



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA (UFBA)**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DA UFBA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Dissertação de Mestrado

**EFEITOS TÉRMICOS EM DISPOSITIVOS BASEADOS EM CRISTAIS  
FOTÔNICOS DIELÉTRICOS**

Autora

Kézia Barreto Santos

Orientador

Vitaly Félix Rodríguez Esquerre

SALVADOR – BA

2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DA UFBA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**EFEITOS TÉRMICOS EM DISPOSITIVOS BASEADOS EM CRISTAIS**  
**FOTÔNICOS DIELÉTRICOS**

Autora: Kézia Barreto Santos.

Orientador: Prof. Dr. Vitaly Félix Rodríguez Esquerre.

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

SALVADOR – BA

2024

Barreto Santos, Kézia

Efeitos Térmicos em Dispositivos Baseados em Cristais Fotônicos  
Dielétricos / Kézia Barreto Santos. Salvador, 2024.

70 f.

Orientador: Vitaly Félix Rodriguez Esquerre.

Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2024.

1. Banda fotônica proibida. 2. Cristais fotônicos. 3. Metamateriais. 4.  
Temperatura. 5. Transmissividade. I. Rodriguez Esquerre, Vitaly Félix. II.  
Universidade Federal da Bahia. III.  
Título.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DA UFBA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**EFEITOS TÉRMICOS EM DISPOSITIVOS BASEADOS EM CRISTAIS**  
**FOTÔNICOS DIELÉTRICOS**

Dissertação de Mestrado

Autora: Kézia Barreto Santos.

Orientador: Prof. Dr. Vitaly Félix Rodríguez Esquerre.

Dissertação de Mestrado aprovada em 11 de dezembro de 2024 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

---

Prof. Dr. Vitaly Félix Rodríguez Esquerre

---

Profa. Dra. Ana Julia Fernandes de Oliveira Barros

---

Prof. Dr. Anderson Dourado Sisnando

SALVADOR – BA

2024

Dedico ao meu esposo, minha mãe, meu irmão e minha irmã, minha base.

## AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação marca o fim de uma etapa repleta de desafios, aprendizados e realizações, mas, acima de tudo, simboliza o resultado do apoio e da dedicação de muitas pessoas que estiveram ao meu lado ao longo dessa jornada.

Primeiramente, agradeço a Deus que é o meu guia primordial de toda a minha vida. Agradeço por me proporcionar sabedoria nos momentos de incerteza, paciência nos momentos de dificuldade e confiança quando o caminho parecia incerto. Sem a Sua graça e misericórdia, este trabalho não teria sido possível.

Agradeço ao meu orientador Dr. Vitaly Félix Rodríguez Esquerre, por sua paciência, sabedoria e dedicação ao longo de todo o processo, sua orientação e incentivo foram constantes e essenciais para a realização deste trabalho e para o meu crescimento como pesquisadora.

Ao meu esposo, Michael, expresso minha eterna gratidão e amor. Sua paciência, apoio incondicional e compreensão foram fundamentais para que eu pudesse enfrentar os desafios dessa jornada. Em todos os momentos, você esteve ao meu lado, oferecendo palavras de incentivo e sendo meu maior apoio emocional. Sua fé em mim, mesmo nos momentos mais difíceis, e a maneira como sempre acreditou no meu potencial, me motivaram a seguir em frente. Obrigada por me dar forças quando eu mais precisei e por ser a minha base em todas as fases desse processo.

À minha mãe, Fátima e meu irmão, Wellington, meu alicerce, expresso minha eterna gratidão. Agradeço pelo amor incondicional, pelas palavras de encorajamento e por acreditarem em mim, mesmo nos momentos em que duvidei de mim mesma. Sem vocês, esta conquista seria impossível.

Em especial, agradeço a Kelly, e te dedico minha gratidão, sabendo que este momento é também seu. Você foi uma presença constante de apoio, compreensão, companheirismo e carinho ao longo de toda essa trajetória. Nos momentos de dificuldade, suas palavras de incentivo e sua confiança em mim foram fontes de força e motivação, sabendo que sem sua presença ao meu lado, esse caminho seria bem mais difícil.

Por fim, agradeço à coordenação do Programa de Pós Graduação Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia pelo incentivo e oportunidade de realizar esta pesquisa.

*“A sabedoria é a coisa principal: adquiere pois a sabedoria; sim, com tudo o que possuis adquiere o conhecimento.” Provérbios 4:7*

## RESUMO

Os metamateriais são gerados artificialmente a partir dos materiais naturais criando estruturas sintéticas que apresentam propriedades distintas, que quando combinadas formam propriedades eletromagnéticas específicas reagindo com frequências ressonantes configuráveis dentro do espectro desejado. Neste trabalho, foi estudado o efeito causado pela variação da temperatura na transmissividade, observando a influência do índice de refração, as frequências ressonantes e os comprimentos de onda em estruturas fotônicas compostas por metamateriais, como cristais fotônicos. Foram analisados os efeitos térmicos na transmissão de cavidades ressonantes em um cristal fotônico unidimensional em três casos distintos, compostos por camadas alternadas de Arsênio de Gálio (GaAs), Silício (Si), Bismuto-Germânio-Oxigênio (BGO) cada um combinado com Sílica ( $\text{SiO}_2$ ), todos com defeitos de  $\text{SiO}_2$ , considerando os coeficientes termo-ópticos e os coeficientes de expansão térmica dos metamateriais. Também foram investigados os efeitos termo-ópticos na Estrutura da Banda Fotônica (PBS, em inglês) de um cristal fotônico bidimensional de rede quadrada, em três situações com elementos compostos por cilindros de BGO, GaAs e Si, todos embutidos no ar. Verificou-se que, o índice de refração é dependente da variação da temperatura, e os comprimentos de ondas ressonantes foram alterados, uma vez que, os efeitos termo-ópticos afetaram as estruturas fotônicas unidimensionais, obtendo uma eficiência da transmissividade superior a 85%. Os resultados revelaram que com o aumento da temperatura houve uma redução das frequências das bandas de operação e um alargamento da Banda Fotônica Proibida (PBG, em inglês) em todos os casos estudados para os cristais fotônicos bidimensionais.

**Palavras-chave:** Banda fotônica proibida. Cristais fotônicos. Metamateriais. Temperatura. Transmissividade.



## ABSTRACT

Metamaterials are artificially generated from natural materials, creating synthetic structures that have distinct properties, which when combined form specific electromagnetic properties reacting with configurable resonant frequencies within the desired spectrum. In this work, the effect caused by temperature variation on transmissivity was studied, observing the influence of the refractive index, resonant frequencies and wavelengths in photonic structures composed of metamaterials, such as photonic crystals. The thermal effects on the transmission of resonant cavities in a one-dimensional photonic crystal were analyzed in three different cases, composed of alternating layers of Gallium Arsite (GaAs), Silicon (Si), Bismuth-Germanium-Oxygen (BGO) each combined with Silica (SiO<sub>2</sub>), all with SiO<sub>2</sub> defects, considering the thermo-optical coefficients and thermal expansion coefficients of the metamaterials. The thermo-optical effects on the Photonic Band Structure (PBS) of a two-dimensional photonic crystal with a square lattice were also investigated, in three situations with elements composed of cylinders of BGO, GaAs and Si, all embedded in air. It was found that the refractive index is dependent on temperature variation, and the resonant wavelengths were changed, since thermo-optical effects affected one-dimensional photonic structures, obtaining a transmittance efficiency greater than 85%. The results revealed that with the increase in temperature there was a reduction in the frequencies of the operating bands and a broadening of the prohibited photonic band in all cases studied for two-dimensional photonic crystals.

**Keywords:** Photonic band gap. Photonic crystals. Metamaterials. Temperature. Transmissivity.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Ilustrações esquemáticas de cristais fotônicos (a) unidimensional, (b) bidimensional e (c) tridimensional. (ZHANG et al., 2021).....                                                                         | 28 |
| Figura 2: Cristal fotônico unidimensional com dois defeitos inseridos. (SEGOVIA-CHAVES; VINCK-POSADA, 2018). ....                                                                                                      | 30 |
| Figura 3: Perfil do cristal fotônico bidimensional com defeito um inserido. (SEGOVIA-CHAVES; VINCK-POSADA, 2019a). ....                                                                                                | 32 |
| Figura 4: Cristal fotônico bidimensional composto por uma matriz quadrada (CONTU; MEE; SEATZU, 2012). ....                                                                                                             | 33 |
| Figura 5: Cristal fotônico bidimensional composto por uma matriz triangular (CONTU; MEE; SEATZU, 2012). ....                                                                                                           | 34 |
| Figura 6: Cristal fotônico bidimensional composto por uma matriz hexagonal (QIANG; ZHOU; SOREF, 2007).....                                                                                                             | 35 |
| Figura 7: Estrutura do cristal fotônico unidimensional simulado.....                                                                                                                                                   | 39 |
| Figura 8: Variação do índice de refração do SiO <sub>2</sub> em função da temperatura. ....                                                                                                                            | 40 |
| Figura 9: Variação do índice de refração do BGO em função da temperatura.....                                                                                                                                          | 41 |
| Figura 10: Espectro de transmissividade em função do comprimento de onda para $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$ com visualização aproximada para os materiais BGO e SiO <sub>2</sub> . ....                                 | 42 |
| Figura 11: Espectro de transmissividade em função do comprimento de onda com variação da temperatura de 25°C a 300°C para os materiais BGO e SiO <sub>2</sub> . ....                                                   | 43 |
| Figura 12: Variação do comprimento de onda para BGO e SiO <sub>2</sub> em função da temperatura.....                                                                                                                   | 44 |
| Figura 13: Estrutura do cristal fotônico unidimensional com dois defeitos inseridos. ....                                                                                                                              | 44 |
| Figura 14: Espectros de transmissão para um cristal fotônico unidimensional com camadas de BGO e SiO <sub>2</sub> com dois defeitos em função da temperatura de 25 °C a 300 °C para (a) m=1 (b) m=6 (c) m=10. ....     | 46 |
| Figura 15: Variação do índice de refração do GaAs em função da temperatura.....                                                                                                                                        | 48 |
| Figura 16: Espectro de transmissão da cavidade ressonante cristal fotônico unidimensional para GaAs e SiO <sub>2</sub> com um defeito.....                                                                             | 48 |
| Figura 17: Espectro de transmissividade em função do comprimento de onda com variação da temperatura de 25°C a 300°C para os materiais GaAs e SiO <sub>2</sub> no cristal fotônico unidimensional com um defeito. .... | 49 |
| Figura 18: Variação do comprimento de onda para GaAs e SiO <sub>2</sub> em função da temperatura. ....                                                                                                                 | 50 |
| Figura 19: Espectros de transmissão para um cristal fotônico unidimensional com camadas de GaAs e SiO <sub>2</sub> com dois defeitos em função da temperatura de 25°C a 300°C para (a) m = 1 (b) m = 4 (c) m = 8. .... | 52 |
| Figura 20: Variação do índice de refração do Si em função da temperatura. ....                                                                                                                                         | 53 |
| Figura 21: Espectro de transmissão da cavidade ressonante cristal fotônico unidimensional para Si e SiO <sub>2</sub> com um defeito. ....                                                                              | 54 |

|                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 22: Espectro de transmissividade em função do comprimento de onda com variação da temperatura de 25 °C a 300 °C para os materiais Si e SiO <sub>2</sub> no cristal fotônico unidimensional com um defeito. .... | 55 |
| Figura 23: Variação do comprimento de onda para Si e SiO <sub>2</sub> em função da temperatura. ....                                                                                                                   | 56 |
| Figura 24: Perfil do cristal fotônico bidimensional composta por cilindros e ar.....                                                                                                                                   | 57 |
| Figura 25: PBS com T = 25°C (linha preta) e T = 300°C (linha vermelha) com BGO e Ar.....                                                                                                                               | 58 |
| Figura 26: PBS com T = 25°C (linha preta) e T = 300°C (linha vermelha) com GaAs e Ar.....                                                                                                                              | 60 |
| Figura 27: PBS com T = 25°C (linha preta) e T = 300°C (linha vermelha) com Si e Ar. ....                                                                                                                               | 61 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Índices de refração e coeficientes termo-ópticos (DANTAS-YOSHIDA; RODRÍGUEZ-ESQUERRE; ISÍDIO-LIMA, 2013). ..... | 26 |
| Tabela 2: Coeficientes de expansão térmica e coeficientes termo-ópticos dos materiais BGO e $\text{SiO}_2$ . .....        | 40 |
| Tabela 3: Coeficientes de expansão térmica e coeficientes termo-ópticos dos materiais GaAs e $\text{SiO}_2$ . .....       | 47 |
| Tabela 4: Coeficientes de expansão térmica e coeficientes termo-ópticos dos materiais Si e $\text{SiO}_2$ . .....         | 53 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                  |                                                     |
|------------------|-----------------------------------------------------|
| BGO              | Bismuto-Germânio-Oxigênio                           |
| GaAs             | Arsento de Gálio                                    |
| MEF              | Método dos Elementos Finitos                        |
| PBG              | Banda Fotônica Proibida (PBG, em inglês)            |
| PBS              | Estrutura da Banda Fotônica (PBS, em inglês)        |
| PWE              | Método de Expansão de Ondas Planas (PWE, em inglês) |
| Si               | Silício                                             |
| SiO <sub>2</sub> | Sílica                                              |
| TE               | Transverso Elétrico                                 |

## SUMÁRIO

|          |                                                                           |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                   | <b>14</b> |
| 1.1      | OBJETIVO GERAL .....                                                      | 19        |
| 1.1.1    | Objetivos Específicos.....                                                | 19        |
| 1.2      | JUSTIFICATIVA .....                                                       | 19        |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                                         | <b>21</b> |
| 2.1      | METAMATERIAIS .....                                                       | 21        |
| 2.2      | PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E EFEITOS TÉRMICOS .....                       | 23        |
| 2.3      | CRISTAIS FOTÔNICOS .....                                                  | 27        |
| <b>3</b> | <b>RESULTADOS .....</b>                                                   | <b>39</b> |
| 3.1      | CASOS SIMULADOS DE CRISTAL FOTÔNICO UNIDIMENSIONAL .....                  | 39        |
| 3.1.1    | Caso 1: Cristal Fotônico Unidimensional com BGO e SiO <sub>2</sub> .....  | 39        |
| 3.1.2    | Caso 2: Cristal Fotônico Unidimensional com GaAs e SiO <sub>2</sub> ..... | 47        |
| 3.1.3    | Caso 3: Cristal Fotônico Unidimensional com Si e SiO <sub>2</sub> .....   | 52        |
| 3.2      | CASOS SIMULADOS DE CRISTAL FOTÔNICO BIDIMENSIONAL.....                    | 56        |
| 3.2.1    | Caso 1: Cristal Fotônico Bidimensional com BGO e Ar.....                  | 58        |
| 3.2.2    | Caso 2: Cristal Fotônico Bidimensional com GaAs e Ar.....                 | 59        |
| 3.2.3    | Caso 3: Cristal Fotônico Bidimensional com Si e Ar .....                  | 60        |
| <b>4</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                                          | <b>62</b> |
| 4.1      | CONCLUSÃO .....                                                           | 62        |
| 4.2      | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....                                     | 64        |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                  | <b>65</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a fotônica desempenha um papel crucial em tecnologias avançadas, envolvendo o controle, a transmissão e a detecção da luz para aplicações como telecomunicações, sensores, lasers e computação quântica. A capacidade de manipular fótons com alta precisão está impulsionando inovações em redes de comunicação de alta velocidade e dispositivos ópticos (SUTHAR; BHARGAVA, 2020).

A ótica integrada vem ganhando destaque com a miniaturização de sistemas ópticos em chips, permitindo que componentes como guias de onda, moduladores e detectores sejam incorporados em um único circuito. Essa integração está revolucionando setores como telecomunicações, processamento de dados e sensores, abrindo caminho para dispositivos mais rápidos, eficientes e compactos, essenciais para a fotônica em larga escala (FUSCO *et al.*, 2020).

A ótica integrada em circuitos integrados oferece uma série de vantagens, a exemplo do alcance de uma alta taxa de transmissão de dados. Isso se deve à natureza da luz, que possui uma frequência muito maior do que os sinais elétricos, permitindo taxas de transmissão de dados muito mais rápidas em comparação com a eletrônica convencional (LI *et al.*, 2021).

Além disso, a ótica integrada também oferece vantagens em termos de eficiência energética, largura de banda e imunidade a interferências eletromagnéticas. Isso é especialmente importante em aplicações de alta velocidade, supercondutores e alta densidade de dados, como redes de comunicação de alta velocidade, centros de dados e computação de alto desempenho (SRIVASTAVA *et al.*, 2018; ABADLA; A ELSAYED; MEHANEY, 2020a).

Ao integrar a ótica com a microeletrônica em circuitos integrados, é possível criar sistemas mais compactos, eficientes e de alto desempenho, que são essenciais para atender as demandas por comunicação e processamento de dados, desempenhando um papel crucial na composição de dispositivos fotônicos, proporcionando uma série de vantagens em termos de desempenho, eficiência e capacidade de transmissão de dados (KUMAR *et al.*, 2020).

As estruturas fotônicas que são materiais ou dispositivos projetados para manipular e controlar a propagação da luz de maneiras específicas desempenham um papel fundamental na composição de dispositivos fotônicos, que são essenciais em

uma ampla gama de aplicações modernas (LIU *et al.*, 2020). Estes dispositivos incluem componentes como lasers, moduladores ópticos, fotodetectores, guias de onda óptica e muitos outros (RAHMAN-ZADEH *et al.*, 2019).

Os dispositivos fotônicos estão suscetíveis a exposição de variações de temperaturas podendo apresentar um impacto significativo em seu desempenho e em suas características. Devido as dimensões extremamente pequenas dessas estruturas, mesmo com alterações mínimas na temperatura podem acarretar discrepâncias significativas em suas propriedades ópticas e elétricas e, conseqüentemente, nos resultados pretendidos (MAMRI; BARKAT, 2019).

Assim, compreender e mitigar os efeitos da variação de temperatura é crucial para garantir o desempenho estável e confiável de dispositivos fotônicos, especialmente em estruturas na ordem de nanômetros onde pequenas variações podem ter um impacto significativo (SEGOVIA-CHAVES *et al.*, 2019b).

Escolher materiais com coeficientes de expansão térmica compatíveis pode ajudar a minimizar o estresse mecânico induzido pela variação de temperatura, reduzindo assim o risco de falhas nos dispositivos e projetar dispositivos com estruturas possuindo geometrias robustas e tolerantes às variações de temperatura pode ajudar a minimizar os efeitos negativos sobre suas propriedades ópticas e elétricas (CHANG; JHU; WU, 2012).

O empenho em realizar testes detalhados e a caracterização de dispositivos em uma faixa de temperatura pode ajudar a entender melhor os efeitos da variação de temperatura e otimizar o *design* dos dispositivos para garantir o desempenho adequado em condições reais de operação (ALY; AMEEN; VIGNESWARAN, 2018).

Nas estruturas fotônicas, onde o comportamento da luz é manipulado para diversas aplicações, o índice de refração dos materiais pode variar com a temperatura. Isso pode ser identificado por meio do coeficiente termo-óptico, que descreve a mudança no índice de refração de um material com a variação da temperatura. Tal situação ocorre porque o índice de refração do material influencia o comprimento de onda da luz conforme ela se propaga (MAMRI; BARKAT, 2019).

Para lidar com essas mudanças e manter o funcionamento adequado dos dispositivos fotônicos, é importante considerar não apenas o coeficiente termo-óptico, mas também o coeficiente de expansão térmica do material. Esses coeficientes podem ser usados para equilibrar equacionalmente os efeitos térmicos e ópticos,



garantindo assim o desempenho correto dos dispositivos em diferentes condições de temperatura (MA *et al.*, 2021).

Quando uma onda eletromagnética incide em uma estrutura fotônica, seu comprimento de onda também pode ser influenciado pelos efeitos térmicos. Isso pode levar a mudanças na fase da onda, na velocidade de propagação ou em outras propriedades ópticas da estrutura. Então, ao levar em consideração esses coeficientes, é possível desenvolver estruturas fotônicas que sejam mais estáveis e menos sensíveis as variações de temperatura, garantindo assim um desempenho óptico consistente em diferentes ambientes (TINKER; LEE, 2005).

Os cristais fotônicos são estruturas que consistem em arranjos periódicos de materiais com diferentes índices de refração, criando uma Estrutura da Banda Fotônica (PBS, em inglês) que influencia o comportamento da luz que passa por eles. Dentro da banda as ondas eletromagnéticas são fortemente refletidas, enquanto fora dela, elas podem propagar-se mais livremente. Isso significa que os cristais fotônicos podem agir como filtros ópticos, permitindo ou bloqueando a passagem de certas frequências de luz, dependendo de sua estrutura e composição (HE; HE; WEI, 2021).

Essas estruturas fotônicas podem ser usadas em uma variedade de dispositivos, como lasers, moduladores ópticos e filtros ópticos de alta precisão. Eles desempenham um papel crucial na manipulação e controle da luz em várias aplicações tecnológicas e científicas (MAMRI; BARKAT, 2019).

Os metamateriais são materiais artificiais projetados para terem propriedades ópticas, elétricas ou magnéticas que não são encontradas nos materiais originados na natureza. Eles são compostos por estruturas artificiais nanométricas, que permitem controlar e manipular o comportamento da luz, do calor ou do campo eletromagnético de maneira única e permite controlar propriedades como índice de refração e coeficientes termo-ópticos (SRIVASTAVA *et al.*, 2018).

A investigação do efeito da variação da temperatura em estruturas fotônicas, como cristais fotônicos compostos por metamateriais, pode ter implicações significativas em diversas aplicações, incluindo comunicações ópticas, sensores ópticos e dispositivos fotônicos integrados. A variação da temperatura também pode influenciar outros aspectos das estruturas fotônicas, como a largura da Banda Fotônica Proibida (PBG, em inglês), a dispersão da luz, a eficiência de acoplamento de energia, permissividade e a eficiência da transmissividade (ZARE; GHARAATI, 2020).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método numérico amplamente utilizado para resolver uma variedade de problemas de engenharia e física, incluindo análises estruturais, térmicas, eletromagnéticas e fluidodinâmicas, entre outras. O MEF possibilita realizar uma análise de estruturas com elevado nível de complexidade, por meio de aproximação de equações diferenciais, com o intuito de solucionar os problemas de valor de fronteira dividindo um problema maior em partes menores para ser solucionado. Ao discretizar o problema desta forma, ele se transforma em um conjunto de equações algébricas que podem ser resolvidas numericamente (TINKER; LEE, 2005).

