



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA

MÁRCIO ANTÔNIO MATIAS COSTA

GUIAS DE ONDAS EM CRISTAIS FOTÔNICOS USANDO FDTD

FORTALEZA

2021

MÁRCIO ANTÔNIO MATIAS COSTA

GUIAS DE ONDAS EM CRISTAIS FOTÔNICOS USANDO FDTD

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Física do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Física.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rocha Paschoal

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C874g Costa, Márcio Antônio Matias.
Guias de Ondas em Cristais Fotônicos : Estudo Bibliográfico / Márcio Antônio Matias Costa. – 2021.
46 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências,
Curso de Física, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Alexandre Rocha Paschoal.

1. Cristais fotônicos. 2. Guias de ondas. 3. Ressonador. 4. Espelho de Bragg. I. Título.

CDD 530

MÁRCIO ANTÔNIO MATIAS COSTA

GUIAS DE ONDAS EM CRISTAIS FOTÔNICOS USANDO FDTD

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Física do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Física.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Rocha Paschoal (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Paulo de Tarso Cavalcante Freire
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, pelos cuidados indispensáveis na minha caminhada acadêmica. Irmãos e sobrinhos que amo demais.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Alexandre Rocha Paschoal por me orientar em meu trabalho de conclusão do curso e por ser um excelente professor.

Ao Prof. Dr. Saulo Davi Reis, por ser um grande professor do departamento de Física da UFC.

A minha família pelo apoio e momentos de alegria, são só 10 pessoas que moram comigo.

Aos amigos de longa data, Junior (primo), Ednaldo, Rômulo, Arleff, Tanaka, Thiago, Gabriel, Victor, Lara, Rafael e outros.

Ao Prof. Dr. Humberto de Andrade Carmona do Curso de Física da UFC pela dedicação ao departamento de Física da UFC. Assim como o Professor Lucas que me orientou em outros momentos.

Aos meus pais, irmãos e sobrinhos, que nos momentos de minha ausência dedicados ao estudo superior, sempre fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente!

Agradeço a todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender.

E, por fim, agradecer a Universidade Federal do Ceará (UFC), especialmente a PRAE pelos auxílios financeiros que me proporcionaram seguir em frente e pela oportunidade de me formar em física-bacharel.

”O ponto de chegada não é o mais importante, o que importa é a busca pelo caminho, as sementes que foram plantadas e os frutos que vão ser colhidos.”

(Desconhecido)

RESUMO

Este trabalho consiste em uma pesquisa bibliográfica sobre guias de ondas e cristais fotônicos, o objetivo principal é verificar a eficiência na transmissão dos modos transversais eletromagnéticos, isto é realizado através da discussão de alguns trabalhos existentes na literatura, onde é destacado os principais resultados obtidos com base na simulação FDTD (Finite Difference Time Domain). Todas as simulações são elaboradas pelos respectivos autores. Estes trabalhos, descrevem os problemas da baixa transmissão dos modos de propagação em guias de ondas de cristais fotônicos. Inicialmente foi descrito o problema da baixa transmissão, em seguida são demonstrados os resultados que se espera obter através da simulação FDTD e da adição de um ressonador e um espelho de Bragg. Na sequência, é discutido formas de melhorar a taxa de transmissão dos modos eletromagnéticos no guia de onda, uma variação da geometria do ressonador e utilização de espelho duplo foi analisado, os dados obtidos estão de acordo com a simulação FDTD e mostram os fatores de relevância nos resultados finais. O tamanho, a posição e a qualidade do ressonador, designado pelo fator Q, demonstram um impacto relevante na construção de dispositivos que ofereçam um nível de excelência para a produção de guias de ondas. Quanto à posição do ressonador em relação ao guia de onda, foi feita um análise com o ressonador colocado nas posições interna, externa e central. Neste caso, verificou-se que os melhores resultado são obtidos quando o ressonador se encontra na posição interna. Porém a taxa de transmissão, quando analisado apenas com o ressonador, mostrou uma falta de homogeneidade, apresentando um pico máximo de 76% na transmissão, em $\lambda = 1,79\mu m$. Quando adicionado o espelho de canto e reduzido o ressonador a uma seção triangular verificamos o aumento na taxa de transmissão, porém a falta de linearidade permanece. Posteriormente, analisa-se uma configuração com apenas um espelho colocado a 45° , os resultados mostram uma eficiência de 96% para a propagação dos modos transversais em torno do comprimento de onda $\lambda = 1,55\mu m$. Na análise baseada no espelho único, verifica-se uma melhora significativa fazendo com que a taxa de transmissão chegue a 96% para $\lambda = 1,55\mu m$, resultado esse que foi melhorado ainda mais com o uso do espelho duplo, onde a transmissão chegou a 99%, praticamente para toda a faixa de comprimento de onda analisada, o que corresponde ao intervalo de $1.4\mu m$ a $1.7\mu m$ ou $300nm$. Com isso, é possível concluir que a transmissão dos modos de propagação atinge seu melhor resultado quando a estrutura é analisada apenas com o uso de espelhos refletores.

Palavras-chave: Cristais fotônicos; Guias de ondas; Ressonador; Espelho de Bragg;

ABSTRACT

This work consists of a bibliographical research on waveguides and photonic crystals, the main objective is to verify the efficiency in the transmission of transverse electromagnetic modes, this is done through the discussion of some existing works in the literature, where the main results obtained with based on FDTD (Finite Difference Time Domain) simulation. All simulations are created by the respective authors. These works describe the problems of low transmission modes of propagation in photonic crystal waveguides. Initially, the low transmission problem was described, then the results that are expected to be obtained through the FDTD simulation and the addition of a resonator and a Bragg mirror are demonstrated. Next, ways to improve the transmission rate of electromagnetic modes in the waveguide are discussed, a variation in the geometry of the resonator and the use of a double mirror was analyzed, the data obtained are in accordance with the FDTD simulation and show the relevance factors in the final results. The size, position and quality of the resonator, designated by the Q factor, demonstrate a relevant impact on the construction of devices that offer a level of excellence for the production of waveguides. As for the position of the resonator in relation to the waveguide, an analysis was performed with the resonator placed in the internal, external and central positions. In this case, it was found that the best results are obtained when the resonator is in the internal position. However, the transmission rate, when analyzed only with the resonator, showed a lack of homogeneity, presenting a maximum peak of 76% in transmission, at $\lambda = 1.79\mu m$. When adding the corner mirror and reducing the resonator to a triangular section, we see an increase in the transmission rate, but the lack of linearity remains. Afterwards, a configuration with only one mirror placed at 45° is analyzed, the results show an efficiency of 96% for the propagation of the transversal modes around the wavelength $\lambda = 1.55\mu m$. In the analysis based on the single mirror, there is a significant improvement, making the baud rate reach 96% for $\lambda = 1.55\mu m$, a result that was further improved with the use of the mirror double, where the transmission reached 99%, practically for the entire analyzed wavelength range, which corresponds to the range of $1.4\mu m$ to $1.7\mu m$ or $300nm$. Thus, it is possible to conclude that the transmission of propagation modes achieves its best result when the structure is analyzed only with the use of reflecting mirrors.

Keywords: Photonic crystals; Wave guides; Resonator. Bragg's Mirror;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de Redes Cristalinas	17
Figura 2 – Ilustração da Lei de Bragg	17
Figura 3 – Fenômeno da Reflexão Interna Total	19
Figura 4 – Modos de propagação: (a) Modos de Ar e (b) Modos do substrato	20
Figura 5 – Confinamento completo no Guia	20
Figura 6 – Estrutura de Cristais Fotônicos nas dimensões 1D, 2D e 3D	21
Figura 7 – Banda Fotônica de um filme com várias camadas de ar e um dielétrico como substrato	22
Figura 8 – Cristal Fotônico com periodicidade em z	23
Figura 9 – Diagrama de um Espelho de Bragg. Camadas finas com alto índice de refração n_1 são intercaladas com camadas mais espessas com menor índice de refração n_2 . Os comprimentos de caminho l_A e l_B diferem em exatamente um comprimento de onda, o que leva a uma interferência construtiva.	24
Figura 10 – Cristal Fotônico 2D. Arranjo de rede quadrada com cilindros dielétricos de ar, raio r , constante de rede a e constante dielétrica ϵ	24
Figura 11 – Cristal Fotônico 2D. A estrutura é composta por colunas de ar imerso em um substrato dielétrico com rede triangular e parâmetro de periodicidade a	25
Figura 12 – Efeito Purcell: taxa de emissão gerado pelo acoplamento. Lado esquerdo temos a representação da taxa de emissão gerado por um átomo fora da cavidade. Lado direito a variação da radiação quando um átomo é inserido na cavidade óptica	27
Figura 13 – (a) Estrutura com curva de 90° não otimizada, (b) Distribuição do Campo Magnético referente a curva de 90° e luminosidade para cada comprimento de onda.	30
Figura 14 – Espectro de Transmissão e Reflexão não-otimizado referente ao guia de onda de 90°	31
Figura 15 – (a) Estrutura com curva de 90° , (b) Distribuição do Campo Magnético referente a curva de 90°	32
Figura 16 – Espectro de Transmissão e Reflexão referente ao guia de onda de 90°	32

Figura 17 – Esquema das configurações da curva. (a) Curva com ressonador quadrado. (b) Curva com ressonador triangular com corte a 45° e espelho refletor. (c) Curva com um único espelho refletor (d) Curva circular lisa sem espelho e sem ressonador	33
Figura 18 – Ressonador na Posição Interna	36
Figura 19 – Ressonador na Posição Externa	36
Figura 20 – Ressonador Posição Central	37
Figura 21 – Espectro de Transmissão da cavidade quadrada das três posições do ressonador. As imagens no canto superior descrevem a largura e a posição de cada ressonador	37
Figura 22 – Variação da largura do espelho único	39
Figura 23 – Variação da largura do espelho duplo	40
Figura 24 – Espectro de Transmissão das três configurações: curva com ressonador, curva com espelho único, curva com espelho duplo	40

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Lado do quadrado do ressonador
b	Largura do espelho de Bragg
d	Largura do guia de onda
E	Campo elétrico
F_p	Fator de Purcell
M	Campo Magnético
n	índice de refração
Q	Fator de qualidade do ressonador
t	Tempo
θ	Ângulo de incidência
θ_i	Ângulo incidente
θ_t	Ângulo transmitido
θ_c	Ângulo crítico
λ	Comprimento de onda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivos Gerais	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	CRISTAIS FOTÔNICOS	16
3.1	Definição de Cristais	16
3.1.1	<i>Lei De Bragg</i>	16
3.2	Guias de Ondas	18
3.2.1	<i>Princípio da orientação do índice</i>	18
3.3	Cristal Fotônico	21
3.3.1	<i>Band Gap Fotônico</i>	22
3.3.2	<i>Cristal Fotônico 1D e Espelho de Bragg</i>	23
3.3.3	<i>Cristal Fotônico 2D</i>	24
3.4	Cavidades Ressonantes e Modos Acoplados	25
3.4.1	<i>Acoplamento fraco</i>	26
3.4.2	<i>Acoplamento forte</i>	27
3.4.3	<i>Fator de Qualidade do Ressonador</i>	28
3.5	Simulação Computacional de Cristais Fotônicos	28
4	ANALISE DOS PARÂMETROS EM GUIAS DE ONDA COM CURVA DE 90°	29
4.1	Descrição e análise inicial da estrutura de estudo	29
4.2	Adição de parâmetros para melhorar a taxa de transmissão.	32
4.3	Funções do ressonador no guia de onda	34
4.4	Adição do espelho de canto	38
5	DISCUSSÃO COMPARATIVA DA TAXA DE TRANSMISSÃO.	41
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	42
6.1	Conclusões	42
6.2	Trabalhos Futuros	42
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

O objetivo de controlar o fluxo da luz é um desafio que permeia a mente de muitos cientistas atualmente, constituindo um dos principais desafios da óptica moderna, diversas pesquisas já foram elaboradas na tentativa de alcançar tal êxito. Atualmente, existem diversos dispositivos capazes de mudar o fluxo da luz, entre eles, podemos citar, o espelho de Bragg, ressonadores, guias de ondas e divisores ópticos, isto acoplado a cristais fotônicos têm oferecido um grande avanço na tentativa de atingir níveis altos de eficiência da transmissão da luz por canais ópticos.

A miniaturização de dispositivos ópticos possibilita o avanço em vários setores tecnológicos. Porém, a fabricação de tais dispositivos tem se tornado cada vez mais complicada, pois a necessidade em aumentar o desempenho na transmissão de dados e a geração de dispositivos que ofereçam baixas perdas de radiação entra em conflito com métodos de fabricação. A partir desse nível de complexidade, a simulação numérica adquire uma grande importância como uma das etapas de desenvolvimento destes dispositivos fotônicos. Assim, este trabalho busca fazer uma conexão de conceitos teóricos sobre a implementação de cristais fotônicos alinhados ao conhecimento computacional que possa favorecer a análise dessas estruturas. Este trabalho consiste na compreensão de métodos computacionais, especificamente no uso de algoritmos FDTD (Finite Difference Time Domain), que possam abordar a simulação de guias de ondas curvas em cristais fotônicos, e discutir formas de aumentar a taxa de transmissão dos modos transversais eletromagnéticos, em função do comprimento de onda. Além disso, um estudo preliminar sobre guia de onda acoplada à cavidade ressonante é abordado.

