



Universidade Federal da Bahia - UFBA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE

# Características de Propagação e Polarização de Guias de Onda Segmentados

Adriano dos Santos Reis

Salvador

2024



Universidade Federal da Bahia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Adriano dos Santos Reis

## **Características de Propagação e Polarização de Guias de Onda Segmentados**

Dissertação elaborada pelo acadêmico Adriano dos Santos Reis, como parte das exigências para conclusão do curso de pós-graduação stricto-senso em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, sob a orientação do professor Dr. Vitaly Félix Rodríguez Esquerre e coorientação da Professora Dra. Ana Júlia Fernandes de Oliveira Barros.

Orientador: Vitaly Félix Rodriguez Esquerre

Coorientadora: Ana Julia Fernandes de Oliveira Barros

Salvador

2024

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

dos Santos Reis, Adriano

Características de Propagação e Polarização de Guias  
de Onda Segmentados / Adriano dos Santos Reis. --  
Salvador, 2024.

86 f.

Orientador: Vitaly Félix Rodriguez Esquerre.

Coorientadora: Ana Julia Fernandes de Oliveira  
Barros.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Engenharia  
Elétrica) -- Universidade Federal da Bahia, UFBA,  
2024.

1. Guias de Ondas Segmentados. 2. Método dos  
Elementos Finitos. 3. Dispositivos Fotônicos. 4. Óptica  
Integrada. I. Rodriguez Esquerre, Vitaly Félix. II.  
Fernandes de Oliveira Barros, Ana Julia . III.  
Título.

Adriano dos Santos Reis

# Características de Propagação e Polarização de Guias de Onda Segmentados

Salvador-BA, 20/02/2024

Comissão Examinadora



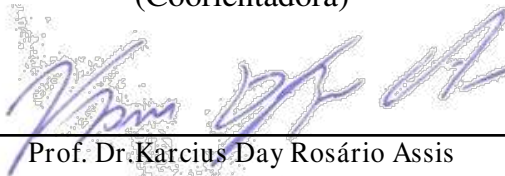
---

Prof. Dr. Vitaly Felix Rodríguez Esquerre.  
UFBA  
(Orientador)



---

Profa. Dra. Ana Júlia Fernandes de Oliveira  
UNIVASF  
(Coorientadora)



---

Prof. Dr. Karcus Day Rosário Assis  
UFBA



---

Prof. Dr. Joaquim Júnior Isídio de Lima  
UNIVASF

# Abstract

This dissertation examined periodically segmented waveguides, with segmented guides defined as those with non-trivial geometries in which propagation mechanisms are not evident, exploring the behavior of their propagation modes and polarization through numerical simulations using the 2D Finite Element Method. The formulation for waveguide mode analysis was employed, enabling the investigation of the impact of variations in the core geometry (radius, width, gap, and core period) on its guiding properties for TE and TM modes. The performance of materials (silica, silicon carbide, and silicon nitride) composing the waveguide was explored in the dispersion relation, aiming to analyze how material properties, such as refractive index, influence the propagation characteristics of modes within the waveguide.

**Keywords:** Segmented waveguides, Photonic Devices, Finite Element Method, Nanowires, Slot waveguides.

# Resumo

Esta dissertação analisou os guias de onda periodicamente segmentados, entenda-se por guias segmentados àqueles com geometrias não triviais nos quais os mecanismos de propagação não são evidentes, explorando o comportamento de seus modos de propagação e polarização por meio de simulações numéricas utilizando o Método dos Elementos Finitos 2D. Foi utilizada a formulação para a análise dos modos dos guias de onda, o que permitiu a investigação do impacto de variações na geometria do núcleo do guia (raio, largura, *gap* e período do núcleo) nas suas propriedades de guiamento para os modos TE e TM. Foi explorado o desempenho dos materiais (sílica, carbetto de silício e nitreto de silício) que compõem o guia de onda na relação de dispersão, isso implica analisar como as propriedades dos materiais, como índice de refração, influencia as características de propagação dos modos dentro do guia de onda.

**Palavras-chave:** Guia de ondas segmentados, Dispositivos Fotônicos, Método dos Elementos Finitos, Nanofios, Guia de ondas Slot.

# Prefácio

Esta dissertação de mestrado foi submetida à Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

A dissertação foi desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), tendo como orientador a Prof. Dr. **Vitaly Félix Rodriguez Esquerre**, a Profa. Dra. **Ana Julia Fernandes de Oliveira Barros** foi coorientadora deste trabalho.

# Agradecimentos

Quero expressar minha profunda gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho de pesquisa e para a conclusão bem-sucedida do meu mestrado.

Primeiramente, agradeço a Deus pela orientação, força e inspiração que Ele me proporcionou ao longo desta jornada acadêmica. Sua graça e misericórdia foram uma fonte constante de conforto e encorajamento durante os desafios enfrentados.

Não posso deixar de mencionar minha mãe Maria das Graças, família e amigos, cujo apoio incondicional e encorajamento foram cruciais para superar os desafios desta jornada acadêmica.

Ao meu orientador, Vitaly Esquerre, e a minha coorientadora, Ana Julia De Oliveira, agradeço por sua orientação sábia, apoio constante e instruções valiosos ao longo deste processo. Sua dedicação e expertise foram fundamentais para o desenvolvimento e aprimoramento desta dissertação.

A professora do PPGEE Ana Isabela Cunha por toda dedicação ao ensino e seu jeito humilde para com todos os alunos.

Não posso deixar de citar a inspiração de Maria Crispina (*in Memoriam*), mesmo em sua passagem breve, nos deixou inspirações a serem seguidas.

Por fim, agradeço à UFBA e ao PPGEE pela oportunidade concedida e pelos recursos disponibilizados para a realização desta pesquisa.

Este trabalho não teria sido possível sem o apoio e colaboração de todos vocês. Agradeço a Deus e a cada um de vocês por fazerem parte desta conquista.



*“São as nossas escolhas que revelam  
o que realmente somos, muito mais  
do que as nossas qualidades.”*

– Alvo Dumbledore

# Sumário

<b>Abstract</b>	<b>i</b>
<b>Resumo</b>	<b>ii</b>
<b>Prefácio</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>1 Considerações Iniciais</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	2
1.2 Considerações Preliminares . . . . .	3
1.3 Objetivos Gerais . . . . .	4
1.4 Objetivos Específicos . . . . .	5
1.5 Organização do Trabalho . . . . .	5
1.6 Metodologia . . . . .	6
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>7</b>
2.1 Guias de Onda Dielétrico . . . . .	7
2.2 Guias de Onda segmentados . . . . .	8
2.3 Análise para os modos dos Guias de Onda Segmentados . . . . .	9
2.4 Método dos elementos Finitos . . . . .	11
2.5 Modos de Polarização . . . . .	14
2.6 Conclusão . . . . .	15
<b>3 Projeto dos guias de onda e discussões</b>	<b>16</b>
3.1 Guia de Onda com Nanofios . . . . .	16
3.2 Guias de Onda Slot . . . . .	26
3.3 Conclusão . . . . .	36
<b>4 Desempenho dos Guias de Onda com núcleo de Carbetto de Silício</b>	<b>37</b>
4.1 Carbetto de Silício . . . . .	37
4.2 Guia de onda com núcleo de Carbetto de Silício . . . . .	38

4.3	Conclusão . . . . .	50
<b>5</b>	<b>Desempenho dos Guias de Onda Com Núcleo de Nitreto de Silício</b>	<b>51</b>
5.1	Nitreto de Silício . . . . .	51
5.2	Guia de onda com núcleo de Nitreto de Silício . . . . .	53
5.3	Conclusão . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>66</b>
6.1	Trabalhos Futuros . . . . .	67
	<b>Referências</b>	<b>68</b>
<b>A</b>	<b>Produções Bibliográficas</b>	<b>71</b>

# Lista de Figuras

1.1	Visão geral para os guias de onda ( <a href="#">Meng et al., 2021</a> ) . . . . .	3
2.1	Exemplo de guia de onda dielético ( <a href="#">de Oliveira, 2012</a> ) . . . . .	8
2.2	Exemplo de guia de onda segmentado ( <a href="#">Costa et al., 2011</a> ) . . . . .	9
2.3	Esquema do guia de ondas segmentado periódico com destaque para célula unitária. . . . .	12
2.4	Polarização Elétrica, Magnética e Mista, respectivamente . . . . .	14
3.1	Malha para guia de onda segmentado composto por três nanofios . . .	17
3.2	Esquema para guia de onda segmentado proposto composto por três nanofios . . . . .	18
3.3	Esquema do guia de ondas segmentado periódico composto por um núcleo com três nanofios de silício sobre sílica com raio de 50nm e $\Delta x = 0$ . . . . .	19
3.4	Esquema do guia de ondas segmentado periódico composto por um núcleo com três nanofios de silício sobre sílica com raio de 50nm e $\Delta x = 50$ nm. . . . .	19
3.5	Esquema do guia de ondas segmentado periódico composto por um núcleo com três nanofios de silício sobre sílica com raio de 50nm e $\Delta x = 100$ nm. . . . .	19
3.6	Esquema do guia de ondas segmentado periódico composto por um núcleo com três nanofios de silício sobre sílica com raio de 50nm e $\Delta x = 150$ nm. . . . .	20
3.7	Esquema do guia de ondas segmentado periódico composto por um núcleo com três nanofios de silício sobre sílica com raio de 50nm e $\Delta x = 200$ nm. . . . .	20
3.8	Esquema do guia de ondas segmentado periódico composto por um núcleo com três nanofios de silício sobre sílica com raio de 50nm e $\Delta x = 250$ nm. . . . .	20
3.9	Esquema do guia de ondas segmentado periódico composto por um núcleo com três nanofios de silício sobre sílica com raio de 50nm e $\Delta x = 300$ nm. . . . .	21
3.10	Curvas de dispersão para nanofios de silício com raio igual a 40nm, modo TE. . . . .	22

3.11	Curvas de dispersão para nanofios de silício com raio igual a 40nm, modo TM. . . . .	22
3.12	Curvas de dispersão para nanofios de silício com raio igual a 50nm, modo TE. . . . .	23
3.13	Curvas de dispersão para nanofios de silício com raio igual a 50nm, modo TM. . . . .	23
3.14	Curvas de dispersão para nanofios de silício com raio igual a 60nm, modo TE. . . . .	24
3.15	Curvas de dispersão para nanofios de silício com raio igual a 60nm, modo TM. . . . .	24
3.16	Distribuição espacial do campo para o guia de onda com nanofios de silício com raio 50nm considerando o deslocamento (a) $\Delta x = 0$ , (b) $\Delta = 50\text{nm}$ , (c) $\Delta x = 100\text{nm}$ , (d) $\Delta x = 150\text{nm}$ . . . . .	25
3.17	Modelo de Guia de onda com 1 slot . . . . .	26
3.18	Malha para guia de silício com 1 slot . . . . .	27
3.19	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de silício, com <i>gap</i> de 10nm, modo TE. . . . .	28
3.20	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de silício, com <i>gap</i> de 10nm, modo TM. . . . .	28
3.21	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de silício, com <i>gap</i> de 15nm, modo TE. . . . .	29
3.22	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de silício, com <i>gap</i> de 15nm, modo TE. . . . .	29
3.23	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de silício, com <i>gap</i> de 20nm, modo TM. . . . .	30
3.24	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de silício, com <i>gap</i> de 20nm, modo TM. . . . .	30
3.25	Modelo de Guia de onda com núcleo de silício e 2 slots . . . . .	31
3.26	Malha para guia com núcleo de silício e 2 slots . . . . .	32
3.27	Curvas de dispersão, guia com núcleo de silício, para $l = 30\text{nm}$ , modo TE. . . . .	33
3.28	Curvas de dispersão, guia com núcleo de silício, para $l = 30\text{nm}$ , modo TM. . . . .	33
3.29	Curvas de dispersão, guia com núcleo de silício, para $l = 60\text{nm}$ , modo TE. . . . .	34
3.30	Curvas de dispersão, guia com núcleo de silício, para $l = 60\text{nm}$ , modo TM. . . . .	34
3.31	Curvas de dispersão, guia com núcleo de silício, para $l = 90\text{nm}$ , modo TE. . . . .	35
3.32	Curvas de dispersão, guia com núcleo de silício, para $l = 90\text{nm}$ , modo TM. . . . .	35
4.1	Curvas de dispersão para nanofios de carbeto de silício com raio igual a 40nm, modo TE. . . . .	39