Esse método é utilizado no *software* Comsol© para auxiliar na resolução dos problemas tratados neste projeto. Além disso, o Comsol© é usado em muitos campos da ciência e engenharia, incluindo mecânica estrutural, transferência de calor e eletromagnetismo. Sua capacidade de lidar com problemas complexos e sua interface flexível o tornam uma ferramenta valiosa para a análise e projeto de uma ampla variedade de sistemas físicos e tecnológicos (COMSOL, 2024).

Estruturas periódicas como os cristais fotônicos exigem uma abordagem analítica para calcular as propriedades das PBS. Neste trabalho foi utilizado o Método de Expansão de Ondas Planas (PWE, em inglês). Esse método é particularmente útil para cristais fotônicos de geometria periódica, como o cristal fotônico de rede quadrada bidimensional, composto por cilindros de dois materiais (SEGOVIA-CHAVES; VINCK-POSADA, 2019a).

No método de expansão de ondas planas, a estrutura periódica é representada como uma matriz infinita de repetições unitárias. As soluções das equações de Maxwell para a onda eletromagnética dentro dessas células unitárias são expressas como uma soma de ondas planas. As propriedades das PBS, como as frequências de ressonância e os modos de propagação, podem ser determinadas através da diagonalização da matriz de transferência que relaciona as amplitudes das ondas nas diferentes células unitárias (SEGOVIA-CHAVES; VINCK-POSADA, 2019a).

Outro *software* utilizado para simulações foi o *Rsoft CAD Layout*© que possibilita o desenvolvimento de simulações para projetar guias de onda, circuitos ópticos e diversos outros dispositivos, como também, fornece dados essenciais para esses os projetos, incluindo as propriedades do material e a geometria estrutural do dispositivo em análise (SYNOPSYS, 2024).

Neste projeto, o intuito foi estudar o efeito causado pela variação da temperatura em estruturas fotônicas compostas por metamateriais, averiguando o efeito da variação da temperatura em estruturas como cristais fotônicos. Observando a influência do índice de refração dos metamateriais com as frequências ressonantes e os comprimentos de onda.

Para o desenvolvimento deste projeto foram realizados estudos e simulações com metamateriais compostos por Arsênio de Gálio (GaAs), Silício (Si), Sílica (SiO<sub>2</sub>), Bismuto-Germânio-Oxigênio (BGO) e ar para verificar o comportamento da combinação desses materiais e analisar qual apresentará melhor resultado. Esses materiais possuem propriedades distintas que podem ser exploradas para criar metamateriais com comportamentos ópticos únicos.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho foi estudar o efeito causado pela variação da temperatura em estruturas fotônicas compostas por metamateriais.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

- Analisar os efeitos da variação da temperatura no cristal fotônico unidimensional;
- Verificar a dependência do índice de refração em relação a temperatura nas estruturas fotônicas compostas por metamateriais;
- Observar os efeitos da variação da temperatura no cristal fotônico bidimensional;
- Verificar a influência termo-óptica na transmissividade das estruturas fotônicas compostas por metamateriais;
- Apresentar os resultados obtidos em publicações em eventos ou revistas.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A crescente demanda por tecnologias que operam com alta eficiência e precisão no controle de ondas eletromagnéticas em aplicações como telecomunicações, sensoriamento e lasers tem impulsionado o estudo de estruturas fotônicas e metamateriais. Os metamateriais são amplamente utilizados devido a sua capacidade de manipular a luz de maneira única, podendo alterar os valores dos índices de refração a depender das interferências externas ou ajustes nos dispositivos programados (LIU *et al.*, 2021).

Os metamateriais são caracterizados por propriedades ópticas não encontradas na natureza, têm se mostrado promissores na manipulação da propagação da luz, proporcionando funcionalidades avançadas em uma ampla gama de dispositivos fotônicos. No entanto, as características ópticas dessas estruturas

podem ser significativamente afetadas por fatores como a variação de temperatura, umidade ou pressão que altera o índice de refração dos metamateriais e, consequentemente, a resposta do sistema fotônico, como as frequências ressonantes e comprimentos de onda envolvidos (MA *et al.*, 2021).

O estudo do efeito termo-óptico em cristais fotônicos compostos por metamateriais é, portanto, de extrema relevância, tanto do ponto de vista teórico quanto tecnológico. As variações no índice de refração em função da temperatura podem comprometer o desempenho de dispositivos ópticos baseados nesses materiais, afetando sua estabilidade, eficiência e confiabilidade em condições operacionais reais (MAMRI; BARKAT, 2019).

Além disso, o aprofundamento no entendimento dessas influências pode possibilitar o desenvolvimento de novas técnicas de controle ativo sobre as propriedades ópticas, o que abre caminho para aplicações em sensores de temperatura, sistemas ópticos e sistemas de comunicação. (RAHMAN-ZADEH *et al.*, 2019; KUMAR *et al.*, 2020).

Assim, o objetivo de estudar o efeito causado pela variação da temperatura em estruturas fotônicas compostas por metamateriais é justificado pela necessidade de compreender e controlar as alterações em suas propriedades ópticas. Este estudo contribuirá para o avanço da ciência dos metamateriais e para o desenvolvimento de dispositivos fotônicos mais robustos e adaptáveis, fundamentais para a evolução das tecnologias modernas que dependem do controle preciso da luz em diferentes condições ambientais.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 METAMATERIAIS

Os Metamateriais são materiais artificiais desenvolvidos com o intuito de apresentar características resultantes das propriedades dos materiais que os compõem (HUANG *et al.*, 2018). O metamaterial permite controlar o comportamento da luz conforme os parâmetros de sua configuração, de modo que, é amplamente utilizado atualmente para estudos em diversos campos de aplicação (LEE *et al.*, 2016).

Como os metamateriais são constituídos artificialmente permitem apresentar propriedades que são originadas dos materiais utilizados para a sua composição (HUANG *et al.*, 2018). Isso significa que, para projetar um metamaterial para uma determinada aplicação é necessário considerar as características dos materiais escolhidos para o compor, assim, o metamaterial resultante manifestará propriedades que se desejar obter ou manipular (WANG, 2016).

Os metamateriais correspondem a um tipo de material composto por estruturas sintéticas que podem apresentar propriedades distintas e ao serem combinadas formam novas propriedades eletromagnéticas específicas que reagem com frequências ressonantes configuráveis dentro do espectro desejado (SANTOS; RODRIGUEZ-ESQUERRE, 2020). Os materiais primários são encontrados na natureza e possuem características particulares que ao se combinarem podem ser utilizados em diversas aplicações, tais como, ciência dos materiais, eletromagnetismo, óptica (ZHENG *et al.*, 2023).

Os metamateriais podem ser fabricados a partir de uma variedade de materiais, incluindo metais, dielétricos, semicondutores e polímeros. A escolha dos materiais depende das propriedades desejadas e das aplicações específicas do metamaterial (CHARIK; BOURAS; BENNACER, 2021).

Para configurar um metamaterial é necessário levar em consideração as especificidades físicas de cada componente, os fatores estruturais e as características dielétricas objetivando ajustar a estrutura física e a proporção dos materiais para

determinar a frequência ressonante e a interação do metamaterial com o ambiente (ZHENG *et al.*, 2023).

O modo como se configura um metamaterial influencia diretamente na finalidade de aplicação do composto e em como ele reage a estímulos externos como temperatura, pressão, umidade, cor, absorção, reflexão, transmissão, reações biológicas e químicas. Esses fatores são considerados e tanto nos materiais encontrados na natureza quanto nos metamateriais. Outro fator determinante será a função do metamaterial no ambiente em que será inserido, podendo agir como sensor, filtro, lente etc (ZHENG *et al.*, 2023).

Para a configuração de metamateriais o comprimento de onda é uma propriedade crítica a ser considerada devido sua relação direta com a frequência de operação desejada. A capacidade de projetar e fabricar estruturas nanométricas que interagem com a luz de maneira altamente controlada abre possibilidades fascinantes para uma ampla gama de aplicações nas áreas de óptica avançada, comunicações e dispositivos fotônicos (TINKER; LEE, 2005).

Os metamateriais apresentam propriedades ópticas que transparecem em sua constituição de nanoestruturas. Esse formato na estrutura é produzido em laboratório com equipamentos projetados especificamente para atenderem as necessidades da composição do material. Essas nanoestruturas realizam a função de atuar no caminho das ondas eletromagnéticas entrando em contato com o material e permitindo que a onda eletromagnética seja transportada pela estrutura (WANG, 2016).

Os metamateriais apresentam componentes, os quais são conjuntos de diversos elementos individuais, que podem ser compostos por metais ou dielétricos, de modo que, apresentam uma estrutura com padrões repetitivos, possuindo uma estrutura microscópica. Desse modo, trabalham com uma subescala de comprimento de onda, assim sendo, essa característica possibilita que o metamaterial consiga controlar as ondas incidentes (HUANG *et al.*, 2018).

A geometria do metamaterial, assim como seus parâmetros estruturais e sua orientação pode afetar a luz que entra em contato com a estrutura. Com isso, os comprimentos de onda considerados para os metamateriais vão ser determinados com base nas características do metamaterial (WANG, 2016). Em contato com o metamaterial a luz pode reagir sendo refletida ou transmitida, também, o resultado da incidência da luz no metamaterial pode resultar em absorção (LEE *et al.*, 2016).

Os metamateriais estão sendo amplamente estudados pela versatilidade de configuração. A fabricação desses componentes é rigorosamente alinhada e manipulada no processo de fabricação em nanoescala possibilitando a interação com o meio de ondas eletromagnéticas, permitindo a aplicação na área de telecomunicações, óptica etc. (MALEK *et al.*, 2022).

Dessa maneira, por consequência de os metamateriais possuírem propriedades que se destacam pela sua nanoestrutura, por serem produzidas artificialmente, e não por composições químicas, como os materiais naturais, existem muitos fins para o seu uso (ZHAO *et al.*, 2018).

## 2.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E EFEITOS TÉRMICOS

Compreender as propriedades dos materiais que compõem os metamateriais é crucial para entender seu comportamento em diferentes condições, incluindo variações de temperatura. Algumas propriedades importantes a se considerar incluem condutividade térmica, coeficiente de expansão térmica, permissividade e permeabilidade magnética e transmissividade (SEGOVIA-CHAVES *et al.*, 2019b).

A variação de temperatura pode afetar essas propriedades e, consequentemente, o desempenho dos metamateriais. Por exemplo, mudanças na temperatura podem alterar a estrutura cristalina dos materiais, afetando suas propriedades elétricas e magnéticas. Isso pode levar a mudanças no comportamento dos metamateriais, como variações nas frequências de ressonância ou na eficácia das propriedades ópticas. Portanto, é importante escolher materiais com coeficientes de expansão térmica compatíveis ou implementar técnicas de controle de temperatura nos dispositivos (AGARWAL, 2014; SUTHAR; BHARGAVA, 2020).

Considerando que, com o avanço da tecnologia e a alta demanda do mercado, existe um aumento da exigência para que as estruturas que compõem os dispositivos fotônicos sejam mais eficientes. Além disso, com a tendência da redução das dimensões dos dispositivos, alcançando dimensões das estruturas fotônicas em escalas nanométricas, operando com maior qualidade e confiabilidade, gera uma preocupação com relação ao custo e fabricação, para que seja eficiente em operar em frequências desejadas (TINKER; LEE, 2005).



Com os efeitos de variações de temperatura torna-se importante também avanços na fabricação para garantir que essas estruturas possam operar com qualidade e confiabilidade, mesmo em condições variáveis de temperatura, mantendo os custos sob controle. O desenvolvimento de técnicas de fabricação avançadas e materiais adequados é crucial para atender a essas demandas do mercado (LIMA, 2012).

Os materiais que são comumente utilizados nas estruturas fotônicas são Silício e Sílica. Esses materiais são semicondutores, os quais são encontrados na natureza em abundância. Quando a estrutura fotônica é exposta a variação de temperatura os materiais sofrem algumas mudanças físicas que afetam suas propriedades ópticas. Uma dessas mudanças está relacionada ao coeficiente termo-óptico, que descreve como o índice de refração de um material muda com a temperatura (SEGOVIA-CHAVES *et al.*, 2019b).

Em materiais como silício e sílica, variações de temperatura podem causar expansão ou contração térmica, afetando a estrutura cristalina do material e, conseqüentemente, seu índice de refração. Assim, é necessário considerar e compensar os efeitos do coeficiente termo-óptico para garantir o funcionamento adequado do dispositivo em diferentes condições ambientais. (SOAVE *et al.*, 2009).

As mudanças no índice de refração podem ter um impacto significativo no desempenho de dispositivos fotônicos, pois podem alterar as propriedades de guia de ondas, dispersão e ressonância dos materiais.

Existem vários efeitos da variação de temperatura que podem afetar os dispositivos fotônicos, tais como:

**Coeficiente termo-óptico:** é uma medida da sensibilidade resultante do comportamento dos materiais em estruturas fotônicas e é influenciado pela temperatura devido às mudanças no índice de refração, que por sua vez afetam o comprimento de onda da luz ao atravessar esses materiais (BEN-ALI *et al.*, 2020).

**Coeficiente de expansão térmica:** indica que os materiais tendem a expandir ou contrair com mudanças na temperatura. Isso pode levar a distorções nas estruturas nanoestruturadas, afetando suas propriedades ópticas (ABADLA; ELSAYED; MEHANEY, 2020a).

**Variação do índice de refração:** a temperatura afeta o índice de refração dos materiais, o que por sua vez pode alterar as propriedades de propagação da luz em

guias de onda óptica e outros componentes fotônicos (ILINYKH; MATYUSHKIN, 2016).

Mudanças nas propriedades dos materiais: a temperatura pode alterar as propriedades intrínsecas dos materiais, como a condutividade elétrica em semicondutores, o que pode afetar o funcionamento de dispositivos como fotodetectores e moduladores ópticos (GRZELCZYK; AWREJCEWICZ, 2019).

Ao considerar tanto o coeficiente termo-óptico quanto o coeficiente de expansão térmica e o *design* de estruturas, é possível modelar e prever o comportamento de materiais em estruturas fotônicas sujeitas a variações de temperatura, o que é importante para projetar e operar eficientemente dispositivos fotônicos em diversas condições ambientais (ABADLA; ELSAYED; MEHANEY, 2020b; RAHMAN-ZADEH *et al.*, 2019).

Ao ocorrer pequenas alterações com os valores da temperatura o índice de refração pode ser calculado considerando algumas variáveis, o qual é determinado linearmente por meio da Equação 1 (DANTAS-YOSHIDA; RODRÍGUEZ-ESQUERRE; ISÍDIO-LIMA, 2013):

$$n(T) = n(T_0) \quad (1)$$

O  $n(T)$  caracteriza o índice de refração na temperatura  $T$ , o  $T_0$  é o coeficiente termo-óptico para a temperatura determinada de referência  $T_0$ , e  $n(T_0)$  consiste do índice de refração da temperatura de referência.

O material pode sofrer com mudanças internas advindas da polarização medida por unidade de volume, o que resulta na variação do índice de refração, a diminuição ou aumento desse índice vai depender das características do material (DANTAS-YOSHIDA; RODRÍGUEZ-ESQUERRE; ISÍDIO-LIMA, 2013).

Essas alterações também estão diretamente relacionadas ao volume do material. Por conseguinte, sabendo da relação entre a variação do índice de refração e a variação da temperatura nos materiais utilizados nos dispositivos fotônicos na óptica integrada, o coeficiente termo-óptico pode ser determinado a partir da Equação 2 (SOAVE *et al.*, 2009):

$$TOC = \frac{dn}{dT} \frac{(n^2-1)(n^2+2)}{6n} (\Phi - \beta) \quad (2)$$

Na Equação 2,  $T$  corresponde a temperatura,  $n$  refere-se ao índice de refração,  $\Phi$  é polarizabilidade eletrônica, e  $\beta$  trata-se do coeficiente de expansão volumétrica. O  $\beta$  é definido por meio da Equação 3 (SOAVE *et al.*, 2009):

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (3)$$

O  $\rho$  caracteriza a densidade do material.

Os materiais semicondutores, como Silício e Sílica, apresentam valores de coeficientes termo-ópticos positivos. Isso significa que ocorre um aumento do índice de refração desses materiais quando é apresentado um aumento da temperatura no dispositivo que é composto de tais materiais (DANTAS-YOSHIDA; RODRÍGUEZ-ESQUERRE; ISÍDIO-LIMA, 2013).

Existem materiais que se comportam de maneira contrária aos materiais supracitados, os quais manifestam índices de refração reduzidos quando ocorre o aumento da temperatura, como é o caso do polímero, esses materiais possuem coeficientes termo-ópticos negativos (SOAVE *et al.*, 2009).

Na Tabela 1 são apresentados os valores referentes aos índices de refração e coeficientes termo-ópticos a uma temperatura de 20° C de alguns materiais.

| Material        | Índice de Refração | Coeficiente Termo-óptico (C <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|--------------------|---------------------------------------------|
| <b>Silício</b>  | 3,476              | 1,8x10 <sup>-4</sup>                        |
| <b>Sílica</b>   | 1,444              | 1,0x10 <sup>-5</sup>                        |
| <b>Polímero</b> | 1,515              | -2,4x10 <sup>-4</sup>                       |

Tabela 1: Índices de refração e coeficientes termo-ópticos (DANTAS-YOSHIDA; RODRÍGUEZ-ESQUERRE; ISÍDIO-LIMA, 2013).

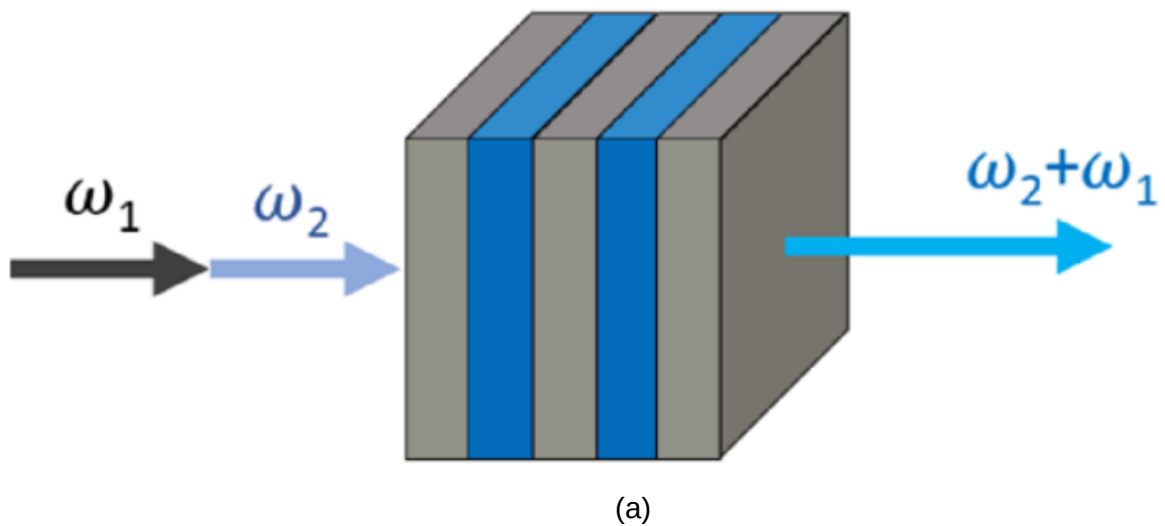
O Silício é um material facilmente encontrado na natureza e que é comumente utilizado nos dispositivos atualmente. Isso se dá pelo fato de ser vantajoso em diversos aspectos, tais como, apresenta propriedades mecânicas e químicas que são consideradas de nível excelente, além de ter um ótimo desempenho no que diz respeito as propriedades elétricas. O Silício ainda se destaca por possuir uma taxa elevada de purificação (LIMA, 2012).

A Sílica é material encontrado abundantemente na areia e apresenta formas cristalinas variadas, o qual é utilizado habitualmente na confecção de vidros. A Sílica

compõe diversas aplicações na área da óptica, desde lasers a amplificadores. A sua utilidade em dispositivos ópticos é facilmente empregada pela vasta quantidade disponível na natureza. Esse material pode apresentar uma estrutura condizente com a ametista, o quartzo e o topázio (LIMA, 2012).

### 2.3 CRISTAIS FOTÔNICOS

Os cristais fotônicos são estruturas que podem ser representadas uni, bi ou tridimensionalmente, de forma a apresentar uma periodicidade em sua estrutura, ou seja, são elaborados de modo a apresentar alternância de materiais distintos compondo a estrutura que permite a existência da propagação da radiação eletromagnética dentro de um intervalo de banda fotônica. Esse intervalo, no qual existe o espectro da radiação eletromagnética, é caracterizado pelo índice de refração do material assim como pela ordem espacial da estrutura (FURLAN *et al.*, 2018).



