

PROPRIEDADES ÓPTICAS DE CRISTAIS FOTÔNICOS UNIDIMENSIONAIS

RAMON PRATES MOREIRA LIMA¹; RAYARA GALENO DA SILVA²; PROF. DR. ISAÍAS PEREIRA COELHO³

RESUMO

A Fotônica é uma área da Física que estuda os fôtons, partículas que compõem a radiação eletromagnética. Ela investiga como os fôtons são emitidos e detectados, buscando assim viabilizar o uso da luz para benefício humano. O termo Fotônica é derivado da palavra fóton, que foi proposto por Max Planck para explicar os quantas de luz. Dentre as pesquisas realizadas, os cristais fotônicos ganham destaque. Os cristais fotônicos são estruturas periódicas compostas de materiais dielétricos, tendo dimensões de mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da luz. Assim, esses materiais podem ser muito úteis, pois possuem propriedades ópticas que permitem a manipulação da radiação eletromagnética. Para a execução desse trabalho foi realizado um estudo das equações de Maxwell, que descrevem a relação entre campos elétricos e magnéticos, bem como um levantamento bibliográfico focado nas produções recentes da área. A partir disso foi realizado um estudo do espectro óptico em materiais dielétricos, utilizando a técnica da Matriz Transferência para a análise da propagação da radiação eletromagnética através das estruturas. Após isso, foram feitas implementações utilizando a linguagem Python para construção de programas numéricos que permitiram a análise da absorção e transmissão em multicamadas periódicas. Os espectros ópticos foram obtidos para uma estrutura constituída de dióxido de titânio e dióxido de silício e para outros materiais. A variação dos materiais permitiu compreender de maneira mais aprofundada como se dá a propagação da radiação na estrutura, mostrando que a forma como a estrutura é construída é predominante sobre os materiais constituintes da estrutura.

Palavras-chave: Fotônica; Cristais fotônicos; Matriz Transferência; Band gap fotônico.

O projeto foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão – FAPEMA por meio da concessão de bolsa de iniciação científica.

¹Estudante do Curso de Licenciatura em Física do IFMA Campus Imperatriz; E-mail: ramonl@acad.ifma.edu.br.

²Estudante do Curso de Licenciatura em Física do IFMA Campus Imperatriz; E-mail: galeno.rayara@acad.ifma.edu.br.

³ Professor do Curso de Licenciatura em Física do Campus Imperatriz; E-mail: isaias@ifma.edu.br.

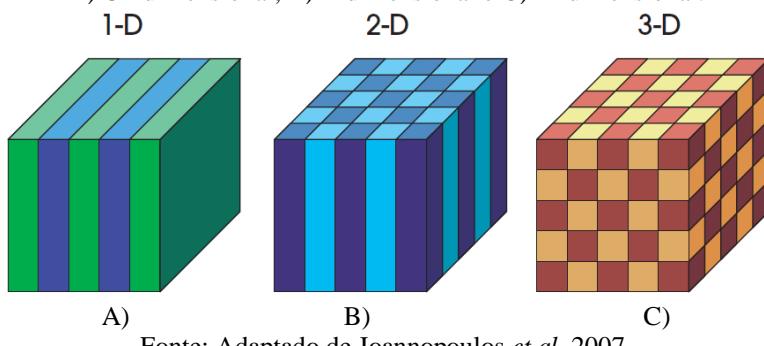
1 INTRODUÇÃO

A luz desempenha um papel significativo na sociedade, sendo usada em construções, telecomunicações, transportes, transmissão de dados e em tratamentos médicos, seja nos *lasers* utilizados para cirurgias, na obtenção de imagens para diagnósticos ou em procedimentos mais modernos como a *Photodynamic Therapy* (PDT), que se trata de uma reação fotoquímica utilizada para induzir a morte de algum tecido específico. Além disso, a utilização da luz pode ser expandida para outras finalidades, desde que as limitações técnicas e teóricas sejam superadas, sendo necessário que pesquisas de base sejam realizadas com esse objetivo.

A Fotônica é uma área da Física que estuda os fôtons, partículas que compõem a radiação eletromagnética. Ela investiga como os fôtons são emitidos e detectados, buscando assim viabilizar o uso da luz para benefício humano. O termo Fotônica é derivado da palavra fôton, que foi proposto por Max Planck para explicar os quantas de luz. Os estudos em Fotônica começaram na década de 1960 após a descoberta dos *lasers* e, embora os estudos tenham começado nessa década, a popularização do termo veio apenas com a criação do periódico *Photonics Technology Letters* no final do século XX. Dentre as pesquisas realizadas, um tema que ganha destaque é dos cristais fotônicos.