4.2	Curvas de dispersão para nanofios de carbeto de silício com raio igual a 40nm, modo TM. . . . .	39
4.3	Curvas de dispersão para nanofios de carbeto de silício com raio igual a 50nm, modo TE. . . . .	40
4.4	Curvas de dispersão para nanofios de carbeto de silício com raio igual a 50nm, modo TM. . . . .	40
4.5	Curvas de dispersão para nanofios de carbeto de silício com raio igual a 60nm, modo TE. . . . .	41
4.6	Curvas de dispersão para nanofios de carbeto de silício com raio igual a 60nm, modo TM. . . . .	41
4.7	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de carbeto de silício para <i>gap</i> de 10nm, modo TE. . . . .	43
4.8	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de carbeto de silício para <i>gap</i> de 10nm, modo TM. . . . .	43
4.9	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de carbeto de silício para <i>gap</i> de 15nm, modo TE. . . . .	44
4.10	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de carbeto de silício para <i>gap</i> de 15nm, modo TE. . . . .	44
4.11	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de carbeto de silício para <i>gap</i> de 20nm, modo TM. . . . .	45
4.12	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de carbeto de silício para <i>gap</i> de 20nm, modo TM. . . . .	45
4.13	Curvas de dispersao para guia de onda com núcleo de carbeto de silicio com $l = 30$ nm, modo TE . . . . .	47
4.14	Curvas de dispersao para guia de onda com núcleo de carbeto de silicio com $l = 30$ nm, modo TM. . . . .	47
4.15	Curvas de dispersao para guia de onda com núcleo de carbeto de silicio com $l = 60$ nm, modo TE. . . . .	48
4.16	Curvas de dispersao para guia de onda com núcleo de carbeto de silicio com $l = 60$ nm, modo TM. . . . .	48
4.17	Curvas de dispersao para guia de onda com núcleo de carbeto de silicio com $l = 90$ nm, modo TE. . . . .	49
4.18	Curvas de dispersao para guia de onda com núcleo de carbeto de silicio com $l = 90$ nm, modo TM. . . . .	49
5.1	Progresso da integração fotônica baseada em nitreto de silício com demonstrações-chave rotuladas com o ano de lançamento.(Xiang et al., 2022) . . . . .	52
5.2	Curvas de dispersão para nanofios de nitreto de silício com raio igual a 40nm, modo TE. . . . .	54
5.3	Curvas de dispersão para nanofios de nitreto de silício com raio igual a 40nm, modo TM. . . . .	54
5.4	Curvas de dispersão para nanofios de nitreto de silício com raio igual a 50nm, modo TE. . . . .	55

5.5	Curvas de dispersão para nanofios com raio igual a 50nm, modo TM.	55
5.6	Curvas de dispersão para nanofios de nitreto de silício com raio igual a 60nm, modo TE.	56
5.7	Curvas de dispersão para nanofios de nitreto de silício com raio igual a 60nm, modo TM.	56
5.8	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício, <i>gap</i> de 10nm, modo TE.	58
5.9	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício, <i>gap</i> de 10nm, modo TM.	58
5.10	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício, <i>gap</i> de 15nm, modo TE.	59
5.11	Curvas de dispersão para Gap guia de onda com núcleo de nitreto de silício, <i>gap</i> de 15nm, modo TM.	59
5.12	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício, <i>gap</i> de 20nm, modo TE.	60
5.13	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício, <i>gap</i> de 20nm, modo TM.	60
5.14	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício com $l = 30$ nm, modo TE.	62
5.15	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício com $l = 30$ nm, modo TM.	62
5.16	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício com $l = 60$ nm, modo TE.	63
5.17	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício com $l = 60$ nm, modo TM.	63
5.18	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício com $l = 90$ nm, modo TE.	64
5.19	Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício com $l = 90$ nm, modo TM.	64

# Capítulo 1

## Considerações Iniciais

*“O insucesso é apenas uma oportunidade para recomeçar com mais inteligência.”*

– Henry Ford

A evolução das telecomunicações ópticas representa uma fascinante jornada que transformou radicalmente a forma como nos comunicamos e compartilhamos informações. Desde os primórdios da comunicação humana, a busca por meios mais eficientes e rápidos de transmitir dados tem sido uma constante, e as telecomunicações ópticas surgiram como um divisor de águas nesse cenário.

Os primeiros passos rumo à comunicação óptica remontam à década de 1960, quando pesquisadores começaram a explorar a transmissão de informações por meio de feixes de luz. No entanto, somente nas últimas décadas é que testemunhamos avanços significativos e a implementação generalizada dessa tecnologia. O advento das fibras ópticas, finos filamentos de vidro ou plástico que transmitem dados por meio de pulsos de luz, revolucionou as telecomunicações. Comparadas aos cabos de cobre convencionais, as fibras ópticas oferecem maior largura de banda, menor atenuação e maior velocidade de transmissão.

A evolução das telecomunicações também se manifesta na pesquisa contínua por materiais mais eficientes e técnicas avançadas de transmissão. A introdução de amplificadores ópticos, como os amplificadores de fibra dopada com érbio (EDFA), permitiu a transmissão de sinais por distâncias muito maiores sem a necessidade de conversão para sinais elétricos, otimizando a eficiência da rede. Além disso, as redes ópticas coerentes trouxeram melhorias significativas na capacidade de transmissão, utilizando técnicas avançadas de modulação e detecção para maximizar a eficiência espectral. Isso possibilitou a transmissão de taxas de dados mais altas por meio das fibras existentes, prolongando a vida útil das infraestruturas de telecomunicações.



No campo da pesquisa e desenvolvimento, a exploração de novas faixas espectrais, como as faixas do infravermelho próximo e médio, tem o potencial de expandir ainda mais a capacidade das redes ópticas. A introdução de tecnologias como multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) e multiplexação por divisão de espaço (SDM) demonstra o comprometimento contínuo em aprimorar a eficiência e a capacidade das telecomunicações ópticas.

À medida que continuamos a avançar no século XXI, é inegável que as telecomunicações ópticas desempenharão um papel central na construção de sociedades mais conectadas e na facilitação do intercâmbio global de informações. A busca por inovação nesse campo promete uma era excitante de descobertas, consolidando as telecomunicações ópticas como uma força motriz na evolução da sociedade da informação.

## 1.1 Motivação

Os guias de onda são estruturas físicas que permitem a propagação de ondas eletromagnéticas, como a luz, de um ponto a outro. Eles são comumente usados em aplicações de comunicação e sensores. Já a tecnologia SOI (Silicon on Insulator) é uma técnica de fabricação de dispositivos semicondutores, na qual uma camada de silício monocristalino é isolada do substrato de silício por um material dielétrico. A combinação de guias de onda e a tecnologia SOI é frequentemente utilizada na fabricação de dispositivos ópticos, como moduladores e comutadores, devido às propriedades ópticas superiores do silício e da tecnologia SOI. A integração de guias de onda em substratos SOI permite a criação de dispositivos ópticos altamente eficientes e compactos (de Oliveira, 2012)..

Os guias de ondas são importantes em sistemas de comunicação modernos, pois possuem diversas características que os tornam essenciais em sistemas avançados de comunicação, como baixa atenuação, isolamento de interferência e flexibilidade. Eles são utilizados em diversas áreas da tecnologia moderna, a medicina e a negenharia. e podem ser projetados para operar em diferentes modos, dependendo da frequência da onda, das dimensões do guia de ondas e das propriedades do material dielétrico. Além disso, os guias de ondas ópticos encontram sua mais importante aplicação em fotônica, proporcionando integração entre componentes eletrônicos em um espaço 3D (Sun et al., 2020).

As portas lógicas ópticas com guias de onda são componentes que utilizam a luz para realizar operações lógicas e são implementados utilizando guias de onda ópticos para direcionar e manipular a luz (Singh et al., 2014)Os guias de onda são usados para controlar o fluxo de luz, permitindo a transmissão de sinais ópticos dentro da ONN.Essa aplicação para guias de onda estão amplamente sendo estudadas, como podem ser vistos em (Zhang et al., 2024), (Anika e Mia, 2021), (Hammond e Camacho, 2019), (Wu et al., 2021)

Guias de onda ópticos e dispositivos ópticos integrados são soluções promissoras para muitas aplicações, como diagnóstico médico, monitoramento de saúde e terapias de luz. Apesar das muitas revisões existentes focadas nos materiais a partir dos quais estes dispositivos são feitos, uma revisão sistemática que relacione estes dispositivos com os vários materiais, processos de fabricação, métodos de detecção e aplicações médicas em (Osborne et al., 2023) foi utilizado guias de onda de germânio amorfo para diagnósticos médicos usando espectroscopia no infravermelho médio, dispositivos para implantes cerebrais (Singer et al., 2023), trapias de luz (Wang e Dong, 2020), fototerapia para tratamento de infecções (Wang et al., 2021), fibra optica biocompatíveis para diagnosticos cerebrais (Nazempour et al., 2018).

## 1.2 Considerações Preliminares

Nas investigações iniciais, a atenção recaía sobre um guia de onda com modulação nas paredes do núcleo, ou seja, a estrutura em si não era segmentada, mas sim apresentava uma perturbação periódica. Foi somente durante a década de 1990 que os guias periódicos ganharam um maior destaque, marcando o início dos estudos sobre guias de onda efetivamente segmentados. Durante esse período, foram conduzidas várias análises teóricas que contribuíram substancialmente para a compreensão dos modos suportados pelos guias segmentados (Halir et al., 2015).

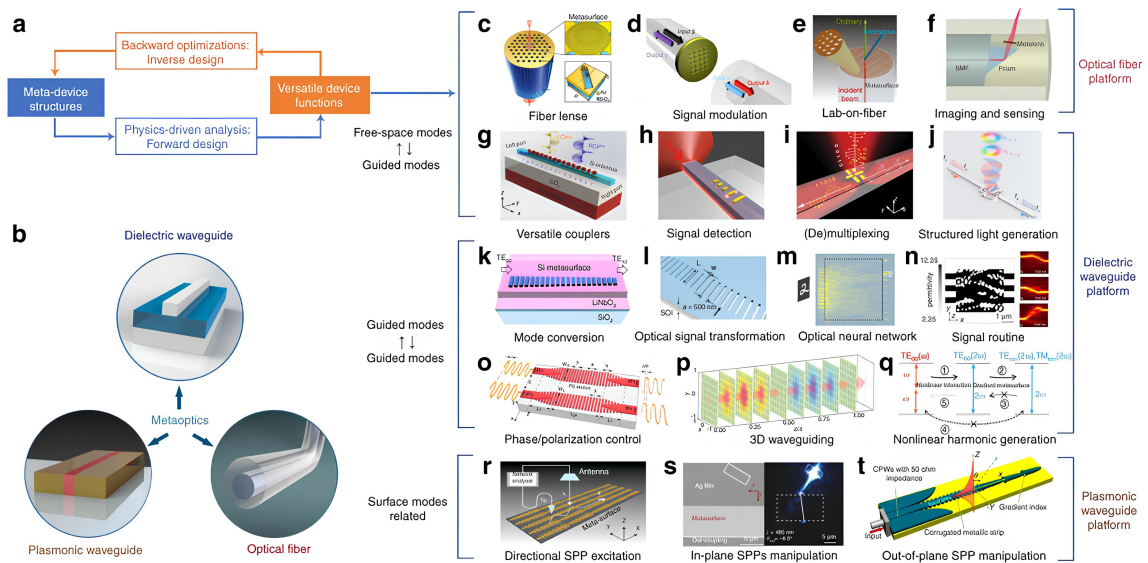


Figura 1.1: Visão geral para os guias de onda (Meng et al., 2021)

A Figura 1.1 apresentam o panorama Visão geral, para os guias de ondas ópticos: Guias de ondas dielétricas, guias de ondas plasmônicas e fibras ópticas, que são estruturas utilizadas para direcionar e transmitir luz. Guias de ondas dielétricas são feitos de materiais não condutores e são comumente utilizados em fibras ópticas para a transmissão de luz a longas distâncias. Por outro lado, guias de ondas plasmônicas

baseiam-se na interação entre a luz e elétrons livres na superfície de um metal, permitindo distribuições de campo mais localizadas, mas geralmente apresentam maiores perdas de propagação.

Estão sendo investigados para diversas aplicações em nano-óptica. Fibras ópticas, que são um tipo de guia de ondas dielétrico, que são amplamente utilizadas para a transmissão de luz a longas distâncias, como em comunicações ópticas. Elas também são empregadas em circuitos integrados fotônicos. A escolha do guia de ondas depende da aplicação específica e do equilíbrio entre fatores como perdas de propagação, confinamento de campo e facilidade de acoplamento de luz.

Os guias de onda segmentados têm sido objeto de estudo em diversas pesquisas, devido às suas potenciais aplicações em áreas como comunicações ópticas, sensores e dispositivos integrados. Em (Segundo, 2018) foi realizado um estudo abordou a análise de guias de onda ópticos segmentados com sequência quase periódica, demonstrando a relevância e o interesse acadêmico nesse campo. Além disso, pesquisas como a de (DEVECCHI e RUBIO-MERCEDES, 2015) destacam a utilização de guias de onda periodicamente segmentados para a conversão de modos e acoplamento de luz em óptica integrada, evidenciando a importância e o potencial desses dispositivos em aplicações práticas.

Uma das principais vantagens dos SWGs é a possibilidade de controlar a dispersão cromática, que é a variação da velocidade de propagação da luz em função do comprimento de onda. Esse controle é fundamental em sistemas de comunicação óptica de alta velocidade, onde a dispersão cromática pode limitar a largura de banda do sistema. Com os SWGs, é possível criar dispositivos que compensam a dispersão cromática, permitindo a transmissão de sinais em longas distâncias com alta taxa de transferência de dados.

Além disso, os SWGs apresentam outras propriedades interessantes, como a possibilidade de criar filtros ópticos de alta seletividade e a capacidade de guiar a luz em curvas com raios de curvatura muito pequenos. Essas características tornam os SWGs uma ferramenta versátil e promissora para aplicações em diversas áreas da óptica e optoeletrônica.