Atualmente, existe uma tendência nas áreas de pesquisa tecnológica com o intuito de diminuir o tamanho dos dispositivos fotônicos, isso permitiria um melhor desempenho de sua funcionalidade, tornando tais sistemas mais baratos e mais fáceis de serem integrados em sistemas de comunicação e computação quântica. A compatibilidade com a infraestrutura de processamento CMOS (Complementary metal oxide semiconductor) apresenta uma grande vantagem no desenvolvimentos desses dispositivos que são passíveis de serem construídos com tecnologias existentes. A conexão destas ideias se faz pela utilização de cristais fotônicos que têm a capacidade de possibilitar a proibição total ou parcial da luz em determinadas direções e frequências. Essas estruturas apresentam uma periodicidade que permite a distribuição e dispersão dos modos eletromagnéticos, tais propriedades são importantes para que se possa manipular a luz. No geral, cristais fotônicos podem apresentar "band gap" fotônico (lacunas de

energia), regiões onde os fótons são proibidos de se propagar, essas lacunas podem existir em uma, duas ou três dimensões, dependendo da periodicidade da constante dielétrica da estrutura. Além disso, os cristais fotônicos exibem uma peculiaridade quando se fala de bandas proibidas, as diversas aplicações existentes dependem da existência de uma banda proibida ou da geometria do cristal e dos índices de refração dos materiais que compõem tal estrutura, algo que fica claro no capítulo 3.

Com base nesses relatos precedentes, um dos objetivos deste trabalho é elaborar um estudo preliminar sobre simulação de guias de onda em cristais fotônicos que possa ser integrado futuramente a pesquisas envolvendo outras configurações. Assim, inicialmente foi proposto fazer um estudo bibliográfico sobre guias de ondas com ângulo reto em cristais fotônicos. Isto permitiu a inserção de conceitos diversificados como guia de onda acoplado à cavidade ressonante e espelhos de Bragg. Assim, o Capítulo 2 trata dos objetivos que buscamos alcançar com o desenvolvimento deste trabalho. O Capítulo 3 trata dos fundamentos teóricos que são cruciais para a compreensão da proposta inicial, uma abordagem básica sobre cristais fotônicos em uma, duas e três dimensões é discutida, com ênfase nos cristais fotônicos em duas dimensões. O uso de simulação FDTD foi a principal ferramenta utilizada para analisar tais dispositivos, e as simulações discutidas fazem parte das bibliografias usadas. No Capítulo 4 é abordado a parte principal do trabalho, em que algumas referências bibliográficas são utilizadas para embasar o problema de baixa transmissão dos modos transversais em cristais fotônicos e posteriormente busca-se a solução com parâmetros de otimização e simulação FDTD. Importante salientar que os resultados obtidos são de autoria de trabalhos existentes na literatura discutida, onde a ferramenta de simulação numérica FDTD foi largamente aplicada e todos os resultados são baseados nessa simulação. No Capítulo 5, é feita uma análise comparativa dos resultados relatados no capítulo anterior. E por último no Capítulo 6, é feita a conclusão e destaque os trabalhos que podem dar sequência a pesquisas futuras.

Para ilustrar a importância do estudo em guias de ondas em cristais fotônicos, destacamos a crescente procura por computadores ópticos que possam substituir os computadores convencionais baseado na eletrônica de semicondutores, isso tem gerado intensas pesquisas em dispositivos fotônicos como transistores ópticos. No entanto, existem diversas dificuldades que impedem o avanço nesta área, um dos problemas é a produção de guia de ondas eletromagnéticas sem que ocorra dissipação de energia pelas curvas, esse fato até hoje permanece sendo um desafio na construção de dispositivos óticos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

- Compreender metodologias de pesquisa que possam ser utilizadas em pesquisas futuras.
- Compreender como a luz pode ser manipulada através de cristais fotônicos.

2.2 Objetivos Específicos

- Compreender metodologias computacionais voltada para simulação de guias de ondas em cristais fotônicos.
- Entender como os modos de propagação das ondas eletromagnéticas são acopladas às cavidades ressonantes, bem como características de acoplamento em guias dielétricos
- Analisar a eficiência de transmissão de ondas eletromagnéticas como guia de onda com curvatura reta.
- Realizar uma investigação Bibliográfica para estudar a otimização da taxa de transmissão dos modos transversais eletromagnéticos com a introdução de parâmetros adicionais.

3 CRISTAIS FOTÔNICOS

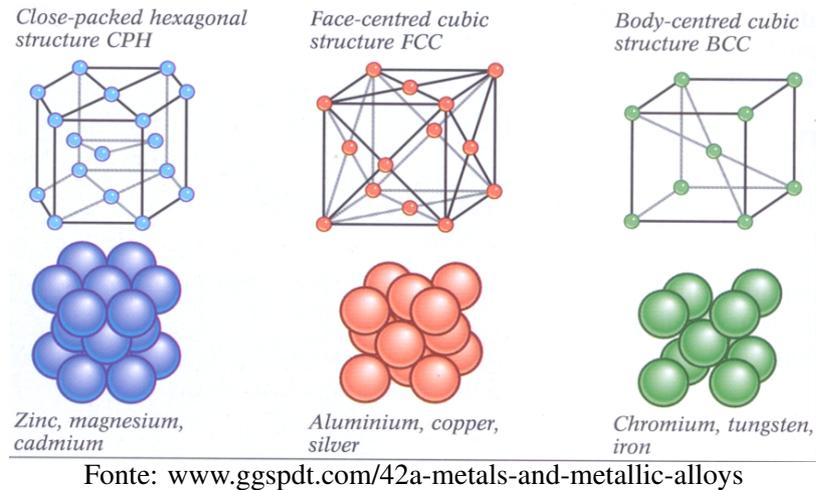
3.1 Definição de Cristais

Cristais são definidos como estruturas sólidas ou líquidas que apresentam arranjos periódicos de átomos, moléculas ou íons, e assim formam um padrão de repetição denominado rede cristalina, fornecendo um potencial periódico que tem um papel crucial nas propriedades dessas estruturas. Como exemplo, a propagação de elétrons e de ondas eletromagnéticas são restritas a determinadas frequências, por outro lado, a rede cristalina pode proibir a propagação de ondas em outro intervalo de frequência, o que significa que os elétrons só podem se propagar pelo cristal com certas energias e em determinadas direções. A estrutura de bandas de energia do cristal sintetiza esses conceitos do ponto de vista formal da teoria. Diferentes direções na rede recíproca têm diferentes separações energéticas, chamadas de hiatos de energia ou "gap" energético, conceito base para a definição de isolantes que apresenta hiatos típicos maiores que $9eV$, semicondutores apresentam hiatos de aproximadamente de $1eV$ e metais não apresentam qualquer hiato. No caso de ondas eletromagnéticas, a periodicidade da estrutura é definida pela presença de meios dielétricos com diferentes índices de refração em vez de átomos ou moléculas, e assim surge o conceito de Cristal Fotônico. As propriedades que os cristais apresentam os tornam materiais de extrema relevância, as ligações, impurezas e defeitos na rede são características que permitem aplicações distintas. As principais áreas que se beneficiam destas propriedades são a eletrônica e a fotônica, esta última onde se concentra esse estudo. Como ilustração, a Figura 1 mostra átomos de diferentes elementos metálicos agrupados em um retículo cristalino. Alguns exemplos clássicos de estruturas cristalinas são alumínio ou uma liga de alumínio, cobre, prata e várias outras. A utilização de cristais em dispositivos fotônicos tem sido intensificada pela busca promovida pelo avanço em telecomunicações e computação. A grande dificuldade está presente nos meios de fabricação de estruturas cristalinas que possam guiar a luz em três dimensões. Para resolver este problema, diversos esforços voltados para a utilização de métodos numéricos estão sendo desenvolvidos, sendo o FDTD uma das principais ferramentas utilizadas para fazer a simulação destes cristais.

3.1.1 Lei De Bragg

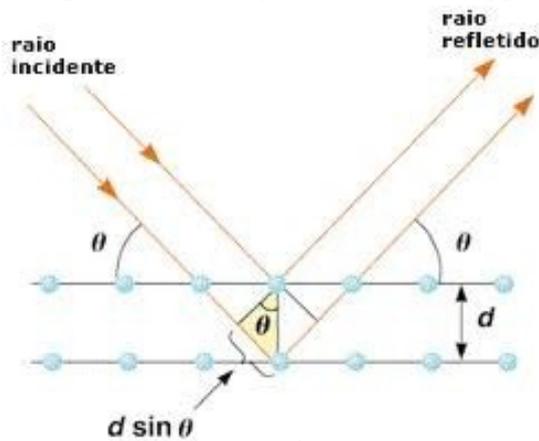
Em 1913, William Lawrence Bragg e William Henry Bragg demonstraram uma relação matemática para a ocorrência de interferência construtiva entre as ondas espalhadas pela

Figura 1 – Exemplos de Redes Cristalinas



rede cristalina. A ideia é considerar uma rede de planos paralelos separados por uma distância d , então calcula-se a diferença de percurso entre os raios refletidos pelos planos vizinhos, concluindo que para ocorrer interferência construtiva a diferença de percurso deve ser igual a um número inteiro n vezes o comprimento de onda, o que implica em uma diferença de fase de 2π radianos. Assim, de acordo com a análise da Figura 2 é possível construir a Equação (3.1) que explica o padrão de interferência em uma rede cristalina, essa lei é uma consequência da periodicidade dos cristais.

Figura 2 – Ilustração da Lei de Bragg



Fonte: (ARAÚJO, 2012)

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.1)$$

Sendo n um número inteiro, λ o comprimento de onda incidente na rede cristalina, d a distância entre dois planos paralelos vizinhos e θ o ângulo de incidência, a lei de Bragg é satisfeita para

comprimentos de onda $\lambda < 2d$. A formulação de Bragg inicialmente foi utilizada como uma forma de explicar os padrões de reflexão de raios x em sólidos cristalinos. Eles descobriram que altos picos de radiação refletida eram produzidos a partir de determinados comprimentos de onda e um ângulo de incidência.

3.2 Guias de Ondas

Nesta seção é feita uma breve discussão sobre o conceito de guias de ondas, porém uma introdução matemática mais elaborada, foge do foco deste trabalho, e pode ser encontrada em (OKAMOTO, 2006) ou (CALVO; LAKSHMINARAYANAN, 2018).

A principal função de guia de ondas, como o nome já diz, é direcionar ondas, neste caso, ondas eletromagnéticas, de forma que dissipe o mínimo possível de energia, direcionando essa energia para uma porta de saída ou detector. O guia de onda é extremamente importante, pois sem essa restrição física, as intensidades das ondas diminuem de acordo com a lei do inverso do quadrado. O guia abordado neste trabalho constitui de uma geometria planar que confina as ondas eletromagnéticas em duas dimensões, de forma que a onda transmitida pelo guia depende do comprimento de onda, o que determina as dimensões do guia. Portanto, cada guia tem um comprimento de onda de corte, sendo assim, ondas com comprimento maior não poderão ser guiadas; por exemplo, uma fibra óptica pode guiar a luz, mas não transmite micro-ondas que apresenta um comprimento de onda maior. Aqui, restringimos o interesse em guias de onda dielétricos planares que possam se acoplar à radiação e cavidades ópticas, estruturas descritas mais a frente.

3.2.1 Princípio da orientação do índice

Os fenômenos de reflexão e refração são fundamentos importantes no campo da óptica. Quando uma onda eletromagnética atinge a interface de uma estrutura qualquer com um ângulo de incidência θ_i em relação a normal, a luz incidente pode ser refratada ou refletida. Tal relação pode ser descrita pela lei de Snell dada por:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (3.2)$$

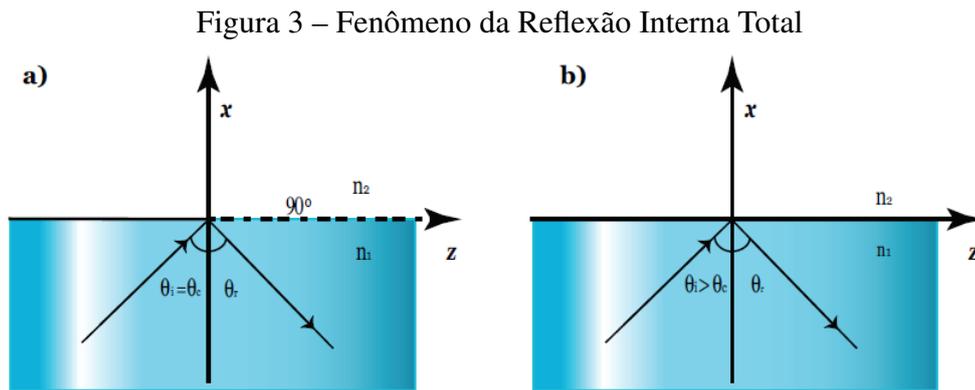
De forma que, n_1 e n_2 são os índices de refração do meio incidente e meio refratado,

respectivamente, θ_i representa o ângulo de incidência e θ_t o ângulo de transmissão.

Seguindo as ideias de (LÓPEZ-GALMICHE *et al.*, 2013), consideramos a propagação da luz de um meio com índice de refração n_1 para um meio dois com índice de refração n_2 , tal que $n_1 > n_2$, além disso é suposto que os meios sejam homogêneos e isotrópicos. Aplicando a Lei de Snell, existe um ângulo θ_c , chamado ângulo crítico, que satisfaz a relação $\theta_i = \theta_c$ e que não produz transmissão para o meio dois se $\theta_t = 90^\circ$, o ângulo crítico pode ser escrito como:

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.3)$$

Assim, se esta condição for satisfeita, o raio incidente será refletido para o meio incidente, o que gera o fenômeno da Reflexão Interna Total (RIT), conforme mostrado na Figura 3



Fonte: (LÓPEZ-GALMICHE *et al.*, 2013)

Em termos estruturais, consideramos um guia de onda retangular, ou como é chamado na literatura "*slab*", o qual consiste de três camadas com diferentes índices de refração designados por n_1 , n e n_2 . Com base na Figura 3, a luz será confinada entre as interfaces superior (chamada de superestrato) e inferior (chamada de substrato). A região entre elas representa o guia de ondas. Supondo que $n > n_1 > n_2$, isto implica dois ângulos críticos θ_{c1} e θ_{c2} , sendo:

$$\sin \theta_{c1} = \frac{n}{n_1} \quad (3.4)$$

$$\sin \theta_{c2} = \frac{n_2}{n} \quad (3.5)$$

Portanto, existe três possibilidades:

– **Caso 1**

Modos de ar, ocorre se $n_1 = 1$, ou seja, a camada superior for composta por ar, além disso devemos ter $\theta_{c1} < \theta$ e $\theta_{c2} < \theta$. Isso faz com que a luz se propague em modos de radiação do substrato ao superestrato. Portanto, o confinamento da luz não será possível, pois não ocorre reflexão total, Figura 5(a).