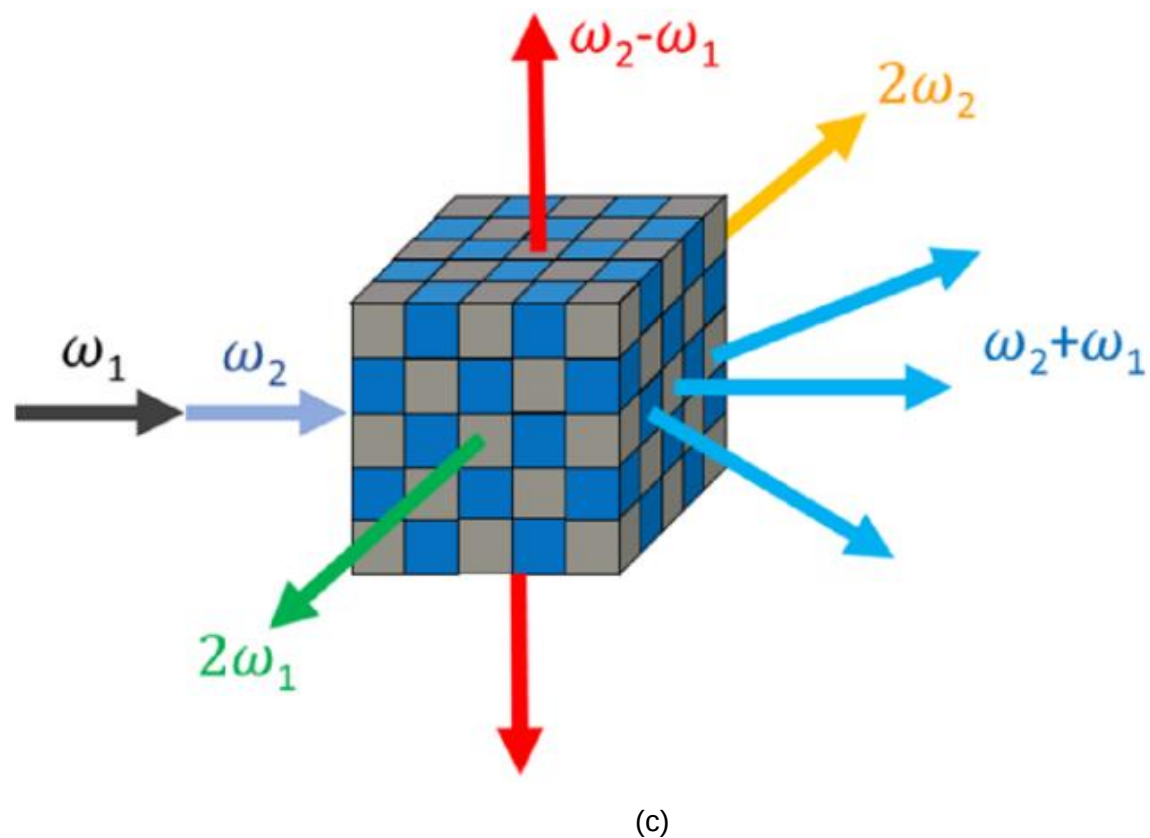
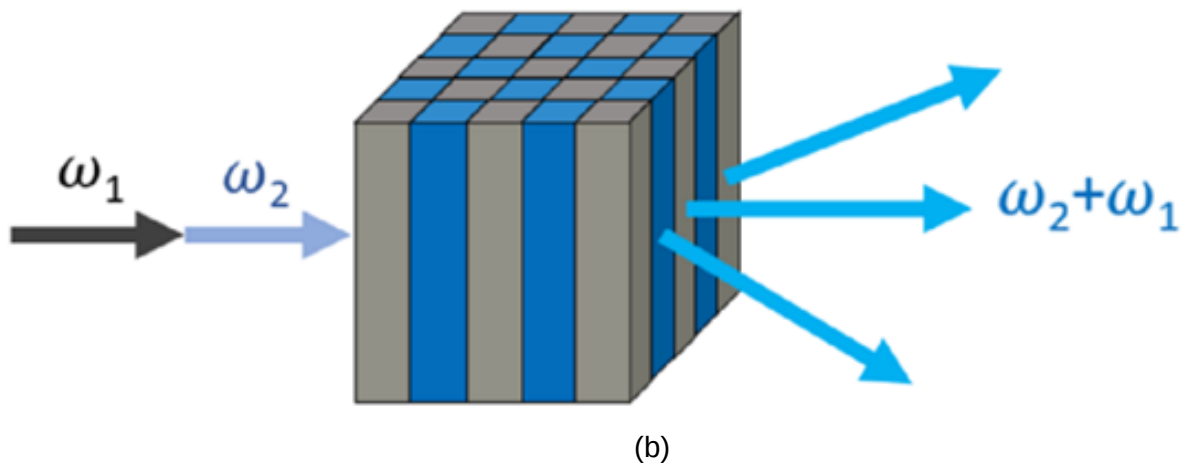


Figura 1: Ilustrações esquemáticas de cristais fotônicos (a) unidimensional, (b) bidimensional e (c) tridimensional. (ZHANG et al., 2021).

Na Figura 1, o  $\omega_1$  e  $\omega_2$  representam a componente da luz e sua direção de propagação nas três estruturas apresentadas. Nos cristais fotônicos unidimensionais Figura 1 (a), a periodicidade é restrita a uma única dimensão, como ocorre em estruturas de multicamadas, amplamente empregados em filtros ópticos e cavidades ressonantes devido à sua capacidade de refletir seletivamente determinadas frequências de luz. Em cristais fotônicos bidimensionais, Figura 1 (b), a periodicidade é estendida a duas dimensões, comumente representada por arranjos regulares de

cavidades ou perfurações em uma superfície plana, tornando-os particularmente adequados para o controle da luz em guias de onda e em dispositivos fotônicos. Os cristais fotônicos tridimensionais, Figura 1(c) apresentam periodicidade em todas as três dimensões espaciais, o que possibilita um controle mais abrangente sobre a propagação da luz em qualquer direção, destacando-se como promissores para aplicações em lasers de alta eficiência e sensoriamento avançado (ZHANG *et al.*, 2021).

Os cristais fotônicos impossibilitam que exista propagação de radiação eletromagnética fora dos limites do intervalo de PBG. Assim, as faixas de frequências proibidas funcionam como um bloqueio controlável da propagação da radiação eletromagnética (SEGOVIA-CHAVES; VINCK-POSADA, 2019a).

A PBG possui o potencial de revolucionar a fotônica, fornecendo uma base sólida para o controle e a manipulação precisa de fótons. Essa propriedade viabiliza o desenvolvimento de dispositivos capazes de direcionar, confinar ou filtrar luz de maneiras que seriam inatingíveis com materiais convencionais (SANTOS; RODRIGUEZ-ESQUERRE, 2020). Os cristais fotônicos com PBG podem ser projetados para criar estruturas altamente eficientes, com perdas de energia minimizadas, aprimorando significativamente o desempenho de dispositivos fotônicos (GHARAATI; ZARE, 2021).

Os cristais fotônicos são usados para projetar uma variedade de dispositivos ópticos, como:

**Guias de Onda de Cristal Fotônico:** um cristal fotônico pode ser projetado com defeitos que criam caminhos para guiar a luz ao longo de direções específicas. Isso é útil para transferir sinais ópticos em circuitos integrados fotônicos com baixo índice de perda (MAMRI; BARKAT, 2019).

**Interruptores ópticos:** utilizam a capacidade de alterar a PBG de forma dinâmica para controlar a propagação da luz. Isso pode ser feito com o uso de materiais não lineares, que mudam suas propriedades ópticas em resposta a um campo elétrico ou variação de temperatura (SRIVASTAVA *et al.*, 2018).

**Filtros de Banda Estreita:** podem ser usados para criar filtros que bloqueiam ou transmitem apenas certas frequências de luz. Alterando o parâmetro da estrutura do cristal, é possível ajustar a faixa de frequência que será transmitida ou refletida (ROBINSON; NAKKEERAN, 2012).

**Cavidades de Modo Defeituoso:** introduzindo defeitos em um cristal fotônico, é possível criar cavidades ressonantes que confinam fortemente a luz em uma pequena região. Essas cavidades são usadas em sistemas ópticos como *nanolasers*, acopladores direcionais e portas lógicas (SRIVASTAVA; AGHAJAMALI, 2019).

**Sensores Baseados em Mudanças na PBG:** podem ser projetados para detectar variações ambientais, como mudanças de temperatura, pressão ou presença de gases, ao monitorar o deslocamento da PBG. Isso os torna úteis para sensores de detecção altamente sensíveis (GHARAATI; ZARE, 2021).

**Moduladores Fotônicos:** utilizando a mudança do índice de refração por efeito eletro-óptico ou termo-óptico, os cristais fotônicos podem atuar como moduladores, controlando o fluxo de luz em dispositivos de comunicação óptica (TINKER; LEE, 2005).

**Lasers de Cavidade Defeituosa:** são usados para criar *nanolasers*, onde o confinamento eficiente da luz na cavidade reduz a energia necessária para iniciar a emissão de laser (RAHMAN-ZADEH *et al.*, 2019).

**Divisores de Feixe Óptico:** cristais fotônicos podem ser usados para dividir a luz em diferentes caminhos com base na PBS do cristal. Isso é útil em interferômetros e circuitos ópticos complexos (CHEN *et al.*, 2019; PANDEY; SUTHAR, 2020).

A Figura 2 apresenta uma ilustração de uma estrutura de um cristal fotônico unidimensional com dois defeitos inseridos.

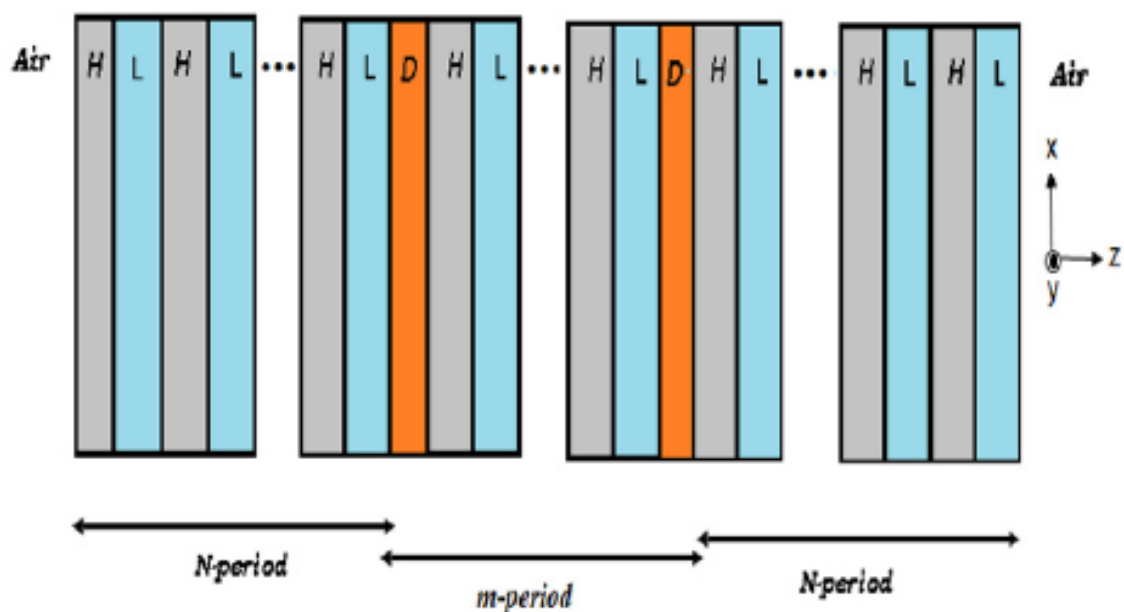


Figura 2: Cristal fotônico unidimensional com dois defeitos inseridos. (SEGOVIA-CHAVES; VINCK-POSADA, 2018).

Na Figura 2 o H representa a camada com o material com o maior valor de índice de refração e o L com o menor valor de índice de refração, o D corresponde ao defeito inserido. O N refere-se à periodicidade das camadas do cristal fotônico e o m refere-se ao período das camadas entre os defeitos. A representação dos cristais fotônicos pode ocorrer em três dimensões. Na Figura 2 é destacada a representação em uma dimensão do cristal fotônico.

Os cristais fotônicos unidimensionais são componentes fundamentais para dispositivos fotônicos, devido a sua capacidade de controlar e manipular a propagação de ondas eletromagnéticas em espaços programados. Como estes cristais são compostos por camadas alternadas de materiais dielétricos com diferentes índices de refração, que criam uma PBG, é possível controlar uma faixa de frequência em que a propagação de luz é fortemente inibida (SEGOVIA-CHAVES *et al.*, 2019b).

A estrutura periódica dos cristais fotônicos unidimensionais permite controlar a forma como as ondas eletromagnéticas interagem com o material, permitindo refletir, transmitir ou guiar luz em frequências específicas, sendo possível confinar a luz dentro de certas regiões, o que é útil para desenvolver guias de onda e cavidades ressonantes (SEGOVIA-CHAVES *et al.*, 2019b).

Comparados aos cristais fotônicos bidimensionais e tridimensionais, esses dispositivos unidimensionais são relativamente fáceis de fabricar, criando camadas alternadas de matérias no processo de fabricação. Os materiais utilizados possuem um contraste elevado entre os índices de refração das camadas alternadas que melhora a eficiência dos espelhos dielétricos e amplia a PBG (BEN-ALI *et al.*, 2020).

A Figura 3 ilustra a composição de um cristal fotônico em duas dimensões, apresentado por (SEGOVIA-CHAVES; VINCK-POSADA, 2019a). Em uma estrutura fotônica bidimensional, a manipulação da luz ocorre em duas dimensões. Essas estruturas podem ser projetadas para criar PBG, onde a luz não pode propagar em determinadas frequências, de forma análoga ao que ocorre com os elétrons em materiais semicondutores. A estrutura da Figura 3 apresenta um cristal fotônico composto por camadas alternadas do semicondutor GaAs embutidas com ar. Verifica-se a presença de um defeito inserido no cristal fotônico. O defeito é inserido com o intuito de gerar um modo defeituoso na frequência ressonante que se deseja trabalhar.



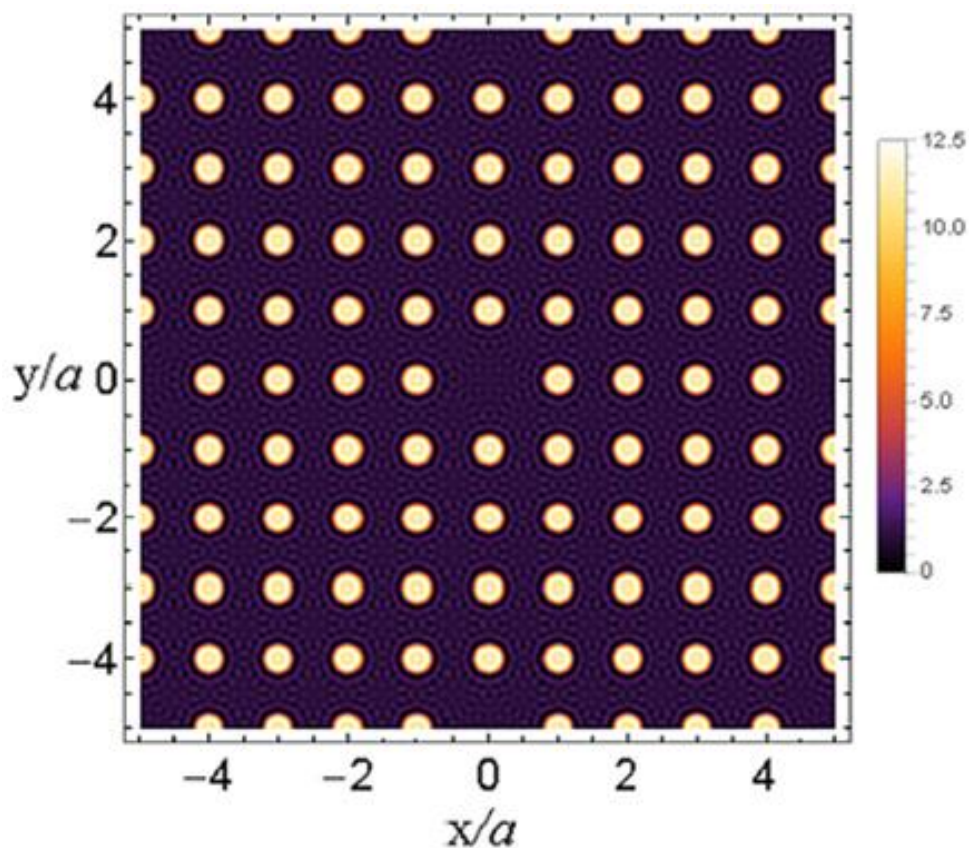


Figura 3: Perfil do cristal fotônico bidimensional com defeito um inserido. (SEGOVIA-CHAVES; VINCK-POSADA, 2019a).

Os cristais fotônicos bidimensionais são realmente uma plataforma atraente para o desenvolvimento de dispositivos fotônicos devido a várias vantagens estruturais e funcionais. Essas vantagens fazem deles uma tecnologia promissora para aplicações em circuitos ópticos integrados e dispositivos baseados em fotônica (QIANG; ZHOU; SOREF, 2007).

Uma vantagem é possuir um tamanho reduzido que devido à sua natureza bidimensional, os cristais fotônicos ocupam menos espaço em comparação com estruturas tridimensionais. Isso é especialmente vantajoso para a miniaturização de dispositivos ópticos. Além disso, os cristais fotônicos bidimensionais são relativamente simples de fabricar e integrar em plataformas de circuitos fotônicos. Eles geralmente consistem em uma matriz periódica de cilindros dielétricos em um fundo de ar ou outro material de baixo índice de refração (RAJASEKAR; ROBINSON, 2018).

A geometria de um cristal fotônico bidimensional é definida por uma periodicidade no índice de refração ao longo de duas dimensões espaciais, enquanto a terceira dimensão permanece homogênea ou apresenta variações uniformes. Essa periodicidade é comumente implementada por meio de arranjos regulares, como

matrizes de cilindros dielétricos combinados a uma matriz dielétrica de material diferente do primeiro ou por perfurações cilíndricas em um substrato dielétrico (HIDAYAT; RIVELI, 2018).

As geometrias mais usuais para cristais fotônicos bidimensionais incluem arranjos com desenho quadrada, triangular, ou hexagonal, sendo essas configurações determinantes para as características da PBG. A definição da geometria, incluindo os parâmetros como o tamanho, a forma e o espaçamento das estruturas periódicas, exerce influência direta sobre a localização do espectro da onda eletromagnética e da PBG. Essas características tornam os cristais fotônicos bidimensionais altamente versáteis para aplicações em dispositivos ópticos integrados e sistemas de manipulação de luz (CONTU; MEE; SEATZU, 2012).

No cristal fotônico bidimensional com arranjo quadrado os pontos estão organizados em uma rede regular, com todos os elementos dispostos em quadrados. Este arranjo é um dos mais simples e clássicos em cristais fotônicos, conforme Figura 4. Nessa rede, os elementos, geralmente materiais com diferentes índices de refração, são dispostos em linhas retas perpendiculares umas às outras, formando uma grade de quadrados (HIDAYAT; RIVELI, 2018).

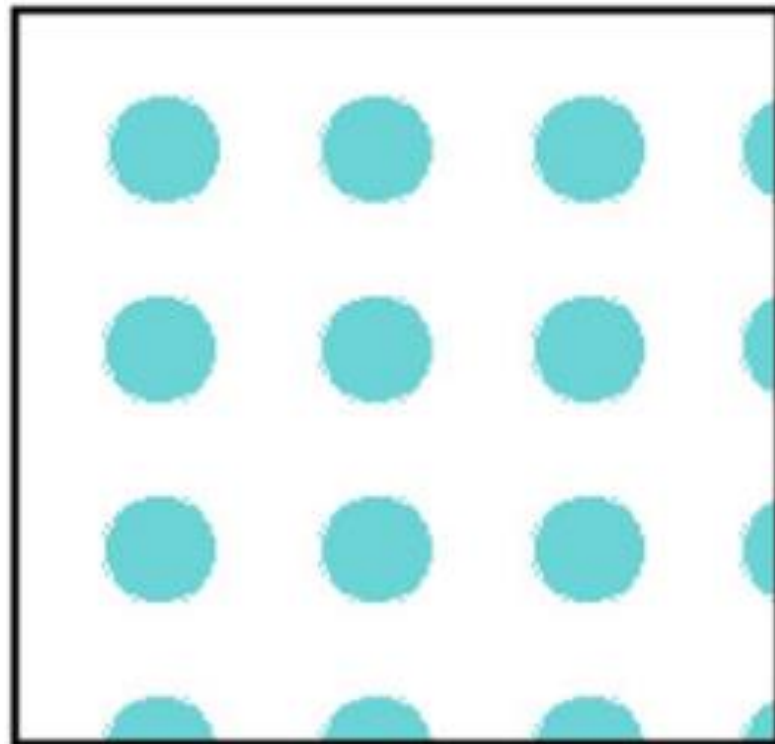


Figura 4: Cristal fotônico bidimensional composto por uma matriz quadrada (CONTU; MEE; SEATZU, 2012).

No cristal fotônico bidimensional, Figura 5, com arranjo triangular os pontos de uma rede são organizados de maneira triangular com triângulos equiláteros, criando uma estrutura altamente simétrica e são comumente observados em sistemas como grafeno. É uma variação mais simétrica da rede quadrada e pode gerar distribuições de ondas altamente controladas e produzir PBG que não são fáceis de obter em outras redes (CONTU; MEE; SEATZU, 2012).

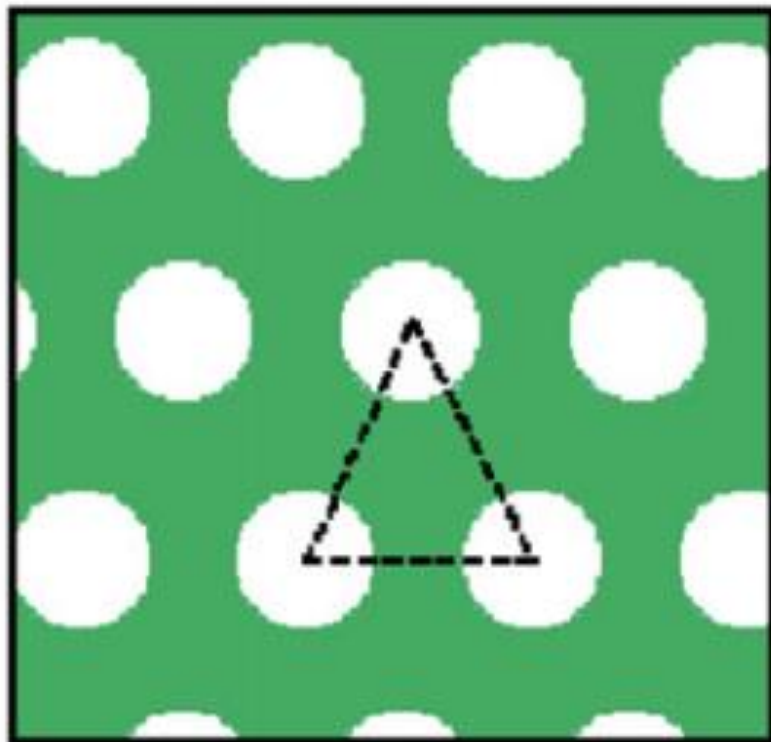


Figura 5: Cristal fotônico bidimensional composto por uma matriz triangular (CONTU; MEE; SEATZU, 2012).

