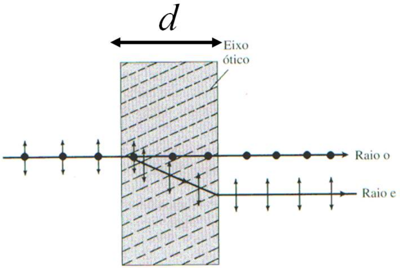
Birrefringência

- 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



Placas de onda

- 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

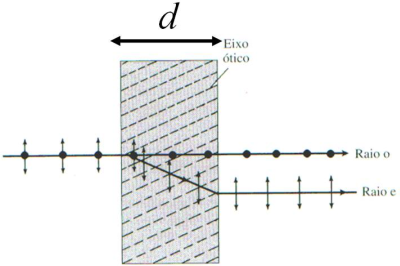
$$n_o = \frac{c}{v_o} \qquad n_e = \frac{c}{v_e}$$

- Tempo que cada componente leva para atravessar a placa

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

- 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

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

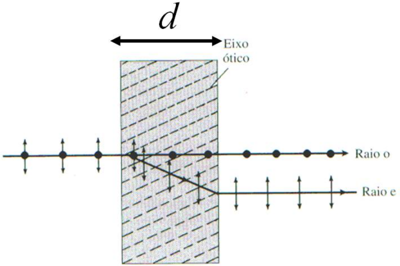
- Diferença de fase

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

  - λ - comprimento de onda da luz incidente

- Substituindo

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



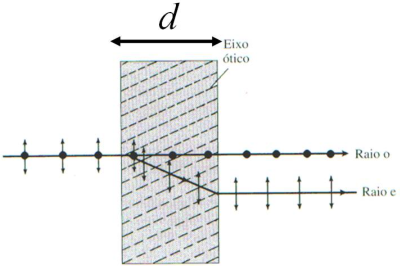
Placas de $\frac{1}{2}$ onda

- 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

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

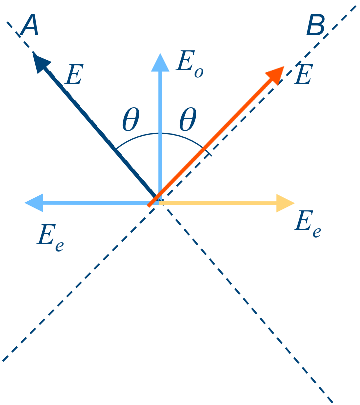


Placas de $\frac{1}{2}$ onda

- 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

$$\vec{E} = \quad E_o\cos(kz - \omega t)\hat{o} \\ +E_e\cos(kz - \omega t)\hat{e}$$

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



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

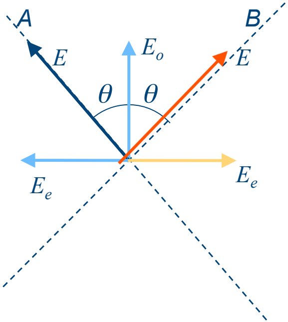
- O Campo elétrico na saída da placa será

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

- Ou seja

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

- 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



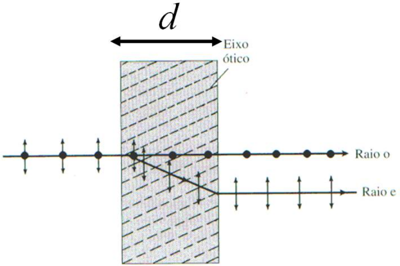
Placas de $\frac{1}{4}$ de onda

- 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

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

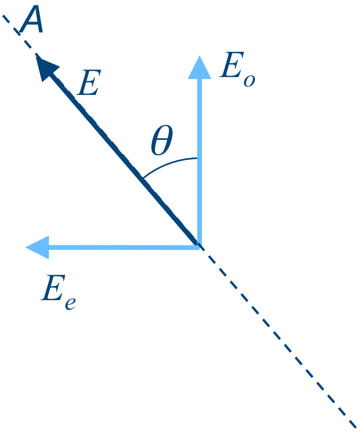


Placas de $\frac{1}{4}$ de onda

- 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

$$\vec{E} = \begin{aligned} &E_o \cos(kz - \omega t)\hat{o} \\ &+E_e \cos(kz - \omega t)\hat{e} \end{aligned}$$

- 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

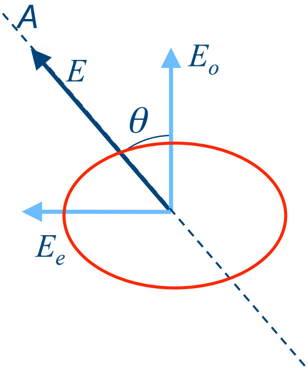
- Assim, o campo elétrico na saída da placa é

$$\vec{E} = \begin{aligned} & E_o \cos(kz - \omega t)\hat{o} \\ & + E_e \cos(kz - \omega t + \tfrac{\pi}{2})\hat{e} \end{aligned}$$