De acordo com Pires (2013), o termo ‘cristal fotônico’ foi introduzido pela primeira vez por Eli Yablonovitch em 1986. Os cristais fotônicos são estruturas periódicas compostas de materiais dielétricos, tendo dimensões de mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da luz. Assim, esses materiais podem ser muito úteis, pois possuem propriedades ópticas que permitem a manipulação da radiação eletromagnética. Os cristais fotônicos podem ser construídos de forma a terem sua periodicidade distribuída nas três dimensões do espaço, o que pode ser visto na figura 1.

Figura 1 –Cristais fotônicos em diferentes dimensões
A) Unidimensional, B) Bidimensional e C) Tridimensional.



Fonte: Adaptado de Joannopoulos *et al*, 2007.

A figura 1 apresenta as possíveis estruturas de um cristal fotônico, sendo que cada cor representa um material diferente. A periodicidade da estrutura pode ser definida em um eixo (cristal fotônico unidimensional) ou nos três eixos (cristal fotônico tridimensional). Dentre as características desses materiais podemos citar *band gaps* fotônicos, dispersão de luz lenta e manipulação da luz em escalas nanométricas. Dessa forma, muitos esforços têm sido realizados na tentativa de fazer com que os fótons se tornem uma alternativa real como portadores de informação, assim como os elétrons são, no caso eletrônico.

O *band gap* fotônico consiste numa faixa de frequência na qual a luz fica proibida de se propagar no interior do cristal, e a luz incidente nessa estrutura com comprimento de onda igual ao da banda proibida é refletida (Pires, 2013, p.8). De acordo com Ortiz *et al.* (2008, p.VI, tradução do autor) o “conceito de band gap fotônico surgiu originalmente com o desejo de alcançar um controle completo da emissão espontânea”, essa propriedade dos cristais fotônicos pode ser amplamente utilizada, pois podem permitir a construção de guias de onda de cristais fotônicos, que de acordo com Paul *et al.* (2020) “prometem reduções dramáticas no consumo de eletricidade em comparação com os guias de ondas metálicos” e além disso, possuem propriedades “ópticas interessantes como, dispersão adaptável, alta birrefringência, baixa perda de confinamento, alta não linearidade e resposta de alta sensibilidade”.

Um dos pontos fundamentais em controlar a propagação de ondas de luz é como selecionar fótons de certas frequências e obter uma alta transmissividade nestas frequências desejadas (Joannopoulos, 2008). Com a utilização de estruturas periódicas ou quase periódicas, muitos parâmetros podem ser ajustados, ampliando as possibilidades de aplicações tecnológicas em diversos campos, caminhando em direção à arquitetura dos computadores fotônicos, visto que a utilização dessas estruturas abriu caminho para aplicações em telecomunicações, transmissão de dados e computação.

2 METODOLOGIA

Para a execução desse trabalho foi realizado um estudo das equações de Maxwell, que são responsáveis por descrever a relação entre campos elétricos e magnéticos, sendo a luz radiação eletromagnética, a compreensão dessas equações foi fundamental para a realização deste trabalho. Tais equações são muito importantes e são encontradas em muitos livros textos de Física.

Além disso, para o embasamento teórico deste estudo foi realizado um levantamento bibliográfico focado nas produções recentes da área, o que forneceu uma base sólida a este

estudo. Estes materiais foram coletados na internet, em periódicos científicos e livros, utilizando como palavras-chave termos relacionados ao tema central da pesquisa, como "cristal fotônico", "propriedades ópticas", "band gaps".

Com o auxílio desses materiais foi realizado o estudo do espectro óptico em materiais dielétricos, com destaque para o espectro de transmissão de luz. Esse estudo permitiu o cálculo dos espectros de transmissão e reflexão em multicamadas periódicas e quase periódicas utilizando o formalismo matemático da Matriz Transferência, sendo fundamental para a análise da propagação da radiação eletromagnética através das estruturas.