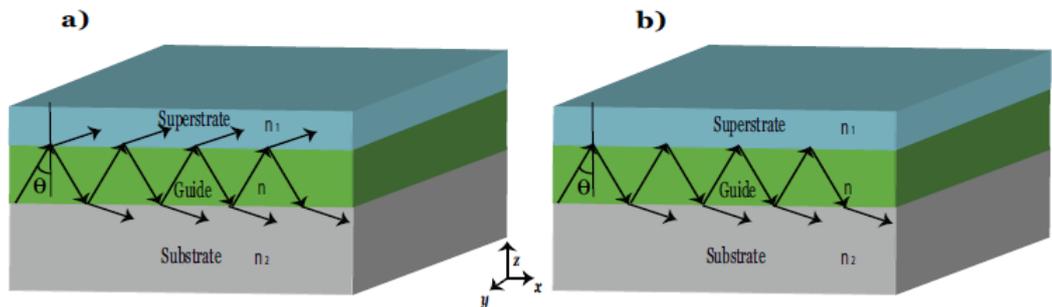
– **Caso 2**

Neste caso, temos os modos de substrato, em que $n_1 = 1$, $\theta_{c1} > \theta$ e $\theta_{c2} < \theta$. Dessa forma, existe refração no substrato-guia e a condição de reflexão interna total só ocorre na interface superestrato-guia, Figura 5(b).

– **Caso 3**

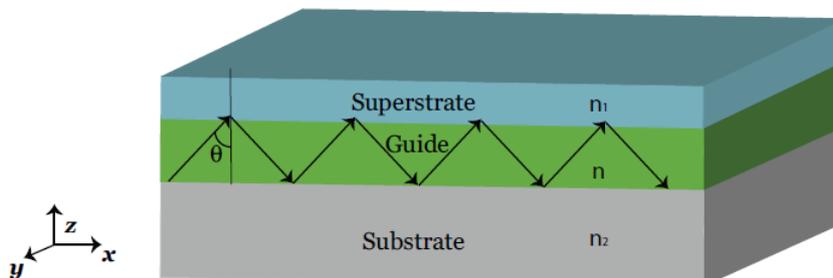
Para ângulos $\theta_{c1} > \theta$ e $\theta_{c2} > \theta$. Neste caso, ocorrerá reflexão interna total tanto na interface superestrato-guia, quanto substrato-guia, e portanto a luz estará confinada no guia de onda, Figura 5.

Figura 4 – Modos de propagação: (a) Modos de Ar e (b) Modos do substrato



Fonte: (LÓPEZ-GALMICHE *et al.*, 2013)

Figura 5 – Confinamento completo no Guia



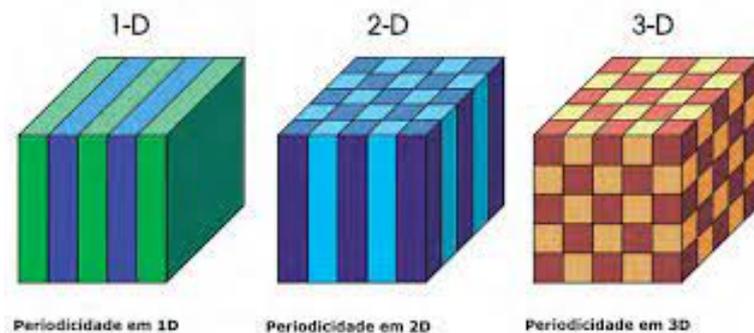
Fonte: (LÓPEZ-GALMICHE *et al.*, 2013)

3.3 Cristal Fotônico

Em 1987, Eli Yablonovitch e Sajeev John descreveram estruturas dielétricas periódicas denominadas cristais fotônicos, caracterizadas por índices de refração ordenados com a mesma periodicidade da ordem do comprimento de onda da luz, (LIPSON; LU, 2009).

Em um cristal semiconductor as propriedades periódicas afetam o comportamento dos elétrons da rede iônica. Analogamente, um Cristal Fotônico é definido como uma nanoestrutura óptica composta de regiões dielétricas diferentes que afetam o movimentos dos fótons, que se comportam como ondas, dependendo do comprimento de onda a propagação em certas regiões não é permitida. Os comprimentos de onda que se propagam são denominados modos, o conjunto de modos permitidos são chamados de bandas e as bandas não permitidas são as lacunas de banda fotônica. Isso gerou nas ultimas décadas um grande interesse científico em manipular a interação entre luz e matéria, embora o uso de cristais fotônicos possibilite manipular apenas certos comprimentos de onda, essa característica permite aplicações diversas em desenvolvimento de lasers, células solares mais eficientes e Fotônica Integrada. Existem cristais fotônicos naturais como a opala, e aqueles que são construídos, e portanto podem ser classificados como metamateriais. A utilização de cristais tridimensionais é uma área de grande estudo na comunidade científica atualmente, tendo como principal objetivo a implementação destas estruturas para fomentar os computadores quânticos. Porém, o foco deste trabalho é estudar aplicações de cristais fotônicos bidimensionais em guias de ondas. Além disso, os processos de fabricação dos cristais fotônicos ainda oferecem diversas dificuldades de serem implementados, porém em um ambiente bidimensional, os processos utilizados são mais fáceis de serem aplicados, o que não é tão fácil quando se trata de cristais em um ambiente 3D. Na Figura 6, temos a ilustração de cristais fotônicos 1D, 2D e 3D.

Figura 6 – Estrutura de Cristais Fotônicos nas dimensões 1D, 2D e 3D



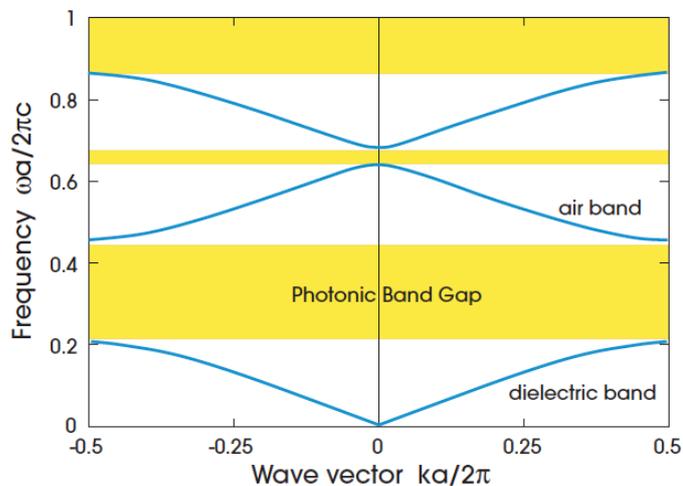
Fonte: (JOANNOPOULOS *et al.*, 2011)

3.3.1 Band Gap Fotônico

Quando um material se encontra no zero absoluto, todos os elétrons estão presentes na camada de valência. À medida que a temperatura aumenta, os elétrons absorvem energia e atingem as camadas de condução. A diferença de energia mínima necessária para que o elétron efetue essa transição é conhecida como banda de energia ou banda proibida, em inglês o termo usado é "*band gap*". A origem do "*band gap*" em Cristais Fotônicos pode ser compreendido como o surgimento da interferência destrutiva de múltiplas reflexões das ondas que se propagam pelo cristal. A Figura 7 ilustra a região de frequência onde a luz é proibida de se propagar, e portanto essa estrutura apresenta uma lacuna de banda fotônica, representado pelas faixas amarelas. A região com a propagação de modos permitidos, modos de ar e modos de substrato, correspondem à faixa branca.

Os modos de propagação vão depender, entre outros fatores, da constante dielétrica do material. No geral, as regiões com constante dielétrica menor correspondem às bandas de ar, e as com constantes dielétrica maior correspondem à banda do dielétrico. A situação é análoga às bandas eletrônicas de semicondutores, onde o "*gap*" fundamental localiza-se entre a banda de condução e a banda de valência. Como ilustração de um exemplo, a Figura 7 destaca o "*band gap*" fotônico para uma estrutura com constante de rede R , espessura de $0,2R$ para a camada de GaAs e $0,8R$ para a de ar. Devemos ressaltar que o "*band gap*" sempre surge em cristais unidimensionais, independentemente do contraste do material, de forma que quanto menor o contraste, menor será o gap de energia.

Figura 7 – Banda Fotônica de um filme com várias camadas de ar e um dielétrico como substrato

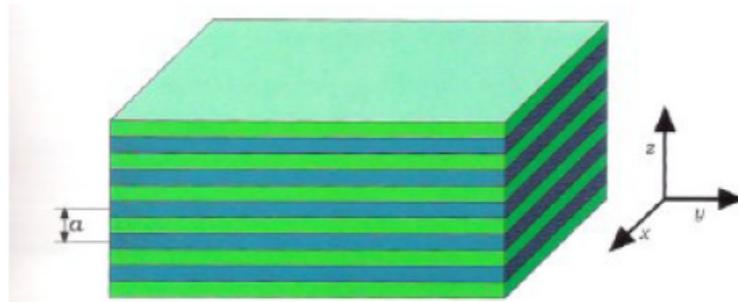


Fonte: (QUIÑÓNEZ *et al.*, 2006)

3.3.2 Cristal Fotônico 1D e Espelho de Bragg

Quando camadas com constantes dielétricas são inseridas no cristal em uma única direção, mantendo as outras dimensões com índices de refração constantes, temos a definição de um cristal fotônico unidimensional.

Figura 8 – Cristal Fotônico com periodicidade em z

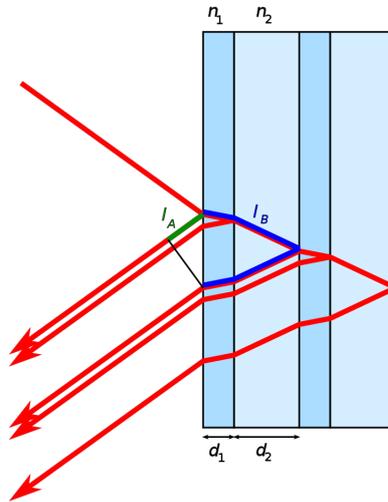


Fonte: (VERMIEIRO; RUBIO-MERCEDES, 2009)

Um espelho de Bragg ou espelho dielétrico é um aparato formado por várias camadas de materiais com variações periódicas em suas geometrias e uma variação periódica do índice de refração. Estes espelhos são os exemplos mais comuns de cristais fotônicos unidimensionais, conforme ilustra (WEST; HELMY, 2006). Para ondas que se propagam em um guia de onda, o refletor de Bragg, ao captar tal onda, causa uma reflexão parcial, cujo comprimento de onda é aproximadamente quatro vezes a espessura da camada do espelho, as reflexões geradas pelo espelho são então combinadas como fonte de interferência construtiva, e assim contribuem para um alto fator de refletividade. A faixa de comprimentos de onda refletida é chamada de faixa fotônica, esses comprimentos de ondas específicos são proibidos de se propagar pela estrutura interna do cristal. Esses dispositivos funcionam com base na interferência da luz refletida das diferentes camadas, constitui um cristal fotônico unidimensional, consistindo em uma pilha de camadas com alto índice de refração intercalado com camadas de baixo índice de refração, Figura 9.

Estes espelhos são largamente usados para produzir outros espelhos com alta refletividade, em alguns casos a taxa de refletividade passa de 99%. A função deste aparato neste trabalho é refletir a faixa do espectro da luz, e então atuar como direcionador da luz pelo guia de onda.

Figura 9 – Diagrama de um Espelho de Bragg. Camadas finas com alto índice de refração n_1 são intercaladas com camadas mais espessas com menor índice de refração n_2 . Os comprimentos de caminho l_A e l_B diferem em exatamente um comprimento de onda, o que leva a uma interferência construtiva.



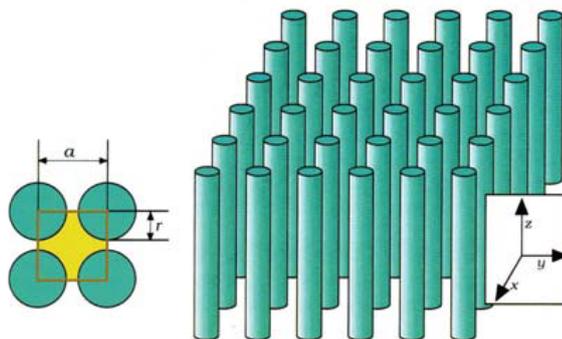
Fonte: (Wikipedia contributors, 2021)

3.3.3 Cristal Fotônico 2D

Thomas Krauss foi o responsável por demonstrar a viabilidade de um cristal fotônico bidimensional em comprimentos de onda da luz, (KRAUSS *et al.*, 1996)), cuja estrutura apresenta uma variação de índice de refração ao longo do plano xy e um valor constante no eixo z . Neste caso, o band gap fotônico tem como origem o alto índice de contraste da constante dielétrica, da periodicidade e da geometria da rede cristalina que pode representar formas variadas como triangular, quadrada e hexagonal.

