

# Introdução ao espalhamento Brillouin em microestruturas fotônicas

*Palavras chave:* Espalhamento Brillouin, Guias de Onda

**Aluno:** Diego da Silva Lisboa

**Orientador:** Prof. Dr. Gustavo da Silva Wiederhecker

*Departamento de Física Aplicada*

*Instituto de Física Gleb Wataghin – UNICAMP*

## 1 Introdução

Este projeto de iniciação científica teve como objetivo estudar os aspectos teóricos e experimentais do espalhamento Brillouin, um efeito óptico não-linear proveniente da interação entre ondas eletromagnéticas e ondas mecânicas em guias de ondas [1]. Mas, devido a pandemia de covid-19 e a adaptação das atividades para um modelo remoto, os estudos feitos no decorrer da IC foram voltados ao meio em que o espalhamento acontece, os guias de ondas.

Um guia de onda óptico é um dispositivo composto por um núcleo guia cercado por uma casca [2]. Para que um feixe de luz seja guiado é necessário que o índice de refração do núcleo seja maior que o da casca, pois é necessário que ocorra reflexão interna total nas interfaces núcleo-casca para que o feixe seja confinado no núcleo.

## 2 Atividade de Pesquisa

A configuração mais simples é a do guia de onda de chapa, onde o núcleo é uma chapa infinita no plano  $yz$  com índice de refração  $n_f$  e espessura  $h$ , e a casca é composta pela capa, de índice  $n_c$ , e pelo substrato, de índice  $n_s$ , como indicado na figura 1. Os índices são escolhido de forma que  $n_f > n_s \geq n_c$ . Apesar do guia de chapas ser uma idealização, o seu desenvolvimento matemático mais simples em comparação a outras configurações facilita a compreensão do funcionamento geral de um guia de onda, além de ser aplicável em alguns caso.

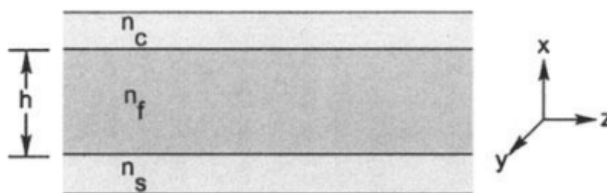


Figura 1: Guia de onda de chapa [3].

Em um guia como esse há dois possíveis modos para o campo eletromagnético, o primeiro deles é o modo elétrico transversal, também conhecido como modo TE, em que o campo elétrico é transversal à direção de propagação  $z$ . O segundo é o modo magnético transversal, ou modo TM, onde o campo magnético é transversal à direção de propagação. No modo TE o campo elétrico precisa ser polarizado na direção  $y$ , para que o campo seja perpendicular à direção de propagação, e deve satisfazer a seguinte equação de onda

$$\nabla^2 E_y + k_0^2 n_i^2 E_y = 0, \quad (1)$$

onde  $n_i = n_f, n_c, n_s$  dependendo da região analisada,  $k_0 = \frac{\omega_0}{c}$  é o comprimento de onda da luz no vácuo e  $\omega_0$  é a sua frequência angular. As soluções que queremos encontrar são da forma

$$E_y(x, z) = E_y(x)e^{-j\beta z} \quad (2)$$

onde  $\beta$  é a constante de propagação na direção  $z$ . Substituindo a candidata à solução 2 na equação de onda 1 obtemos

$$\frac{\partial^2 E_y(x)}{\partial x^2} + (k_0^2 n_i^2 - \beta^2) E_y(x) = 0. \quad (3)$$

A solução da equação 3 é dado por

$$E_y(x) = Ae^{-\gamma_c x} \quad \text{se } 0 < x, \quad (4)$$

$$E_y(x) = B \cos(\kappa_f x) + C \sin(\kappa_f x) \quad \text{se } -h < x < 0, \quad (5)$$

$$E_y(x) = De^{\gamma_s(x+h)} \quad \text{se } x < -h, \quad (6)$$

onde  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  são coeficientes de amplitude,  $\gamma_c = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_c^2}$  e  $\gamma_s = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_s^2}$  são os coeficientes de atenuação na capa e no substrato respectivamente e  $\kappa_f = \sqrt{k_0^2 n_f^2 - \beta^2}$  é a componente transversal do número de onda  $k = k_0 n_f$ . As equações 4 e 6 mostram que o campo elétrico  $E_y(x)$  tende a zero na capa e substrato conforme ele vai se afastando do núcleo, enquanto a equação 5 mostra que o campo elétrico oscila no núcleo.

Para determinar os coeficientes de amplitude é necessário aplicar duas condições de contorno nas interfaces, em  $x = 0$  e  $x = -h$ . A primeira é que  $\vec{E}$  tangencial é contínuo e a segunda é que  $\vec{H}$  tangencial é contínuo. Após a aplicação dessas condições, as equações 4, 5 e 6 podem ser reescritas da seguinte forma

$$E_y = Ae^{-\gamma_c x} \quad \text{se } x > 0, \quad (7)$$

$$E_y = A \left[ \cos(\kappa_f x) - \frac{\gamma_c}{\kappa_f} \sin(\kappa_f x) \right] \quad \text{se } -h < x < 0, \quad (8)$$

$$E_y = A \left[ \cos(\kappa_f h) - \frac{\gamma_c}{\kappa_f} \sin(\kappa_f h) \right] e^{\gamma_s(x+h)} \quad \text{se } x < -h, \quad (9)$$

onde  $A$  é a amplitude do campo elétrico em  $x = 0$ . Além disso, a relação entre os coeficientes de atenuação  $\gamma_c$  e  $\gamma_s$  com o número de onda transversal  $\kappa_f$  é dada pela equação característica dos modos TE

$$\tan(h\kappa_f) = \frac{\gamma_c + \gamma_s}{\kappa_f \left[ 1 - \frac{\gamma_c \gamma_s}{\kappa} \right]}, \quad (10)$$

as soluções dessa equação 10 levam aos autovalores  $\beta_{TE}$  que são usados para identificar os modos TE permitidos no guia de onda de placas.

### 3 Conclusão

Apesar de não ter sido possível estudar o espalhamento Brillouin ou longo do dessa iniciação científica, foi possível obter um bom entendimento do funcionamento de guias de ondas ópticas através da teoria de modos.

### 4 Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro concedido pelo CNPq, e também à Universidade Estadual de Campinas pela concessão da bolsa PIBIC.

### Referências

- [1] EGGLETON, B. J. et al. Brillouin integrated photonics. *Nature Photonics*, Nature Publishing Group, v. 13, n. 10, p. 664-677, 2019.
- [2] OKAMOTO, K. *Fundamentals of optical waveguides*. [S.l.]: Academic press, 2006.
- [3] POLLOCK, C. R.; LIPSON, M. *Integrated photonics*. [S.l.]: Springer, 2003. v. 20.