No entanto, a fabricação dos SWGs ainda apresenta desafios, como a necessidade de alta precisão na fabricação dos segmentos e a dificuldade em controlar a qualidade dos materiais utilizados. Apesar disso, os avanços recentes na tecnologia de fabricação têm permitido a produção de SWGs cada vez mais complexos e com melhor desempenho.

### 1.3 Objetivos Gerais

O propósito desta dissertação é projetar e analisar guias de onda segmentados, considerando diferentes geometrias propostas, com foco na avaliação e otimização do

desempenho de propagação desses dispositivos. Além disso, será investigado o impacto da variação do material no núcleo do guia de onda na eficiência global do sistema.

## 1.4 Objetivos Específicos

- Projetar novas geometrias para guias de ondas segmentados
- Estudar as propriedades de propagação e dispersão dos guias de onda segmentado;
- Investigar o comportamento da propagação de luz em guias de onda segmentados, considerando as modificações de índice de refração e as influências da geometria da estrutura;
- Estudar e comparar as características de propagação de luz em guias de onda segmentados com diferentes materiais intercalados, avaliando o impacto das variações no índice de refração;
- Realizar simulações numéricas baseadas no Método dos Elementos Finitos (FEM) para analisar a influência das variações geométricas nos guias de onda segmentados em suas características de propagação;
- Elaborar conclusões que consolidem os resultados obtidos ao longo da pesquisa, destacando as contribuições para a área de dispositivos fotônicos e a relevância dos guias de onda segmentados em aplicações da óptica integrada.

## 1.5 Organização do Trabalho

No segundo capítulo, serão abordadas as referências bibliográficas, com o intuito de fornecer embasamento teórico necessário para a compreensão dos métodos dos elementos dos guias de onda. No terceiro capítulo, serão propostas novas geometrias de guias de onda segmentados com núcleo de silício, e serão realizadas análises de desempenho de propagação para os modos TE e TM. No capítulo 4, serão feitas abordagens sobre o desempenho do carbeto de silício e no núcleo dos guias propostos, em seguida, no capítulo 5, serão analisadas a performance do nitreto de silício nos guias propostos no capítulo 2.

## 1.6 Metodologia

A avaliação dos guias segmentados foram conduzidos por meio do método dos elementos finitos (MEF). Nessa abordagem, todo o domínio contínuo é discretizado em subdomínios nos quais a função desconhecida, representada pelos campos elétricos ou magnéticos da equação de onda, é expressa por funções de interpolação com um número definido de coeficientes. Dessa forma, a solução original da equação diferencial, que possui um grau de liberdade infinito (domínio contínuo), é transformada em uma solução de um sistema de equações lineares associado a um problema com grau de liberdade finito (domínio discreto). Além disso, as análises serão conduzidas no domínio da frequência, possibilitando a utilização de janelas computacionais mais reduzidas em comparação com as empregadas nas análises no domínio do tempo. Essa abordagem resulta em uma diminuição dos esforços computacionais e dos tempos de simulação.

O primeiro passo para a realização das simulações consiste na discretização da geometria do dispositivo em análise, gerando a chamada "malha", que por sua vez, é composta por arquivos que incluem informações como coordenadas, número de elementos, tipos de materiais, entre outros. Um programa computacional será utilizado para gerar essa "malha", caracterizando essa etapa como pré-processamento. Em seguida, inicia-se a etapa de processamento, que envolve a resolução da equação de onda para o campo elétrico no domínio da frequência. Vale ressaltar que, neste trabalho, o campo inicial considerado é a componente x do campo elétrico do modo fundamental. Este modo é obtido com o auxílio de um programa de autovalores desenvolvido pelo orientador desta pesquisa. Além do modo fundamental, a análise de autovalores fornece o índice de refração efetivo do guia.

A conclusão do equacionamento na fase de processamento leva à formação de um sistema linear de equações, em seguida dá-se início à fase de pós-processamento, onde são empregados programas computacionais comerciais, e para análises adicionais e visualização dos resultados, foi utilizado um software no qual foram produzidas representações gráficas tanto da sobreposição e dispersões elétricas e magnéticas.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

*“A vida é uma grande universidade,  
mas pouco ensina a quem não sabe  
ser um aluno...”*

– Augusto Cury

### 2.1 Guias de Onda Dielétrico

Guias de ondas são dispositivos que possibilitam a transmissão do sinal óptico confinado dentro do núcleo devido ao fenômeno da reflexão interna (Sun et al., 2020). Dessa forma, define-se de abertura numérica (AN), conforme estabelecido pela Lei de Snell. A abertura numérica representa o ângulo de incidência máximo em relação ao eixo do guia de onda, para que o sinal óptico sofra reflexão interna total no interior do núcleo e se propague ao longo deste através de sucessivas reflexões (Patra, 2013). Além disso, é necessário que o guia de onda seja formado por materiais dielétricos com índices de refração distintos, como ilustrado na Figura ??, onde  $n_1$  é o índice de refração do núcleo e  $n_2$  é o da casca/substrato. (de Oliveira, 2012)

Os guias de onda dielétricos são afetadas pela absorção de material, uma vez que os materiais dielétricos adequados para a fabricação de guias de onda apresentam perdas. Embora o silício de alta tenha perdas extremamente baixas ( $\alpha < 0.05 \text{ cm}^{-1}$  para frequências abaixo de 2.5THz), ele não é adequado para a fabricação de muitas geometrias de guias de onda. A escolha do material e a estrutura da guia de onda têm um impacto significativo no desempenho da guia, afetando não apenas a perda de transmissão, mas também a dispersão. (Doerr e Kogelnik, 2008)

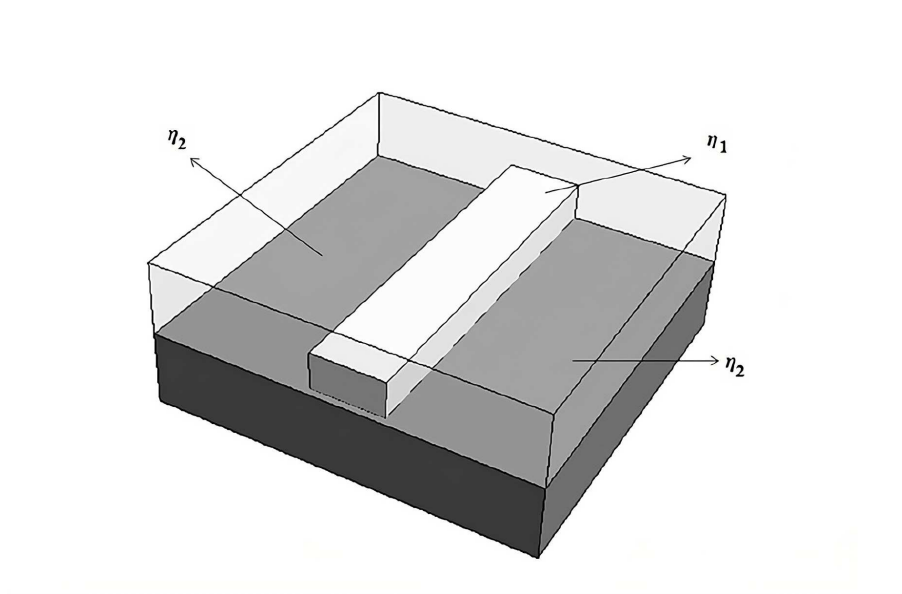


Figura 2.1: Exemplo de guia de onda dielético (de Oliveira, 2012)

## 2.2 Guias de Onda segmentados

Guias de Onda segmentados são arranjos de materiais com periodicidade pequena o suficiente para suprimir efeitos de difração. Conhecidas desde os experimentos de Hertz no final do século XIX, essas estruturas têm diversas aplicações. Lord Rayleigh teorizou sobre meios estruturados, enquanto Rytov, na década de 1950, mostrou que essas estruturas podem agir como meios homogêneos. Descobertas na década de 1960 nos olhos de mariposas, essas estruturas foram reproduzidas para criar propriedades antirreflexo. (Halir et al., 2015)

Guias de onda com alto contraste de índices de refração entre o núcleo e o revestimento geralmente apresentam consideráveis perdas por espalhamento nas imperfeições das paredes do núcleo. Uma possível solução para resolver esse problema pode ser a estratificação do núcleo, por meio do processo de segmentação utilizando materiais com diferentes índices de refração. (Segundo, 2018)

A característica principal dos guias de onda segmentados na redução de perdas por espalhamento e o deslocamento espacial dos modos de propagação no núcleo, causado pelas discontinuidades introduzidas durante a segmentação. Esse rearranjo dinâmico responde às mudanças geométricas, minimizando as interações indesejadas com discontinuidades e otimizando o trajeto de propagação da luz. A introdução controlada de discontinuidades não apenas altera a configuração geométrica, mas também contribui de forma eficaz para atenuar as perdas por espalhamento, destacando a importância dos guias de onda segmentados na maximização da eficiência na transmissão óptica. (Aschiéri e Doya, 2013)

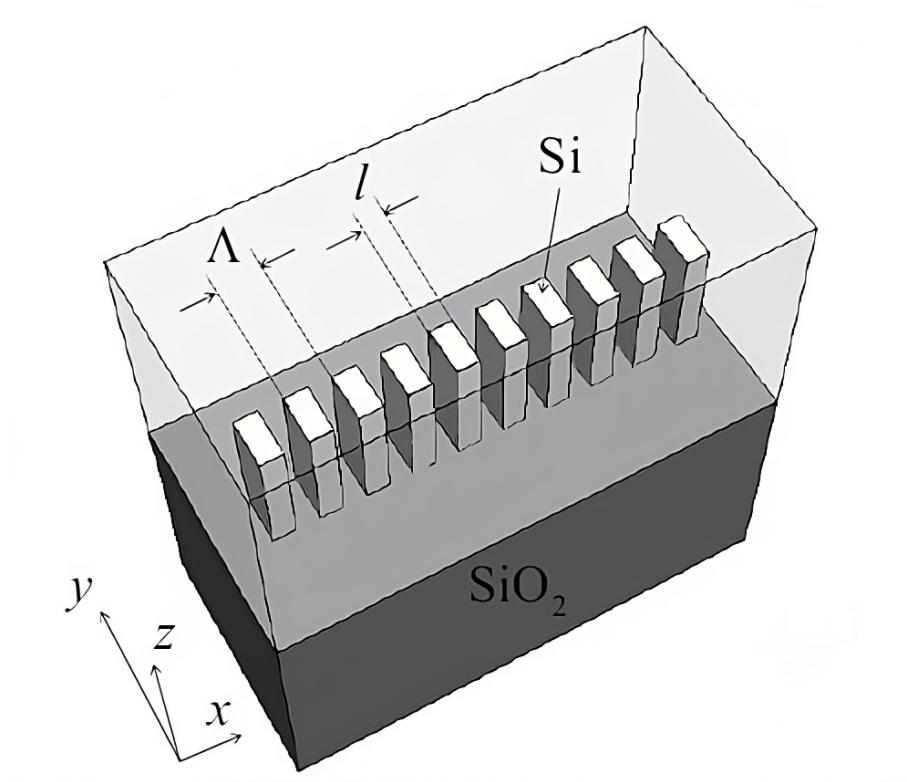


Figura 2.2: Exemplo de guia de onda segmentado (Costa et al., 2011)

### 2.3 Análise para os modos dos Guias de Onda Segmentados

Na fase inicial do estudo, a análise modal dos guias de onda segmentados foi empreendida. No entanto, antes de entrar na modelagem específica dos guias segmentados, é essencial considerar certos aspectos em relação aos guias contínuos. Uma estrutura que exibe uma simetria translacional contínua permanece inalterada sob translações em uma direção específica (ou várias). Um guia de onda contínuo, apresenta simetria translacional na direção  $z$ , dado que suas propriedades permanecem consistentes ao longo dessa direção, refletindo  $\varepsilon(z) = \varepsilon(z + R)$ , independente do valor de  $R$ .

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{A}(x, y)e^{jk_z z}, \quad (2.1)$$

onde  $\mathbf{E}$  é o campo elétrico,  $\mathbf{r} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$  o vetor posição,  $\mathbf{A}$  o perfil transversal do modo e  $k_z$  o número de onda.

Por outro lado, um guia de onda submetido à segmentação periódica não compartilha a simetria translacional contínua observada no guia ilustrado na Figura 2.1. As propriedades do guia segmentado sofrem variações ao longo da direção de propagação,  $z$ , como indicado na Figura 2.2. Contudo, essas variações não são de natureza



aleatória; em vez disso, obedecem a uma regularidade: os materiais que constituem o guia segmentado são intercalados de maneira a tornar o índice de refração do arranjo uma função periódica na direção  $z$ , como ilustrado na Figura 2.2. Nesse contexto, torna-se evidente que o guia de onda segmentado apresenta uma simetria translacional discreta, uma vez que o índice de refração, juntamente com suas demais propriedades, exibe periodicidade na direção  $z$ . Em outras palavras,  $\varepsilon(z) = \varepsilon(z + \Lambda)$ , sendo  $\Lambda$  representando o período de segmentação do guia.