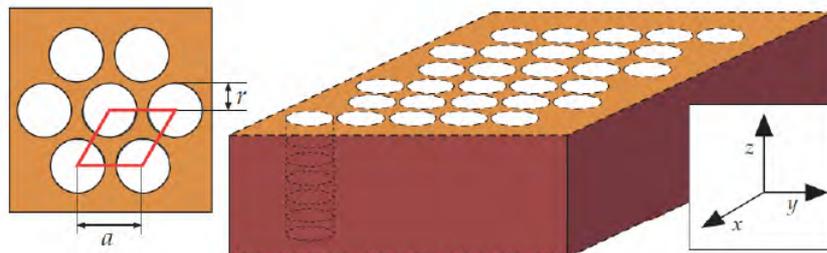
Um exemplo clássico de cristal fotônico bidimensional é um arranjo com cilindros dielétricos na direção z com uma rede quadrada, Figura 10 ou com arranjo geométrico triangular, Figura 11.

Figura 10 – Cristal Fotônico 2D. Arranjo de rede quadrada com cilindros dielétricos de ar, raio r , constante de rede a e constante dielétrica ϵ



Fonte: (QUIÑÓNEZ *et al.*, 2006)

Figura 11 – Cristal Fotônico 2D. A estrutura é composta por colunas de ar imerso em um substrato dielétrico com rede triangular e parâmetro de periodicidade a



Fonte: (QUIÑÓNEZ *et al.*, 2006)

A maior parte dos cristais apresenta defeito em sua periodicidade, resultante da presença de diferentes estruturas em sua rede ou de defeitos no posicionamento das estruturas constituintes. Como exemplo, a rede cristalina de silício apresenta falhas devido à presença de átomos de germânio e outros, o que dá origem a materiais semicondutores.

A introdução de defeitos na estrutura periódica do cristal fotônico gera cavidades com diferentes índices de refração. Esta configuração periódica dos índices de refração seleciona comprimentos de ondas específicos criando faixas permitidas e proibidas para a propagação das ondas, e assim gera um "gap" fotônico. Esse efeito é análogo ao que ocorre em cristais semicondutores, onde se introduz impurezas na rede o que gera níveis de energia permitidos dentro do gap eletrônico, como explica (CARDONA; PETER, 2005).

3.4 Cavidades Ressonantes e Modos Acoplados

Pela definição de ressonância, sabe-se que a amplitude de um sistema oscilante é aumentada quando uma força externa é aplicada periodicamente com uma frequência igual à frequência natural do sistema. Ou seja, quando uma força externa é aplicada com frequência ressonante a um sistema qualquer, o sistema oscila com uma amplitude maior do que quando essa mesma força é aplicada com outras frequências não ressonantes. A partir disso, definimos um ressonador como um sistema que oscila naturalmente com uma frequência específica e exibe ressonância. Esses sistemas ou dispositivos podem ser usados para gerar ondas com frequências específicas.

Uma cavidade ressonante é um dispositivo com parte interna oca que limita o movimento das ondas, permitindo que ondas eletromagnéticas ou mecânicas possam ser confinadas, refletindo para frente e para trás nas paredes do dispositivo. Quando uma fonte de ondas em uma das frequências ressonantes da cavidade é aplicada, as ondas de movimento oposto formam

ondas estacionárias que permite o armazenamento de energia eletromagnética. Exemplos comuns são as cavidades de micro-ondas e receptores usados em comunicação via rádio. Portanto, um ressonador é um sistema que exibe ressonância, oscilando naturalmente com amplitude maior em determinadas frequências. Considerando a frequência ressonante mais baixa, que chamamos de frequência fundamental, nesse sentido todas as propriedades importantes dos ressonadores devem ser aplicadas considerando a frequência fundamental do ressonador.

Agora se considerarmos um material com grande constante dielétrica, cercado com um material com constante dielétrica menor, essa variação será responsável pelo confinamento de ondas eletromagnéticas, e assim atua de forma semelhante a um ressonador de cavidade, como descrito por (POZAR, 2011). A luz presa em uma cavidade tem sua amplitude aumentada, e portanto, uma cavidade óptica também atua como um ressonador, refletindo as ondas eletromagnéticas e permitindo que os modos de onda estacionária sejam gerados.

3.4.1 Acoplamento fraco

Em 1946 Edward Mills Purcell elaborou um trabalho mostrando que ocorre emissão de fótons por átomos excitados ao decair de um estado de maior energia para um estado de menor energia, sendo assim, a radiação varia quando átomos são introduzidos em microcavidades ópticas. Nestes dispositivos ocorre o processo de acoplamento com os modos eletromagnéticos da cavidade, isso contribui para o aumento espontâneo da taxa de emissão da radiação, tal relação é chamado de Efeito Purcell, como descrito em (PURCELL *et al.*, 1946). Essa contribuição abriu muitas possibilidades para desenvolver novos dispositivos opto-eletrônicos, como exemplo altamente desejável na computação quântica, permite a fabricação de dispositivos emissores de fóton único.

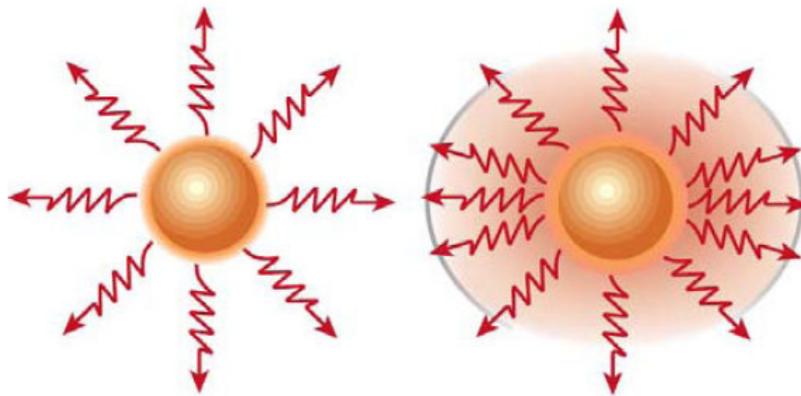
O efeito Purcell envolve o estudo da interação radiação-matéria, o qual foge do escopo deste trabalho, mas em termos matemáticos tal efeito pode ser descrito pelo fator de Purcell, F_p , que mede o aumento da taxa de emissão espontânea de um sistema quântico por seu ambiente. Esse fator de aumento é dado por:

$$F_p = \frac{3}{4\pi} \left(\frac{\lambda}{n} \right)^3 \frac{Q}{V_{efetivo}} \quad (3.6)$$

sendo n o índice de refração da cavidade, λ o comprimento de onda da luz no vácuo, Q o fator de qualidade que descreveremos mais adiante e $V_{efetivo}$ o volume efetivo ocupado pelo modo da

onda estacionária dentro da cavidade. O efeito Purcell pode ser descrito ao retirar um átomo do vácuo e introduzi-lo na cavidade óptica, Figura 12.

Figura 12 – Efeito Purcell: taxa de emissão gerado pelo acoplamento. Lado esquerdo temos a representação da taxa de emissão gerado por um átomo fora da cavidade. Lado direito a variação da radiação quando um átomo é inserido na cavidade óptica



Fonte: (VAHALA, 2003)

O fator de qualidade do ressonador está diretamente ligado ao tempo máximo que um fóton emitido pela fonte de emissão permanece no interior da cavidade antes de escapar. Dependendo desse tempo, o fóton tem a probabilidade de ser reabsorvido pela cavidade e depois entra no ciclo novamente, como descreve (CAI *et al.*, 2000). Se o tempo que o fóton permanece na cavidade for pequeno, então o acoplamento é considerado fraco. Em termos matemáticos, o fator de qualidade pode ser descrito, resumidamente, pela razão $Q = \lambda / \Delta\lambda$, sendo λ o comprimento de onda referente a fonte emissora e $\Delta\lambda$ a faixa de comprimento de onda que pode ser absorvido pela cavidade.

3.4.2 Acoplamento forte

Quando falamos de acoplamento, a outra possibilidade é o acoplamento forte, também conhecido como "*anti-crossing*". Assim como no acoplamento fraco, os modos acoplados da fonte emissora são acoplados aos modos eletromagnéticos da cavidade. Neste caso, o acoplamento é mais intenso que o anterior, fazendo com que a radiação permaneça mais tempo dentro da cavidade.

3.4.3 Fator de Qualidade do Ressonador

As estruturas discutidas nesse trabalho tem como base o princípio de cavidades ressoantes. nesse domínio, a ressonância é o princípio físico que define o comportamento dos sistemas abordados. As cavidades ressoantes favorecem a otimização do guia de onda curvo. A ideia básica é o acúmulo de energia do ressonador devido à excitação dos modos ressonantes, também é de grande importância a influência do acoplamento entre os modos de propagação e tais cavidades. Geralmente, ocorre perda de energia devido à radiação ou absorção de energia pelo material, onde se aplica a teoria dos modos acoplados para analisar o acoplamento dos modos ressonadores. Nesse sentido, a transmissão é completa com nenhuma reflexão se o ressonador for ideal (sem dissipação de calor). Os efeitos da radiação podem ser neutralizados fazendo o fator Q externo de ressonador muito pequeno. Isto pode ser alcançado por um forte acoplamento dos modos dos guias de ondas ao modo gerado pelo ressonador, como descreve (MANOLATOU; HAUS, 2002).

3.5 Simulação Computacional de Cristais Fotônicos

Neste trabalho são discutidos referências bibliográficas voltadas para simulação computacional de guias de ondas em cristais fotônicos, tendo como método numérico a utilização de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) que servirá de ferramenta para a realização de trabalhos futuros. As simulações discutidas no capítulo seguinte fazem parte das referências bibliográficas pesquisadas, cujo objetivo é analisar taxas de transmissão dos modos transversais em guias de ondas e como melhorar os resultados implementando parâmetros que possam melhorar a eficiência na transmissão. As equações básicas que tratam tal tema podem ser pesquisadas em (TAFLOVE *et al.*, 2005).

4 ANÁLISE DOS PARÂMETROS EM GUIAS DE ONDA COM CURVA DE 90°

4.1 Descrição e análise inicial da estrutura de estudo

A proposta deste capítulo é abordar o estudo de artigos relacionados à transmissão de radiação eletromagnética em guias de ondas. Os trabalhos apresentados utilizam simulação FDTD como método computacional para simular a taxa de transmissão em um guia de onda reto. Inicialmente é feita uma análise para ilustrar o problema a ser debatido e os resultados que se espera obter com base em uma situação geral. Em seguida, destaca-se a estrutura analisada e os passos que são utilizados para alcançar os resultados analisados.

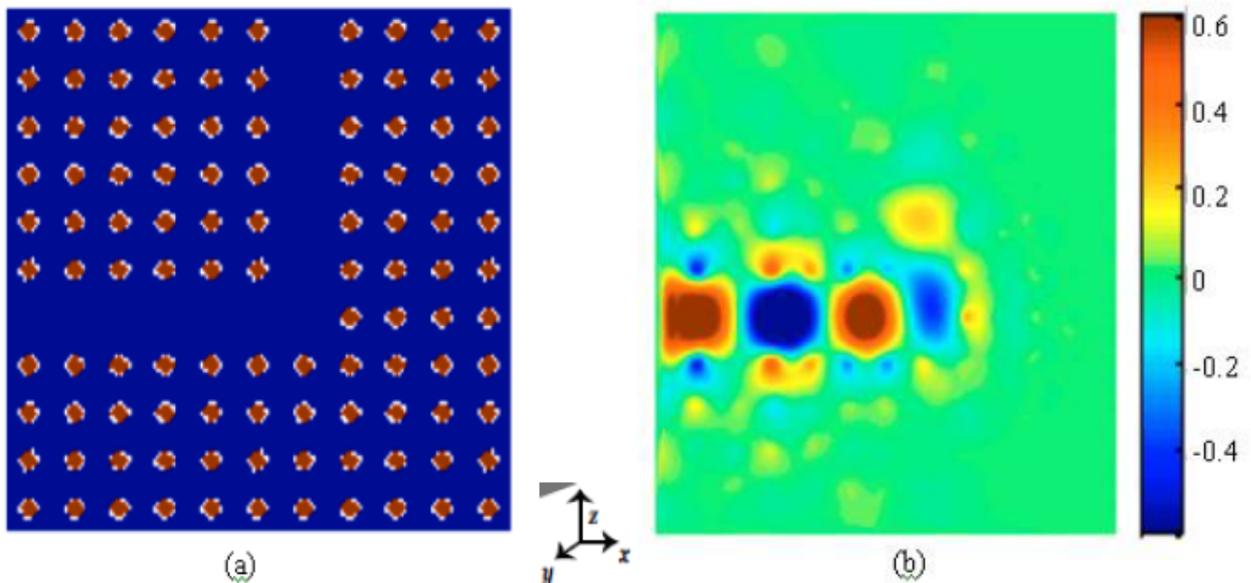
A princípio, como forma de ilustrar o problema a ser analisado, é investigado como os modos de propagação do campo magnético se comportam na estrutura cristalina, independente do tipo do material que compõe o substrato, posteriormente são demonstrado os resultados que se espera obter neste caso. Usando simulação FDTD, é possível avaliar uma variedade geométrica de estruturas bidimensionais para compreender a taxa de transmissão dos modos transversais, em seguida são introduzidos os parâmetros com o intuito de otimizar a taxa de transmissão no guia de ondas. Em geral, o estudo indica que a eficiência na transmissão pode ser aumentada com a adição de uma cavidade ressonante e introduzindo um espelho de Bragg como retardador de fase.