A rede hexagonal do cristal fotônico bidimensional é caracterizada por uma disposição de células hexagonais, cada ponto é cercado por seis outros pontos, formando uma estrutura que lembra um favo de mel, conforme Figura 6. Essa estrutura apresenta características com simetrias mais complexas e maior simetria em relação à rede quadrada, o que pode resultar em melhores propriedades para guiar a luz em algumas direções (ROBINSON; NAKKEERAN, 2012).

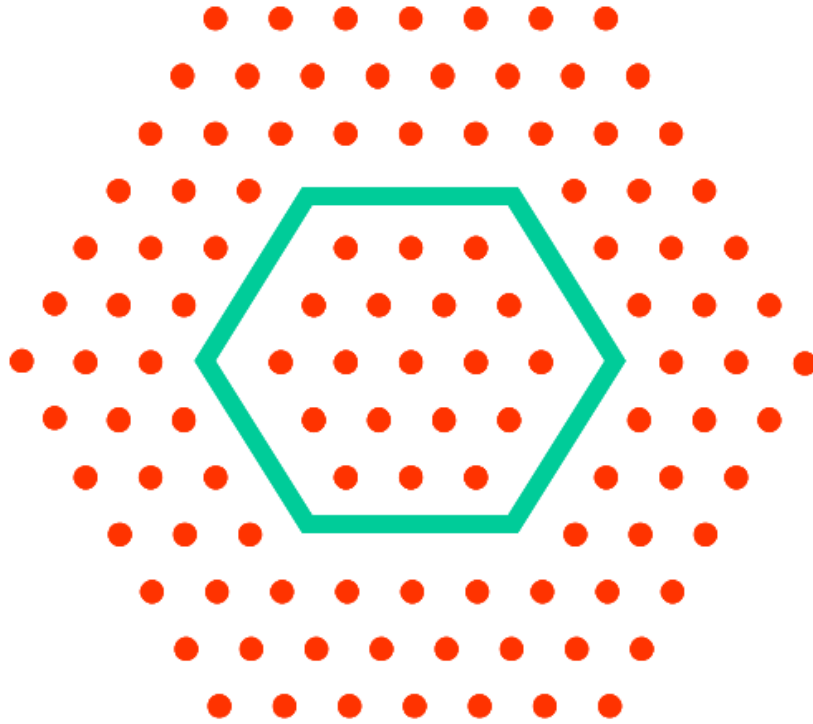


Figura 6: Cristal fotônico bidimensional composto por uma matriz hexagonal (QIANG; ZHOU; SOREF, 2007).

Esses dispositivos também possuem a capacidade de projetar e ajustar a PBG permite controlar quais frequências de luz podem ou não se propagar dentro do cristal. Isso é útil para criar filtros de luz, guias de onda, cavidades ressonantes etc. (JOANNOPOULOS; VILLENEUVE; FAN, 1997). E ainda, por possuir uma estrutura simples e ter compatibilidade com tecnologias de semicondutores, os cristais fotônicos bidimensionais podem ser integrados com circuitos fotônicos integrados, que são fundamentais para a comunicação óptica e sensores de alta precisão.

As ondas eletromagnéticas que interagem com o cristal fotônico apresentam uma interpretação da sua dinâmica fundamentada pelas equações de onda de Maxwell (SEGOVIA-CHAVES; VINCK-POSADA, 2018). Assim, o campo elétrico pode ser representado na Equação 4:

$$\vec{E}_j(x, z) = \vec{e}_y (A_j e^{ik_{j,z}z} + B_j e^{-ik_{j,z}z}) e^{-iqx} \quad (4)$$

Sabe-se que,  $z$  é a representação do componente  $z$  do vetor de onda,  $j$  refere-se a constante dielétrica na  $j$ -ésima camada e a variável  $q$  corresponde ao vetor de ondas ao longo do eixo  $x$ . As variáveis  $A$  e  $B$  são determinadas por meio das condições

de continuidade nos componentes tangenciais dos campos elétrico e magnético (SEGOVIA-CHAVES; VINCK-POSADA, 2018).

Os cristais fotônicos podem ser compostos pela combinação de materiais do tipo dielétrico, metamaterial, metal, supercondutor e semicondutor. Assim, o cristal fotônico é constituído por materiais com propriedades distintas, as quais combinadas fornecem características favoráveis para se trabalhar com diversas aplicações, dependendo da necessidade do projeto (SEGOVIA-CHAVES; VINCK-POSADA, 2019a).

Os cristais fotônicos são reconhecidos como uma recente classe de materiais ópticos que se caracterizam como artificiais, e apresentam modulação periódica, no que se refere a um período que abrange o comprimento de onda das ondas eletromagnéticas para os índices de refração concernentes aos materiais em sua composição (SEGOVIA-CHAVES; VINCK-POSADA, 2018).

Para se trabalhar com cristais fotônicos é necessário manipular os intervalos de PBG, para isso são inseridos defeitos no cristal de maneira que interrompa a periodicidade da estrutura. Isso faz com que ocorra o surgimento de modos eletromagnéticos nas cavidades defeituosas do cristal fotônico, ou seja, no intervalo de PBG. Assim, é possível manipular as características do defeito inserido para melhorar a performance do fator de qualidade e analisar a energia armazenada em razão da energia dissipada na estrutura, modificando os parâmetros da estrutura até obter um resultado satisfatório (SEGOVIA-CHAVES; VINCK-POSADA, 2018).

O cristal fotônico apresenta uma estrutura que possibilita controlar o intervalo de frequência a ser utilizado, contanto com a relação do índice de refração para se obter um intervalo de PBG completo. Desse modo, possibilita a aplicação para cavidades ressonantes, que possuem alto fator de qualidade ao apresentar espectros ressonantes estreitos (DANTAS-YOSHIDA; RODRÍGUEZ-ESQUERRE; ISÍDIO-LIMA, 2013).

A largura do intervalo de PBG é pela Equação 5, sendo a borda da faixa esquerda representada por  $\lambda_L$  e a borda da faixa direita definida por  $\lambda_R$ :

$$\lambda_L = \frac{\pi(n_H d_H + n_L d_L)}{\cos^{-1}\left(\frac{-n_H - n_L}{n_H + n_L}\right)}, \lambda_R = \frac{\pi(n_H d_H + n_L d_L)}{\cos^{-1}\left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}\right)} \quad (5)$$

Sendo que, o  $n_H$  refere-se ao índice de refração do material com o maior valor de desse índice e  $d_H$ , referente a espessura das camadas do material com maior índice de refração, o  $n_L$  e  $d_L$  correspondem, respectivamente, ao índice de refração e a espessura do material com menor índice de refração na estrutura (SEGOVIA-CHAVES; VINCK-POSADA, 2018).

Os materiais utilizados nas estruturas fotônicas apresentam índices de refração inerentes as suas propriedades. Uma vez que ocorre a interferência da variação da temperatura pode ocorrer o aumento ou a diminuição do índice de refração desses materiais. Tal fato se justifica por ocorrer variações na polarização por unidade de volume relacionada a constituição do material (DANTAS-YOSHIDA; RODRÍGUEZ-ESQUERRE; ISÍDIO-LIMA, 2013).

O índice de refração, considerando o efeito termo-óptico, pode ser calculado considerando a variação da temperatura é dado pela Equação 6:

$$n(T) = n_0(1 + \beta\Delta T) \quad (6)$$

Sendo que o  $n_0$  corresponde ao índice de refração de cada camada na temperatura ambiente e  $\beta$  é definido como o coeficiente termo-óptico do material e  $\Delta T$  a variação da temperatura (SEGOVIA-CHAVES; VINCK-POSADA, 2018). No caso da relação do índice de refração com a expansão térmica, a espessura para as camadas é definida pela a Equação 7:

$$d(T) = d_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (7)$$

Sabendo que  $d_0$  é a espessura para cada uma das camadas ao considerar a temperatura ambiente, o  $\alpha$  corresponde ao coeficiente de expansão térmica e  $\Delta T$  a variação da temperatura (SEGOVIA-CHAVES; VINCK-POSADA, 2018).

$$T_t = 1 + R \quad (8)$$

A transmissividade pode ser definida por meio da relação com a reflexão, como apresentada na Equação 8 (LEE, 1986). Desse modo,  $T_t$  corresponde a transmissividade e  $R$  refere-se a reflexão.

Para levar em conta os efeitos da variação de temperatura na PBS, os parâmetros relevantes, como o índice de refração do material, podem ser modelados como funções dependentes da temperatura. Isso permite calcular as propriedades das PBS em diferentes temperaturas e estudar como elas variam com a temperatura (YAO *et al.*, 2019).

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 CASOS SIMULADOS DE CRISTAL FOTÔNICO UNIDIMENSIONAL

##### 3.1.1 Caso 1: Cristal Fotônico Unidimensional com BGO e SiO<sub>2</sub>

A estrutura em estudo consiste de um cristal fotônico unidimensional, o qual é composto por camadas alternadas de Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub> (BGO) e Silica (SiO<sub>2</sub>). Neste estudo foi realizada uma simulação no *software* Comsol© com o intuito de verificar a transmissividade do cristal fotônico na região do defeito de SiO<sub>2</sub> inserido na estrutura, para a frequência ressonante em um comprimento  $\lambda$  de onda igual a 500 nm, que consiste no espectro de luz visível. Essa estrutura foi baseada nos trabalhos de Segovia-Chaves; Vinck-Posada (2018).

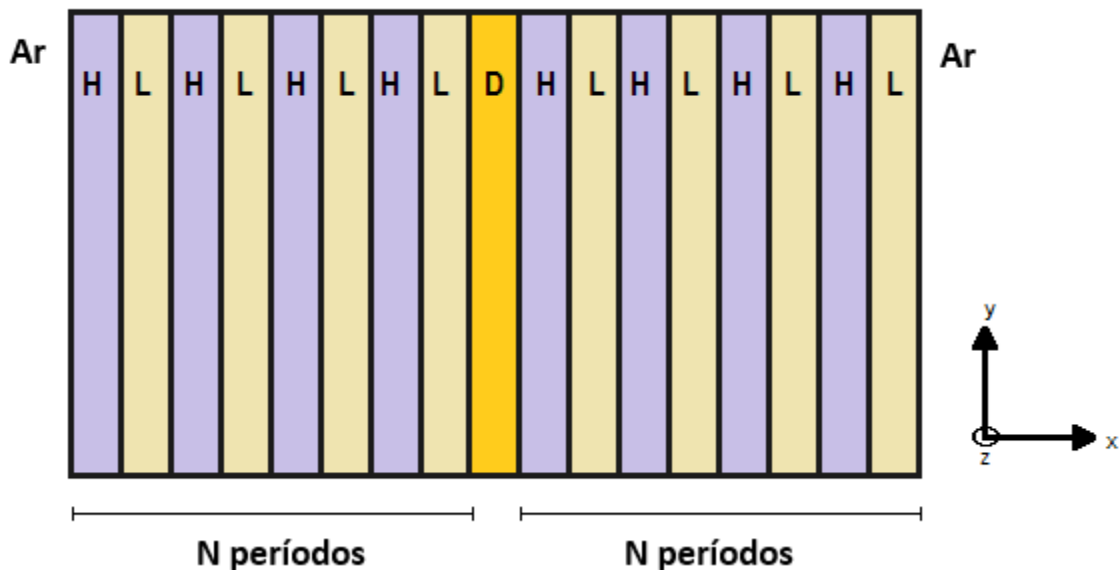


Figura 7: Estrutura do cristal fotônico unidimensional simulado.

A estrutura do cristal fotônico pode ser observada por meio da Figura 7. De modo que, tanto na lateral direita, quanto na lateral esquerda é apresentada uma camada de ar. Por conseguinte, é expressa uma estrutura periódica do cristal fotônico, em que a camada H corresponde ao BGO, com espessura de 54,34 nm, e a camada



L refere-se ao SiO<sub>2</sub>, com espessura de 86,20 nm. Nessa estrutura foi inserido um defeito de SiO<sub>2</sub>, após o período igual a 6, assim, a camada D corresponde ao defeito.

| Material         | Coeficiente de expansão térmica | Coeficiente Termo-óptico (C <sup>-1</sup> ) |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|
| BGO              | $6,3 \times 10^{-6}$            | $3,9 \times 10^{-5}$                        |
| SiO <sub>2</sub> | $5,5 \times 10^{-7}$            | $1,0 \times 10^{-5}$                        |

Tabela 2: Coeficientes de expansão térmica e coeficientes termo-ópticos dos materiais BGO e SiO<sub>2</sub>.

Na Tabela 2 são apresentados os valores do coeficiente termo-óptico, como também, o coeficiente de expansão térmica dos materiais que compõem o cristal fotônico unidimensional. A variação de temperatura utilizada para verificar o comportamento ressonante da cavidade do cristal fotônico corresponde a faixa de 25° C até 300° C. Desse modo, foi possível verificar a variação do índice de refração de cada material do cristal fotônico para cada valor variável da temperatura.

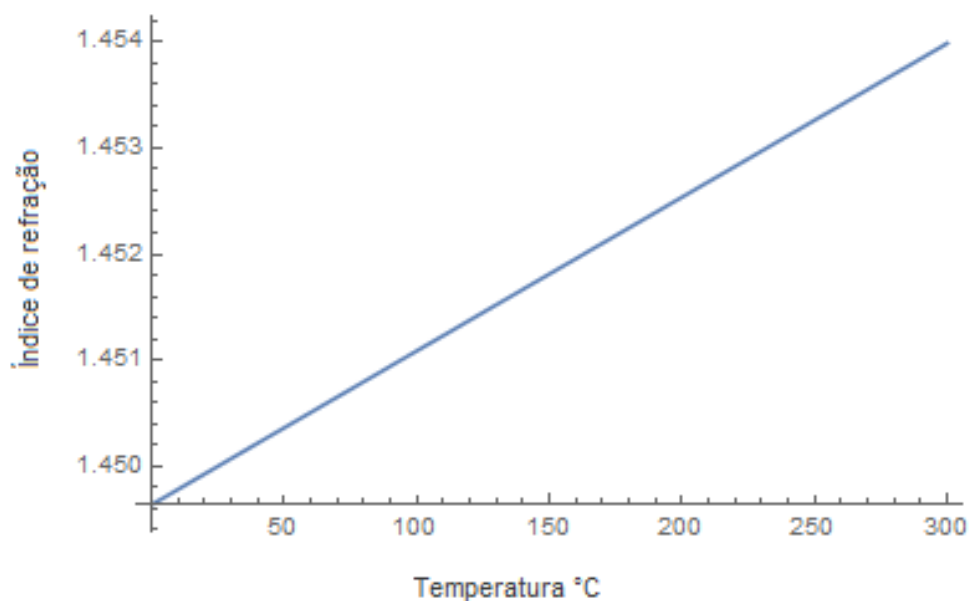


Figura 8: Variação do índice de refração do SiO<sub>2</sub> em função da temperatura.

A Figura 8 apresenta a relação alteração do índice de refração da Sílica em função da variação da temperatura na estrutura do cristal fotônico. Percebe-se que, existe um crescimento linear no valor do índice de refração com o aumento da temperatura. A estrutura estudada é constituída na ordem de nanômetros e implica que pequenas alterações nos valores das variáveis envolvidas na estrutura resultam em resultados diferentes.

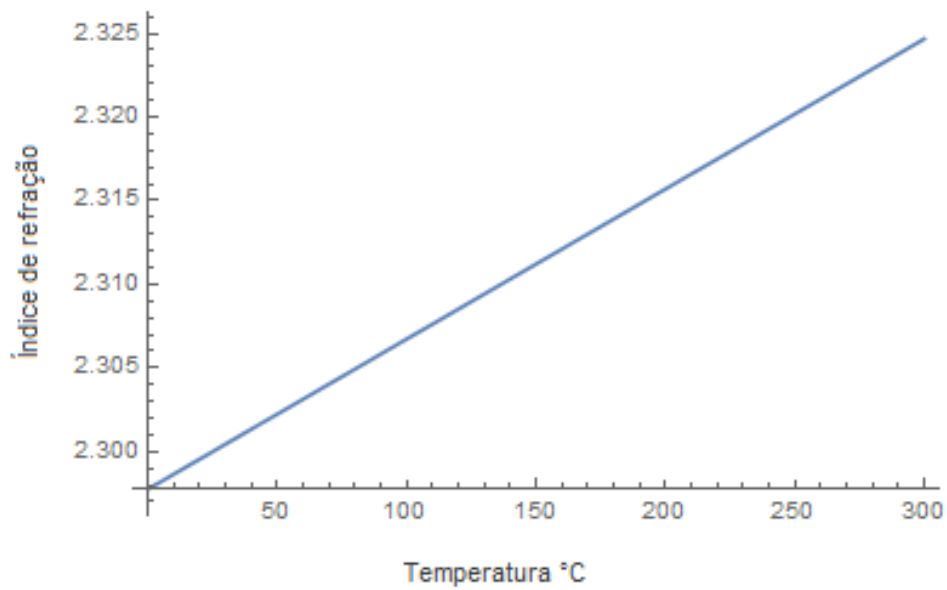


Figura 9: Variação do índice de refração do BGO em função da temperatura.

A Figura 9 expressa a relação da variação do índice de refração do BGO em função da temperatura. Observa-se que, apenas de os valores do índice de refração do BGO ser diferente do  $\text{SiO}_2$ , o comportamento variável com a temperatura também se apresenta linear e proporcional as mudanças térmicas. A Figura 10 ilustra o resultado da transmissividade obtida na cavidade ressonante do cristal fotônico.

Na Figura 10 houve uma taxa de transmissividade para  $\Delta T = 0^\circ\text{C}$  para o comprimento de onda central 500 nm. A porcentagem de absorção se aproxima de 90%, obedecendo a largura do intervalo de PBG tanto na borda da faixa esquerda representada por  $\lambda_L$  e a borda da faixa direita definida por  $\lambda_R$ .

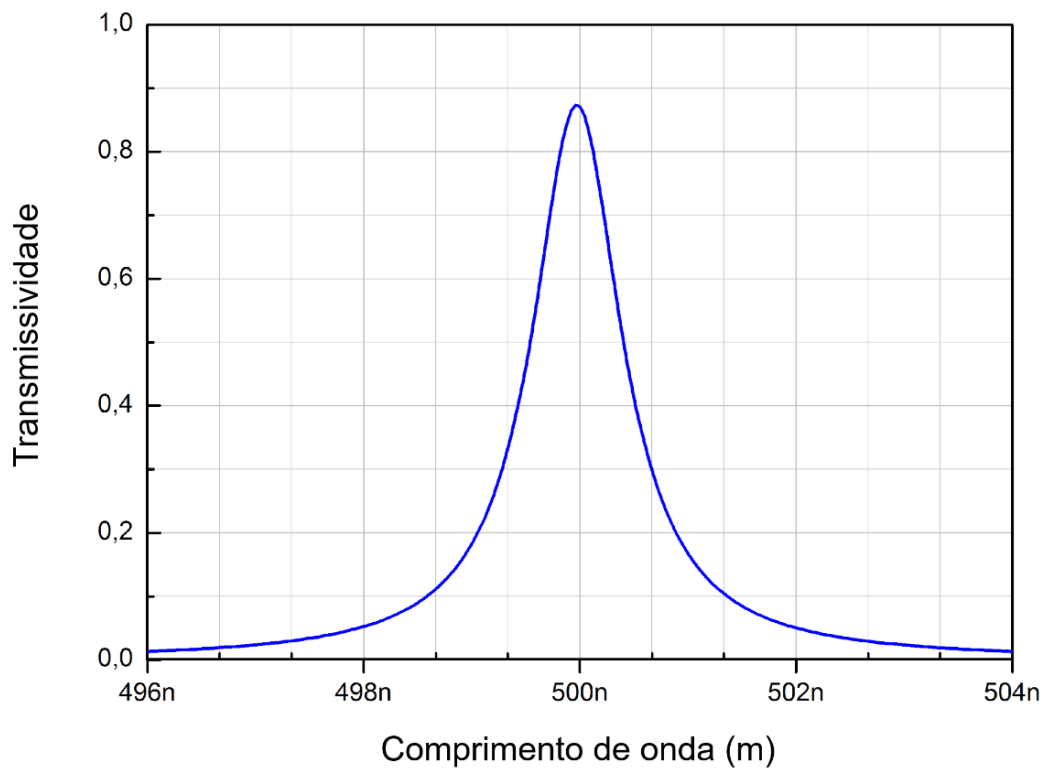


Figura 10: Espectro de transmissividade em função do comprimento de onda para  $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$  com visualização aproximada para os materiais BGO e  $\text{SiO}_2$ .

Na Figura 11, estão ilustrados os espectros de transmissividade da cavidade ressonante do cristal fotônico sob a influência da variação de temperatura. Desse modo, destacam-se os espectros de transmissividade com diferentes picos ressonantes, os quais, são resultados da variação de temperatura até  $T=300^{\circ}\text{C}$ , observa-se que há um deslocamento para o vermelho.