Após a realização desses cálculos foram feitas implementações utilizando a linguagem Python para construção de programas numéricos que permitiram a análise da absorção e transmissão em multicamadas periódicas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Método da Matriz Transferência

O estudo das propriedades ópticas dos cristais fotônicos teve como ferramental a técnica da Matriz Transferência, que é amplamente utilizada na análise da “propagação de ondas em sistemas unidimensionais” (Soukoulis; Markos, 2008, p.1). Para a aplicação dessa técnica, foram utilizadas as condições de contorno de Maxwell, em que o vetor deslocamento elétrico e o campo magnético são contínuos nas interfaces das camadas (Coelho, 2010, p.21). Assim, temos

$$\vec{E}_j^{(N)} = (0, E_{yj}^{(N)}, 0) \quad (1)$$

$$\vec{E}_{yj}^{(N)} = [A_{1j}^{(N)} e^{(ik_{zj}z)} + A_{2j}^{(N)} e^{(-ik_{zj}z)}] e^{(ik_z - i\omega)} \quad (2)$$

Na análise realizada utilizou-se o campo elétrico $\vec{E}_{yj}^{(N)}$, que é dado pela equação 2. Na equação 2, $A_{1j}^{(N)}$ e $A_{2j}^{(N)}$ são as amplitudes da onda eletromagnética em cada camada, sendo $j = A$ ou B e $N = 0, 1, 2, \dots$

A derivada da equação 2 em relação a z fornece as relações de propagação do campo de uma camada para outra, assim temos

$$\vec{E}_{yj}^{(N)} = ikzj [A_{1j}^{(N)} e^{(ik_{zj}z)} + A_{2j}^{(N)} e^{(-ik_{zj}z)}] \quad (3)$$

dessa forma, para a primeira camada C/A onde $z = 0$ temos

$$\vec{E}_{yC}^{(0)} = A_{1C}^{(0)} + A_{2C}^{(0)} \quad (4)$$

De forma semelhante, aplicando as condições de contorno na camada A, temos

$$\vec{E}_{yA}^{(0)} = A_{1A}^{(1)} + A_{2A}^{(0)} \quad (5)$$

Igualando as equações 4 e 5 e adicionando o vetor de onda da respectiva camada obtemos

$$k_{zC}(A_{1C}^{(0)} + A_{2C}^{(0)}) = k_{zA}(A_{1A}^{(1)} + A_{2A}^{(0)}) \quad (6)$$

O procedimento para obter as relações das demais camadas é semelhante e k pode ser escrito de maneira geral como sendo

$$k_{z\alpha} = \left[\left(\frac{n_\alpha \omega}{c} \right)^2 - (k_x)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Onde $\alpha = A, B$ ou C .

Dessa forma, podemos escrever a matriz de transferência óptica para a camada da seguinte forma

$$M_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{k_{z\beta}}{k_{z\alpha}} & 1 - \frac{k_{z\beta}}{k_{z\alpha}} \\ 1 - \frac{k_{z\beta}}{k_{z\alpha}} & 1 + \frac{k_{z\beta}}{k_{z\alpha}} \end{pmatrix} \quad (8)$$

que representa a transmissão de luz com incidência oblíqua através de uma interface do tipo $\alpha \rightarrow \beta$.

E a matriz que fornece a relação de propagação da luz entre as camadas é dada por

$$M_\gamma = \begin{pmatrix} e^{(-ik_{z\gamma}d_\gamma t)} & 0 \\ 0 & e^{(ik_{z\gamma}d_\gamma t)} \end{pmatrix} \quad (9)$$

onde $\gamma = A$ ou B . Dessa forma, após as devidas manipulações obtemos a relação matricial abaixo

$$\begin{pmatrix} A_{1C}^{(0)} \\ A_{2C}^{(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{1C}^{(N)} \\ A_{2C}^{(N)} \end{pmatrix} \quad (10)$$

a partir da qual pode se obter o coeficiente de transmissão que é dado por

$$T = \left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2 \quad (11)$$

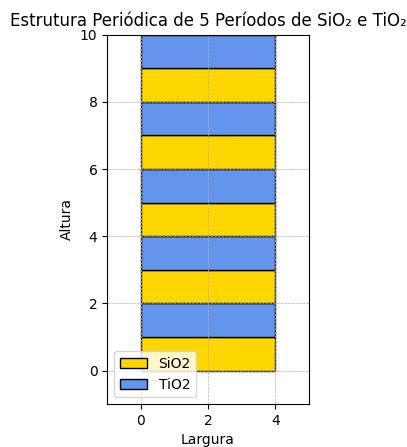
e o coeficiente de reflexão

$$R = \left| \frac{M_{21}}{M_{11}} \right|^2 \quad (12)$$

3.2 Obtenção numérica dos espectros ópticos

Após o cálculo dos coeficientes de transmissão e reflexão, foi possível utilizar a linguagem Python para obter os gráficos de transmissão óptica. Os materiais das camadas da estrutura considerada (figura 2) foram o dióxido de silício SiO_2 (camada A) e o dióxido de titânio TiO_2 (camada B).