A contextualização deste trabalho inicialmente é baseada no trabalho de (DEKKICHE; NAOUM, 2008). A estrutura estudada é composta por uma rede quadrada preenchida por buracos de ar em um substrato dielétrico, Figura 11, a diferença é que aqui utiliza-se uma rede quadrada com índice de refração $n = 3,2$, o que na prática corresponde ao Arseneto de Gálio de Alumínio (AlGaAs), o índice de contraste é de $2,2$, o que representa um fator importante no desempenho da transmissão dos modos de propagação transversais. O material é intercalado por um defeito que forma o guia reto com entrada e saída de larguras de $0,2\mu m$. Na Figura 13(a) é mostrada uma visão superior da geometria cristalina, em que os pontos vermelhos correspondem aos buracos de ar, e a parte azul indica o substrato dielétrico,

Usando uma fonte emissora coerente introduzida na entrada do guia de onda, parte esquerda da Figura 13(a), é emitido um feixe policromático na direção x . Considerando que o campo magnético aponta pra cima, é analisado o espectro de transmissão dos modos transversais magnéticos, o valor máximo de potência transferida é de cerca de 40%. Parte da potência é

perdida como radiação devido à ocorrência de interferência destrutiva oriunda da lei de Bragg ou espalhada pela estrutura interna do cristal, o que gera perdas na taxa de transmissão. De fato, a taxa de polarização do campo elétrico vai depender da relação dos modos que se propagam pelo cristal e os modos gerados pela junção correspondente ao ângulo de 90° . Assim, uma proposta de estudo deste trabalho é investigar como a adição de novos parâmetros e a variação da estrutura geométrica do cristal pode influenciar a eficiência de transmissão dos modos transversais.

Figura 13 – (a) Estrutura com curva de 90° não otimizada, (b) Distribuição do Campo Magnético referente a curva de 90° e luminosidade para cada comprimento de onda.

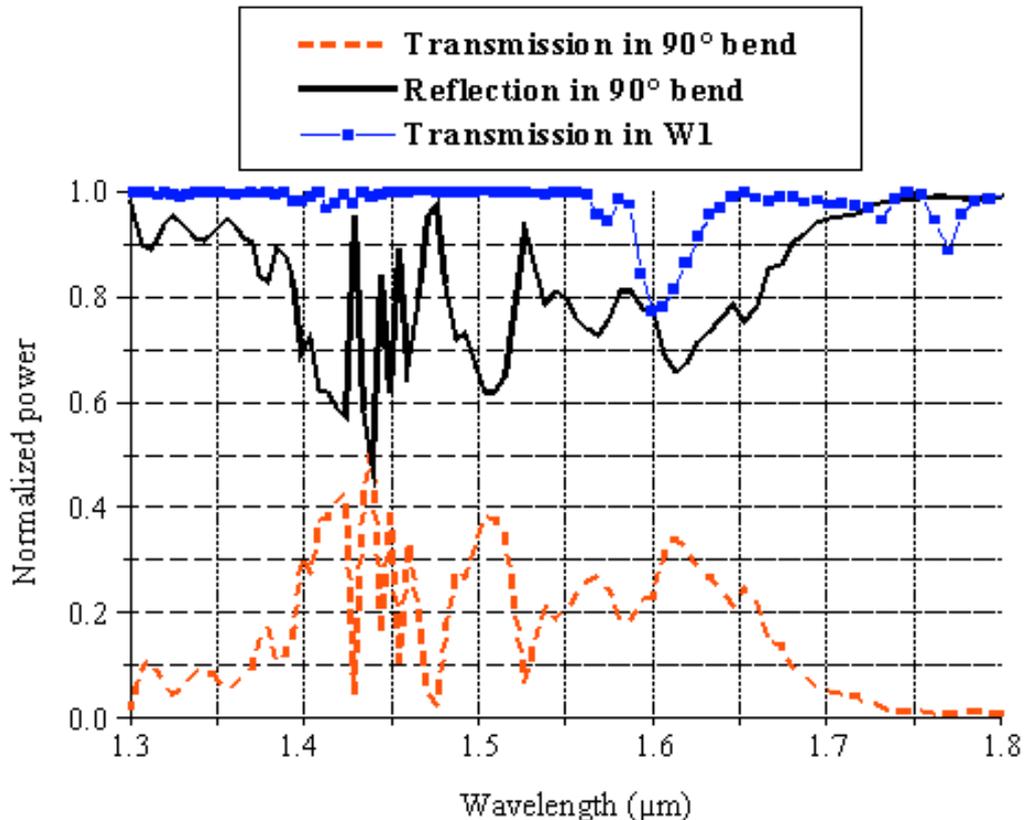


Fonte: (DEKKICHE; NAOUM, 2008)

Na Figura 13(b) é mostrada a distribuição do campo magnético H_z da estrutura não otimizada, o espectro de transmissão e reflexão correspondente ao campo magnético da estrutura não otimizada é mostrado na Figura 14, algo similar é encontrado para a distribuição do campo elétrico. Neste caso, podemos notar que para comprimento de onda $\lambda = 1,5\mu m$ a taxa de transmissão alcança um valor de 40% e a reflexão chega a 60%, para outros comprimentos de onda a reflexão máxima chega a 90% e a transmissão apenas 10%. Isso ocorre porque parte da energia é perdida em forma de radiação oriunda da interferência destrutiva dos modos mal combinados na junção ou espalhada em forma de radiação pela estrutura interna do cristal, essas características impedem as ondas de se propagar pelo guia de ondas, o que fica claro na Figura 13(b). A conclusão é que a transmissão depende da relação entre os modos da junção e os modos que se propagam pelo cristal fotônico. Assim, com o intuito de melhorar a taxa de transmissão é preciso alterar a geometria da junção de 90° de forma que possa favorecer a ocorrência de

interferência construtiva entre esses modos de propagação, o que permitirá o aumento da taxa de transmissão dos modos transversais.

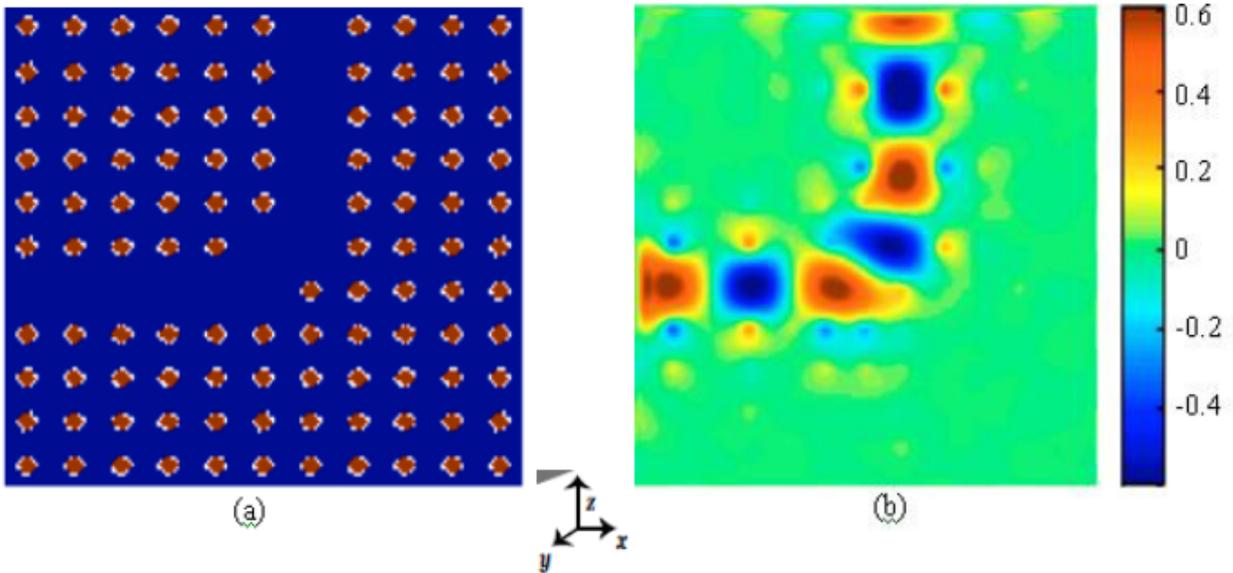
Figura 14 – Espectro de Transmissão e Reflexão não-otimizado referente ao guia de onda de 90°.



Nesse sentido, é removido um buraco de ar e adicionado um espelho refletor de Bragg a 45° no canto reto superior e adicionado um buraco ao canto inferior, de forma que esse buraco adicionado funcione como uma cavidade óptica, conforme mostrado na Figura 15(a), os resultados obtidos com esse novo parâmetro são mostrados nas Figura 15(b), o espectro correspondente é mostrado na Figura 16.

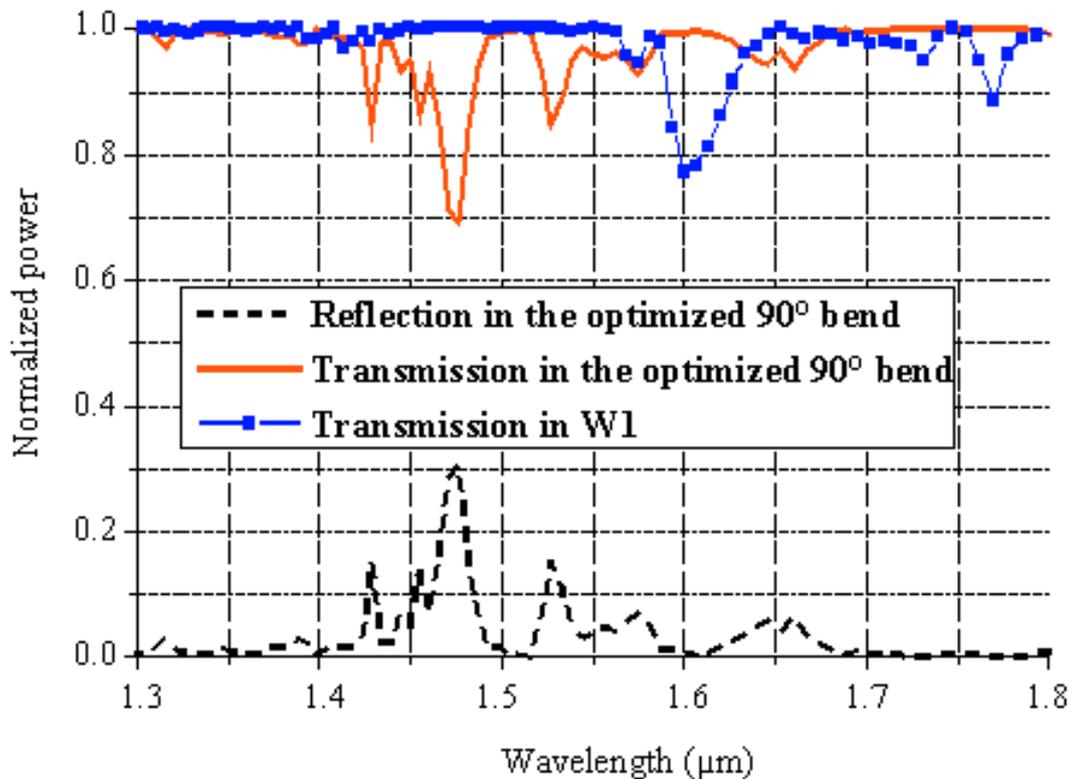
A função w_1 da curva de 90° no cristal fotônico corresponde a propagação de um único modo no guia de onda em relação a entrada e saída, que chega a quase 100 % para a maioria dos comprimentos de onda entre $1,3 \mu m$ e $1,8 \mu m$, o que é um argumento óbvio já que apenas um pulso eletromagnético é incapaz de gerar qualquer tipo de interferência. Não existe uma diferença significativa quando a transmissão passa a ser analisada com a adição do espelho de Bragg e do ressonador.

Figura 15 – (a) Estrutura com curva de 90°, (b) Distribuição do Campo Magnético referente a curva de 90°



Fonte: (DEKKICHE; NAOUM, 2008)

Figura 16 – Espectro de Transmissão e Reflexão referente ao guia de onda de 90°



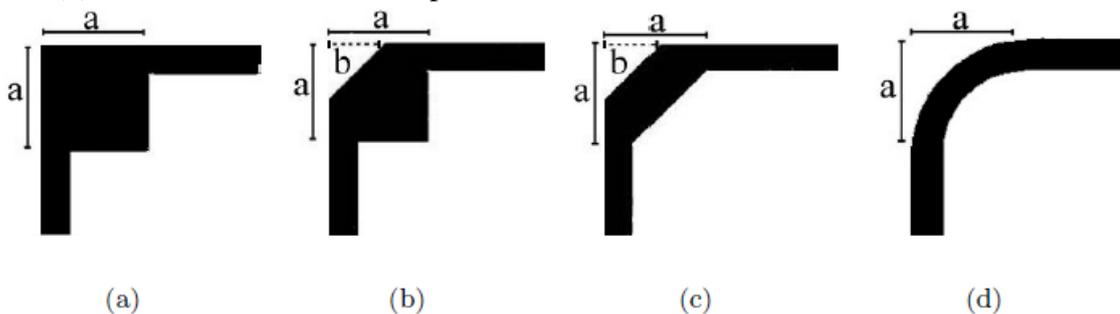
Fonte: (DEKKICHE; NAOUM, 2008)

4.2 Adição de parâmetros para melhorar a taxa de transmissão.

As simulações de guias de ondas com curvas de 90° e baixa perda na transmissão apresentam diversas dificuldades. Este objetivo pode ser alcançado, usando cristais fotônicos,

espelhos de canto e ressonadores de guias de onda, esses aparatos favorecem a otimização dos parâmetros envolvidos delimitando as condições de contorno. Além disso, é considerado um material de alto índice de contraste, formado pelo substrato com índice de refração $n = 3,2$ e buracos de ar. Baseado nisso e com o avanço no estudo de cristais fotônicos e guias de ondas, foi proposto por (MEKIS *et al.*, 1996) construir curvas de 90° com alta eficiência de transmissão, a ideia inicial foi introduzir linhas de defeitos, e então usar simulação para analisar o espectro eletromagnético em um intervalo específico de comprimento de onda. Posteriormente, (MANOLATOU; HAUS, 2002) propôs a adição de uma cavidade ressonante no canto interno da curva conforme mostrado na Figura 17(a). O estudo baseia-se no princípio de ressonadores fracamente acoplados discutido no capítulo anterior, onde um ressonador simétrico pode acoplar um canal de entrada a um canal de saída sem reflexão. A partir disso é possível projetar o design do guia de onda reto, e analisar as variações no espectro de transmissão dos modos transversais. Com base na análise e simulações de Manolatos, foi possível obter uma taxa de transmissão de 98%, ele também mostrou que é possível extrair o máximo de energia para baixos valores de Q do ressonador fortemente acoplado, usando as configurações mostradas nas Figuras 17(a) e 17(b). Apesar dos ressonadores terem um acoplamento forte, o princípio utilizado em acoplamento fraco permanece válido para a simulação do guia de ondas.