Pelo teorema de Bloch-Floquet, os guias de onda segmentados devem comportar modos do tipo:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{u}(\mathbf{r})e^{j\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \quad (2.2)$$

sendo  $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{r} + \mathbf{R})$  uma função periódica para todos os vetores de rede  $\mathbf{R}$  (múltiplos inteiros de  $\Lambda$ ) e  $\mathbf{k}$  o vetor de onda.

O teorema de Bloch-Floquet, através da equação (2.2), nos auxiliou a desvendar como será a forma dos modos que se propagam no guia de onda da figura 1.1, para um meio sem perdas e não magnético. Para uma investigação mais detalhada a respeito da função periódica  $\mathbf{u}(\mathbf{r})$ , nos valem das equações de Maxwell. Em especial, estamos interessados na Lei de Faraday, equação 2.3, e na Lei de Ampère, equação 2.4, além das relações constitutivas:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.6)$$

Para a qual  $\vec{D}$ ,  $\vec{B}$  e  $\vec{J}_c$  são respectivamente as densidades de campo elétrico, campo magnético e de corrente,  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$  são as intensidades de campo elétrico e magnético,  $\rho_v$  é a densidade de carga volumétrica,  $\nabla \cdot$  é o operador divergência e  $\nabla \times$  é o operador rotacional.

Algumas observações a respeito das equações (2.3)-(2.6): assume-se que os materiais envolvidos neste estudo são não-magnéticos, os materiais são isotrópicos e homogêneos e sua permissividade elétrica corresponde a uma constante (função do vetor posição  $\mathbf{r}$ ) e assume-se, por fim, a inexistência de fontes de corrente impressas, isto é,  $\mathbf{J}(\mathbf{r}) = 0$ .

Combinando as equações (2.3)-(2.6), é possível escrever uma equação apenas para o campo elétrico, a equação de onda:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \varepsilon(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (2.7)$$

sendo  $\omega$  a frequência angular da onda eletromagnética e  $c$  a velocidade da luz no vácuo. Toda onda eletromagnética deve satisfazer a equação de onda (2.7) e, logo, os modos do guia de onda segmentado não são exceção. Se substituirmos a equação (2.2) na equação de onda, é possível se obter a relação de dispersão para o guia segmentado, isto é, determinar qual a relação de dependência entre o vetor de onda  $\mathbf{k}$  dos diversos modos e as suas respectivas frequências de operação no guia de onda,  $\omega$ . A obtenção da relação de dispersão corresponde à análise modal do guia de onda.

A equação (2.7) pode ser transformada de forma apropriada em um problema de autovalores generalizado, como exposto na seção 2.2. Através da utilização do FEM (Método dos Elementos Finitos), a relação de dispersão é numericamente determinada. Munidos dessa ferramenta numérica, a análise modal se concentrou na investigação dos efeitos provocados por variações na geometria e composição do guia segmentado na relação de dispersão.

Para uma abordagem mais abrangente, todas as três dimensões do guia de onda foram modificadas: largura e comprimento. Esse último parâmetro engloba tanto o período da grade ( $\Lambda$ ) quanto o denominado "duty-cycle", que corresponde à proporção do período da grade composta por material de silício.

Além das variações na geometria, também foi de interesse do estudo a forma como os materiais que compõem o guia de onda influenciam na sua relação de dispersão. Neste caso, são duas as possibilidades: alterar a composição do núcleo do guia (buscar um material alternativo ao silício) ou alterar o material que realiza o revestimento superior do guia (casca superior). Devido a restrições quanto ao processo de fabricação, a casca inferior do guia de onda não pode ser diferente de  $\text{SiO}_2$ , não correspondendo a um parâmetro de projeto do guia e, logo, não foi um alvo deste estudo.

## 2.4 Método dos elementos Finitos

Em nossa abordagem, consideramos uma configuração na qual a altura dos guias de ondas é significativamente maior do que o comprimento de onda operacional. Isso implica que as variações dos campos ao longo do eixo  $z$  são negligenciáveis. Como resultado, a complexidade do nosso problema 3D é substancialmente reduzida, convertendo-se em um problema 2D.

Para realizar tal análise, concentramo-nos na célula unitária dos guias, conforme ilustrado nas Figura 2.3. Ao aplicar as condições de contorno adequadas do tipo

Bloch, empregando a abordagem FEM 2D no domínio da frequência, conseguimos compreender sobre o comportamento dessas estruturas.

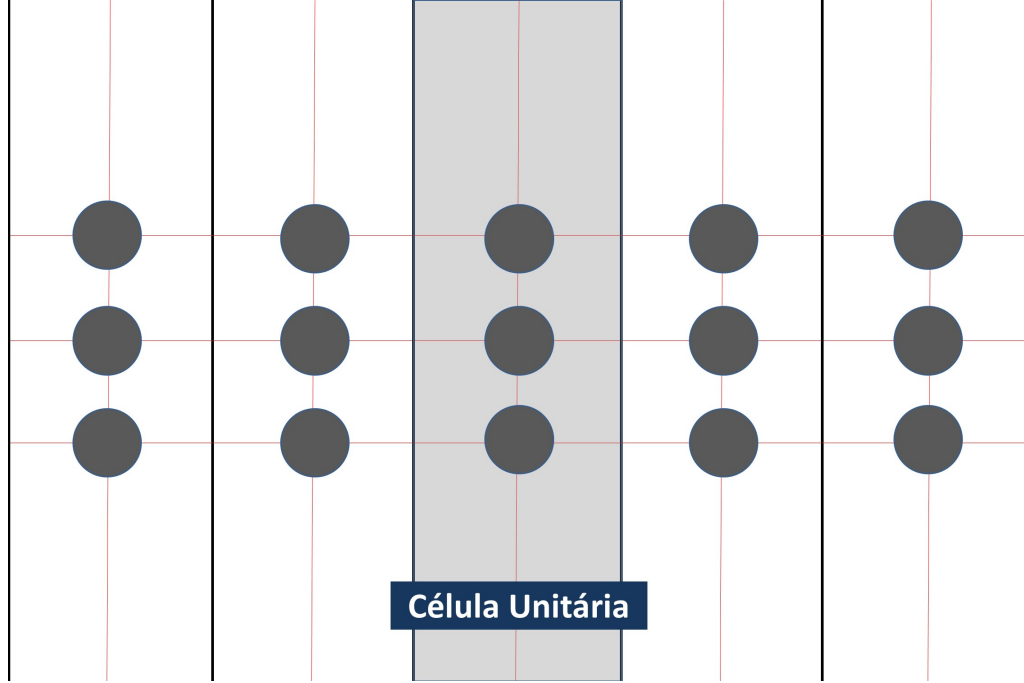


Figura 2.3: Esquema do guia de ondas segmentado periódico com destaque para célula unitária.

A análise FEM da célula unitária pode ser tratada separadamente para os modos TM e modos TE. Em ambos os casos partimos da equação de onda de segunda ordem dada por:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left( p \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( p \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) = q \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 \Phi \quad (2.8)$$

onde,  $p = 1/n$ ,  $q = 1$  e  $\phi = Ez$  para modos TE e  $p = 1$ ,  $q = n$  e  $\phi = Hz$  para modos TM. Aqui,  $n$  é o índice de refração. Considerando a propagação da onda ao longo do eixo  $x$ , os campos  $Ez$  e  $Hz$  podem ser escritos como

$$E_z = e_z e^{-jk_x x} \quad (2.9)$$

$$H_z = h_z e^{-jk_x x} \quad (2.10)$$

onde,  $e_z$  e  $h_z$  são os envelopes espaciais dos campos e  $k_x$  é a constante de propagação na direção  $x$ . Substituindo (2) em (2), aplicando o método convencional de Galerkin e discretizando o domínio computacional usando elementos triangulares

isoparamétricos de segunda ordem de 6 nós obtemos um problema de autovalor dado por:

$$[A]\{\phi\} = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 [B]\{\phi\} \quad (2.11)$$

onde o vetor  $\{\varphi\}$  é o campo  $e_z$  ou  $h_z$ . Para modos TE, as matrizes  $[A]$  e  $[B]$  são dadas por

$$\begin{aligned} [A] = \sum_e \left[ \iint_e \frac{1}{n^2} \frac{\partial\{N\}}{\partial x} \frac{\partial\{N\}^T}{\partial x} \partial x \partial y + \iint_e \frac{1}{n^2} \frac{\partial\{N\}}{\partial y} \frac{\partial\{N\}^T}{\partial y} \partial x \partial y \right. \\ \left. + jk_x \iint_e \frac{1}{n^2} \left( \frac{\partial\{N\}}{\partial x} \{N\}^T - \{N\} \frac{\partial\{N\}^T}{\partial x} \right) \partial x \partial y \right. \\ \left. + jk_x \iint_e \frac{1}{n^2} \left( \frac{\partial\{N\}}{\partial y} \{N\}^T - \{N\} \frac{\partial\{N\}^T}{\partial y} \right) \partial x \partial y + \iint_e \frac{1}{n^2} (k_x^2) \{N\} \{N\}^T \partial x \partial y \right] \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$B = \sum_e \iint_e \{N\} \{N\}^T \partial x \partial y \quad (2.13)$$

Para os modos TM, as matrizes  $[A]$  e  $[B]$  são dadas por

$$\begin{aligned} [A] = \sum_c \left[ \iint_i \frac{\partial\{N\}}{\partial x} \frac{\partial\{N\}^T}{\partial x} \partial x \partial y + \iint_e \frac{\partial\{N\}}{\partial y} \frac{\partial\{N\}^T}{\partial y} \partial x \partial y \right. \\ \left. + 2jk_x \iint_e \frac{\partial\{N\}}{\partial x} \{N\}^T \partial x \partial y + 2jk_x \iint_i \frac{\partial\{N\}}{\partial y} \{N\}^T \partial x \partial y \right. \\ \left. + \iint_x (k_x^2) \{N\} \{N\}^T \partial x \partial y \right] \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$B = \sum_e \iint_e n^2 \{N\} \{N\}^T \partial x \partial y \quad (2.15)$$

Devido à periodicidade do guia de ondas, precisamos apenas discretizar uma célula unitária e condições de contorno periódicas são aplicadas igualando os campos nos lados esquerdo e direito da célula unitária. Os valores de  $k_x$  estão restritos à primeira região de Brillouin na direção  $x$ ,  $\Gamma(0,0)\pi/a - X(1,0)\pi/a$  [3, 6, 7].

## 2.5 Modos de Polarização

O conceito de modo de propagação é um elemento fundamental na teoria da propagação eletromagnética em guias de onda em um contexto geral. Esses modos de propagação são derivados das equações de Maxwell e estão intrinsecamente relacionados às condições de contorno específicas impostas pelo tipo de guia de onda, incluindo fatores como sua geometria e o material do qual é composto.

Esses modos de propagação constituem um conjunto de ondas eletromagnéticas que podem ser guiadas de forma estável ao longo do guia de onda. Cada modo de propagação é distintamente caracterizado por uma configuração particular dos campos elétrico e magnético, que se repetem periodicamente ao longo do comprimento do guia. É importante notar que os guias de onda são capazes de acomodar apenas um número discreto de modos de propagação que podem coexistir e se propagar de maneira simultânea ao longo do guia.

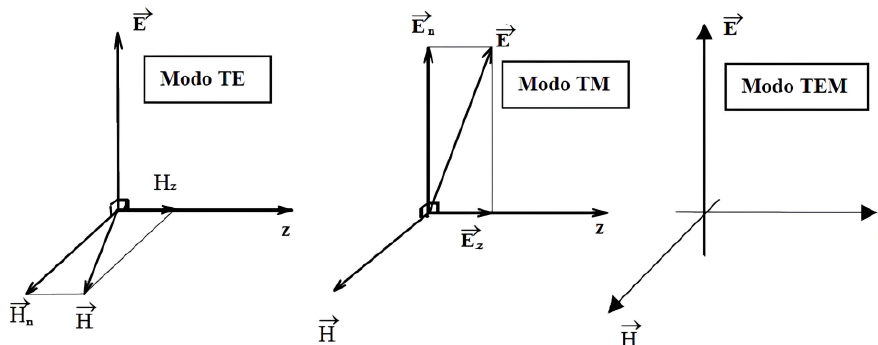


Figura 2.4: Polarização Elétrica, Magnética e Mista, respectivamente

Os diferentes modos de propagação que podem ocorrer estão sujeitos a condições específicas de corte, que indicam quando um modo deixa de ser sustentado pelo guia de onda.

De maneira geral, os guias de onda permitem modos de propagação que podem ser classificados em duas categorias principais: modos transversais e modos híbridos conforme a Figura 2.4. Nos modos transversais, a componente do campo elétrico (modo TE) ou do campo magnético (modo TM) não se estende na direção de propagação da onda eletromagnética, mas é restrita apenas à direção transversal. Já nos modos híbridos (modo EH e HE), tanto o campo elétrico quanto o campo magnético têm componentes na direção de propagação da onda.

Essas distinções são fundamentais, pois os modos de propagação influenciam diretamente o comportamento e as características de propagação em guias de onda, desempenhando um papel crucial na análise e no projeto dessas estruturas fotônicas. Além disso, o entendimento das condições de corte é essencial para determinar quais modos são sustentados em um guia de onda específico e como eles se comportam ao longo do seu comprimento.