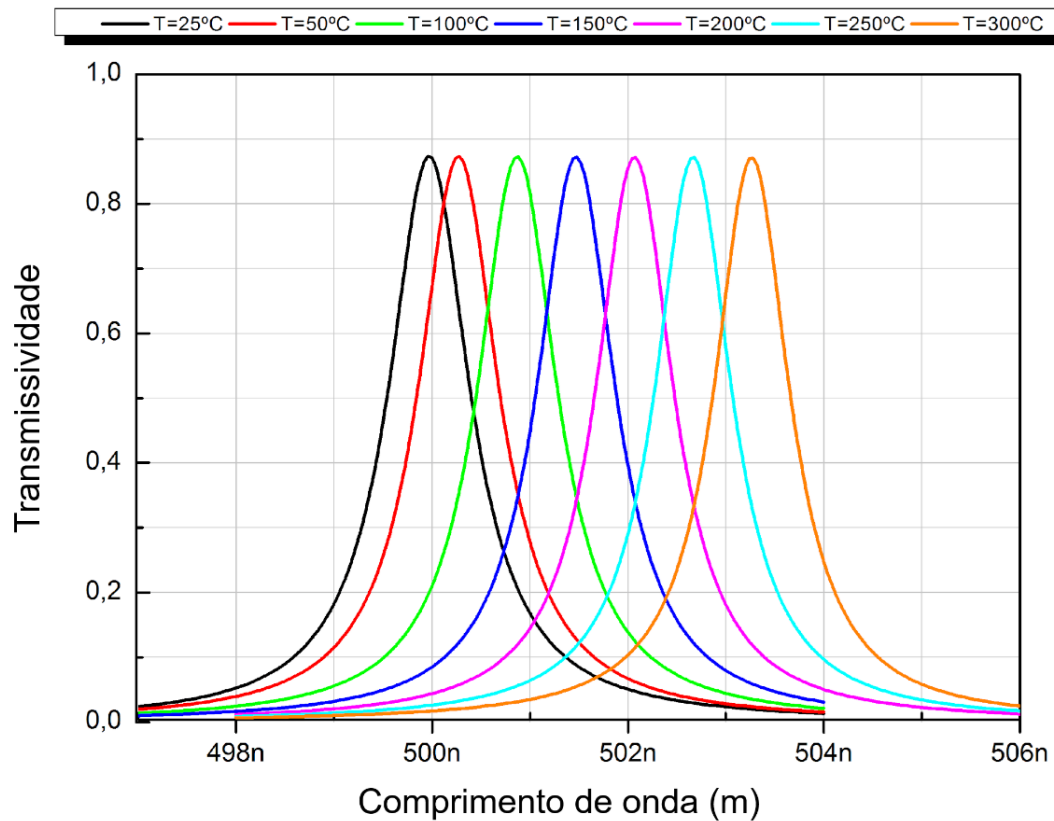


Figura 11: Espectro de transmissividade em função do comprimento de onda com variação da temperatura de 25°C a 300°C para os materiais BGO e SiO<sub>2</sub>.

Na Figura 11, ocorreu uma variação do pico de transmissividade com relação ao comprimento de onda central. Isso significa que, à medida que a temperatura aumentou, o pico ressonante variou para a direita, ou seja, o comprimento de onda foi alterado. Assim, para a temperatura de 300° C o valor do comprimento de onda ultrapassou os 503 nm. Constata-se que, essa variação da temperatura e do comprimento de onda ressonante tem relação direta com a alteração do índice de refração, que se modifica em decorrência da temperatura.

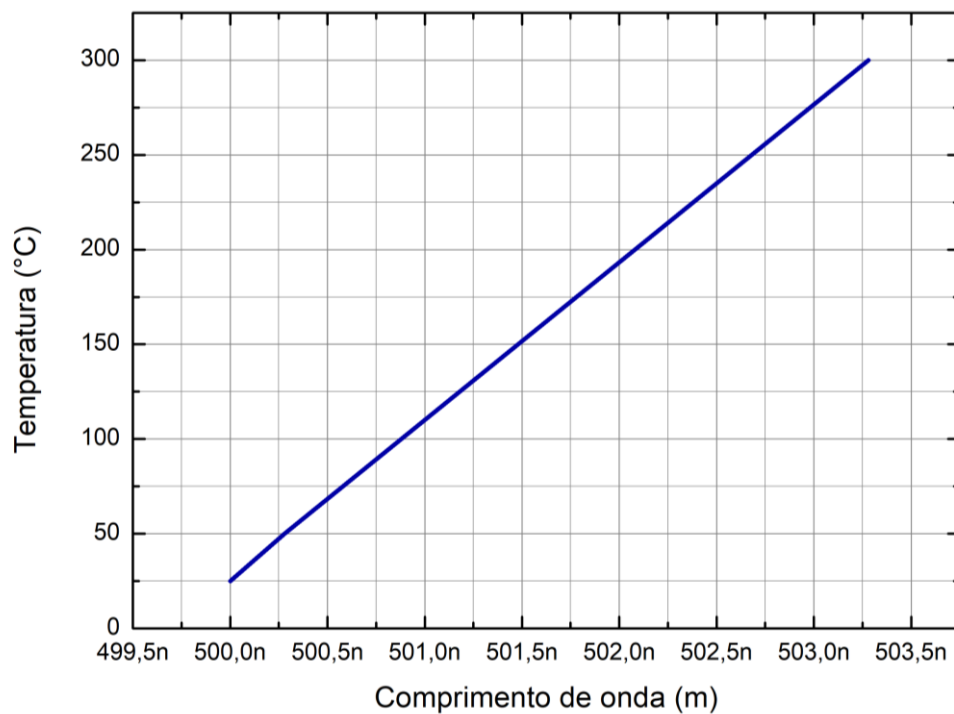


Figura 12: Variação do comprimento de onda para BGO e SiO<sub>2</sub> em função da temperatura.

A Figura 12 ilustra a relação linear entre a temperatura e o comprimento de onda em uma estrutura de cristal fotônico unidimensional com um defeito integrado. Nota-se que, com a variação da temperatura, o comprimento de onda central é deslocado para valores acima de 500 nm na combinação de BGO e SiO<sub>2</sub>. Isso aponta que a transmissividade permanece eficiente para distintos modos ressonantes à medida que a temperatura aumenta.

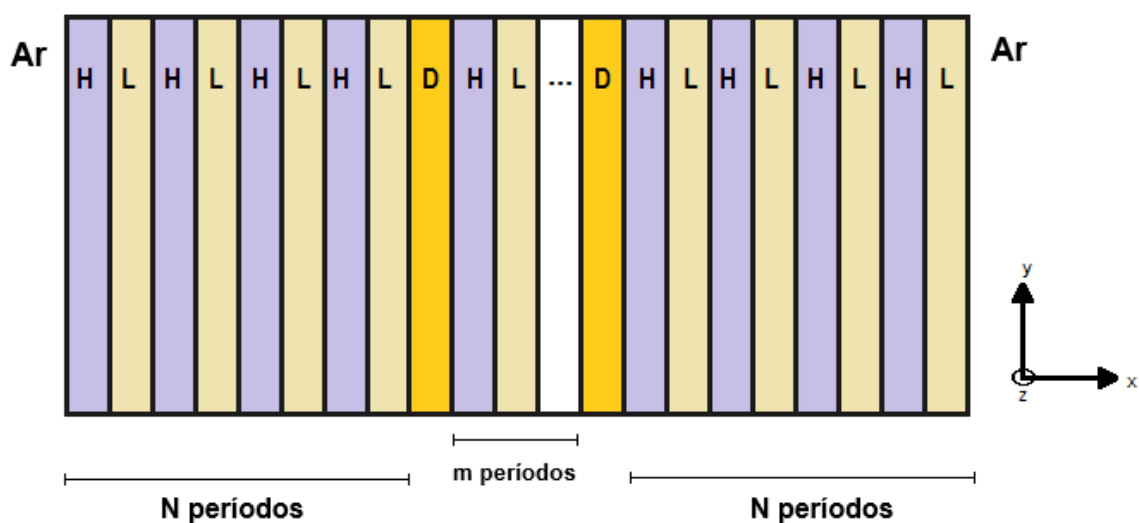
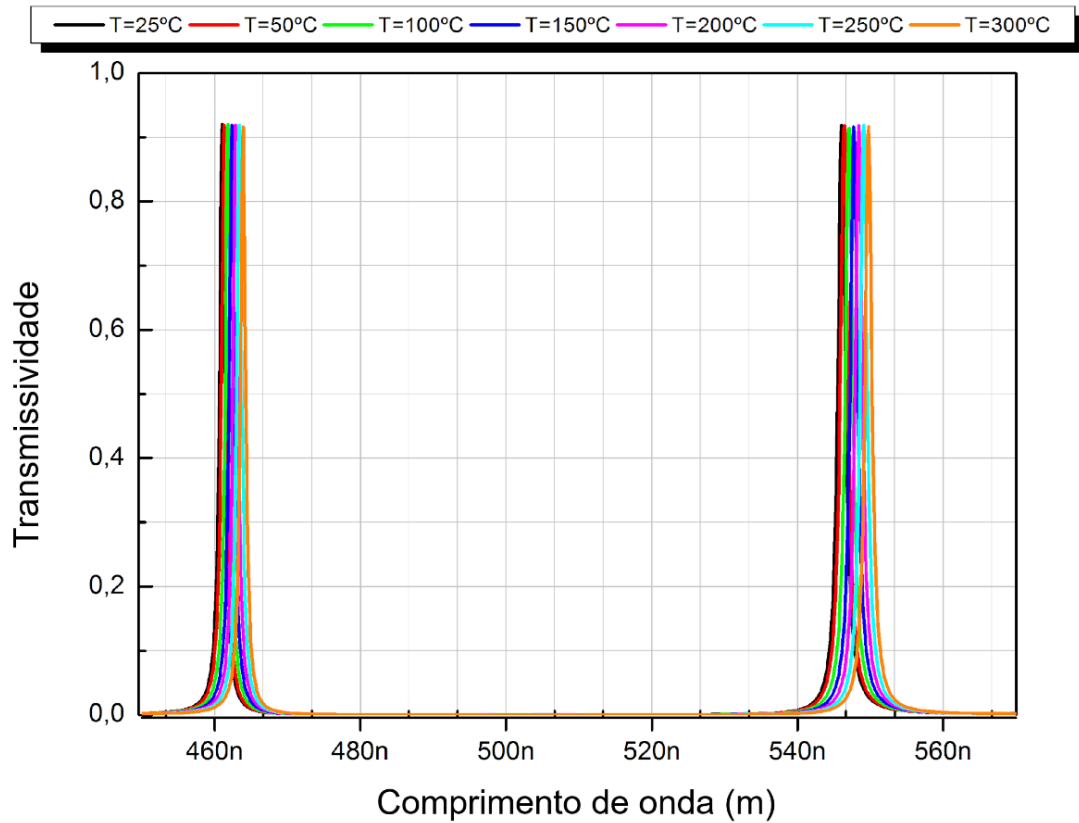


Figura 13: Estrutura do cristal fotônico unidimensional com dois defeitos inseridos.

Na Figura 13, é ilustrada uma estrutura de cristal fotônico unidimensional com dois defeitos inseridos. Assim, considerando o esquema de uma cavidade ressonante com dois defeitos, verifica-se que, o H representa a camada com o material com o maior valor de índice de refração e o L com o menor valor de índice de refração, o D corresponde ao defeito inserido. O N refere-se à periodicidade das camadas do cristal fotônico e o m refere-se ao período das camadas entre os defeitos.



(a)

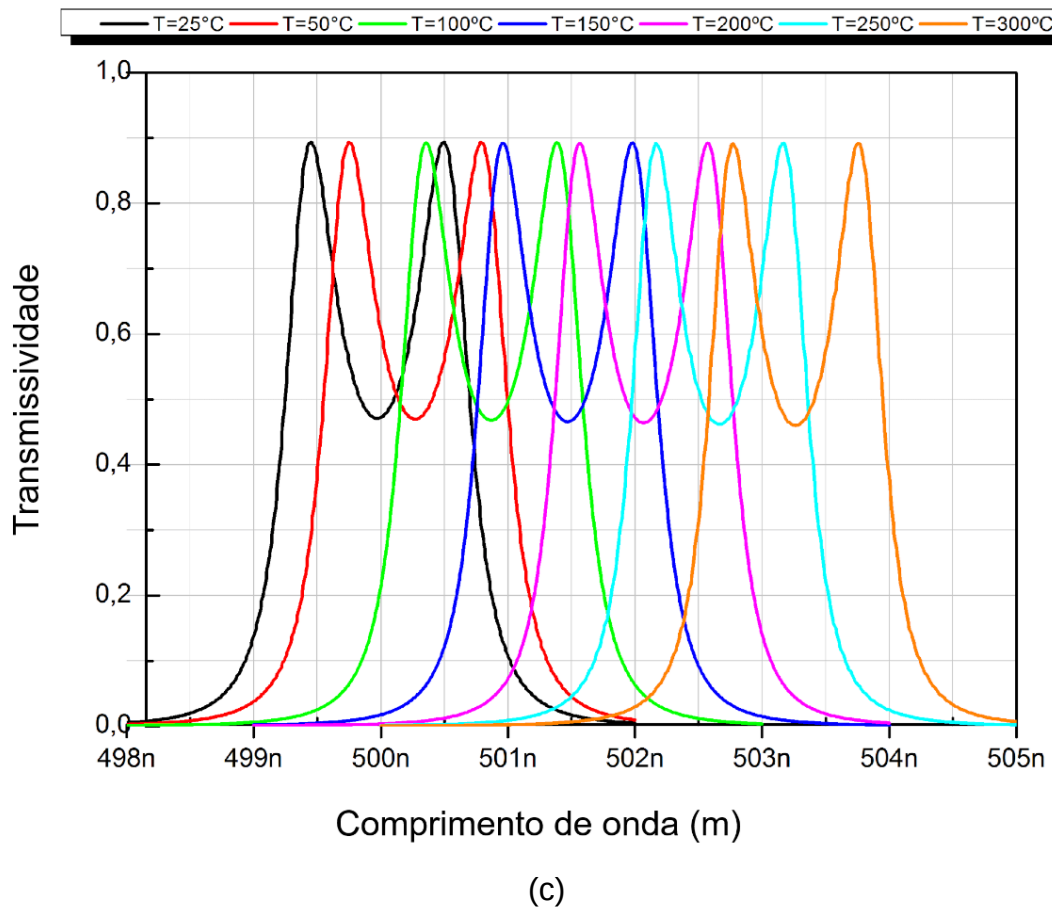
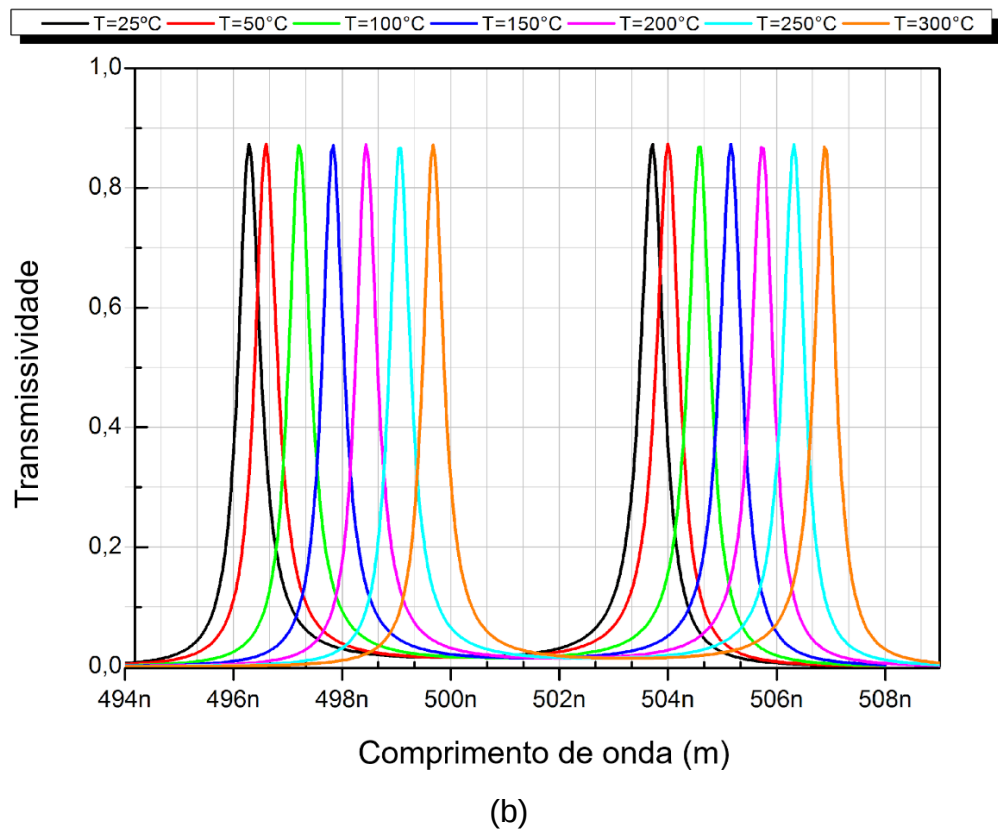


Figura 14: Espectros de transmissão para um cristal fotônico unidimensional com camadas de BGO e  $\text{SiO}_2$  com dois defeitos em função da temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  a  $300^{\circ}\text{C}$  para (a)  $m=1$  (b)  $m=6$  (c)  $m=10$ .

Observa-se na Figura 14 (a), (b) e (c) que, a transmissão está acima de 80% em todos os casos, conforme a periodicidade de  $m$  diminui ocorre o acoplamento entre os defeitos, resultando na redução da degeneração dos modos eletromagnéticos, que se apresenta quando aumenta o período de  $m$ . Com o aumento da distância entre as cavidades ressonantes, tendência o aumento do confinamento do modo dos dois defeitos, nesse caso, o acoplamento diminui. Observa-se que, o pico ressonante central dos dois defeitos na Figura 14 (a), (b) e (c), não se concentram em  $\lambda=500\text{nm}$ . A distância ou divisão entre os picos ressonantes das duas cavidades é representada por  $\Delta$ , e serve de referência para determinar quantitativamente o acoplamento entre os modos dos defeitos do cristal fotônico unidimensional.

### 3.1.2 Caso 2: Cristal Fotônico Unidimensional com GaAs e SiO<sub>2</sub>

A estrutura ilustrada na Figura 7 também serviu de base para realizar um estudo utilizando os materiais GaAs, com espessura de 37,89 nm e SiO<sub>2</sub>, com espessura de 86,20 nm, constituindo as camadas alternadas do cristal fotônico unidimensional. A simulação realizada foi por meio do *software* Comsol©. Foram analisados os mesmos quesitos do primeiro caso apresentado anteriormente, para os materiais BGO e SiO<sub>2</sub>. Desse modo, verificou-se o resultado da transmissividade do cristal fotônico na região do defeito de SiO<sub>2</sub> inserido na estrutura, para a frequência ressonante em um comprimento  $\lambda$  de onda igual a 500 nm.

| Material         | Coeficiente de expansão térmica | Coeficiente termo-óptico (C <sup>-1</sup> ) |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|
| GaAs             | $5,73 \times 10^{-6}$           | $2,5 \times 10^{-4}$                        |
| SiO <sub>2</sub> | $5,5 \times 10^{-7}$            | $1,0 \times 10^{-5}$                        |

Tabela 3: Coeficientes de expansão térmica e coeficientes termo-ópticos dos materiais GaAs e SiO<sub>2</sub>.

Os coeficientes de expansão termo-óptica e térmica dos GaAs e SiO<sub>2</sub> são apresentados na Tabela 3. Esses coeficientes são fundamentais para verificar o comportamento dos parâmetros índice de refração e espessura das camadas do cristal fotônico unidimensional a medida que a temperatura varia de 25°C a 300°C.



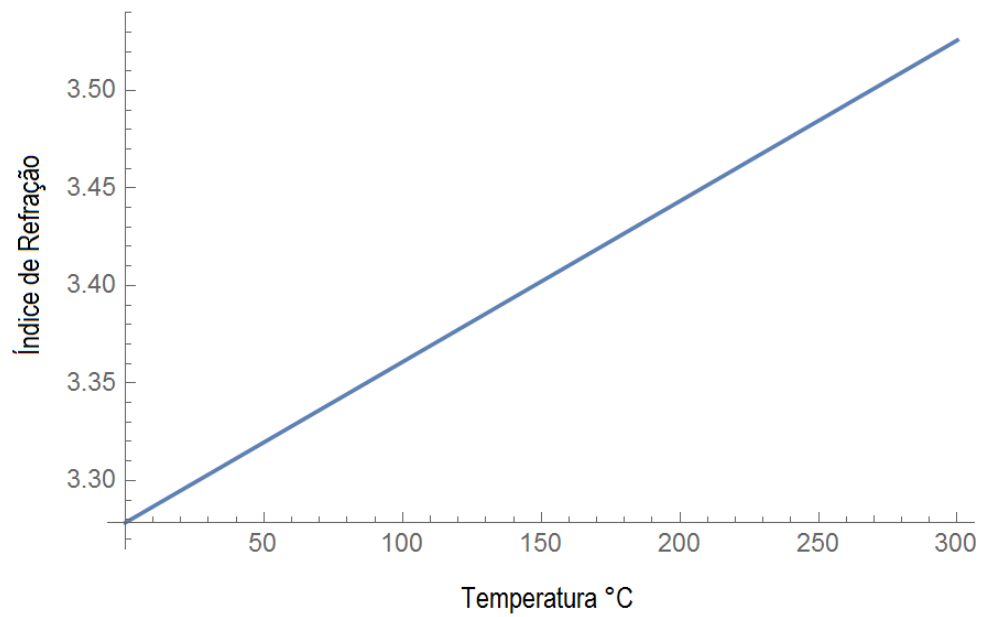


Figura 15: Variação do índice de refração do GaAs em função da temperatura.

A Figura 15, apresenta a relação da variação do índice de refração do GaAs em função da temperatura. Desse modo, observa-se um comportamento linear e proporcional as mudanças térmicas, referente a relação do índice de refração com a alteração do valor da temperatura.

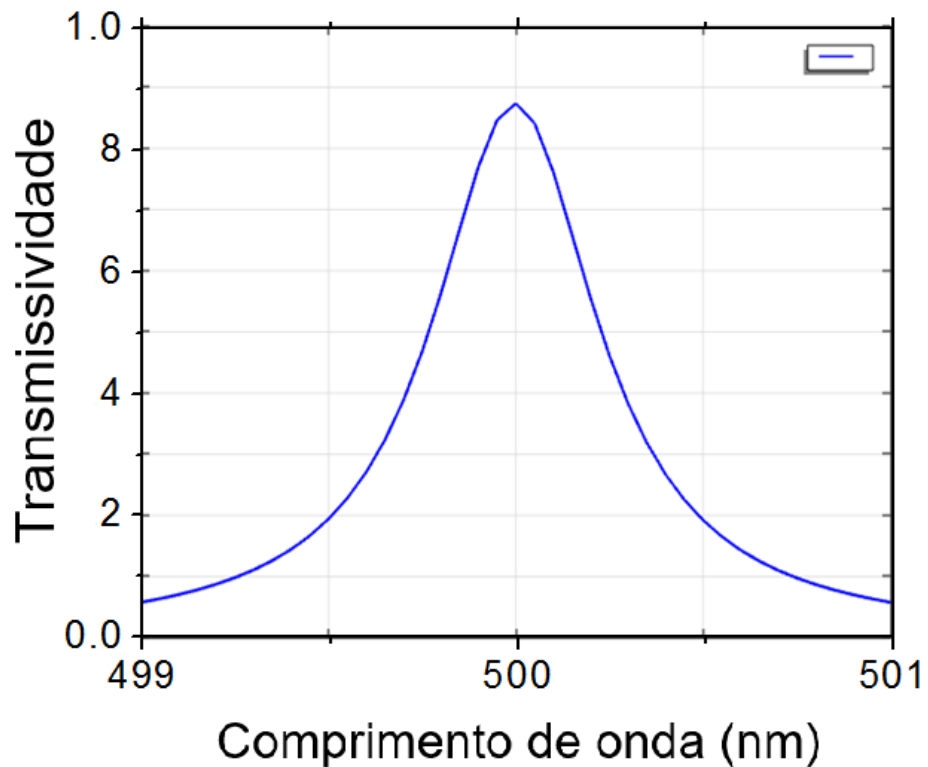


Figura 16: Espectro de transmissão da cavidade ressonante cristal fotônico unidimensional para GaAs e SiO<sub>2</sub> com um defeito.