Figura 17 – Esquema das configurações da curva. (a) Curva com ressonador quadrado. (b) Curva com ressonador triangular com corte a 45° e espelho refletor. (c) Curva com um único espelho refletor (d) Curva circular lisa sem espelho e sem ressonador



Fonte: (ESPINOLA *et al.*, 2001)

Nessa análise, os ressonadores apresentam um baixo valor de Q e estão fortemente acoplados ao guia de ondas. A Figura 17(b) corresponde a uma proposta alternativa de um modelo simétrico de ressonador; como citado na análise inicial, ele usa um ressonador com um espelho a 45° , já para o ressonador quadrado retangular é utilizado uma cavidade ressonante sem adição do espelho. As dimensões do dispositivo são a e b, correspondendo, respectivamente, ao lado do quadrado e tamanho do corte a 45° . Nessa estrutura um modo que se propaga pelo defeito

no cristal sofre reflexão total em 45° e então pode ser guiada em torno do canto modificado, isso faz com que a cavidade atue como um retardador de fase. Para obter tal resultado usa-se um material de índice de refração no canto reto da estrutura para reduzir a velocidade de fase das frentes de onda internas em relação às externas, o que faz com a luz gire em torno da cavidade conforme mostra (NEUMANN, 1981). Através de um estudo mais detalhado, podemos avaliar a possibilidade de outras configurações que possam fornecer resultados semelhantes. A simulação FDTD é o método usado para estudar os fatores que afetam o desempenho na eficiência da transmissão dos modos normais transversais em um ambiente bidimensional. Considerando as Figuras 17(a) e 17(b), inicialmente foi variada a posição do ressonador, em seguida é detalhado como a variação da largura do espelho pode contribuir nos resultados. Os resultados de ambas as situações fornecem uma visão dos fatores envolvidos na otimização da geometria da curva de 90° .

A ideia deste trabalho é fazer comparações baseado nas configurações das Figuras 17(a) e 17(b) para um guia de onda com curvatura de 90° . Na prática, esse estudo pode ser aplicado a diversos cristais, porém baseado nas definições do índice de refração $n = 3,2$, podemos aplicá-lo ao estudo de materiais como *AlGaAs* e derivados com algum tipo de dopagem. Importante salientar que é utilizado FDTD e as condições de absorção de contorno chamadas (PML), Camadas Perfeitamente Combinadas, como descritas por (BERENGER, 1994). Considerando uma célula unitária quadrada de lado $l = 10nm$, as simulações geradas por FDTD projetam os modos transversais do campo elétrico, TE_z .

Inicialmente é introduzido na entrada do guia de onda um pulso gaussiano como modo fundamental de comprimento de onda $\lambda = 1,55\mu m$. Para comprimentos de ondas mais longos, a simulação FDTD pode acarretar erros mais significativos, para mitigar tais erros pode ser usado um guia de onda duplo, o que foge do foco do estudo. Posteriormente, é analisado a fração de potência na entrada acoplado ao modo fundamental e taxa de transmissão correspondente na saída em função do comprimento de onda, caso que pode ser exemplificado pela Figura 13(b) que descreve a distribuição do campo magnético, nesse sentido o objetivo é otimizar essa taxa de transmissão adotando os parâmetros citados anteriormente.

4.3 Funções do ressonador no guia de onda

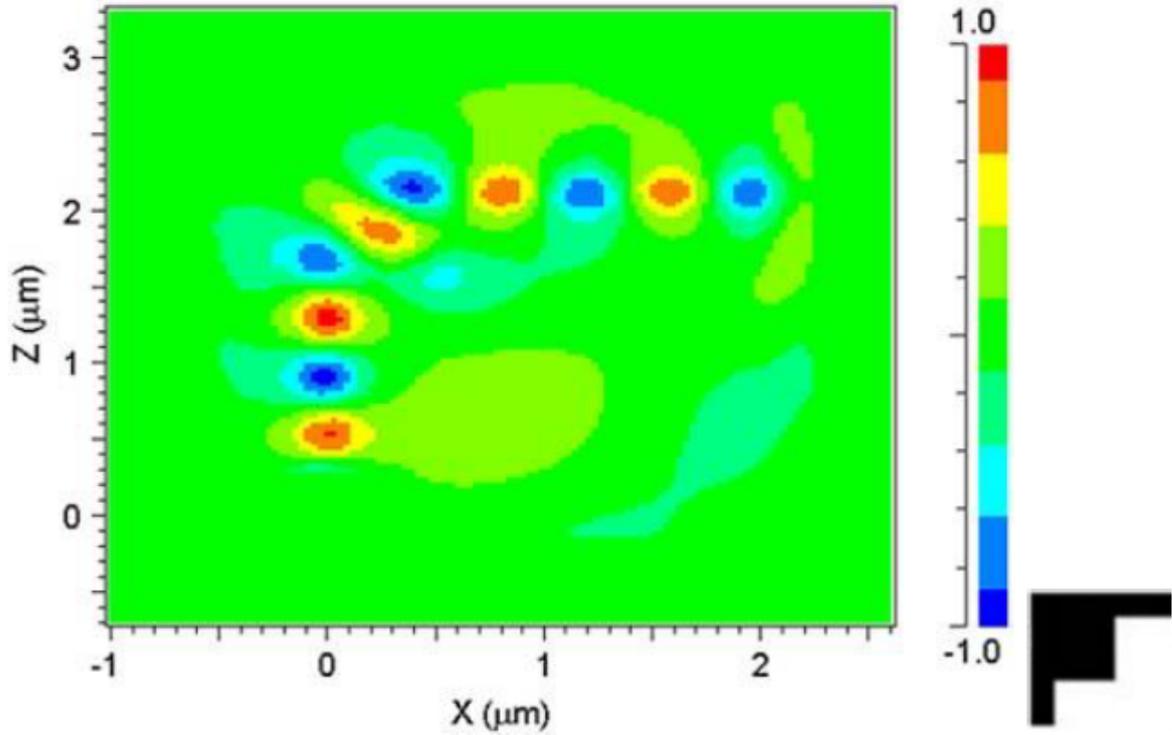
O objetivo nesta seção é avaliar os fatores de ressonância atuantes na cavidade óptica que afetam o desempenho da propagação dos modos ressonantes na guia de onda, esquematizados

nas Figuras 17(a) e 17(b). Para isso, buscamos analisar as propriedades ópticas de ressonadores quadrados e verificar o comportamento dos modos transversais ao entrar e sair da cavidade óptica. Estes dispositivos usam os modos gaussianos acoplados às entradas e saídas dos ressonadores, como descrito em modelos teóricos em (LITTLE *et al.*, 1998) e (CAI *et al.*, 1999), embora tal modelo seja diferente do abordado nesse trabalho, a ideia se encaixa perfeitamente com essas geometrias. O fator de qualidade Q dos ressonadores apresentam um acoplamento forte e um baixo valor, entre 13 e 30 como descrito em (MANOLATOU; HAUS, 2002), o que demonstra uma relevância para o desempenho óptico. Além disso, outros fatores são importantes para tal desempenho, o efeito de ressonância, a geometria da estrutura e as propriedades dielétricas do material, este último pode ser usado para orientar o guia de onda em uma curva. Espera-se também que a variação da entrada e saída ou a variação do ângulo de canto causem uma proporção diferente das ondas que viajam pelo guia em relação aos modos de ondas estacionárias gerada pelos ressonadores, isso é analisado com mais detalhes por (NEUMANN, 1981).

O ressonador pode ser colocada em posições diferentes, porém a que fornece um pico maior da taxa de transmissão do modo do campo elétrico corresponde à posição interna, Figura 17(a) e como resultado gera a Figura 18. A colocação do ressonador em outras posições é analisada e as saídas dos modos de propagação relativo a cada posição diferente do ressonador são ilustradas nas Figuras 19 e 20, a posição ao qual cada figura corresponde é ilustrada ao lado. Além disso, os comprimentos de onda de transmissão máxima ocorrem para uma largura do ressonador de aproximadamente, $0,7 \mu m$, conforme mostrado na Figura 21, de forma que as cavidades internas e externas geram uma excitação dos modos de guias de onda de viagem e giram no sentido horário para a cavidade interna e anti horário para a cavidade externa na porta de saída. O ressonador externo na Figura 19, aumenta o índice de refração no canto externo da curva, e isso atua como um retardador de fase das frentes de ondas externas, fazendo com que o pulso eletromagnético ao entrar na cavidade gire no sentido anti-horário em direção a porta de saída. Na Figura 18, temos a situação inversa, a cavidade atua como um retardador de fase da onda interna, fazendo com que a onda gire no sentido horário. A análise do ressonador na posição central, Figura 20, mostra que a onda não gira em torno do canto e portanto não atua como retardador de fase, isso faz com que a luz se acople à cavidade gerando um modo com amplitude menor do que o modo inicial, e no fim a luz é refletida em direção à porta de entrada.

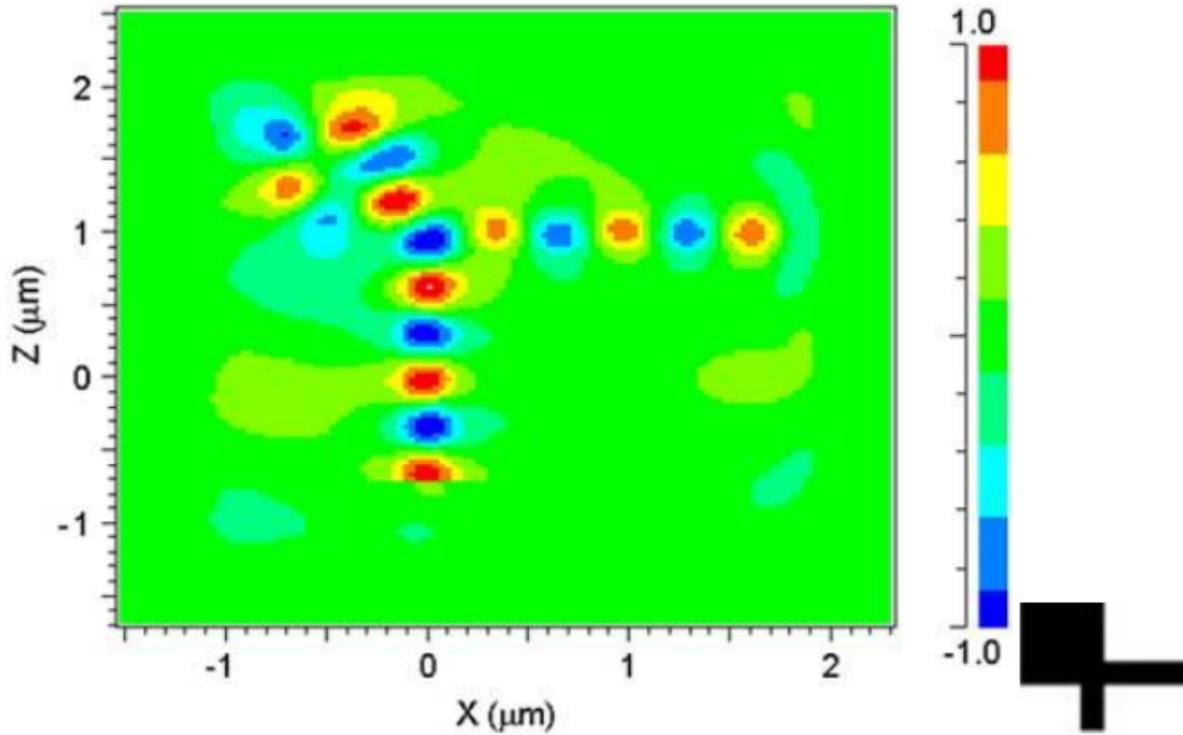
Usando o algoritmo FDTD em duas dimensões é possível calcular a energia trans-

Figura 18 – Ressonador na Posição Interna



Fonte: Adaptado de (ESPINOLA *et al.*, 2001)