O Modo TE (ou Tipo H) surge quando a única componente longitudinal presente é a do campo magnético, e todo o campo elétrico reside no plano transversal em relação à direção de propagação. Se considerarmos a propagação ao longo da direção  $z$ , nesse cenário, temos  $H_z \neq 0$  e  $E_z = 0$ .

Por outro lado, os Modos TM (ou Tipo E) apresentam  $E_z \neq 0$  e  $H_z = 0$ .

Em circunstâncias específicas em que, individualmente, os Modos TE e TM não atendem às condições de contorno exigidas, uma combinação linear desses modos proporciona a solução geral e completa. Esses novos modos, que possuem componentes tanto de  $E_z \neq 0$  quanto de  $H_z \neq 0$ , são conhecidos como modos híbridos e são denotados por EH ou HE (TEM), como ilustrado na Figura 2.4.

## 2.6 Conclusão

Neste capítulo, foi apresentado a fundamentação teórica necessária para embasar os tópicos discutidos ao longo desta dissertação. O principal objetivo foi estabelecer uma compreensão teórica robusta relacionada ao fenômeno do guiamento de ondas e às técnicas de simulações numéricas utilizadas para investigar e analisar esses sistemas.

# Capítulo 3

## Projeto dos guias de onda e discussões

*“A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez”.*

– George Bernard Shaw

### 3.1 Guia de Onda com Nanofios

Utilizando o método de elementos finitos, simulações foram conduzidas para analisar um guia de ondas composto por vários segmentos. O núcleo desse guia é constituído de silício, apresentando um índice de refração  $n_{\text{Si}} = 3,476$ , ao passo que o substrato é composto por sílica, cujo índice de refração é  $n_{\text{SiO}_2} = 1,444$ .

A célula unitária adotada possui uma largura  $w = 300$  nm na direção  $x$ . A abordagem de simulação abrange um domínio computacional  $x \times y = 0,3\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ , resultando em uma malha que contém aproximadamente 4500 nós e 9400 elementos, conforme ilustrado na Figura 3.1

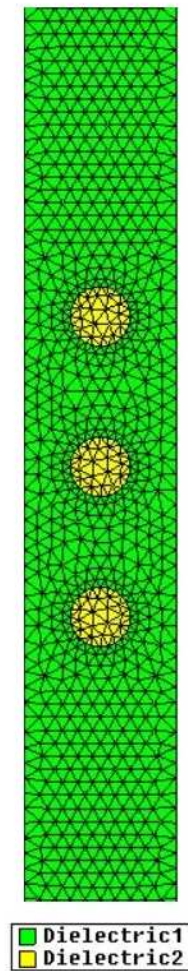


Figura 3.1: Malha para guia de onda segmentado composto por três nanofios

O esquema do guia de ondas periódico apresenta uma estrutura composta por um núcleo que contém três nanofios feitos de silício, os quais estão posicionados sobre um substrato de sílica. Cada um desses nanofios de silício serve como um elemento de modulação dentro do guia de ondas, influenciando as propriedades ópticas da estrutura. A disposição periódica desses elementos permite criar bandas de parada fotônica, que são faixas de frequência nas quais a propagação de determinados modos de luz é proibida. Isso tem implicações importantes na manipulação de sinais ópticos e na criação de dispositivos fotônicos personalizados.



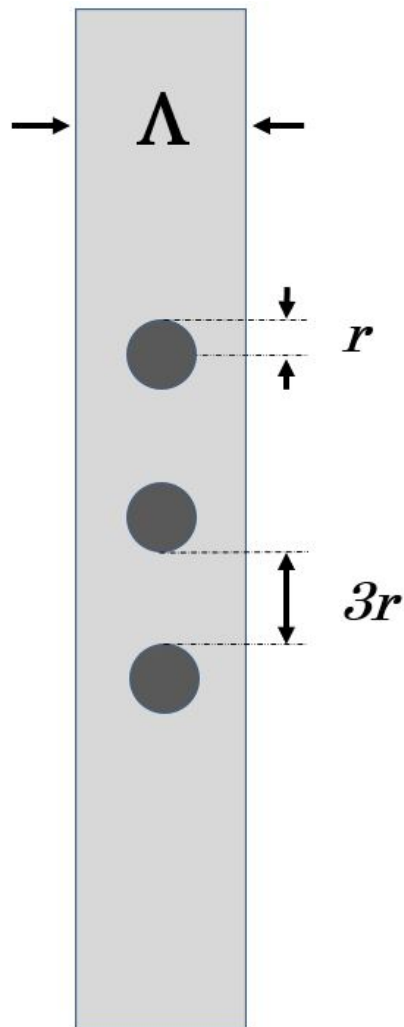


Figura 3.2: Esquema para guia de onda segmentado proposto composto por três nanofios

O guia de onda proposto, contendo três nanofios, foram levados em consideração nas análises, o raio e o deslocamento na direção  $\Delta x$  ao longo do guia, raio foram configurados para 40 nm, 50 nm e 60 nm como pode ser observado nos esquemas mostrados nas Figuras 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9,

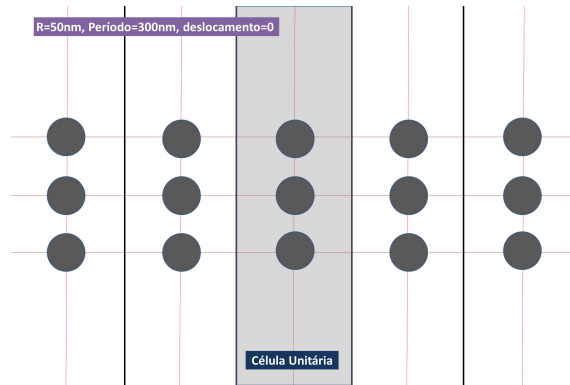


Figura 3.3: Esquema do guia de ondas segmentado periódico composto por um núcleo com três nanofios de silício sobre sílica com raio de  $50\text{nm}$  e  $\Delta x = 0$ .

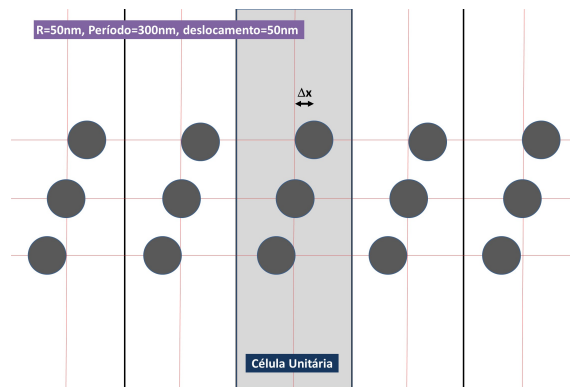


Figura 3.4: Esquema do guia de ondas segmentado periódico composto por um núcleo com três nanofios de silício sobre sílica com raio de  $50\text{nm}$  e  $\Delta x = 50\text{nm}$ .

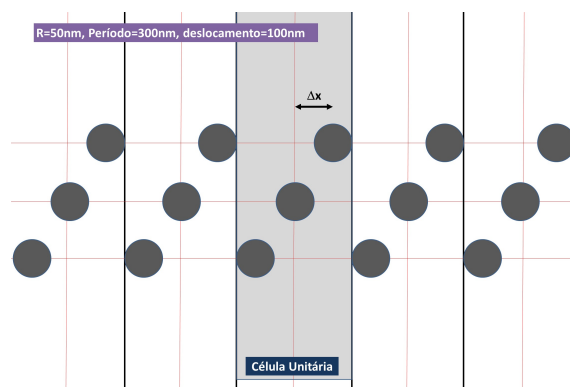


Figura 3.5: Esquema do guia de ondas segmentado periódico composto por um núcleo com três nanofios de silício sobre sílica com raio de  $50\text{nm}$  e  $\Delta x = 100\text{nm}$ .

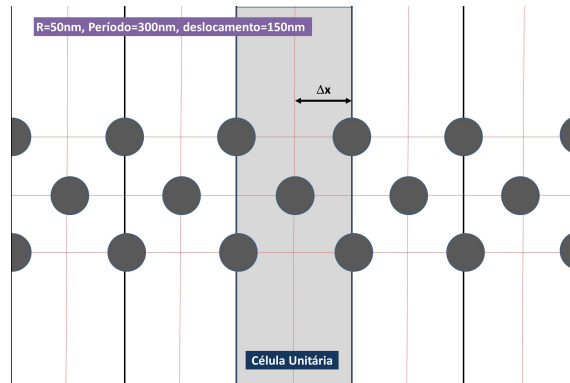


Figura 3.6: Esquema do guia de ondas segmentado periódico composto por um núcleo com três nanofios de silício sobre sílica com raio de  $50\text{nm}$  e  $\Delta x = 150\text{nm}$ .

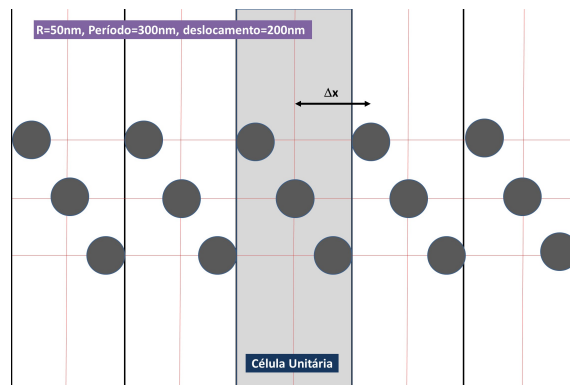


Figura 3.7: Esquema do guia de ondas segmentado periódico composto por um núcleo com três nanofios de silício sobre sílica com raio de  $50\text{nm}$  e  $\Delta x = 200\text{nm}$ .

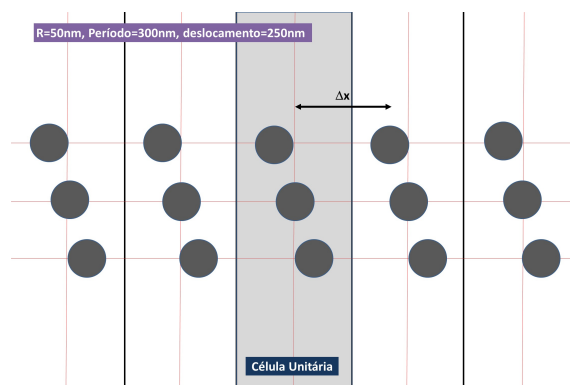


Figura 3.8: Esquema do guia de ondas segmentado periódico composto por um núcleo com três nanofios de silício sobre sílica com raio de  $50\text{nm}$  e  $\Delta x = 250\text{nm}$ .

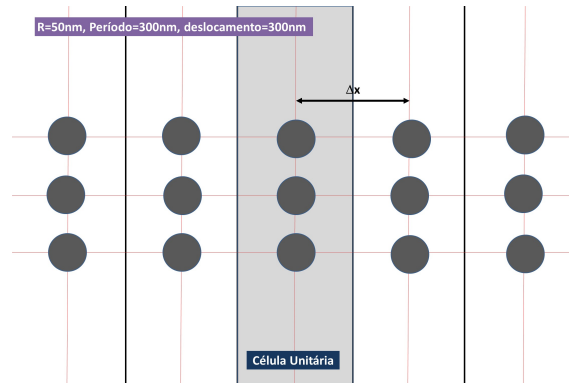


Figura 3.9: Esquema do guia de ondas segmentado periódico composto por um núcleo com três nanofios de silício sobre sílica com raio de 50nm e  $\Delta x = 300\text{nm}$ .

Destaca-se a flexibilidade do projeto ao permitir ajustes no raio e no espaçamento entre os nanofios de silício. Essa capacidade de ajuste oferece a oportunidade de sintonizar com precisão as propriedades do guia de ondas de acordo com os requisitos específicos do projeto. A variação do raio dos nanofios influencia diretamente as características de confinamento da onda eletromagnética, enquanto o controle do espaçamento entre eles desempenha um papel na modulação das interações entre as ondas propagadas. Esses ajustes refinados não apenas contribuem para a personalização do guia de ondas, mas também abrem possibilidades de otimização para atender a diferentes aplicações e condições de operação.

Durante a simulação para propagação dos guias, foi observado que, os deslocamentos a partir de 150nm, contados do centro do guia, geraram simetria entre as geometrias de 0 e 300nm, 50 e 250nm, 100 e 200nm, fazendo que esses deslocamentos, produzissem propagações semelhantes. Uma vez observado isso, foi importante pois economizou tempo para construção de novas geometrias com os respectivos deslocamentos e recurso de processamento.

Foram realizados cálculos das relações de dispersão para os modos TE, e modos TM, considerando diferentes valores para o raio dos nanofios, e o deslocamento em relação ao eixo  $\Delta x$  conforme retratado nas Figuras 3.10, 3.11, 3.12 3.13 3.14 3.15.