Na Figura 16, percebe-se que houve uma taxa de transmissividade para  $\Delta T = 0^\circ\text{C}$  para o comprimento de onda central 500 nm. Desse modo, observa-se que a porcentagem de absorção é superior a 87%, aproximando de 90%, com a inserção do defeito de  $\text{SiO}_2$  obedecendo a largura do intervalo de PBG tanto na borda da faixa esquerda representada por  $\lambda_L$  e a borda da faixa direita definida por  $\lambda_R$ .

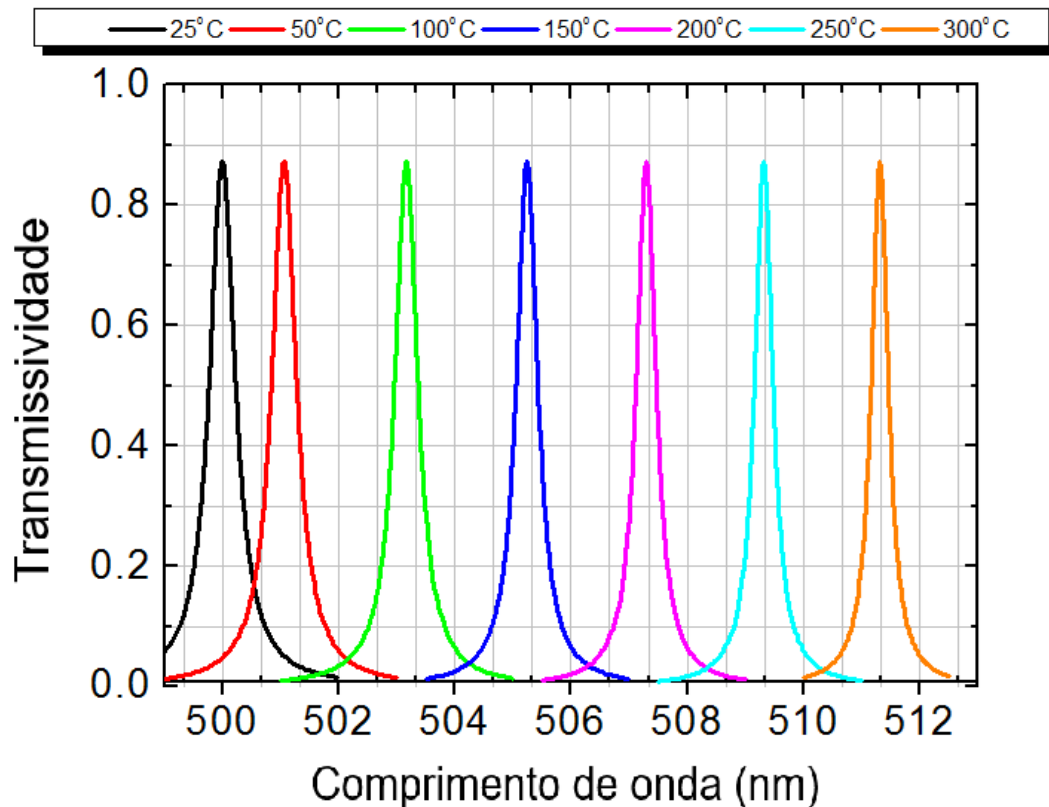


Figura 17: Espectro de transmissividade em função do comprimento de onda com variação da temperatura de 25°C a 300°C para os materiais GaAs e  $\text{SiO}_2$  no cristal fotônico unidimensional com um defeito.

Ao variar a temperatura 25°C a 300°C, houve uma mudança no posicionamento do pico ressonante do defeito inserido do cristal fotônico. Tal fato foi resultante do aumento do contraste dos índices de refração dos materiais. A Figura 17 apresenta os modos ressonantes para diferentes valores de temperatura de 25°C a 300°C. Verifica-se que, para a temperatura  $T = 300^\circ\text{C}$  houve um deslocamento de 500nm para próximo de 511nm.

Com a variação de temperatura de 25 °C a 300 °C ocorre um deslocamento para o vermelho no comprimento de onda ressonante devido à mudança do índice de refração que é ilustrado na Figura 18. O coeficiente térmico é linear com um valor de 40,72 pm/°C.

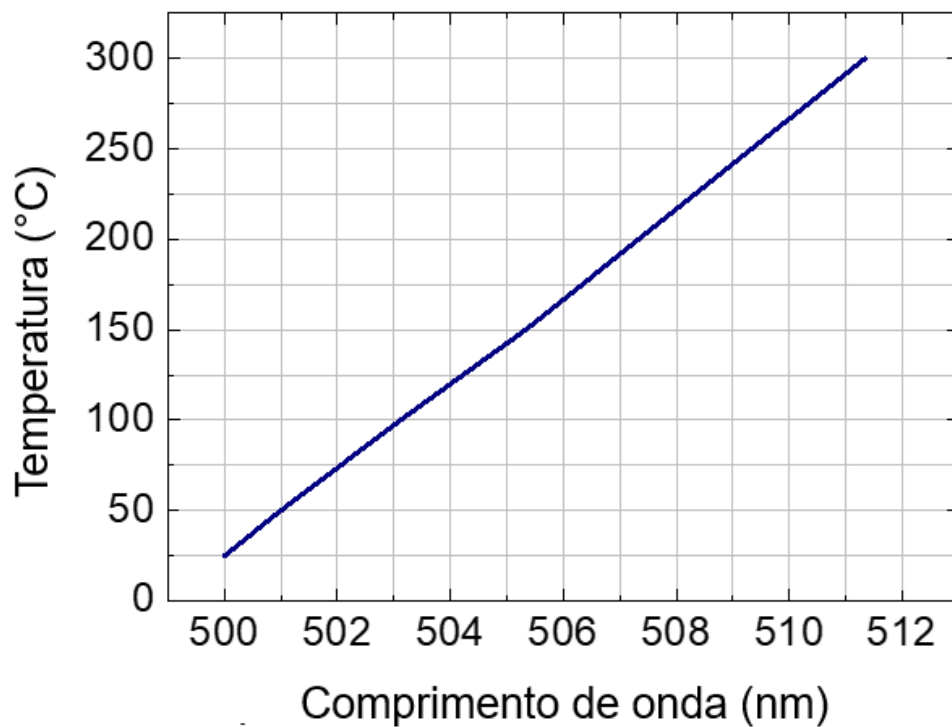
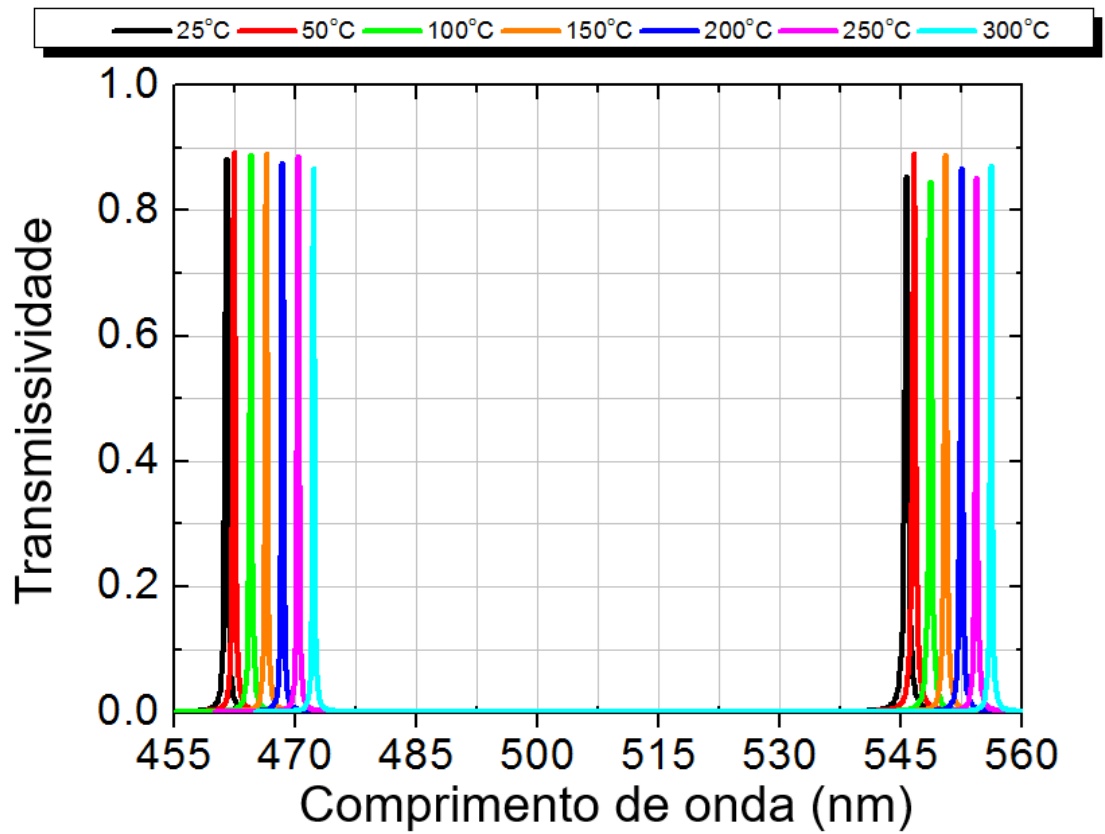


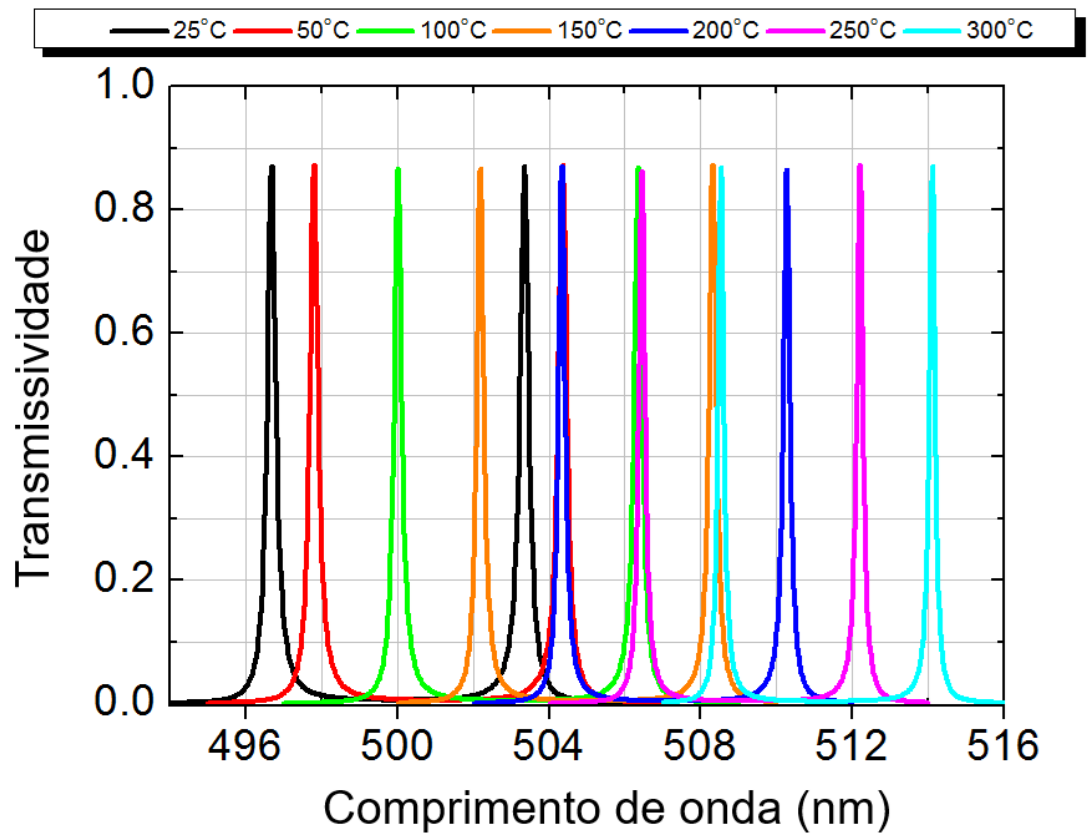
Figura 18: Variação do comprimento de onda para GaAs e SiO<sub>2</sub> em função da temperatura.

A Figura 18 apresenta a relação linear entre a temperatura e o comprimento de onda para a estrutura do cristal fotônico unidimensional com um defeito inserido. Verifica-se que, conforme varia a temperatura, o comprimento de onda central é modificado para valores maiores que 500nm para a combinação de GaAs e SiO<sub>2</sub>. Isso indica que a transmissividade apresentará valores eficientes para modos ressonantes diferentes com o aumento da temperatura.

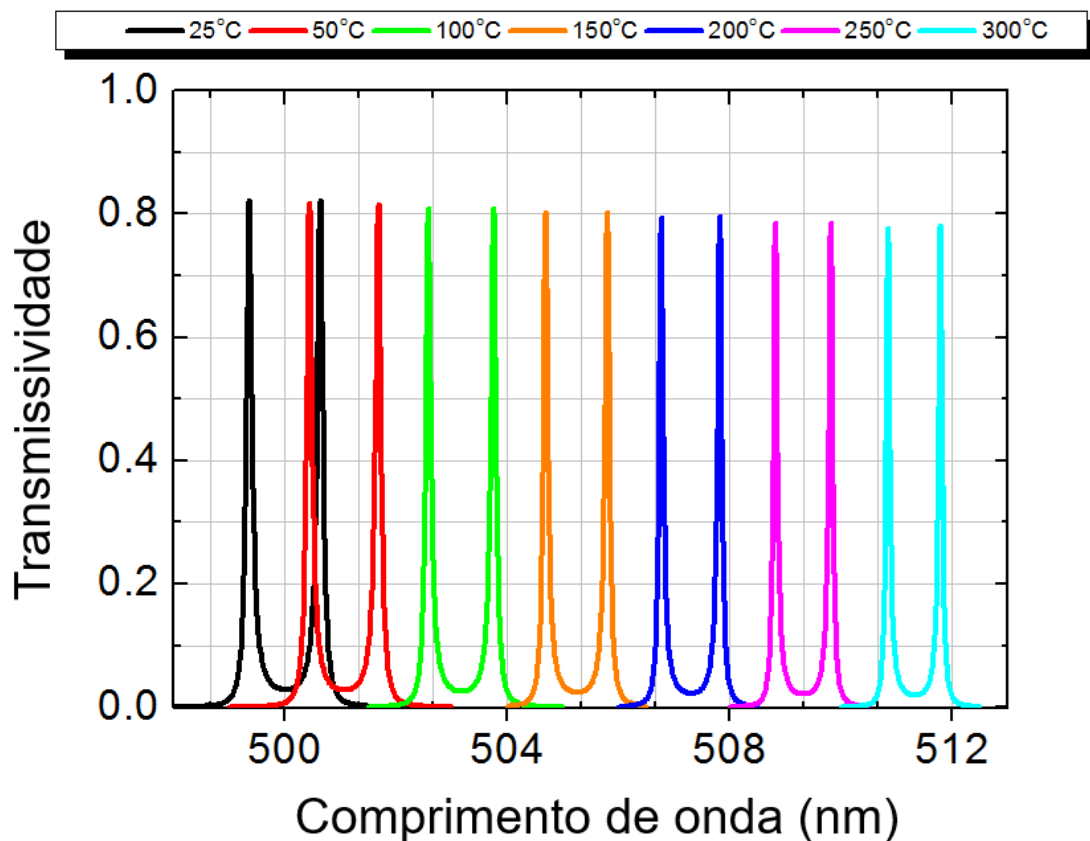
A Figura 13 que ilustra uma estrutura de cristal fotônico unidimensional com dois defeitos inseridos. Também serviu de base para realizar um estudo utilizando os materiais GaAs, com espessura de 37,89 nm e SiO<sub>2</sub>, com espessura de 86,20 nm, constituindo as camadas alternadas do cristal fotônico. A Figura 19 ilustra o resultado do espectro de transmissividade simulado para o cristal fotônico com dois defeitos inseridos.



(a)



(b)



(c)

Figura 19: Espectros de transmissão para um cristal fotônico unidimensional com camadas de GaAs e SiO<sub>2</sub> com dois defeitos em função da temperatura de 25°C a 300°C para (a)  $m = 1$  (b)  $m = 4$  (c)  $m = 8$ .

Na Figura 19, nota-se que, a transmissão está acima de 80% em todos os casos. Quando o número de períodos entre os defeitos aumenta, a separação entre os dois comprimentos de onda ressonantes é menor. Além disso, os picos ressonantes são igualmente espaçados de  $\lambda_0 = 500\text{nm}$ . Os dois picos experimentam um deslocamento para o vermelho quando a temperatura aumenta. O comprimento de onda da posição do pico exibe uma dependência linear com a temperatura com um coeficiente igual a 36,66 pm/°C para  $m=1$ , 39,44 pm/°C para  $m=4$  e 39,16 pm/°C.

### 3.1.3 Caso 3: Cristal Fotônico Unidimensional com Si e SiO<sub>2</sub>

A estrutura ilustrada na Figura 7 também serviu de base para realizar um estudo utilizando os materiais Si, com espessura de 107,88 nm e SiO<sub>2</sub>, com espessura de 259,69 nm, constituindo as camadas alternadas do cristal fotônico unidimensional.

Para esse caso também foi utilizado o *software* Comsol© para simulação. Foram analisados os mesmos quesitos que o primeiro e o segundo casos apresentados anteriormente, para os materiais BGO e SiO<sub>2</sub>, e GaAs e SiO<sub>2</sub>. Desse modo, verificou-se o resultado da transmissividade do cristal fotônico na região do defeito de SiO<sub>2</sub> inserido na estrutura, para a frequência ressonante em um comprimento  $\lambda$  de onda igual a 1500 nm, que é a faixa de comprimento de onda para a aplicação em comunicações ópticas.

| Material         | Coeficiente de expansão térmica | Coeficiente termo-óptico (C <sup>-1</sup> ) |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|
| Si               | $2,5 \times 10^{-6}$            | $1,8 \times 10^{-4}$                        |
| SiO <sub>2</sub> | $5,5 \times 10^{-7}$            | $1,0 \times 10^{-5}$                        |

Tabela 4: Coeficientes de expansão térmica e coeficientes termo-ópticos dos materiais Si e SiO<sub>2</sub>.

Os coeficientes de expansão termo-óptica e térmica dos Si e SiO<sub>2</sub> são apresentados na Tabela 4. Esses coeficientes são essenciais para analisar a variação dos parâmetros de índice de refração e espessura das camadas do cristal fotônico unidimensional conforme a temperatura varia de 25°C a 300°C.

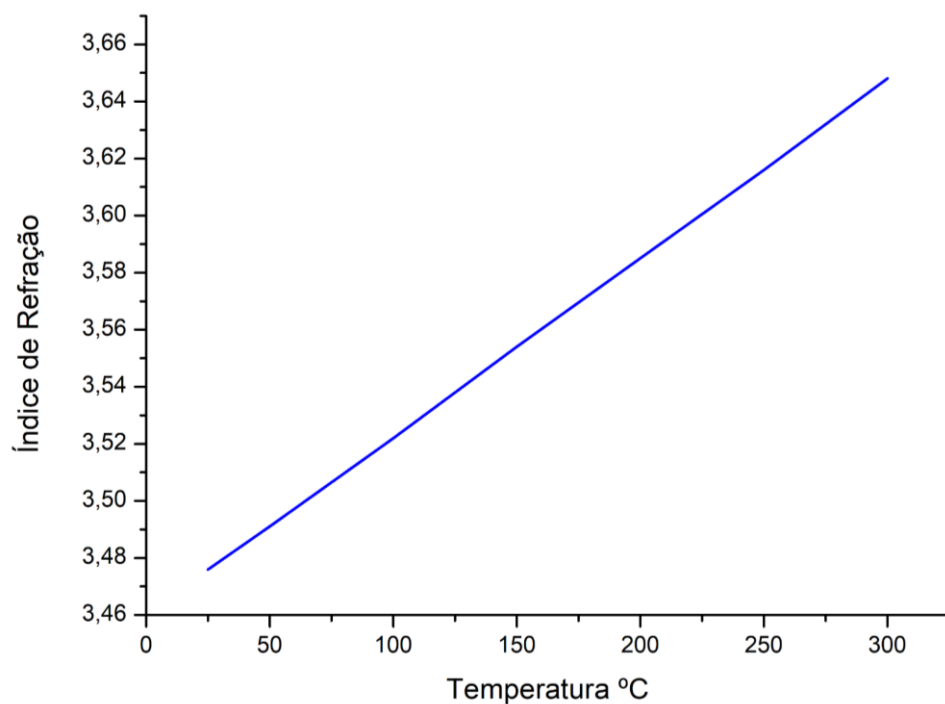


Figura 20: Variação do índice de refração do Si em função da temperatura.

A Figura 20 mostra a relação entre a variação do índice de refração do Si e a temperatura. Observa-se um comportamento linear, proporcional às mudanças

térmicas, indicando que o índice de refração varia de forma diretamente relacionada com o aumento da temperatura.