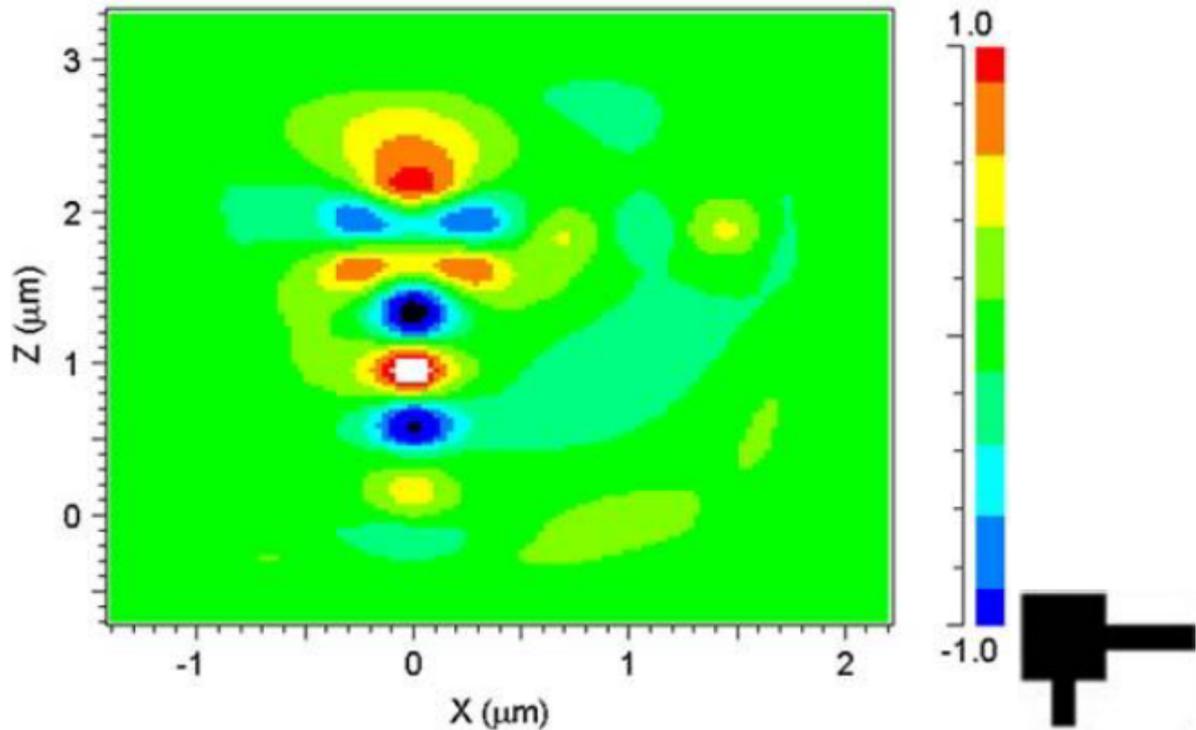
Figura 19 – Ressonador na Posição Externa



Fonte: Adaptado de (ESPINOLA *et al.*, 2001)

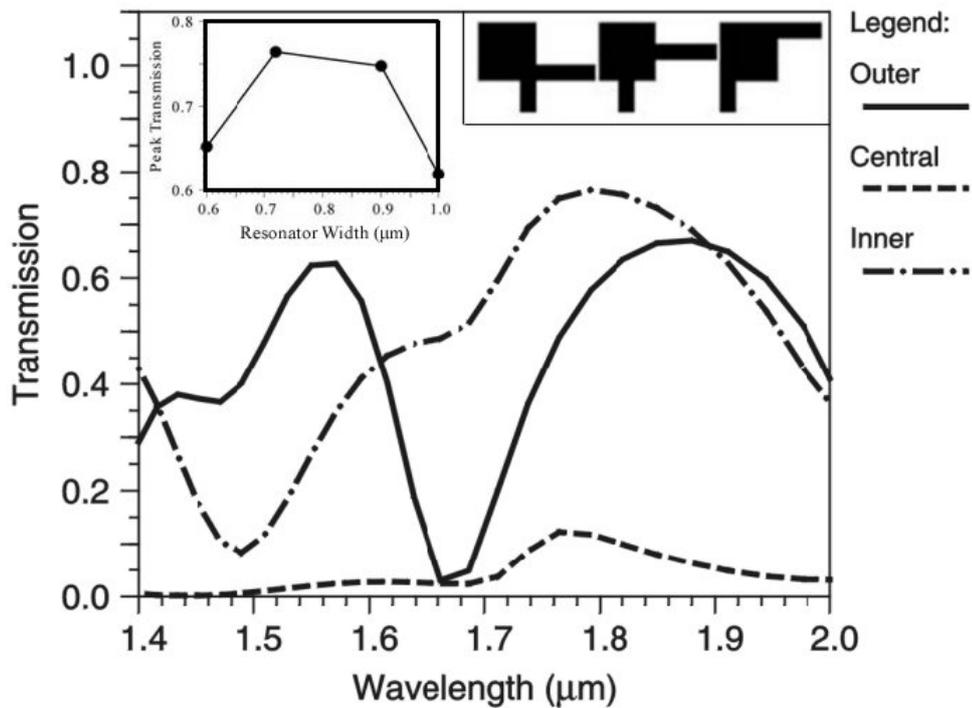
mitida para cada cavidade ilustrada acima, neste caso, tudo indica que as melhores condições de ressonância favorecem um melhor desempenho para a eficiência de transmissão. As figuras

Figura 20 – Ressonador Posição Central



Fonte: Adaptado de (ESPINOLA *et al.*, 2001)

Figura 21 – Espectro de Transmissão da cavidade quadrada das três posições do ressonador. As imagens no canto superior descrevem a largura e a posição de cada ressonador



Fonte: (ESPINOLA *et al.*, 2001)

indicam o pico máximo de transmissão para cada posição e tamanho da cavidade, conforme mostrado na Figura 21, onde diversos tamanhos do lado da cavidade foram usados para fazer as

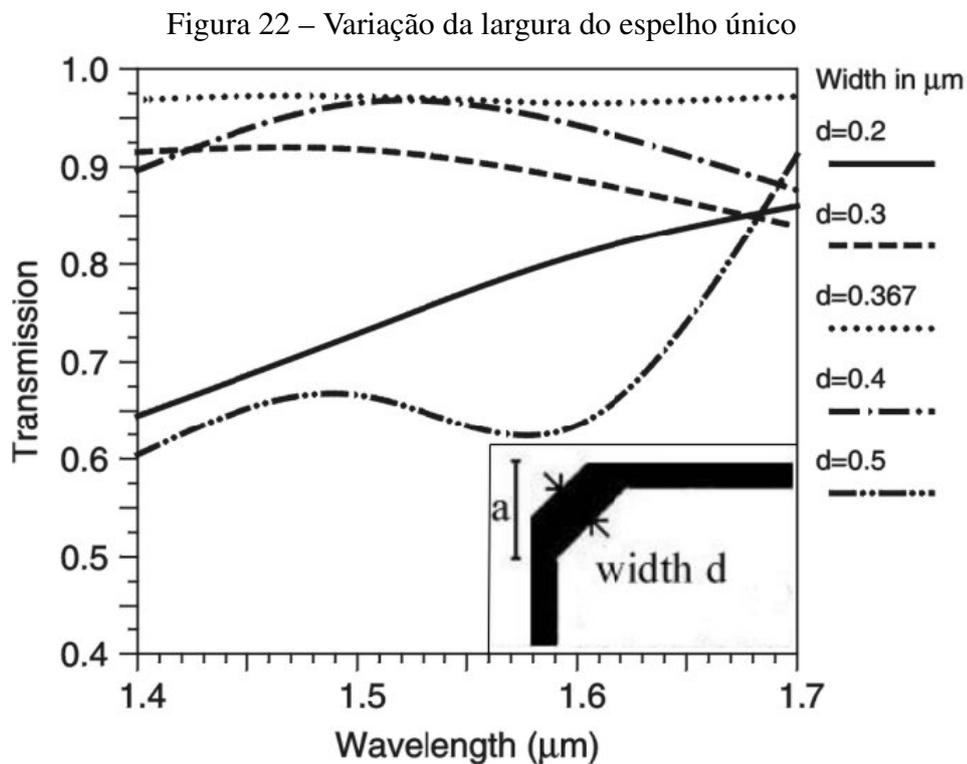
simulações e como pode ser notado o pico de transmissão varia para cada tamanho.

A análise espectral da posição central do ressonador demonstra um baixo desempenho, isso porque a tendência é suprimir a orientação do índice de contraste. Considerando a cavidade interna, podemos ver na Figura 21 que a transmissão máxima de 76% ocorre com $\lambda = 1,79\mu m$. Na situação com cavidade externa, temos uma transmissão máxima menor que a posição interna, isso ocorre devido a perdas geradas pela dissipação de energia gerada pelo espalhamento ao realizar a rotação no canto da cavidade. A posição interna do ressonador mostra uma eficiência máxima, pois age como um retardador de fase e isso contribui para o alto desempenho na transmissão.

4.4 Adição do espelho de canto

Com base nas ideias precedentes, podemos concluir que a orientação do índice de refração contribui significativamente para o desempenho do ressonador, isso possibilita a melhoria da análise da transmissão caso a geometria possa ser modificada. Essa seção foca no aprimoramento dos efeitos de transmissão adicionando um espelho dobrado a 45° ao ressonador interno como mostrado na Figura 17(b). Com base no baixo valor de Q e considerando que a orientação do índice de refração tem um papel muito mais importante, podemos desprezar os efeitos do ressonador nessa situação e, assim a estrutura de canto pode ser analisada apenas considerando os efeitos do espelho de canto, sem o ressonador. O objetivo nesse tópico é verificar como variações na largura e na geometria do espelho, podem alterar as características de transmissão, e com isso verificar qual a configuração tem um melhor rendimento na taxa de transmissão. Inicialmente é retirada a cavidade óptica e analisado a curva apenas com um espelho, neste caso o guia de onda tem uma curvatura de 45° , e tamanho $b = 0,42\mu m$, considerando d a largura do guia de onda nessa nova configuração, conforme mostrado na Figura 17(c). Ao variar a largura do guia e mantendo b constante é possível analisar qual a melhor largura que maximiza a transmissão, fixado a largura d ao intervalo $0,2\mu m < d < 0,5\mu m$, foram analisados cinco valores para d , conforme mostrado na Figura 22. Assim, baseado na Figura 22, procura-se os picos de transmissão para o comprimento de onda $\lambda = 1,55\mu m$, o que fornece a largura que maximiza a transmissão que, neste caso, é dada por $d = 0,367\mu m$ e $a = 0,74\mu m$. A taxa de transmissão correspondente aos modos elétricos passa de 96%. Portanto, verificamos um aumento significativo com o uso do espelho de canto sem o ressonador, isso ocorre devido a otimização das dimensões do espelho e ao retardo de fase nas frentes de onda internas. Na

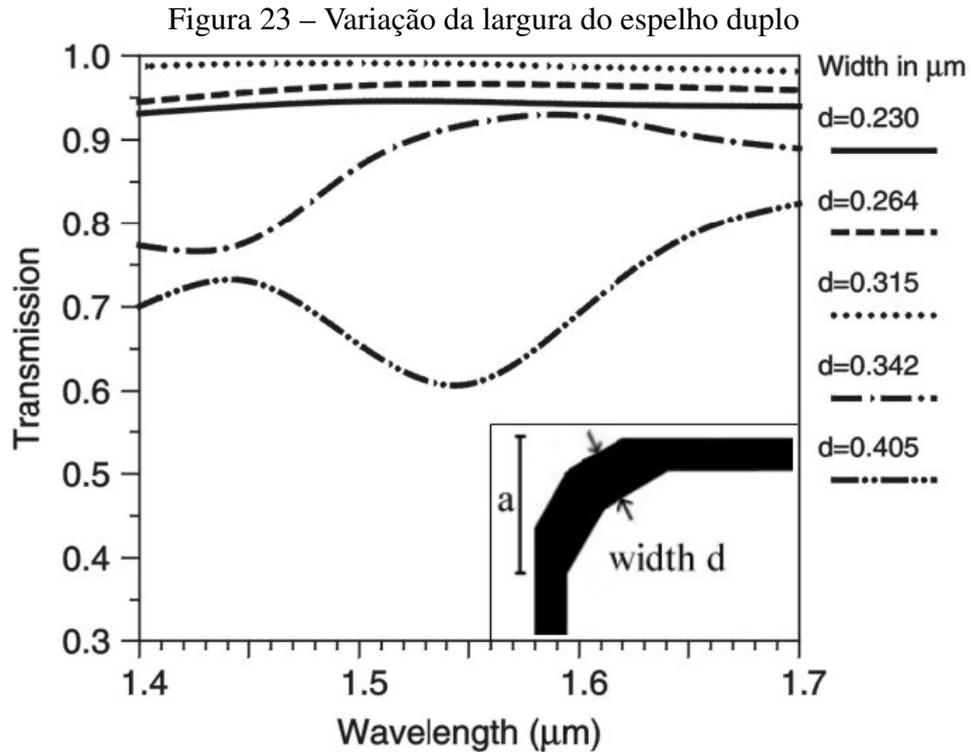
Figura 22 é mostrado o espectro de transmissão para outros valores de d , para $d = 0,5\mu m$, por exemplo, vemos que o espectro apresenta uma não uniformidade, isso ocorre devido ao aumento da contribuição dos modos que não se acoplaram adequadamente ao guia de saída. A simulação mostra uma quantidade de luz escapando nos cruzamentos de curvas ocorrida pela perda de radiação nas regiões pontudas. Podemos mitigar essa perda de radiação, fazendo melhorias na configuração dos espelhos, uma possibilidade seria a utilização do espelho duplo, mostrado na a Figura 23.



Fonte: (ESPINOLA *et al.*, 2001)

Similarmente, é possível otimizar a transmissão deste espelho duplo variando a largura, com o valor de d restrito ao intervalo $0,230 > d < 0,405 \mu m$. Com isso é possível obter o espectro de transmissão que chega à 99% no comprimento de onda $\lambda = 1,55\mu m$, para $d = 0.315\mu m$ e $a = 0.79\mu m$, resultado mostrado na Figura 23. Também seria possível usar uma curva circular lisa com um alto índice de contraste em vez de espelhos de canto, Figura 17(d), porém de acordo com a simulação FDTD, a curva circular oferece um desempenho muito abaixo dos casos simulados anteriormente, além disso são configurações mais difíceis de fabricar, mesmo com o uso de ferramentas litográficas teria uma dificuldade muito alta.

