

# Oscilador Paramétrico Óptico Integrado Operando no Azul

**Palavras-Chave:** mistura de quatro ondas, nitreto de silício, engenharia de dispersão

**Autores:**

Vinícius Cikada Vicente, IFGW – UNICAMP  
Prof. Dr. Felipe Alexandre Silva Barbosa (orientador), IFGW - UNICAMP

---

## 1 Introdução

A produção de luz coerente e de alta intensidade no espectro visível é de interesse para diversas áreas de pesquisa científica e tecnológica. Podemos destacar a comunicação ótica [1] e aplicações em medicina [2]. Dentre as principais fontes de luz coerente e de alta intensidade no espectro visível, é possível citar os osciladores paramétricos óticos (OPO) baseados em processos não-lineares como conversão paramétrica descendente (PDC) e mistura de quatro ondas (FWM). Os OPOs baseados no processo de FWM operando em comprimentos de onda em torno de 1550 nm já foram demonstrados em plataformas integradas há pelo menos uma década.

A descrição do comportamento da luz em guias de onda e em processos não-lineares exige a resolução das equações de Maxwell. Entretanto, a complexidade de geometrias mais realistas exige o uso de métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos (FEM), para a análise dos modos guiados e suas constantes de propagação em diferentes geometrias. Isso permite encontrar os parâmetros para o *design* de um OPO baseado em FWM operando no azul.

## 2 Objetivos do Projeto

- Simulação dos modos normais de guias de onda usando o Método de Elementos Finitos (FEM) no COMSOL.
- Cálculo da dispersão dos modos normais dos guias de onda e comparação com os valores obtidos na literatura.
- Variação de parâmetros nas simulações para encontrar uma região na qual seja possível produzir luz coerente no azul (comprimentos de onda entre 440 nm e 480 nm).

### 3 Metodologia

Para encontrar os parâmetros para o *design* de um OPO baseado em FWM é necessário calcular o ganho desse processo. O foco do projeto foi o processo de FWM degenerado, no qual os campos de bombeio são iguais, seu ganho é dado por [3]:

$$G_s = 1 + \left( \frac{\gamma P_{in}}{g} \right)^2 \sinh^2(gz) \quad (1)$$

com

$$g = \sqrt{(\gamma P_{in})^2 - \left( \frac{\Delta\beta}{2} + \gamma P_{in} \right)^2} \quad (2)$$

$$\Delta\beta = \beta^{(2)}(\omega_p)(\Delta\omega)^2 + \frac{1}{12}\beta^{(4)}(\omega_p)(\Delta\omega)^4 + O(\Delta\omega^6) \quad (3)$$

em que  $\Delta\omega = |\omega_s - \omega_p| = |\omega_i - \omega_p|$  e  $\beta^{(m)} = \frac{d^m\beta}{d\omega^m}$ . A partir da equação 2 temos que  $-4\gamma P_{in} < \Delta\beta < 0$  para que  $g > 0$ , o que significa que existe uma faixa de frequências em que o ganho é consistente. Até a quinta ordem, essa faixa depende dos valores de  $\beta^{(2)}(\omega_p)$  e  $\beta^{(4)}(\omega_p)$  e de suas contribuições. Uma vez que  $\Delta\omega$  aumenta, a contribuição de  $\beta^{(4)}(\omega_p)$  aumenta, pois ela depende de  $\Delta\omega^6$ . O comportamento de  $\Delta\beta$  para diferentes sinais das derivadas de  $\beta$  pode ser observado na Figura 1.