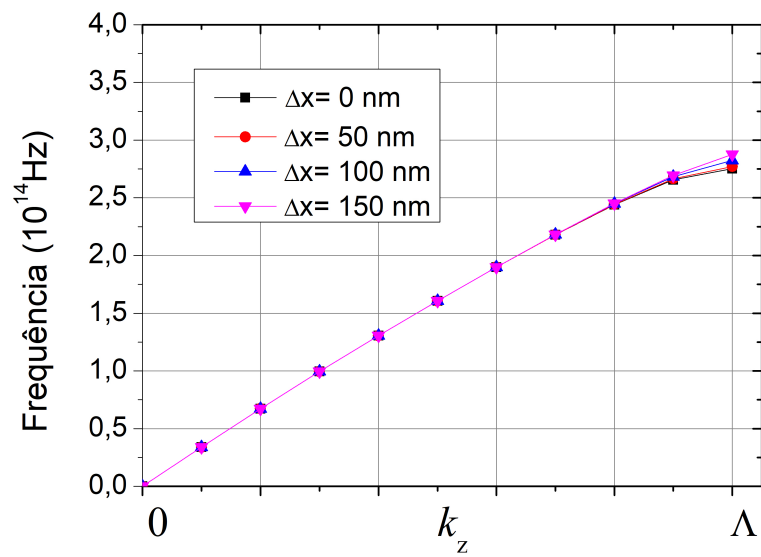


Figura 3.10: Curvas de dispersão para nanofios de silício com raio igual a 40nm, modo TE.

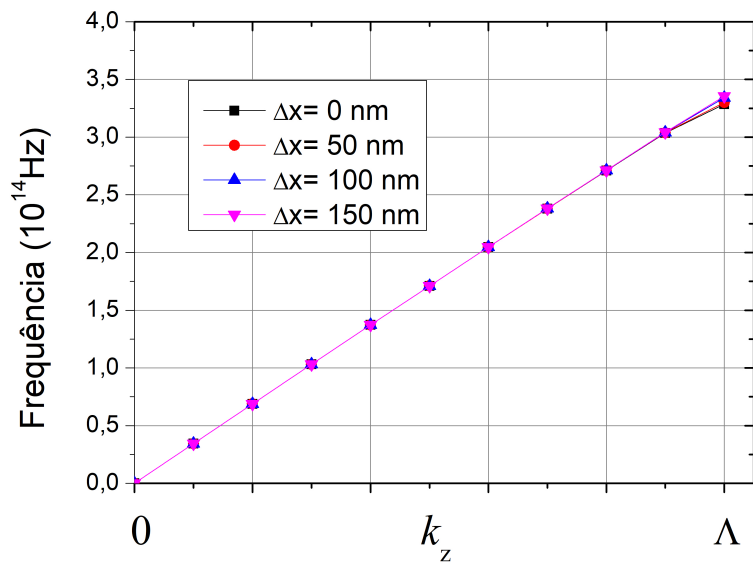


Figura 3.11: Curvas de dispersão para nanofios de silício com raio igual a 40nm, modo TM.

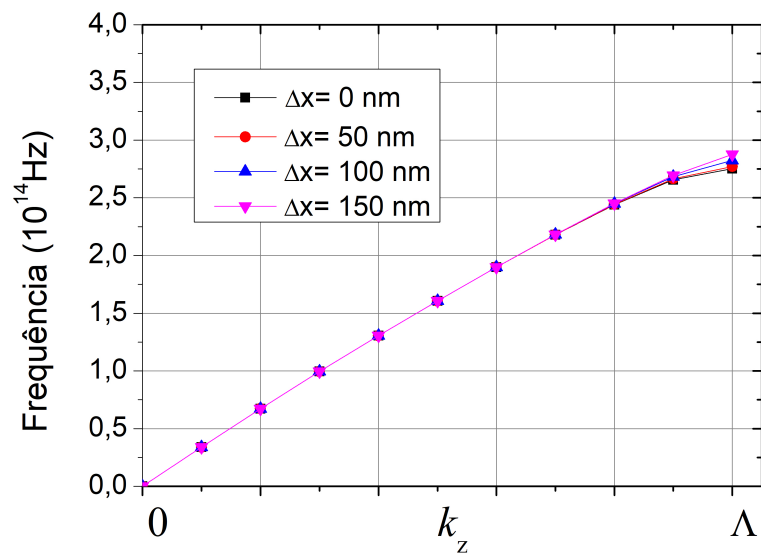


Figura 3.12: Curvas de dispersão para nanofios de silício com raio igual a 50nm, modo TE.

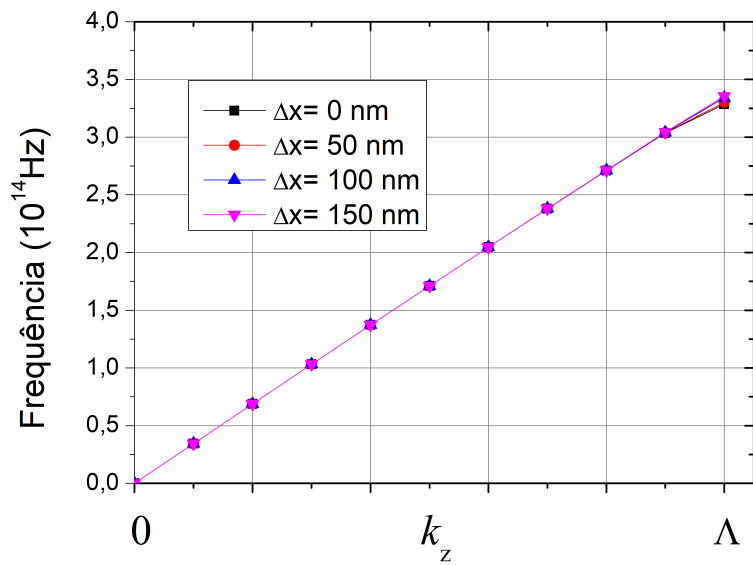


Figura 3.13: Curvas de dispersão para nanofios de silício com raio igual a 50nm, modo TM.

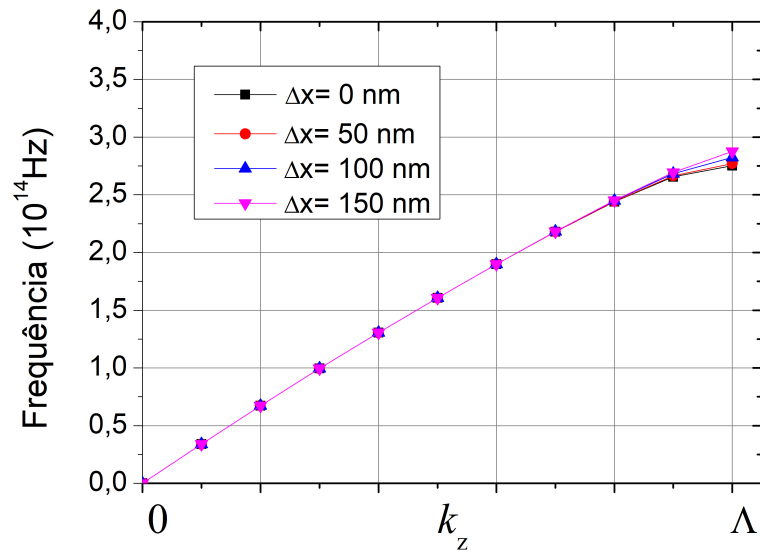


Figura 3.14: Curvas de dispersão para nanofios de silício com raio igual a 60nm, modo TE.

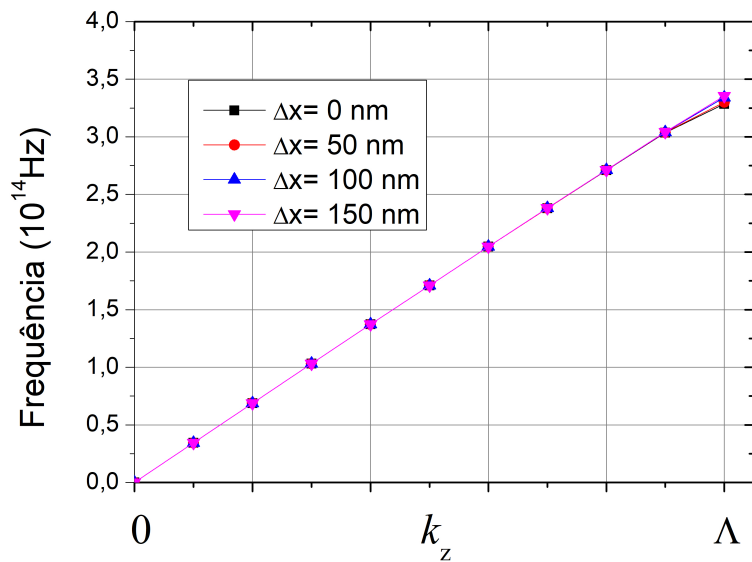


Figura 3.15: Curvas de dispersão para nanofios de silício com raio igual a 60nm, modo TM.

A comparação minuciosa entre as curvas de dispersão dos modos dos guias de onda segmentados revelou uma notável concordância, abrangendo uma ampla faixa de

largura de banda. Esse resultado é particularmente significativo, pois demonstra que as simulações realizadas apresentam uma eficácia notável em prever com precisão o comportamento dos guias de onda segmentados em relação às características dos modos TE e TM.

No entanto, foi observado que, à medida que avançamos para frequências mais elevadas, a propagação nos guias sofre variações relacionados a variação dos raios para os nanofios e os deslocamentos provocados na geometria de seu núcleo.

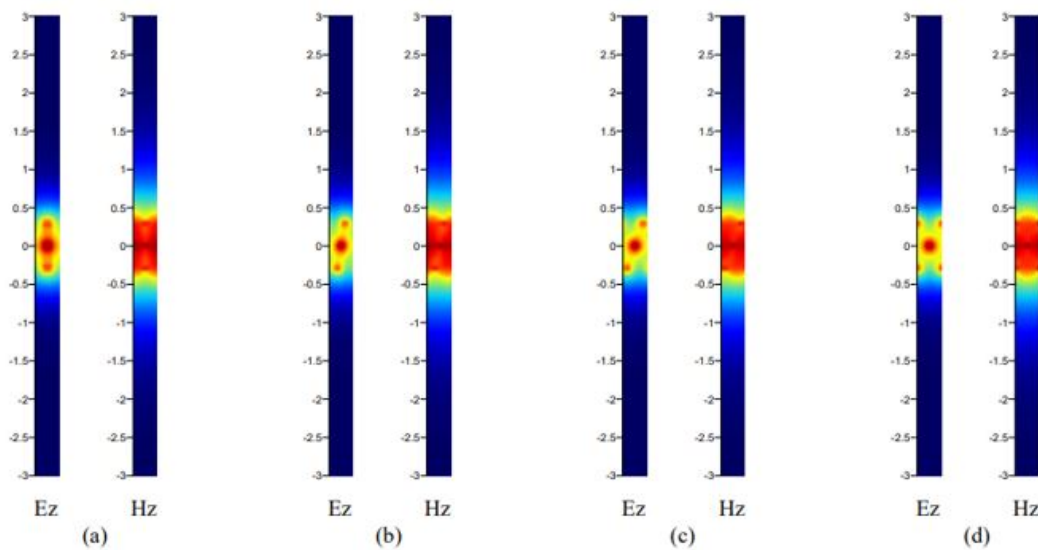


Figura 3.16: Distribuição espacial do campo para o guia de onda com nanofios de silício com raio 50nm considerando o deslocamento (a)  $\Delta x = 0$ , (b)  $\Delta x = 50\text{nm}$ , (c)  $\Delta x = 100\text{nm}$ , (d)  $\Delta x = 150\text{nm}$

Pode-se observar na Figura 3.16, que para os modos Ez o campo está concentrado principalmente nos nanofios enquanto para os modos Hz o campo é distribuído quase uniformemente pela região do núcleo, resultando em pequenas variações nas propriedades de propagação com o deslocamento horizontal.

Para os modos Ez, a concentração do campo elétrico nos nanofios é uma característica central. Isso demonstra a capacidade de direcionar eficazmente o campo elétrico para regiões específicas do guia de onda, abrindo portas para aplicações de modulação de intensidade da luz, como moduladores eletro-ópticos e dispositivos de comutação óptica.

Por outro lado, nos modos Hz, a distribuição uniforme do campo magnético na região do núcleo do guia de onda. Essa uniformidade contribui para a estabilidade das propriedades de propagação, tornando esses guias de onda atraentes para aplicações de baixa perda, como amplificadores ópticos e lasers de alta eficiência.



### 3.2 Guias de Onda Slot

Um guia de onda de slot é uma estrutura fundamental na fotônica, formada por uma lacuna estreita entre duas trilhas de silício em um substrato do tipo Silicon-On-Insulator (SOI). Inventados em 2004 por (Almeida et al., 2004), esses guias de onda tornaram-se essenciais para combinar a tecnologia SOI com polímeros ópticos não lineares. A lacuna gera dois efeitos principais: confinamento parcial da luz e um campo elétrico extremamente grande, permitindo operação em alta velocidade e ampla largura de banda com baixo consumo de energia. Além disso, o guia de onda de slot destaca-se na detecção óptica, aproveitando a forte interação luz-análito devido à concentração significativa da luz próxima às trilhas de silício. (Steglich e You, 2018)

Para essa dissertação foram propostas duas geometrias distintas para guias de onda do tipo slot. A primeira geometria, vide Figura 3.17 e 3.25, consiste com duas geometrias, que forma um slot, com dimensões do tipo  $l \times l = 150nm \times 150nm$  criando apenas uma lacuna entre essas estruturas onde são guiados a luz. O núcleo do guia é composto de silício, com um índice de refração  $n_{Si} = 3,476$ , enquanto o substrato é constituído por sílica, possuindo um índice de refração  $n_{SiO_2} = 1,444$ .