- Ou seja

$$\vec{E} = \begin{aligned} & E_o \cos(kz - \omega t)\hat{o} \\ & - E_e \operatorname{sen}(kz - \omega t)\hat{e} \end{aligned}$$

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



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

- Uma placa $\frac{1}{2}$ onda (Half-**W**ave **P**late em inglês) 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 $\frac{1}{2}$ onda é inverter a componente y.

$$\mathbf{WP}(\lambda/2) = \left(\begin{array}{cc} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{array} \right)$$

- Uma placa $\frac{1}{4}$ de onda (Quarter-**W**ave **P**late em inglês) introduz um atraso de 90° na fase da componente do vetor campo elétrico alinhada com o eixo 'lento' da placa. Se o eixo 'rápido' está alinhado com o eixo x, o efeito da placa de $\frac{1}{4}$ de onda é descrito por:

$$\mathbf{WP}(\lambda/4) = \left(\begin{array}{cc} 1 & 0 \\ 0 & -\mathrm{i} \end{array} \right)$$

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

- Uma placa $\frac{1}{2}$ onda (Half-**W**ave **P**late em inglês) introduz um atraso de fase de π na componente ao longo do eixo extraordinário

$$\mathbf{WP}(\lambda/2) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\pi} \end{pmatrix} = \mathbf{WP}(\delta = \pi)$$

- Uma placa $\frac{1}{4}$ de onda (Quarter-**W**ave **P**late em inglês) introduz um atraso de fase de $\frac{\pi}{2}$ na componente ao longo do eixo extraordinário

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

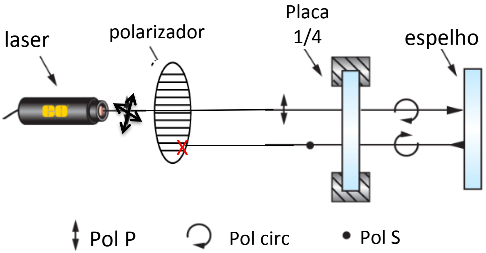
- Em geral uma placa birrefringente vai atrasar de uma quantidade δ a componente extraordinária

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

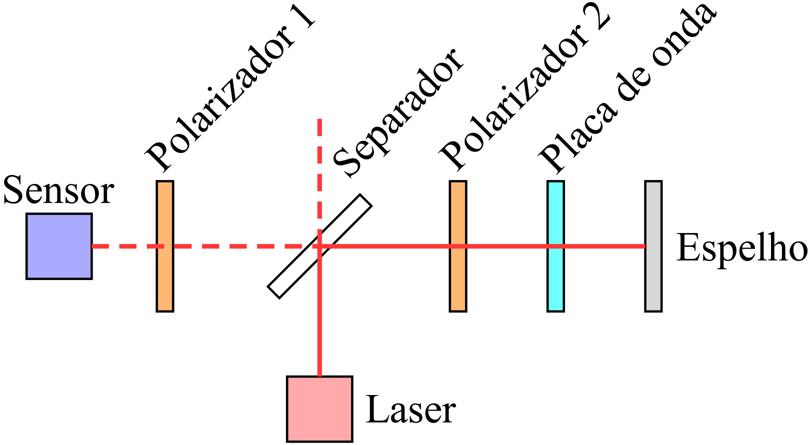
Sumário

1. Experimento
   - Experimento III
   - Polarização
   - Ferramenta de cálculo: as matrizes de Jones
   - Birrefringência e Placas de Onda
   - O isolador ótico do experimento

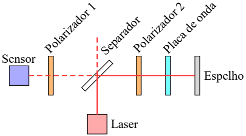
- O princípio de funcionamento de um isolador ótico, baseado em um dispositivo que muda a direção da polarização, é o seguinte
  - Polarizo linearmente o feixe (seja a 0°)
  - Cruzo um elemento ótico que muda a direção da polarização de 45°
  - O feixe voltando, cruzando novamente este elemento ganha mais 45°
  - O primeiro polarizador, que está a 0°, bloqueia o feixe refletido
- No nosso arranjo vamos substituir o elemento que roda de 45° por uma placa de $\frac{1}{4}$ de onda. Orientada corretamente o efeito é o mesmo: ao voltar, o feixe estará com polarização ortogonal à inicial.

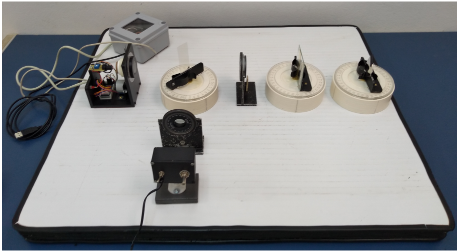


Esquema do isolador ótico do experimento



Montagem do isolador ótico





Atividades mínimas

- Caracterizar cada um dos componentes
  - Polarizador
  - Separador
  - Placa de onda
  - Espelho
- Caracterizar o sistema
- Demonstrar o efeito da isolação ótica

Bibliografia básica

- E. Hecht, Optics
- J. Peatross and M. Ware, Physics of Light and Optics (gratuito em http://optics.byu.edu/)