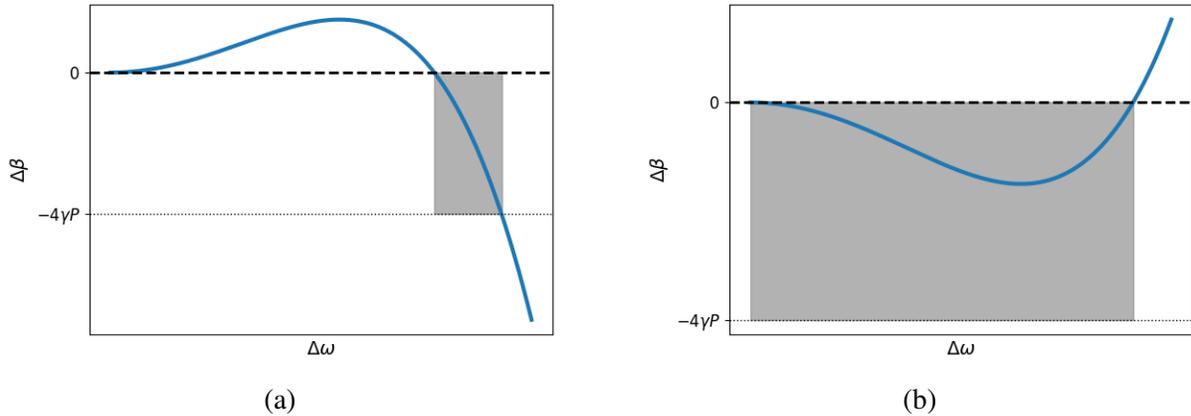


Figura 1: (a)  $\beta^{(2)}(\omega_p) < 0$  e  $\beta^{(4)}(\omega_p) > 0$ . (b)  $\beta^{(2)}(\omega_p) > 0$  e  $\beta^{(4)}(\omega_p) < 0$ . Em ambos os casos, a região cinza representa onde  $-4\gamma P_{in} < \Delta\beta < 0$ .

Para que o ganho tenha um pico na região do azul, é necessário que  $\beta^{(2)}(\omega_p) < 0$  e  $\beta^{(4)}(\omega_p) > 0$ . Podemos utilizar engenharia de dispersão para obter esse comportamento. Para isso, foi necessário realizar simulações utilizando o *software* COMSOL Multiphysics. Os guias simulados tinham o *core* feito de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) e o *cladding* sendo dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ). O corte transversal à direção de propagação tinha geometria retangular (Figura 2) e as geometrias de estudo tinham 3 alturas possíveis: 150 nm, 400 nm e 800 nm.

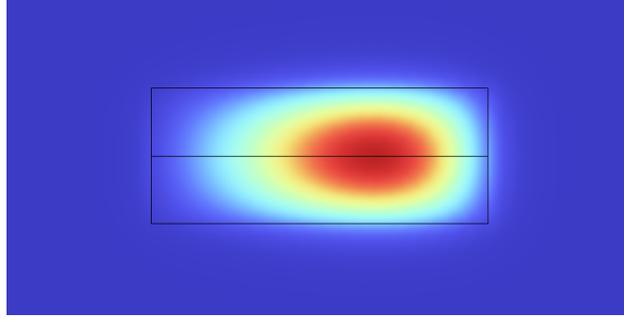


Figura 2: Perfil espacial do modo quasi-TE fundamental em um guia com largura 2000 nm, altura 800 nm e raio 100  $\mu\text{m}$ . O *core* é feito de nitreto de silício e o *cladding* é feito de dióxido de silício

Os dados obtidos a partir das simulações foram analisados utilizando um código feito em python desenvolvido durante o projeto. Foi realizada a separação dos modos quasi-TE e quasi-TM. A partir disso, foi feito o cálculo da constante de propagação  $\beta$  e realizou-se o cálculo das derivadas de  $\beta$  utilizando métodos numéricos.

Primeiramente, foram encontrados os parâmetros em que  $\beta^{(2)} > 0$  e  $\beta^{(4)} < 0$  para comprimentos de onda do campo de bombeio entre 600 nm e 1000 nm, pois é a faixa de operação do laser disponível no laboratório. Após isso, foi realizado o cálculo do ganho a fim de descobrir para quais modos e parâmetros o campo gerado tem um pico entre 440 nm e 480 nm.

## 4 Resultados e Discussão

Foram realizadas simulações para diferentes alturas de guia de onda, sendo elas 150 nm, 400 nm e 800 nm. Para guias com alturas de 150 nm, parte dos modos não eram guiados e as perdas eram altas, uma vez que, no máximo, apenas 70% da potência ficava no *core* para os modos guiados.