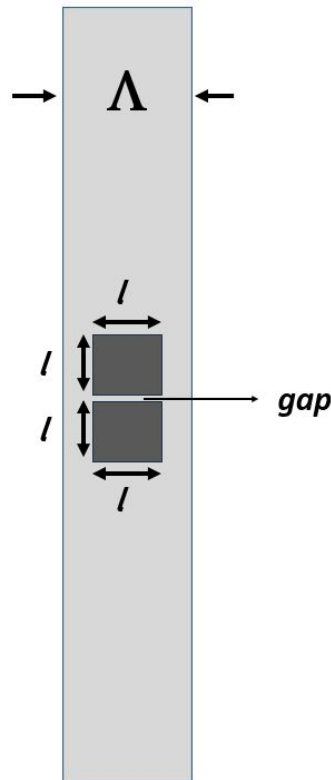


Figura 3.17: Modelo de Guia de onda com 1 slot

A célula unitária adotada possui uma largura  $w = 300$  nm na direção  $x$ . A abor-

dagem de simulação abrange um domínio computacional  $x \times y = 0,3\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ , resultando em uma malha que contém aproximadamente 4500 nós e 9400 elementos conforme a Figura 3.25

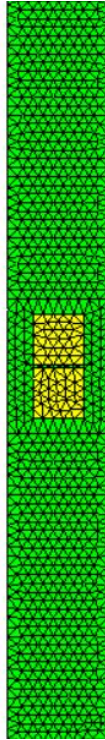


Figura 3.18: Malha para guia de silício com 1 slot

Durante a simulação não houve variação nas dimensões da geometria no núcleo do guia, mas houve variação na largura dos gaps. Foi usado os deslocamento das geometrias para averiguar o efeito causado na propagação do guia, sendo os deslocamento foram de 15nm, 30nm, 45nm, 60nm e 75nm. O limite máximo foi devido ao efeito de espelhamento já explicado anteriormente.

Foram realizados cálculos das relações de dispersão para os modos TE, e modos TM, considerando o deslocamento em ralação ao eixo  $\Delta x$  conforme retratado nas Figuras 3.19, 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24.

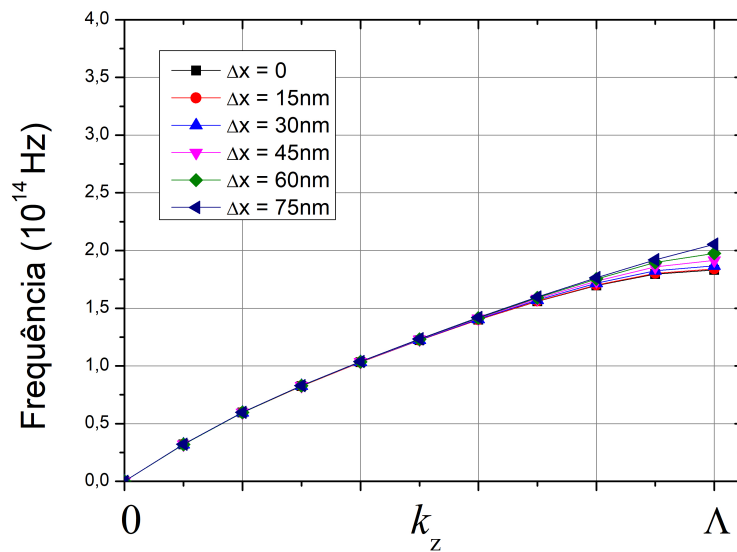


Figura 3.19: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de silício, com *gap* de 10nm, modo TE.

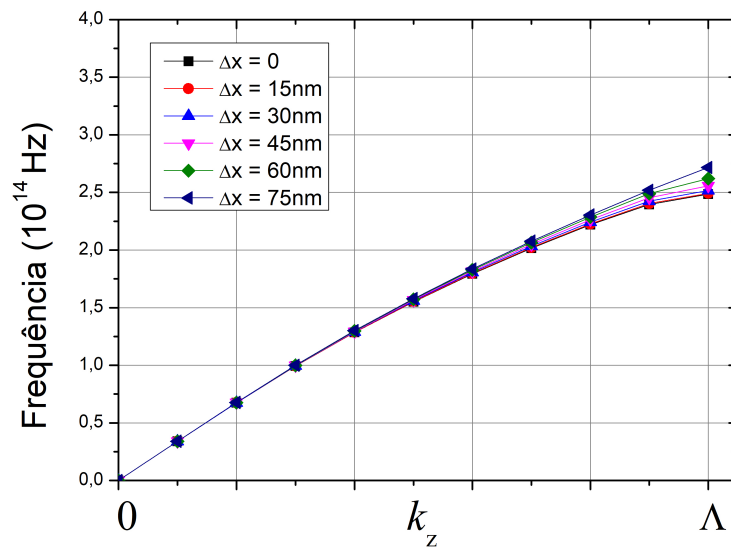


Figura 3.20: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de silício, com *gap* de 10nm, modo TM.

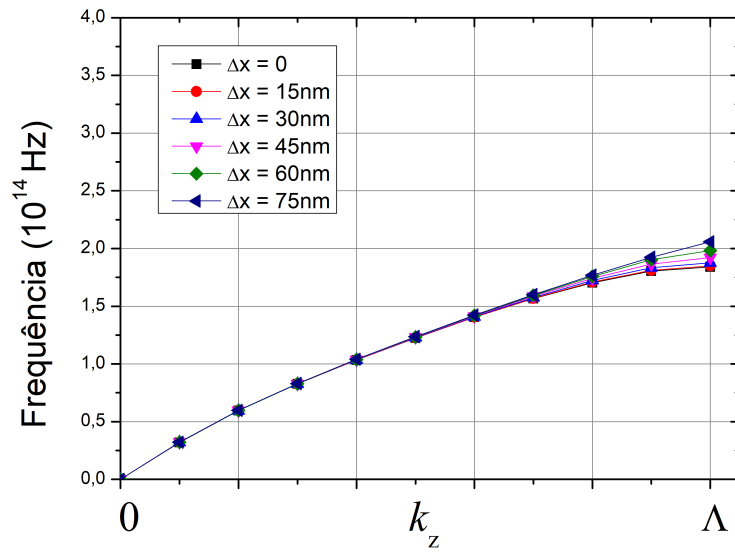


Figura 3.21: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de silício, com *gap* de 15nm, modo TE.

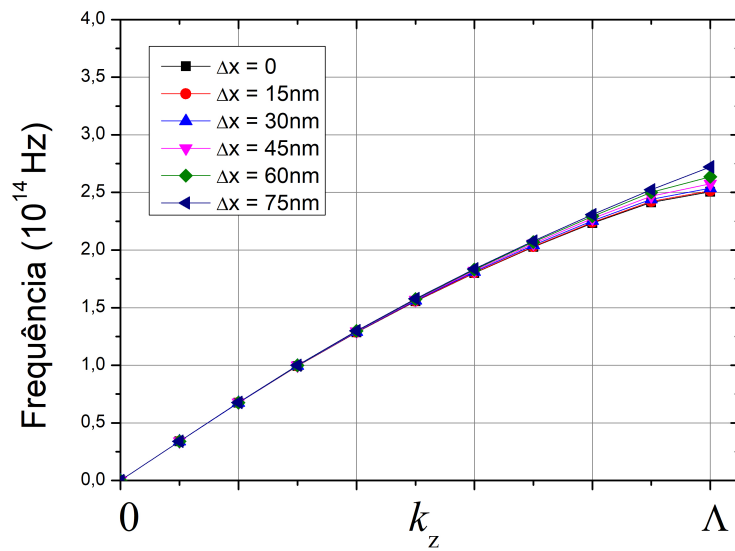


Figura 3.22: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de silício, com *gap* de 15nm, modo TE.

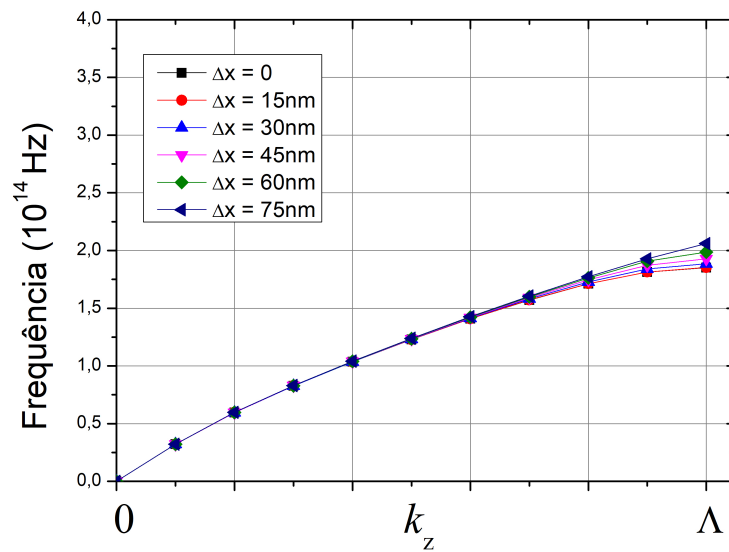


Figura 3.23: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de silício, com *gap* de 20nm, modo TM.

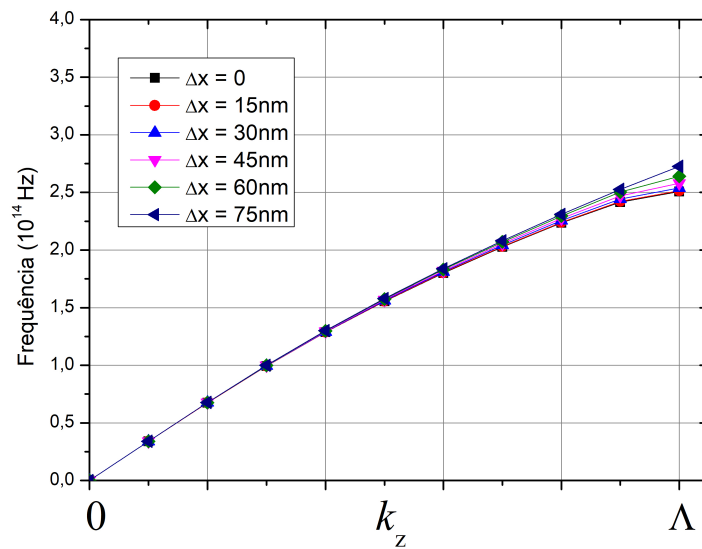


Figura 3.24: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de silício, com *gap* de 20nm, modo TM.

A segunda geometria é composta por dois slots do tipo  $l \times w$ , sendo duas geometrias iguais a  $30nm \times 20nm$  e um terceiro slot com dimensões de  $30nm \times 90nm$ . Não houve variação em relação aos gaps, mas houve variação na largura dos segmentos no núcleo do guia. Em relação ao deslocamento dos segmentos, a medida que a largura foi aumentando, o deslocamento foi reduzindo, pois iria gerar o mesmo efeito de espelhamento já citado em geometrias anteriores, fazendo com que haja economia de tempo para construção e processamento das geometrias.

A célula unitária adotada possui uma largura  $w = 30 \text{ nm}$ ,  $w = 60 \text{ nm}$  e  $w = 90 \text{ nm}$  na direção  $x$ . A abordagem de simulação abrange um domínio computacional  $x \times y = 0,3\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ , resultando em uma malha que contém aproximadamente 4500 nós e 9400 elementos conforme a Figura 3.25

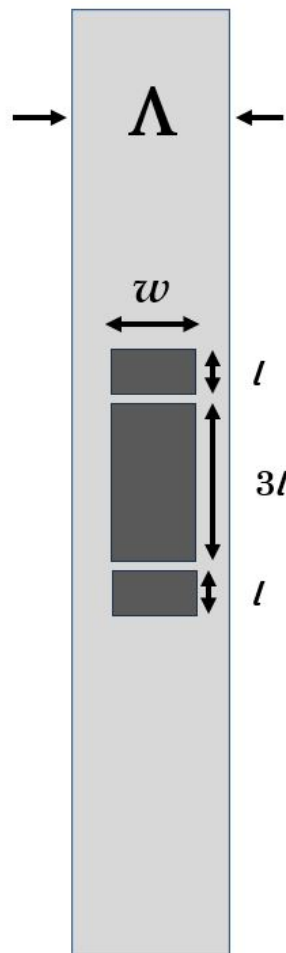


Figura 3.25: Modelo de Guia de onda com núcleo de silício e 2 slots

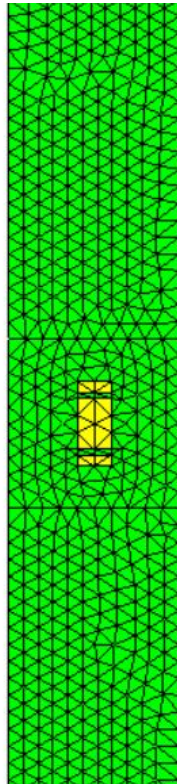


Figura 3.26: Malha para guia com núcleo de silício e 2 slots

Foram realizados cálculos das relações de dispersão para os modos TE, e modos TM, considerando o deslocamento em relação ao eixo  $\Delta x$  conforme retratado na Figura 3.27, 3.28, 3.29, 3.30, 3.31, 3.32

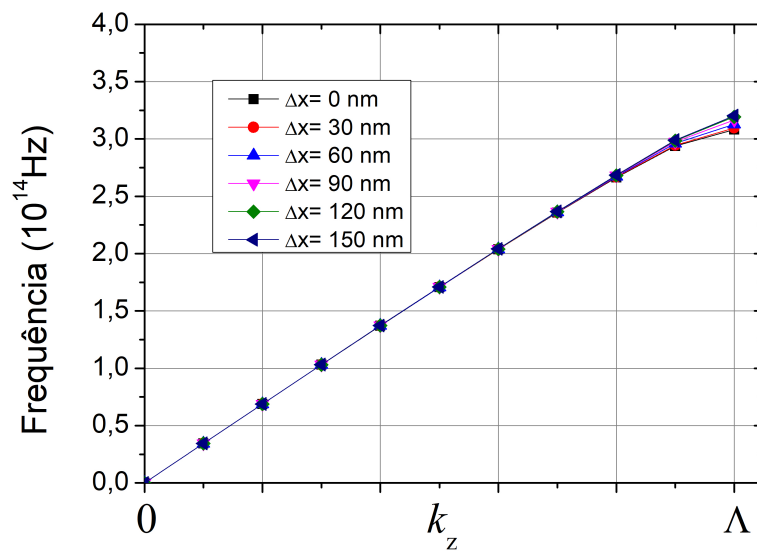


Figura 3.27: Curvas de dispersão, guia com núcleo de silício, para  $l = 30$ nm, modo TE.