Figura 2 – estrutura quase periódica de TiO_2 e SiO_2 .



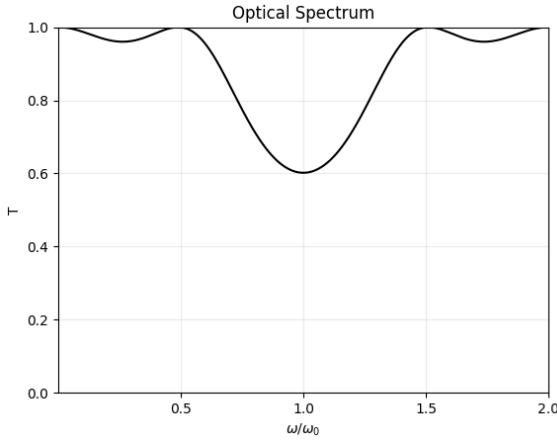
Fonte: Autores, 2024.

De acordo com Coelho (2010) estes materiais não absorvem radiação eletromagnética para comprimentos de onda acima de 400 nm. O comprimento de onda da radiação considerada nesse caso é 700 nm e os índices de refração do dióxido de silício e do dióxido de titânio são respectivamente $n_A = 1.45$ e $n_B = 2.30$. Consideramos ainda que o meio (C), de onde a radiação é emitida é o vácuo, o que pode simplificar as análises e equações.

As figuras 3 e 4 apresentam os resultados numéricos para a terceira e quinta geração de uma estrutura Fibonacci simples. O que se observa nessas figuras é que não há um pico de transmissão perfeita (transmissão total) para a frequência reduzida igual a um ($\omega = 1$). No entanto é possível observar que conforme aumentamos o número de gerações (ou camadas) há um aumento no número de picos de transmissão perfeita assim como uma maior localização desses picos. Pode-se inferir também, a partir da figura 3 que, com o aumento do número de

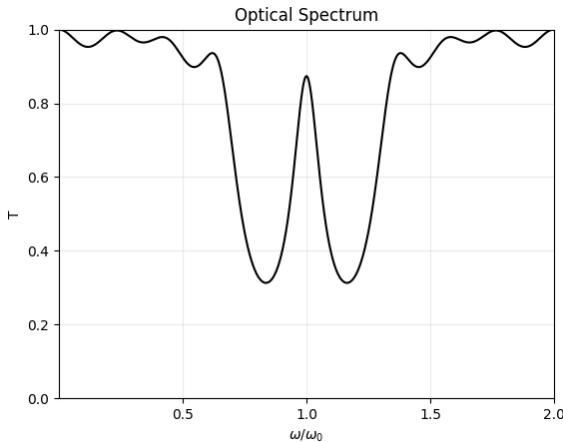
gerações, tem-se o surgimento dos gaps fotônicos, regiões onde a transmissão é igual ou bem próxima de zero. Percebe-se também um padrão de simetria na distribuição dos picos em torno de $\omega = 1$.

Figura 3 – Variação da transmissão em função da frequência reduzida para a terceira geração.



Fonte: Autores, 2024.

Figura 4 – Variação da transmissão em função da frequência reduzida para a quinta geração.



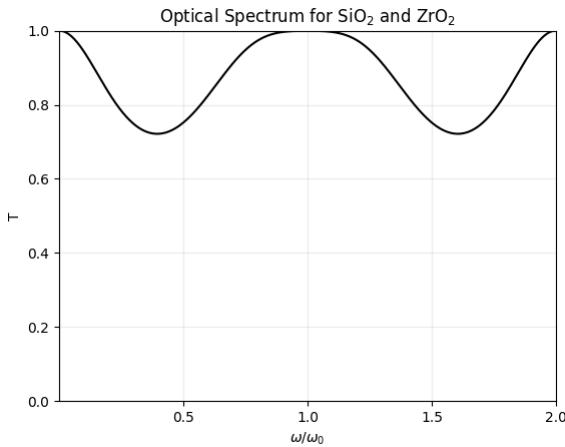
Fonte: Autores, 2024.