Para guias com alturas de 400, foram obtidos  $\beta^{(2)} > 0$  e  $\beta^{(4)} > 0$ . Portanto, não seria possível obter ganho para campos de bombeio nessa região. Apenas os guias com 800 nm de altura tinham  $\beta^{(2)} > 0$  e  $\beta^{(4)} < 0$  (Figura 3) na região de interesse.

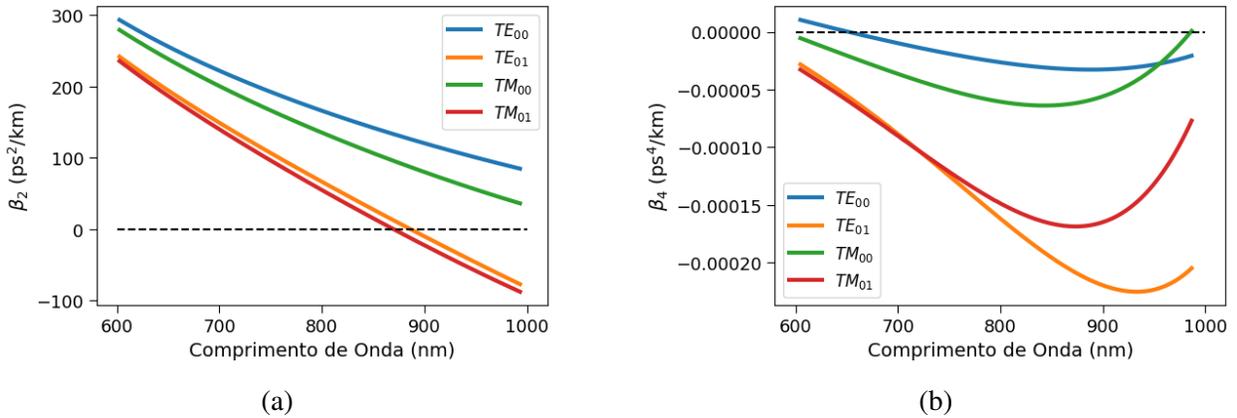


Figura 3: (a)  $\beta^{(2)}$  em função do comprimento de onda. (b)  $\beta^{(4)}$  em função do comprimento de onda. Em ambos os casos, a largura do guia é 1733 nm, a altura é 800 nm e o raio é 100  $\mu\text{m}$ , o *core* é feito de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  e *ocladding* é feito de  $\text{SiO}_2$ .

A partir disso, foi realizado o cálculo do ganho para os guias com 800 nm de altura. Apenas os guias com largura superior a 1000 nm tiveram ganho na região de interesse, em especial para campos de bombeio com comprimentos de onda superiores a 755 nm.

## 5 Conclusões

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que é possível fabricar um OPO com o *core* feito de nitreto de silício e o *cladding* de dióxido de silício baseado em FWM que gera luz na região do azul, para um campo de bombeio entre 755 nm e 1000 nm. Não é possível concluir se seria possível fabricar um OPO com alturas de diferentes de 800 nm, uma vez que não foram feitas simulações para alturas diferentes das mencionadas.

## 6 Bibliografia

- [1] Luiz Eduardo Mendes Matheus et al. “Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges”. Em: *IEEE Communications Surveys Tutorials* 21.4 (2019), pp. 3204–3237. DOI: 10.1109/COMST.2019.2913348.
- [2] Seok Hyun Yun e Sheldon J. J. Kwok. “Light in diagnosis, therapy and surgery”. Em: *Nature Biomedical Engineering* 1 (2017). DOI: 10.1038/s41551-016-0008.
- [3] Michael R.E. Lamont, Boris T. Kuhlmeier e C. Martijn de Sterke. “Multi-order dispersion engineering for optimal four-wave mixing”. Em: *Opt. Express* 16.10 (mai. de 2008), pp. 7551–7563. DOI: 10.1364/OE.16.007551.