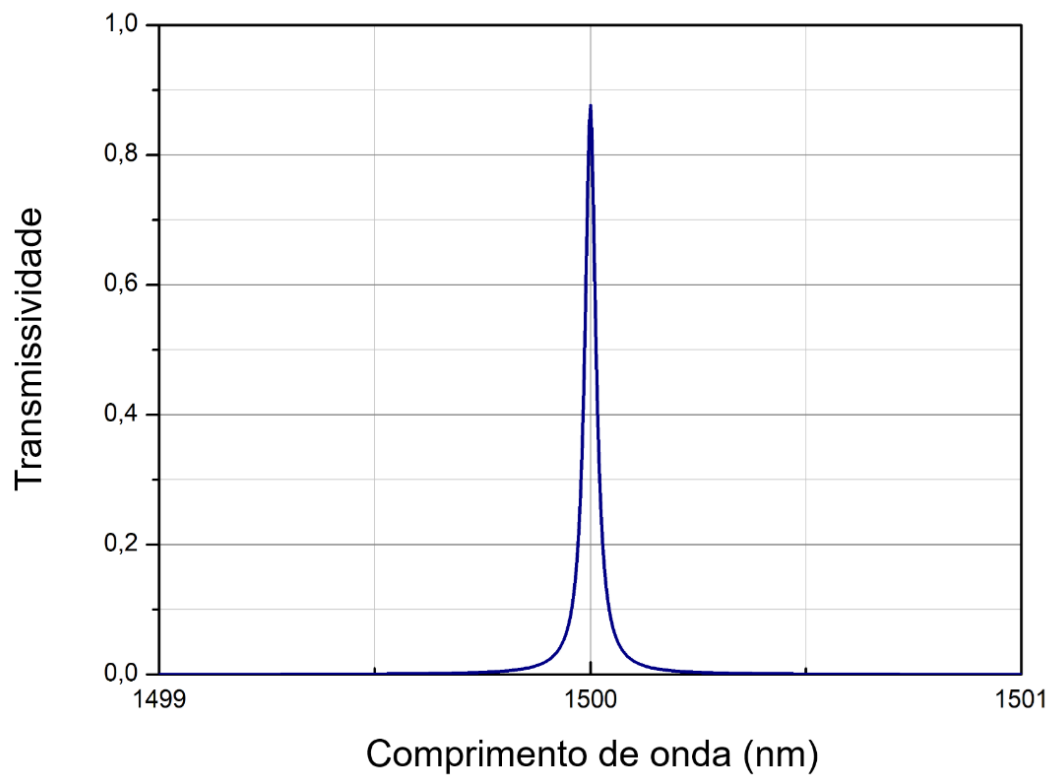


Figura 21: Espectro de transmissão da cavidade ressonante cristal fotônico unidimensional para Si e SiO<sub>2</sub> com um defeito.

A Figura 21 indica que houve uma taxa de transmissividade para  $\Delta T = 0^\circ\text{C}$  para o comprimento de onda central 1500 nm. O nível de transmissividade aproximou-se da porcentagem chegando próximo de 87%. A análise consiste no cristal fotônico com um defeito de SiO<sub>2</sub> obedecendo a largura do intervalo de PBG na borda da faixa esquerda  $\lambda_L$  e na borda da faixa direita  $\lambda_R$ . O pico ressonante está indicado no comprimento de onda de operação de 1500nm.

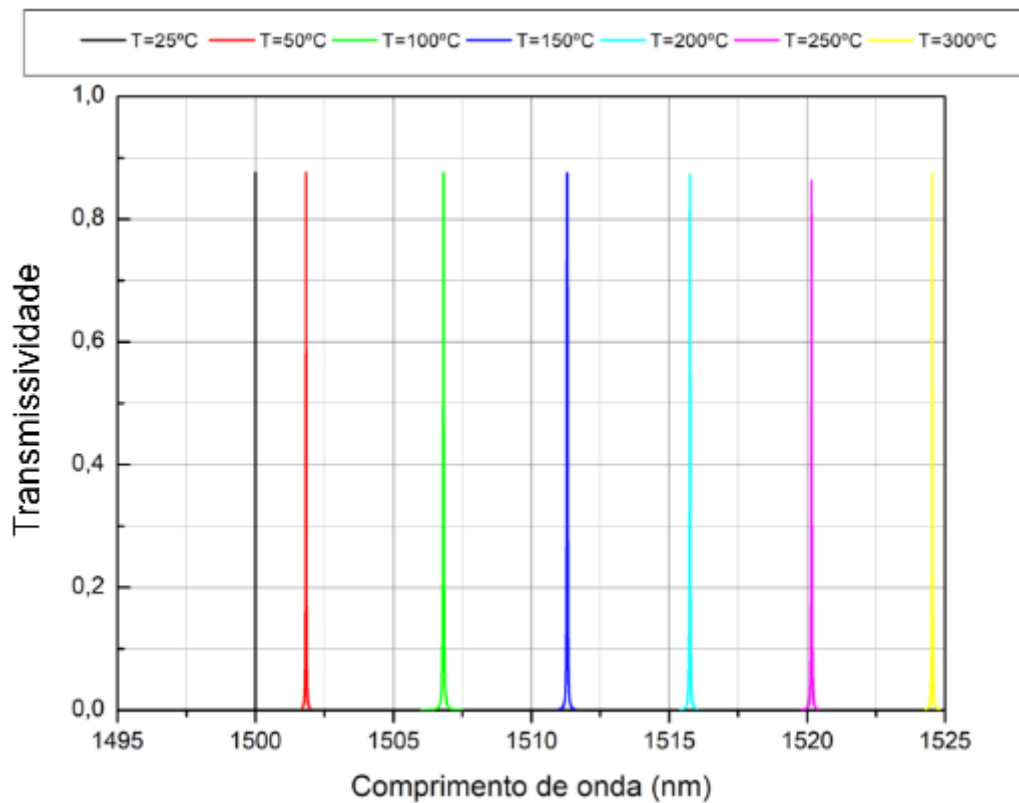


Figura 22: Espectro de transmissividade em função do comprimento de onda com variação da temperatura de 25 °C a 300 °C para os materiais Si e SiO<sub>2</sub> no cristal fotônico unidimensional com um defeito.

Com a variação da temperatura de 25°C a 300°C, observou-se uma mudança no posicionamento do pico ressonante do defeito inserido no cristal fotônico. Esse efeito resultou do aumento no contraste dos índices de refração dos materiais. A Figura 22 mostra os modos ressonantes para diferentes temperaturas entre 25°C e 300°C. Verifica-se que, para a temperatura de 300°C, houve um deslocamento de 1500 nm para aproximadamente 1524 nm.

Ao observar o comportamento dos modos ressonantes com a variação da temperatura, nota-se que, apesar da mudança na frequência dos picos, a transmissividade manteve-se acima de 85% em todas as temperaturas, atingindo aproximadamente 90% para a estrutura com um defeito inserido.



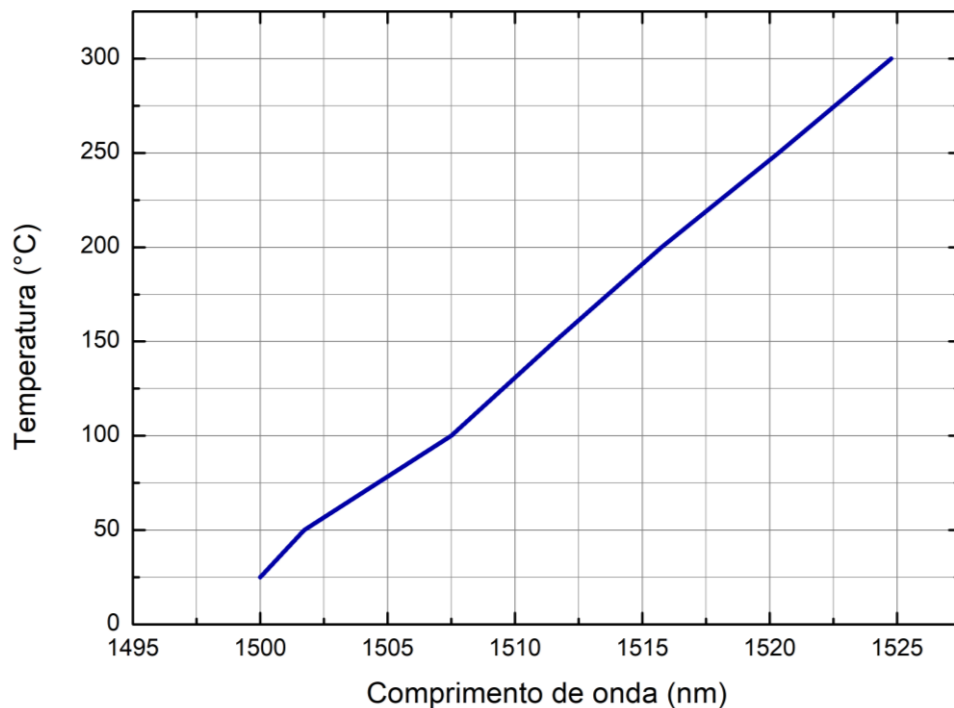


Figura 23: Variação do comprimento de onda para Si e SiO<sub>2</sub> em função da temperatura.

A Figura 23 apresenta a relação entre a temperatura e o comprimento de onda em uma estrutura de cristal fotônico unidimensional com um defeito inserido, observando que, com o aumento da temperatura, o comprimento de onda central é ajustado para valores entre 1500 nm e 1525 nm na combinação de Si e SiO<sub>2</sub>. Esse comportamento indica que a transmissividade permanece eficiente para diferentes modos ressonantes conforme a temperatura aumenta.

### 3.2 CASOS SIMULADOS DE CRISTAL FOTÔNICO BIDIMENSIONAL

A estrutura do cristal fotônico bidimensional em análise na Figura 21 possui uma rede quadrada bidimensional composta por metamateriais, com cilindros com seções transversais circulares embutidos no ar. O estudo foi desenvolvido considerando a variação de temperatura de  $T = 25^\circ \text{C}$  (temperatura ambiente) até  $T = 300^\circ \text{C}$  para as três combinações de materiais embutidos no ar: BGO, GaAs e Si.

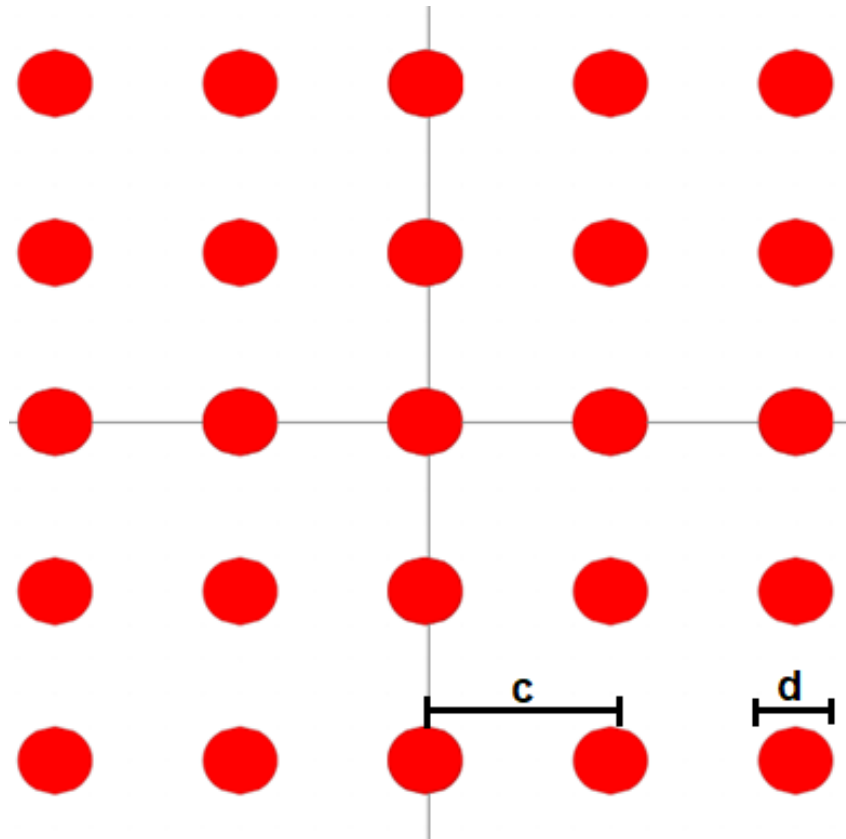


Figura 24: Perfil do cristal fotônico bidimensional composta por cilindros e ar.

A estrutura da Figura 24 em bidimensional foi configurada como uma rede quadrada com 25 cilindros organizados em 5 fileiras. Cada cilindro possui a medida de  $d = 0,4$  nm de diâmetro e com distância do seu centro de  $c = 1$  nm. A polarização utilizada foi o modo Transverso Elétrico (TE) para trabalhar com a variação de temperatura e a banda de frequência de operação. Os valores dos coeficientes dos materiais foram considerados conforme Tabelas 2, 3 e 4.

Neste estudo as simulações foram realizadas no *software* Rsoft CAD Layout© com o intuito de verificar o comportamento do cristal fotônico nas regiões de PBG, indicando as frequências em que a luz não propaga no cristal fotônico. Essa estrutura foi baseada nos trabalhos de Segovia-Chaves, Vinck-Posada (2019a).

Ao calcular a PBS surgem as PBG, e essas regiões onde não tem modos eletromagnéticos permitidos em determinadas frequências são importantes porque indicam as frequências em que a luz não pode se propagar no cristal fotônico e essa região é chamada de Zona de Brillouin. A análise da Zona de Brillouin em um cristal fotônico bidimensional é fundamental para entender a propagação das ondas eletromagnéticas e a estrutura das PBG. Em cristais fotônicos bidimensional, a análise da Zona de Brillouin fornece informações sobre a periodicidade do material e ajuda a

identificar frequências em que a propagação da luz é proibida (HE; HE; WEI, 2021; SHOKRI; JAMSHIDI, 2019).

### 3.2.1 Caso 1: Cristal Fotônico Bidimensional com BGO e Ar

No primeiro caso, a estrutura do cristal fotônico bidimensional é analisada com a combinação do cilindro de BGO e ar. A Figura 25 mostra o comportamento da PBS considerado os efeitos do aumento da temperatura no intervalo da PBG.

A Figura 25 mostra a região da PBG destacada em amarelo. Os resultados representam pelas linhas pretas o comportamento da estrutura na Zona de Brillouin na temperatura de  $T=25^{\circ}\text{C}$  e pelas linhas vermelhas na temperatura de  $T=300^{\circ}\text{C}$ . No intervalo de frequência onde se observa a PBG entre as bandas 1 e 2 para  $T=25^{\circ}\text{C}$  os valores partem de 0,40674 e 0,47111, respectivamente, na medida de frequência  $\omega a/2\pi c$ , com largura de PBG de 0,06437.

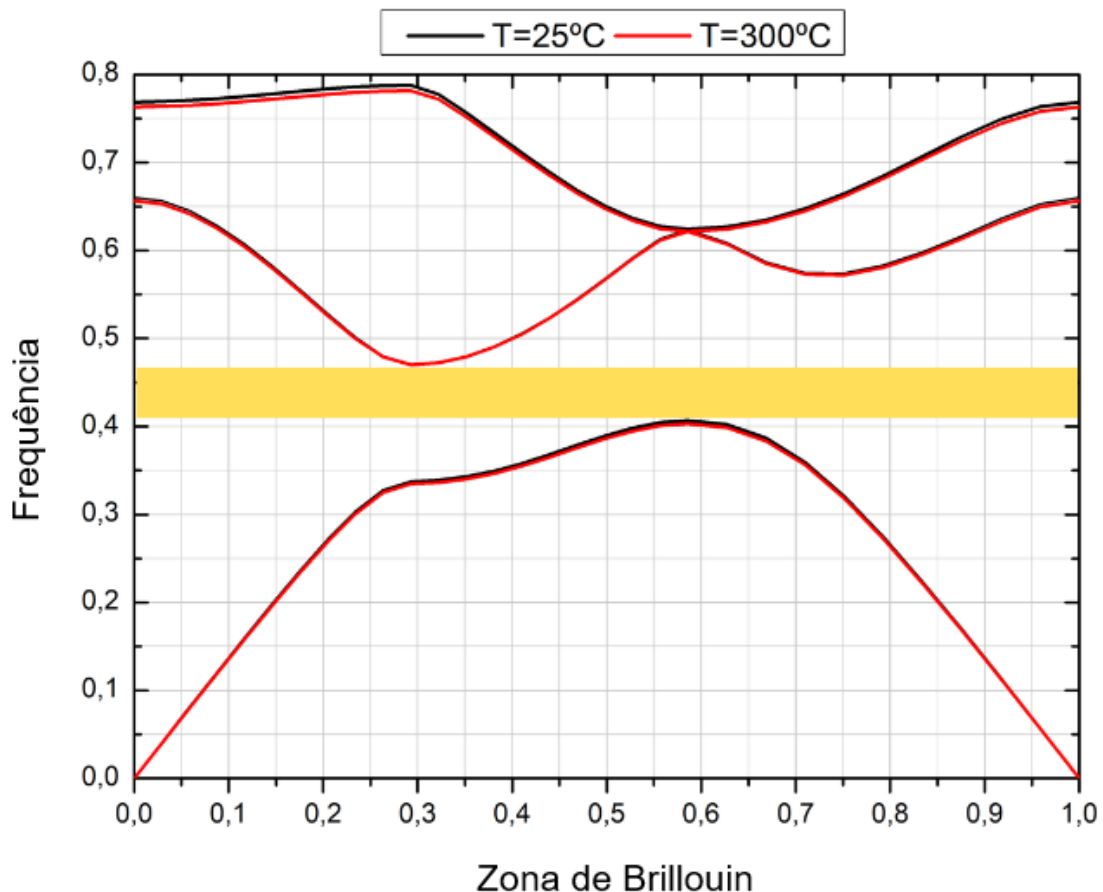


Figura 25: PBS com  $T = 25^{\circ}\text{C}$  (linha preta) e  $T = 300^{\circ}\text{C}$  (linha vermelha) com BGO e Ar.

O intervalo é estreito comparado aos outros materiais simulados a seguir, porém existe o intervalo em é possível manipular a PBG para controlar a frequência de operação nas aplicações de dispositivos com cristais fotônicos bidimensional com o BGO e ar combinados.

Ao variar a temperatura de  $T=25^{\circ}\text{C}$  a  $T=300^{\circ}\text{C}$  nota-se que as frequências das bandas 1 e 2 sofrem alteração. A banda 1 passa a operar na frequência 0,40304 e a banda 2 com 0,47025, indicando um novo intervalo para a PBG de 0,06721. As bandas 1 e 2 tiveram uma diminuição nos valores das frequências, 0,0037 e 0,00086, respectivamente. Houve também um aumento da largura da PBG de 0,00284.

A PBS e a PBG podem ser modificadas por meio de interferências externas que podem alterar o contraste óptico dos cristais fotônicos. A variação da temperatura desloca o PBS para regiões de menor frequência no espectro de transmissividade, especificamente para polarização TE. O ajuste da PBG em cristais fotônicos bidimensional foi obtido através da variação de temperatura, sendo que esse deslocamento do PBS é atribuído aos efeitos termo-ópticos e à expansão térmica dos cilindros componentes da estrutura.

### 3.2.2 Caso 2: Cristal Fotônico Bidimensional com GaAs e Ar

No segundo caso, a estrutura do cristal fotônico bidimensional é resultado da utilização do GaAs no cilindro combinado com ar. A análise foi realizada considerando os mesmos efeitos para o caso anterior verificando os efeitos do aumento da temperatura no intervalo da PBG.

A Figura 26 também destacada em amarelo a região da PBG. Inicialmente, é possível perceber que o intervalo da PBG é maior quando comparado com o BGO e Ar. As linhas pretas representam o resultado para a temperatura em  $T = 25^{\circ}\text{C}$  e as linhas vermelhas para  $T = 300^{\circ}\text{C}$  com a mesma análise para a Zona de Brillouin.

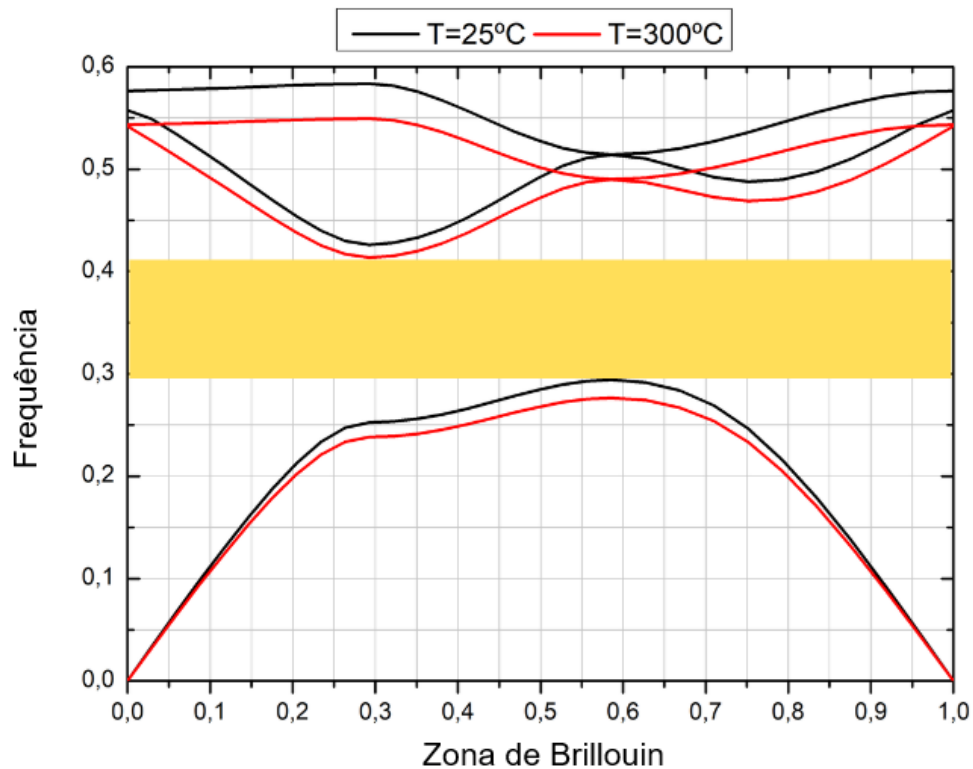


Figura 26: PBS com  $T = 25^{\circ}\text{C}$  (linha preta) e  $T = 300^{\circ}\text{C}$  (linha vermelha) com GaAs e Ar.