3.3 Espectros ópticos para diferentes materiais

Após a obtenção dos espectros ópticos para a estrutura constituída de SiO_2 e TiO_2 , outros materiais dielétricos foram utilizados na construção da estrutura quase periódica. A variação dos materiais permitiu compreender de maneira mais aprofundada como se dá a propagação da radiação na estrutura, mostrando que a forma como a estrutura é construída é predominante sobre os materiais constituintes da estrutura. Dessa forma, ao se alterar os materiais observou-se um padrão de simetria nas distribuições dos picos em torno de $\omega = 1$, ou seja, mesmo mudando os materiais que compõem a estrutura, mas mantendo a mesma sequência geradora, os padrões das curvas não mudam. Assim, os resultados numéricos foram

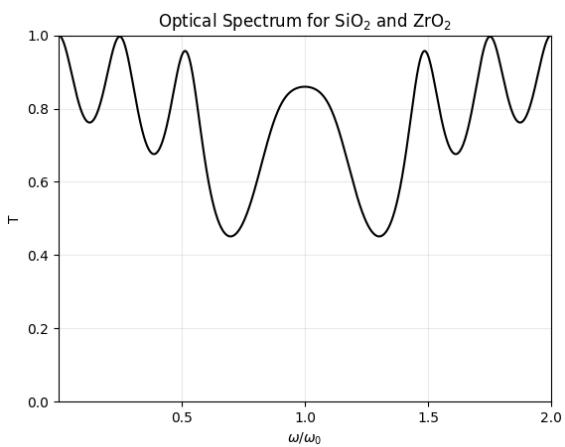
obtidos para a terceira, quinta e sétima geração da estrutura Fibonacci simples. A transmissão óptica para esses diferentes materiais pode ser vista nas figuras 6 e 7.

Figura 6 - Variação da transmissão em função da frequência reduzida para a terceira geração.



Fonte: Autores, 2024.

Figura 7 - Variação da transmissão em função da frequência reduzida para a quinta geração.



Fonte: Autores, 2024.

Os materiais utilizados na constituição das camadas foram o dióxido de silício (SiO_2) e o dióxido de zircônio (ZrO_2), sendo que os índices de refração são respectivamente $n_A = 1,45$ e $n_B = 2,15$. A alteração de um dos materiais da estrutura possibilitou uma compreensão mais aprofundada de como a forma de construção da estrutura influencia na transmissão óptica.

4 CONCLUSÕES

Neste estudo, obtivemos os coeficientes de transmissão e reflexão para uma estrutura quase periódica constituída a partir de uma sequência de Fibonacci simples, a partir disso, esses cálculos permitiram a construção de implementações computacionais para simular o espectro de transmissão óptico dessas estruturas. Esses espectros mostram que os picos de transmissão perfeita são mais definidos quando há um aumento no número de gerações da

estrutura. Além disso, a forma como a estrutura é construída é mais relevante do que os materiais que compõem a estrutura, visto que ao se alterar os materiais a simetria em torno da frequência reduzida $\omega = 1$ se mantém.

REFERÊNCIAS

- COELHO, Isaías P. **Excitações elementares em super-redes quase periódicas com simetria espelho.** 2010. Tese (Doutorado em Física) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Departamento de Física Teórica e Experimental, Natal, 2010.
- JOANNOPOULOS, J.D. et al. **Photonic Crystals: Molding the Flow of Light.** 2º ed. New Jersey, Princeton. Princeton University Press, 2008. 304 p.
- LOURTIOZ, J.M. et al., **Photonic Crystals: Towards Nanoscale Photonic Devices.** 2º ed. Alemanha, Berlim: Springer, 2008. 514 p.
- PIRES, Luis C. C. **Caracterização das propriedades ópticas de fibras microestruturadas contendo cristais líquidos.** 2013. 66 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO, Porto, Portugal. 2013.
- PAUL, B. K. et al. **Investigation of gas sensor based on differential optical absorption spectroscopy using photonic crystal fiber.** Alexandria Engineering Journal, Egypt. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.09.030>.
- SOUKOULIS, C. M.; MARKOS, P. **WAVE PROPAGATION FROM ELECTRONS TO PHOTONIC CRYSTALS AND LEFT – HANDED MATERIALS.** 1º ed. New Jersey, Princeton. Princeton University Press, 2008. 376p.