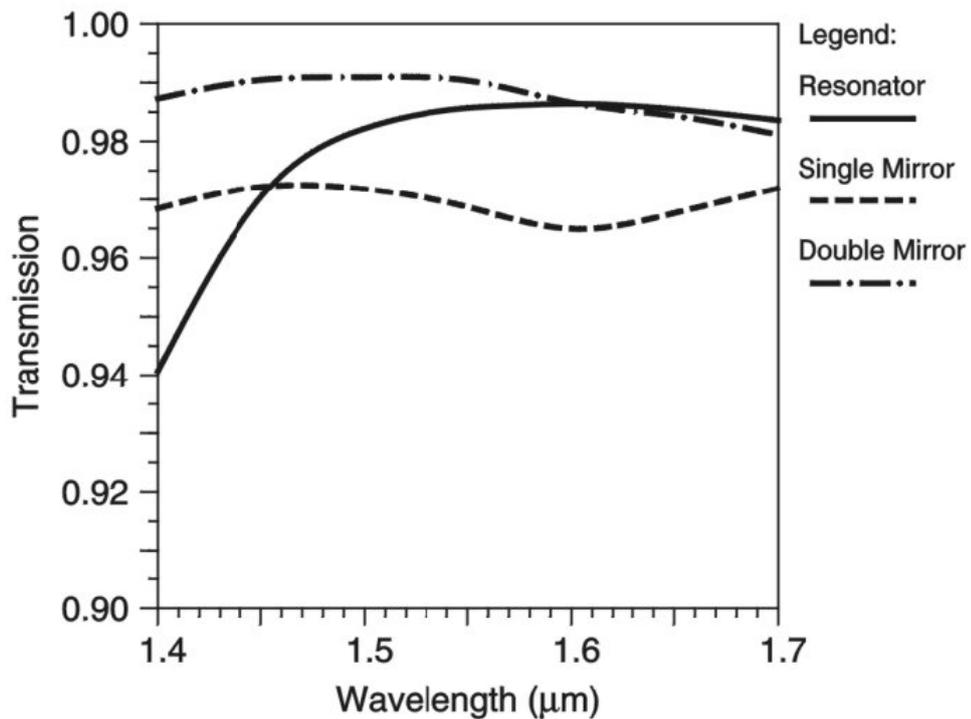
Por fim, considerando as configurações 17(a), 17(b) e 17(c), é possível elaborar o gráfico comparando ambas as análises, os resultados mostram que a configuração com espelho



Fonte: (ESPINOLA *et al.*, 2001)

duplo apresenta uma melhor performance comparada as outras configurações, Figura 24.

Figura 24 – Espectro de Transmissão das três configurações: curva com ressonador, curva com espelho único, curva com espelho duplo



Fonte: (ESPINOLA *et al.*, 2001)

5 DISCUSSÃO COMPARATIVA DA TAXA DE TRANSMISSÃO.

A investigação dos fenômenos de transmissão e reflexão no guia de onda de cristais fotônicos leva em consideração métodos computacionais que possam agregar melhorias nas teorias existentes, já que métodos analíticos tornam-se impraticáveis nesse quesito. Foi feita uma investigação comparativa de algumas configurações e utilizando parâmetros que possam determinar quais vantagens são oferecidas por cada um. Inicialmente foi feito a análise com ressonador, depois acrescentou-se um espelho curvado à 45° e reduzido o ressonador a uma seção transversal a 45° . Posteriormente, foi retirado o ressonador e analisado a estrutura apenas com o espelho curvado, por ultimo a análise foi feita com um espelho duplo. Com isso, apesar de algumas dificuldades para analisar o guia de onda com curva de 90° e da perda de radiação nos contornos da região pontuda, os resultados obtidos com base na variação dos parâmetros envolvidos mostram formas mais eficientes de elabora guias de ondas com alta transmissão. Os resultados comparativos mostrados na Figura 24 exibem um comportamento da curva de transmissão para o design dos espelhos único e duplo comparado com a curva do ressonador. O design do espelho de canto fornece uma transmissão praticamente plana, correspondendo ao valor de 96,6 % em uma largura de banda de $300nm$ centrada em $\lambda = 1,55\mu m$, Considerando o espectro de transmissão do ressonador, o pico de transmissão chega a 98,6% em $\lambda = 1,55\mu m$, porém exibe uma falta de uniformidade relativo a outros comprimentos de onda. A estrutura do espelho duplo fornece o melhor desempenho, com pico alcançando uma eficiência de transmissão de 99 % em $\lambda = 1,55\mu m$ e uma curva plana. O alto rendimento das configurações com espelho é atribuído ao forte confinamento dos modos de propagação devido ao alto índice de contraste, ao retardo de fase e principalmente a alta refletividade fornecida pelo espelho de Bragg. Portanto, parece que, em termos de rendimento, o espelho de canto pode oferecer uma alternativa interessante para um design de curva de 90° abrupta. A vantagem adicional da pequena área do dispositivo seria torná-lo adequado para ser um componente óptico compacto em circuitos integrados fotônicos.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

O crescente interesse em dispositivos fotônicos gera a necessidade de componentes que favoreçam a implementação de conexões diversas com baixa dissipação de energia em guias de ondas, e dessa forma possa ser integrada à chips fotônicos. Este trabalho focou na investigação de cavidades ressonantes e espelhos refletivos colocados em curvas de guia de ondas que possam contribuir para a melhoria do desempenho da transmissão no guia de onda. A partir dos efeitos de ressonância e dos fatores de acoplamento, a transmissão é maximizada e a reflexão minimizada. No caso do ressonador, a alta no desempenho pode ser avaliado com base no fator de qualidade do ressonador acoplado que depende explicitamente do fator de acoplamento à radiação. Com a variação das dimensões do espelho, a simulação FDTD mostrou que é possível atingir um pico de transmissão de até 99% de transmissão na curva reta.

O trabalho pode ser aplicado a diversos materiais como estruturas contendo dióxido de silício, a base da eletrônica atualmente, e vários outros. Porém, a análise ficou restrita a materiais com índice de refração $n = 3,2$, e nesse sentido, a formulação deste trabalho pode ser direcionada para a pesquisa de materiais cuja estrutura básica seja formada por *GaAs/AlGaAs*, o que corresponde a uma faixa de índice de refração entre 3,0 e 3,6.

6.2 Trabalhos Futuros

Este trabalho possibilitou, entre outras coisas, a compreensão de metodologias de pesquisa que abrem caminho para trabalhos mais elaborados e que possam no futuro trazer contribuições para o desenvolvimento da ciência, especialmente na área de desenvolvimento teórico e prático de dispositivos fotônicos. Assim, minha busca pelo conhecimento e aplicações a sociedade podem dar continuidade nos trabalhos futuros, dos quais serão de extrema importância para o meu crescimento profissional e pessoal.

A ideia de pesquisa futura está dividida em duas partes, inicialmente os esforços devem se concentrar numa extensão do assunto abordado neste trabalho, analisando variações das estruturas estudadas, como a implementação de ângulos diferentes e divisores de potência acoplados a dispositivos fotônicos, ideias básicas descritas em (GHAFARI *et al.*, 2008). Entre tais configurações, variação do ângulo, divisor Y em uma rede quadrada, como forma de

minimizar os efeitos de transmissão e obter a máxima distribuição de potência, pode ser analisado uma heteroestrutura combinada por redes quadradas e hexagonais. No geral, é possível obter uma taxa de transmissão similar àquelas mencionadas neste trabalho. Por último baseado na junção T e na curva de 90° otimizadas seria proposto divisor óptico 1x4 no cristal fotônico com alta eficiência na transmissão. A segunda parte de pesquisa, estaria relacionada com a aplicação dos conceitos aprendidos neste trabalho em óptica quântica focando em pontos quânticos acoplados a cavidades ressonantes. O interesse em tais cavidades surge da possibilidade de sua utilização para fabricação de dispositivos que podem ser integrados a sistemas opto-eletrônicos, na computação quântica e criptografia quântica, tais sistemas possibilitam a fabricação de dispositivos como fontes de fóton único, e, portanto, podem atuar como emissores altamente coerentes de informação. Assim, esta proposta de pesquisa busca fazer uma análise teórica sobre a interação radiação-matéria em cristais fotônicos, uma análise sobre o espectro de transmissão em guias de ondas seria baseado no mesmo esquema abordado neste trabalho, ou seja, usa-se métodos numéricos em um ambiente bidimensional para simular o guia de ondas em cristais fotônicos. No fim, buscamos integrar essas cavidades ópticas a sistemas voltados para implementação de dispositivos quânticos integrados a fotônica do silício.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, C. A. A. Excitações em cristais fotônicos unidimensionais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.
- BERENGER, J.-P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. **Journal of computational physics**, Elsevier, v. 114, n. 2, p. 185–200, 1994.
- CAI, M.; HUNZIKER, G.; VAHALA, K. Fiber-optic add-drop device based on a silica microsphere-whispering gallery mode system. **IEEE Photonics Technology Letters**, IEEE, v. 11, n. 6, p. 686–687, 1999.
- CAI, M.; PAINTER, O.; VAHALA, K. J. Observation of critical coupling in a fiber taper to a silica-microsphere whispering-gallery mode system. **Physical review letters**, APS, v. 85, n. 1, p. 74, 2000.
- CALVO, M. L.; LAKSHMINARAYANAN, V. **Optical waveguides: from theory to applied technologies**. [S. l.]: CRC Press, 2018.
- CARDONA, M.; PETER, Y. Y. **Fundamentals of semiconductors**. [S. l.]: Springer, 2005. v. 619.
- DEKKICHE, L.; NAOUM, R. Optimal design of 90 bend in two dimensional photonic crystal waveguides. **journal of applied sciences**, v. 8, n. 13, p. 2449–2455, 2008.
- ESPINOLA, R. L.; AHMAD, R.; PIZZUTO, F.; STEEL, M. J.; OSGOOD, R. M. A study of high-index-contrast 90° waveguide bend structures. **Optics Express**, Optical Society of America, v. 8, n. 9, p. 517–528, 2001.
- GHAFFARI, A.; MONIFI, F.; DJAVID, M.; ABRISHAMIAN, M. Analysis of photonic crystal power splitters with different configurations. **Journal of Applied Science**, v. 8, n. 8, p. 1416–1425, 2008.
- JOANNOPOULOS, J. D.; JOHNSON, S. G.; WINN, J. N.; MEADE, R. D. **Photonic crystals**. [S. l.]: Princeton university press, 2011.
- KRAUSS, T. F.; RICHARD, M.; BRAND, S. Two-dimensional photonic-bandgap structures operating at near-infrared wavelengths. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 383, n. 6602, p. 699–702, 1996.
- LIPSON, R.; LU, C. Photonic crystals: a unique partnership between light and matter. **European Journal of Physics**, IOP Publishing, v. 30, n. 4, p. S33, 2009.
- LITTLE, B. E.; FORESI, J.; STEINMEYER, G.; THOEN, E.; CHU, S.; HAUS, H.; IPPEN, E. P.; KIMERLING, L.; GREENE, W. Ultra-compact si-sio₂ microring resonator optical channel dropping filters. **IEEE Photonics Technology Letters**, IEEE, v. 10, n. 4, p. 549–551, 1998.
- LÓPEZ-GALMICHE, G.; VÁZQUEZ-GUARDADO, A.; LEÓN, I. D.; SÁNCHEZ-MONDRAGÓN, J. Slow light in photonic crystals waveguides. **Acta Universitaria**, v. 23, p. 27–30, 2013.
- MANOLATOU, C.; HAUS, H. A. **Passive components for dense optical integration**. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2002.

MEKIS, A.; CHEN, J.; KURLAND, I.; FAN, S.; VILLENEUVE, P. R.; JOANNOPOULOS, J. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides. **Physical review letters**, APS, v. 77, n. 18, p. 3787, 1996.

NEUMANN, E.-G. Reducing radiation loss of tilts in dielectric optical waveguides. **Electronics Letters**, IET, v. 17, n. 11, p. 369–371, 1981.

OKAMOTO, K. **Fundamentals of optical waveguides**. [S. l.]: Academic press, 2006.

POZAR, D. M. **Microwave engineering**. [S. l.]: John wiley & sons, 2011.

PURCELL, E. M.; TORREY, H. C.; POUND, R. V. Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid. **Physical review**, APS, v. 69, n. 1-2, p. 37, 1946.

QUIÑÓNEZ, F. A. *et al.* Cristais fotônicos 2 d: projeto e fabricação. [sn], 2006.

TAFLOVE, A.; HAGNESS, S. C.; PIKET-MAY, M. Computational electromagnetics: the finite-difference time-domain method. **The Electrical Engineering Handbook**, Elsevier, v. 3, 2005.

VAHALA, K. J. Optical microcavities. **nature**, Nature Publishing Group, v. 424, n. 6950, p. 839–846, 2003.

VERMIEIRO, J. L.; RUBIO-MERCEDES, C. E. Análise de cristais fotônicos unidimensionais pelo método dos elementos finitos. **ANAIS DO ENIC**, v. 1, n. 1, 2009.

WEST, B. R.; HELMY, A. S. Properties of the quarter-wave bragg reflection waveguide: theory. **JOSA B**, Optical Society of America, v. 23, n. 6, p. 1207–1220, 2006.

Wikipedia contributors. **Dielectric mirror — Wikipedia, The Free Encyclopedia**. 2021. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dielectric_mirror&oldid=1018280570. [Online; accessed 14-August-2021].