O intervalo de frequência da PBG entre as bandas 1 e 2 para  $T=25^{\circ}\text{C}$  corresponde a 0,13316, e os valores das bandas, respectivamente, são 0,29299 e 0,42615.

Com a variação da temperatura de  $T=25^{\circ}\text{C}$  a  $T=300^{\circ}\text{C}$  ocorre a diminuição da frequência em todas as bandas na Zona de Brillouin. A banda 1 passa a operar na frequência 0,27641 e a banda 2 com 0,41367, indicando um novo intervalo para a PBG de 0,13726. A banda 1 sofreu uma redução na frequência de 0,01658 e a banda 2 0,01248. Com isso, nota-se que além da diminuição da frequência das bandas ocorreu um aumento no intervalo da PBG de 0,0041.

### 3.2.3 Caso 3: Cristal Fotônico Bidimensional com Si e Ar

No terceiro caso, utilizou-se a combinação do Si com ar. A Figura 27 é o resultado do comportamento da do cristal fotônico bidimensional simulando os efeitos do aumento da temperatura no intervalo da PBG.

A PBG está destacado de amarelo na Figura 27. Os resultados para a temperatura de  $T = 25^{\circ}\text{C}$  estão ilustrados pelas linhas pretas e para  $T = 300^{\circ}\text{C}$  pelas linhas vermelhas. O comportamento das bandas em análise da estrutura da zona de Brillouin mostram que o intervalo da PBG está entre as bandas 1 e 2.

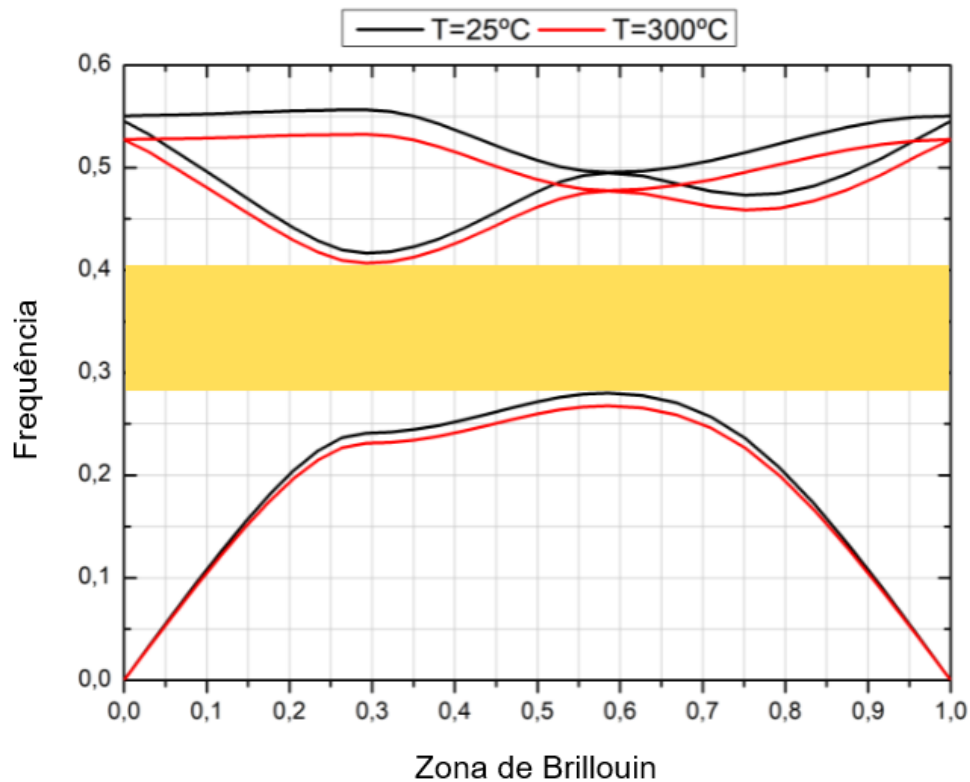


Figura 27: PBS com  $T = 25^{\circ}\text{C}$  (linha preta) e  $T = 300^{\circ}\text{C}$  (linha vermelha) com Si e Ar.

Para  $T = 25^{\circ}\text{C}$  os valores das frequências são, banda 1 de 0,28013 e banda 2 de 0,41645, tendo como largura de PBG de 0,13632. No cenário de  $T = 300^{\circ}\text{C}$  os valores das bandas 1 e 2 são 0,26768 e 0,40676, obtendo um novo intervalo de PBG de 0,13908. Nota-se neste caso que também houve uma redução das frequências das bandas de operação.

A banda 1 sofre uma redução de 0,01245 na frequência, enquanto a banda 2 registra uma diminuição de 0,00969. Com esses novos resultados é possível concluir que mesmo com a redução das frequências das bandas com o aumento da temperatura houve um alargamento da PBG de 0,00276. Essa conclusão foi confirmada nos três casos estudados para o cristal fotônico bidimensional.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 4.1 CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento desse projeto, conclui-se que, estudar o efeito causado pela variação da temperatura em estruturas fotônicas, compostas por metamateriais, possibilita identificar suas características resultantes nas propriedades dos materiais estudados, verificando que o índice de refração é dependente da variação da temperatura, e que, os comprimentos de ondas ressonantes podem ser alterados uma vez que os efeitos termo-ópticos afetam as estruturas fotônicas.

Neste trabalho, os efeitos térmicos na transmissão de cavidades ressonantes foram analisados em um cristal fotônico unidimensional em três casos distintos, compostos por camadas alternadas de BGO e  $\text{SiO}_2$ , GaAs e  $\text{SiO}_2$ , e Si e  $\text{SiO}_2$ , todos com defeitos de  $\text{SiO}_2$ . A simulação foi baseada no método dos elementos finitos. Foram analisados os efeitos da temperatura no cristal fotônico, considerando os coeficientes termo-ópticos e os coeficientes de expansão térmica dos metamateriais.

Os cristais fotônicos unidimensionais são uma ferramenta poderosa na engenharia óptica, com aplicações que vão desde espelhos de alta eficiência até interruptores ópticos e limitadores de luz. Sua estrutura simples, combinada com a capacidade de manipular ondas eletromagnéticas, torna os cristais fotônicos unidimensionais uma solução versátil e acessível para uma ampla gama de dispositivos fotônicos, como filtros e sensores. Ao explorar essas características, os cristais fotônicos unidimensionais continuam a ser um foco importante de pesquisa e desenvolvimento na fotônica moderna.

Os resultados analisados permitem observar a presença de modos ressonantes na região dos defeitos do cristal fotônico, que atingem a faixa da PBG. Percebe-se que, conforme a distância entre os defeitos muda, resulta na aproximação dos modos de defeito. Conforme a temperatura muda, o comprimento de onda de referência alterado, tendo o seu valor aumentado, obtendo uma eficiência da transmissividade superior a 85% em todos os casos nos cristais fotônicos unidimensionais.

As simulações apresentaram os resultados esperados pela influência da temperatura na variação do índice de refração, que conseqüentemente, influenciou no resultado da transmissividade para o comprimento de onda do pico ressonante.

Neste estudo também se investigou os efeitos termo-ópticos no PBS de um cristal fotônico bidimensional de rede quadrada, em três situações com elementos distintos, compostos por cilindros de BGO, GaAs e Si, todos embutidos no ar. O método PWE foi utilizado para determinar o PBS do cristal fotônico bidimensionais em diferentes temperaturas.

Os cristais fotônicos bidimensionais são uma plataforma promissora para o desenvolvimento de dispositivos fotônicos, pois combinam a capacidade de controlar a propagação da luz com um alto grau de miniaturização e eficiência. Devido ao seu forte confinamento da luz, ajuste fino de PBG e facilidade de integração com circuitos fotônicos, os cristais fotônicos bidimensionais podem ser usados em uma ampla gama de aplicações, desde comunicação óptica até sensores e lasers compactos. Isso os torna fundamentais para a próxima geração de dispositivos fotônicos.

Os resultados revelaram que com o aumento da temperatura houve uma redução das frequências das bandas de operação, e também houve um alargamento da PBG em todos os casos estudados. Também foi possível perceber que a PBS muda para regiões de curta frequência devido aos efeitos termo-ópticos causados pelo aumento da temperatura e do contraste do índice de refração.

Observou-se que, a diferença de frequências entre estados consecutivos e o contraste entre os materiais que formam o cristal fotônico bidimensionais são fundamentais para criar uma PBG que impede a propagação de determinadas frequências de luz, e quanto maior a diferença no comportamento óptico dos materiais, mais provável será a formação de uma lacuna no espectro, isso permite um controle preciso da propagação da luz em dispositivos fotônicos.

Com o desenvolvimento deste projeto foi possível alcançar resultados favoráveis com as estruturas estudadas, alcançando os objetivos descritos no início desse trabalho, concluindo que, os efeitos causados pela variação da temperatura nas estruturas fotônicas possibilitam resultados vantajosos para as aplicações de dispositivos fotônicos, fornecendo um avanço na pesquisa e na utilização das estruturas de maneira positiva, alcançando uma eficiência elevada na transmissão de ondas eletromagnéticas nos cristais fotônicos uni e bidimensionais. Assim, podendo



gerar impactos tecnológicos e científicos positivos com o desenvolvimento desse estudo por metamateriais ao sofrerem a influência da variação da temperatura.

#### 4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros consistem em estudar os efeitos da variação de temperatura em estruturas fotônicas compostas por metamateriais em modelo tridimensional, podendo incluir a realização de simulações numéricas detalhadas para analisar como as mudanças térmicas afetam as propriedades ópticas e mecânicas desses materiais. Essas investigações podem abranger a modulação do índice de refração, a distorção de PBG e a mudança na absorção e emissão de radiação térmica, considerando estruturas complexas com geometria não uniforme.

Os estudos poderão também explorar a influência da temperatura sobre a estabilidade térmica e mecânica dos metamateriais, avaliando seu desempenho em dispositivos fotônicos avançados, como moduladores, sensores e guias de onda, com foco na otimização de suas respostas em ambientes térmicos variáveis.

## REFERÊNCIAS

- ABADLA, M. M.; ELSAYED, H.; MEHANEY, A. *Sensitivity enhancement of annular one dimensional photonic crystals temperature sensors with nematic liquid crystals*. **Physica Scripta**, v. 95, n. 8, p. 1-25, 16 jul. 2020a. IOP Publishing.
- ABADLA, M. M.; ELSAYED, H. A.; MEHANEY, A. *Thermo-optical properties of binary one dimensional annular photonic crystal including temperature dependent constituents*. **Physica e: Low-dimensional Systems and Nanostructures**, v. 119, n. 114020, p. 1-7, maio 2020b. Elsevier BV.
- AGARWAL, A. *Electromagnetic metamaterials: an effectual analysus on assorted dimensions*. **International Refereed Journal Of Reviews And Research**, v. 2, p. 1-13, 2 mar. 2014.
- ALY, A. H.; AMEEN, A. A.; VIGNESWARAN, D. *Superconductor Nanometallic Photonic Crystals as a Novel Smart Window for Low-Temperature Applications*. **Journal Of Superconductivity And Novel Magnetism**, v. 9, n. 9, p. 1-7, 12 maio 2018. Springer Nature.
- BEN-ALI, Y. *et al.* *A high sensitivity hydrostatic pressure and temperature based on a defective 1D photonic crystal*. **Journal Of Electromagnetic Waves And Applications**, v. 34, n. 15, p. 2030-2050, 15 ago. 2020. Informa UK Limited.
- CHANG, Y. H.; JHU, Y. Y.; WU, C. J. *Temperature dependence of defect mode in a defective photonic crystal*. **Optics Communications**, v. 285, n. 6, p. 1501-1504, mar. 2012.
- CHARIK, H.; BOURAS, M.; BENNACER, H. *High-Sensitive Thermal Sensor Based on a 1D Photonic Crystal Microcavity with Nematic Liquid Crystal*. **Progress In Electromagnetics Research**, v. 100, p. 187-195, 2021.
- CHEN, C. T. *et al.* *Very High Refractive Index Transition Metal Dichalcogenide Photonic Conformal Coatings by Conversion of ALD Metal Oxides*. **Scientific Reports**, v. 9, n. 2768, p. 1-9, 26 fev. 2019.
- COMSOL, © 2024. *The COMSOL Product Suite*. Disponível em: <<https://www.comsol.com/products>>. Acesso em 10 set. 2024.
- CONTU, P.; MEE, C. D.; SEATZU, S. *A finite element frequency domain method for 2D photonic crystals*. **Journal Of Computational And Applied Mathematics**, v. 236, n. 16, p. 3956-3966, out. 2012.
- DANTAS-YOSHIDA, B. Y.; RODRÍGUEZ-ESQUERRE, V. F.; ISÍDIO-LIMA, J. J. *Thermal effects in photonic crystals resonant cavities*. In: *2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*. IEEE, 2013. p. 1-4.

FURLAN, K. P. *et al.* Photonic materials for high-temperature applications: Synthesis and characterization by X-ray ptychographic tomography. **Applied Materials Today**, v. 13, p. 359-369, 2018.

FUSCO, Z. *et al.* Photonic Fractal Metamaterials: a metal: semiconductor platform with enhanced volatile :compound sensing performance. **Advanced Materials**, v. 32, n. 50, p. 1-10, 22 out. 2020. Wiley.

GHARAATI, A.; ZARE, Z. Investigation of transmission in a thermal tunable disordered metallic defective photonic crystal. **Optik**, v. 232, p. 1-11, abr. 2021. Elsevier BV.

GILLEN, G. D. *et al.* Temperature-dependent refractive index measurements of wafer-shaped InAs and InSb. **Applied optics**, v. 47, n. 2, p. 164-168, 2008.

GRZELCZYK, D.; AWREJCEWICZ, J. Calculation of reflectance and transmittance of optical birefringent networks based on cholesteric liquid crystals. **Latin American Journal Of Solids And Structures**, v. 16, n. 1, p. 1-20, 2019.

HE, S.; HE, Q.; WEI, L. F. Atomic-type photonic crystals with adjustable band gaps. **Optics Express**, v. 29, n. 26, p. 1-16, 9 dez. 2021. Optica Publishing Group.

HIDAYAT, S; RIVELI, N. Calculation of photonic bandgap for 2D hexagonal and square structure base on hybrid polymer material. **Iop Publishing**: 4th International Seminar of Mathematics, Science and Computer Science Education, v. 1013, p. 1-6, 2018.

HUANG, X. T. *et al.* Wide angle of incidence-insensitive polarization-independent THz metamaterial absorber for both TE and TM mode based on plasmon hybridizations. **Materials**, v. 11, n. 5, p. 671, 2018.

ILINYKH, V. A.; MATYUSHKIN, L. B. Fabrication of one-dimensional photonic crystals by sol-gel method. 2016 Ieee Nw Russia Young Researchers In Electrical And Electronic Engineering Conference (Eiconrusnw), p. 47-50, fev. 2016.

IYER, P. P. *et al.* Uniform thermo-optic tunability of dielectric metalenses. **Physical Review Applied**, v. 10, n. 4, p. 044029, 2018.

JOANNOPOULOS, J. D.; VILLENEUVE, P. R.; FAN, S. Photonic crystals: putting a new twist on light. **Nature**, v. 386, n. 6621, p. 143-149, 13 mar. 1997. Springer Science and Business Media LLC.

KUMAR, A. *et al.* Excitons in 2D perovskites for ultrafast terahertz photonic devices. **Science Advances**, 8821, n. 6, p. 1-8, 21 fev. 2020.

LEE, D. L. *Electromagnetic principles of integrated optics*. Wiley, 1986.

LEE, Y. P. *et al.* Metamaterials for perfect absorption. Singapore: Springer, 2016.

LEWI, T. et al. *Thermally reconfigurable meta-optics*. IEEE Photonics Journal, v. 11, n. 2, p. 1-16, 2019.

LI, J. et al. *Thermal Fluctuations of the Optical Properties of Nanomechanical Photonic Metamaterials*. **Advanced Optical Materials**, v. 10, n. 5, p. 1-7, 22 dez. 2021. Wiley.

LIMA, J. J. I. de. Minimização dos efeitos da temperatura em dispositivos fotônicos. 2012. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.

LIU, F. et al. *Thermal Responsive Photonic Crystal Achieved through the Control of Light Path Guided by Phase Transition*. **Small**, v. 16, n. 34, p. 1-8, 23 jul. 2020. Wiley.

LIU, M. et al. *Temperature-Controlled Optical Activity and Negative Refractive Index*. **Advanced Functional Materials**, v. 31, n. 14, p. 1-8, 3 fev. 2021.

MA, L. et al. *Advanced Electromagnetic Metamaterials for Temperature Sensing Applications*. **Frontiers In Physics**, v. 9, p. 1-8, 30 abr. 2021. Frontiers Media SA.

MALEK, C. et al. *Employing the Defective Photonic Crystal Composed of Nanocomposite Superconducting Material in Detection of Cancerous Brain Tumors Biosensor: computational study*. **Crystals**, v. 12, n. 4, p. 540-561, 12 abr. 2022. MDPI AG.

MAMRI, B.; BARKAT, O. *Design of a Selective Filter Based on One-dimensional Superconductor Photonic Crystal*. **Journal Of Superconductivity And Novel Magnetism**, v. 32, n. 11, p. 3397-3405, 9 maio 2019. Springer Science and Business Media LLC.

PANDEY, G. N.; SUTHAR, B. *Transmittance properties of superconductor-dielectric photonic crystal*. **Materials Today: Proceedings**, p. 1-3, dez. 2020.

QIANG, Z.; ZHOU, W.; SOREF, R. A. *Optical add-drop filters based on photonic crystal ring resonators*. **Optics Express**, v. 15, n. 4, p. 1823-1.832, 19 fev. 2007. Optica Publishing Group.

RAHMAN-ZADEH, F. et al. *Design of a highly sensitive photonic crystal refractive index sensor incorporating ring-shaped GaAs cavity*. **Opto-Electronics Review**, v. 27, n. 4, p. 369-377, dez. 2019. Polish Academy of Sciences Chancellery.

RAJASEKAR, R.; ROBINSON, S. *Nano-Pressure and Temperature Sensor Based on Hexagonal Photonic Crystal Ring Resonator*. **Plasmonics**, v. 14, n. 1, p. 3-15, 27 maio 2018. Springer Science and Business Media LLC.

ROBINSON, S.; NAKKEERAN, R. *Investigation on two dimensional photonic crystal resonant cavity based bandpass filter*. **Optik**, v. 123, n. 5, p. 451-457, mar. 2012. Elsevier BV.

SANTOS, K. B.; RODRIGUEZ-ESQUERRE, V. F. *Thermal effects analysis in photonic crystal resonant cavities*. In: Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, Thin Films, and Devices XVII. SPIE, 2020. p. 183-187.

SEGOVIA-CHAVES, F.; VINCK-POSADA, H. *Dependence of optical microcavities coupled with temperature in one-dimensional photonic crystals*. **Optik**, v. 165, p. 168-173, 2018.

SEGOVIA-CHAVES, F.; VINCK-POSADA, H. *Thermo-optic effect on the photonic band structure in a two-dimensional square lattice photonic crystal*. **Optik**, v. 180, p. 1-7, 2019a.

SEGOVIA-CHAVES, F. et al. *Transmittance spectrum in a 1D photonic crystal composed fused silica and sea water*. **Optik**, v. 185, p. 930-935, maio 2019b. Elsevier BV.

SHOKRI, A. A.; JAMSHIDI, R. *Merging of defect modes in a superlattice of one-dimensional metamaterials photonic crystals*. **Aip Advances**, v. 9, n. 5, p. 1-9, 1 maio 2019. AIP Publishing.

SOAVE, P. A. et al. *Refractive index control in bicomponent polymer films for integrated thermo-optical applications*. **Optical Engineering**, v. 48, n. 12, p. 124603, 2009.

SRIVASTAVA, S. K.; AGHAJAMALI, A. *Narrow transmission mode in one-dimensional symmetric defective photonic crystal containing metamaterial and high  $T_c$  superconductor*. **Optica Applicata**, v. 49, n. 1, p. 1-14, 2019.

SRIVASTAVA, Y. K. et al. *A Superconducting Dual-Channel Photonic Switch*. **Advanced Materials**, v. 30, n. 29, p. 1-8, 5 jun. 2018.

SUTHAR, B.; BHARGAVA, A. *Pressure Sensor Based on Quantum Well-structured Photonic Crystal*. **Silicon**, v. 13, n. 6, p. 1765-1768, 3 jul. 2020. Springer Science and Business Media LLC.

SYNOPSYS, © 2024. *RSoft CAD Environment Product Overview*. Disponível em: <<https://www.synopsys.com/photonic-solutions/rsoft-photonic-device-tools/cad-environment.html>>. Acesso em 06 set. 2024.

TINKER, M. T.; LEE, J. B. *Thermal and optical simulation of a photonic crystal light modulator based on the thermo-optic shift of the cut-off frequency*. **Optics Express**, v. 13, n. 18, p. 7174-7.189, 5 set. 2005. Optica Publishing Group.

WANG, Ben-Xin. *Quad-band terahertz metamaterial absorber based on the combining of the dipole and quadrupole resonances of two SRRs*. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, v. 23, n. 4, p. 1-7, 2016.

YAO, J. et al. *1D photonic crystal filled with low-temperature plasma for controlling broadband microwave transmission*. **Aip Advances**, v. 9, n. 6, p. 1-6, 1 jun. 2019. AIP Publishing.

ZARE, Z.; GHARAATI, A. *Enhancement of transmission in 1D thermal tunable metallic photonic crystal filter with exponential gradation thickness*. **The European Physical Journal D**, v. 140, n. 74, p. 1-7, 1 jul. 2020.

ZHANG, Y. *et al.* *Nonlinear photonic crystals: from 2d to 3d*. **Optica**, v. 8, n. 3, p. 372-381, 12 mar. 2021.

ZHAO, L. *et al.* *Theoretical design of twelve-band infrared metamaterial perfect absorber by combining the dipole, quadrupole, and octopole plasmon resonance modes of four different ring-strip resonators*. **Optics express**, v. 26, n. 10, p. 12838-12851, 2023.

ZHENG, Y.; KHAN, F.; ASRAFALI, B.; WANG, Q. *Photonic Crystal Waveguides Composed of Hyperbolic Metamaterials for High-FOM Nano-Sensing*. **Crystals**, v. 13, n. 9, p. 1-14, 18 set. 2023. MDPI AG.