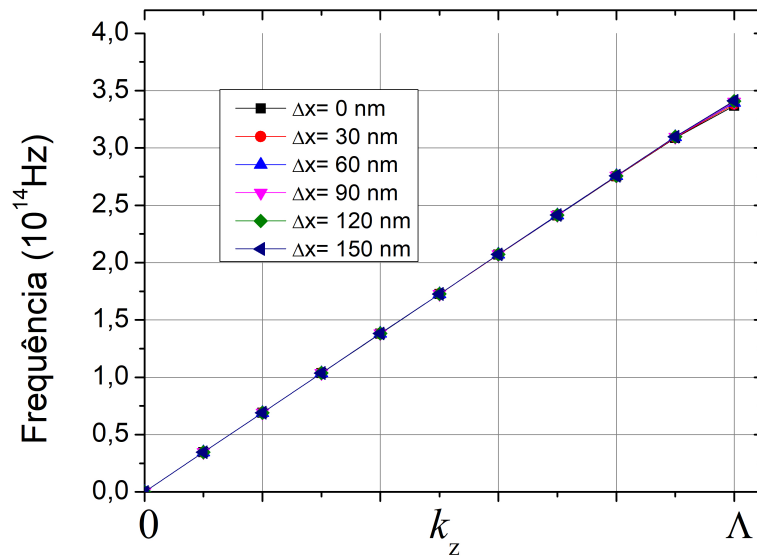


Figura 3.28: Curvas de dispersão, guia com núcleo de silício, para  $l = 30$ nm, modo TM.



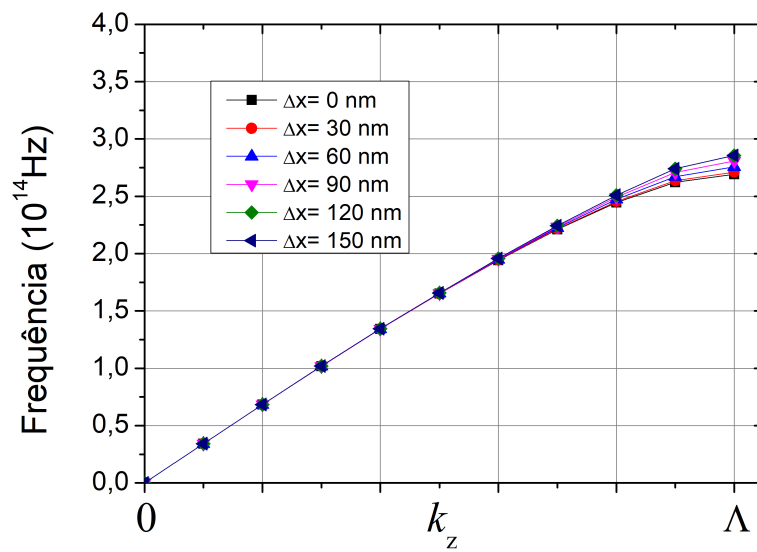


Figura 3.29: Curvas de dispersão, guia com núcleo de silício, para  $l = 60\text{nm}$ , modo TE.

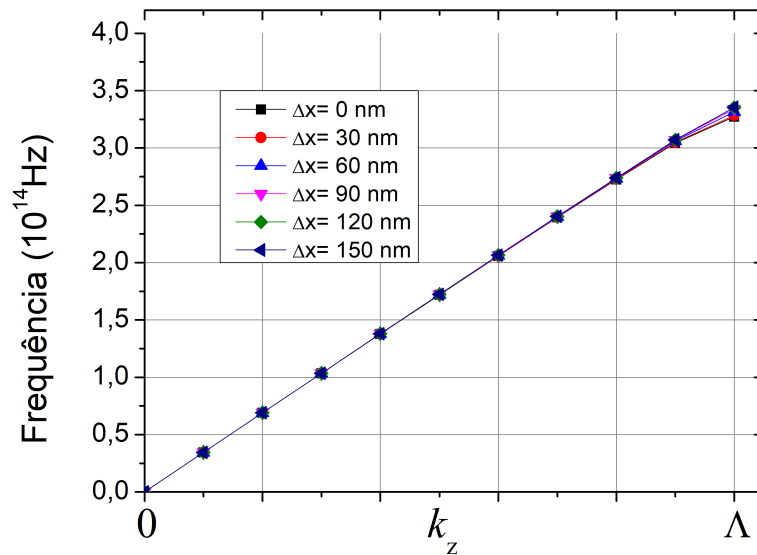


Figura 3.30: Curvas de dispersão, guia com núcleo de silício, para  $l = 60\text{nm}$ , modo TM.

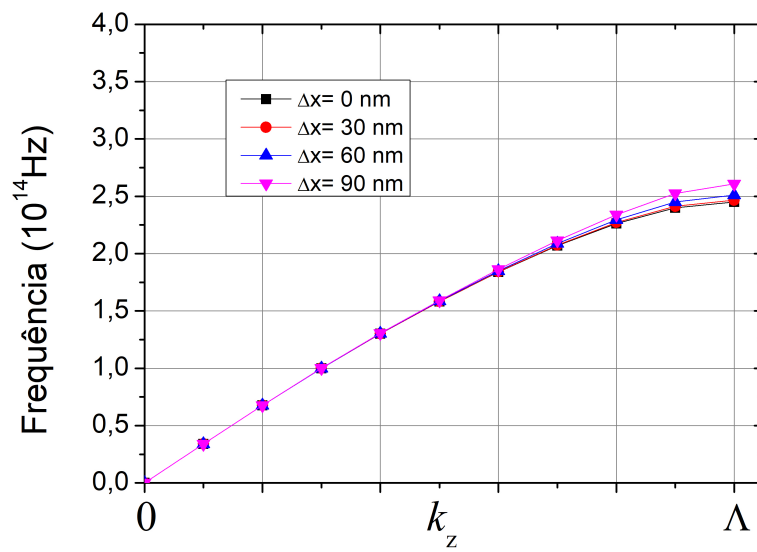


Figura 3.31: Curvas de dispersão, guia com núcleo de silício, para  $l = 90\text{ nm}$ , modo TE.

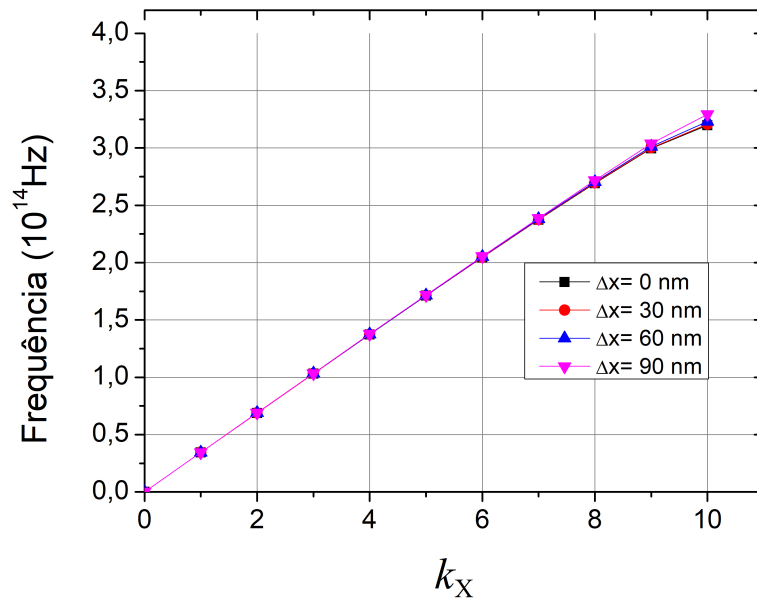


Figura 3.32: Curvas de dispersão, guia com núcleo de silício, para  $l = 90\text{ nm}$ , modo TM.

### 3.3 Conclusão

Neste capítulo, foram apresentadas três geometrias de guias de ondas com núcleo de silício. Foram realizados, simulações baseados no deslocamento das geometrias no núcleo do guia, as quais apresentaram poucas interferências na propagação do guia e respectivamente tiveram seus campos confinados em seu respectivo núcleo.

Para os guias de onda com nanofios foram observados, que para o modo  $H_z$ , foi o modo mais afetado com os deslocamentos simulados na direção  $\Delta x$ , mas o guia se propagou de maneira satisfatória, atingindo uma frequência na casa de 250 THz para o modo  $E_z$  e a frequência de 300 THz para o modo  $H_z$ . Outro parâmetro observado para esse guia proposto, foi que, a a variação no raio dos nanofios, não mudaram de forma significativa a frequência de operação máxima que o guia pode operar.

O guia de onda com 1 *slot*, foi observado o impacto que o aumento no tamanho do *gap* provocaram variações mínimas na propagação do guia proposto, que atingiu a frequência em torno de 200 THz para para o modo  $E_z$  e 250 THz para o modo  $H_z$ . Os deslocamentos para direção  $\Delta x$  já provocou uma influência considerável na propagação do guia para ambos os modos.

Finalmente, o guia de onda com 2 *slots*, foram observados que a medida que aumentou-se a largura do segmento no núcleo do guia, provocou-se a alteração na frequência de propagação do guia que variou entre 250 THz até 300THZ para o modo  $E_z$  e para o modo  $H_z$  foi menos impactado, apresentando propagação na frequência próximo de 320 THz.

# Capítulo 4

## Desempenho dos Guias de Onda com núcleo de Carbeto de Silício

*“Eu não falhei. Eu encontrei  
10.000 maneiras que não  
funcionam.”*

– Thomas Edison

### 4.1 Carbeto de Silício

O carbeto de silício (SiC) está emergindo rapidamente em novas aplicações fotônicas graças às suas propriedades fotônicas únicas facilitadas pelos avanços das nanotecnologias, como a nanofabricação e a transferência de nanofilmes (Ou et al., 2023).

O carbeto de silício, como um semicondutor de terceira geração, amplia as capacidades das plataformas de materiais à base de silício para o desenvolvimento avançado de Circuitos Integrados Fotônicos (PICs). Suas propriedades superiores, incluindo amplo bandgap, altas não linearidades ópticas, alto índice de refração e processamento compatível com semicondutores, permitiram a exploração de diversas aplicações nanofotônicas. Isso abrange guias de onda, microcavidades, conversores de frequência não lineares e defeitos de spin opticamente ativos. O progresso notável levou ao desenvolvimento rápido de PICs de SiC avançados, tanto para aplicações clássicas quanto quânticas (Yi et al., 2022).

O carboneto de silício apresenta propriedades ópticas únicas que o tornam adequado para o desenvolvimento de dispositivos fotônicos inovadores. Transparente do UV ao infravermelho, exibe propriedades não lineares e atua como metamaterial. A fluorescência do SiC, proveniente de centros de cor, possibilita a geração de fótons únicos,

útil para aplicações em computação quântica, comunicação e detecção quântica. A combinação única de propriedades eletrônicas, fotônicas e spintrônicas do SiC impulsiona pesquisas para dispositivos e sensores avançados na tecnologia quântica. Este resumo destaca o progresso, as tendências atuais e as perspectivas da ciência e tecnologia do SiC para dispositivos fotônicos clássicos e quânticos (Castelletto et al., 2022).

## 4.2 Guia de onda com núcleo de Carbetto de Silício

Neste estudo, conduzimos uma série de simulações utilizando o método de elementos finitos para analisar um guia de ondas composto por múltiplos segmentos. O núcleo deste guia é constituído de carbetto de silício, apresentando um índice de refração de  $n_{\text{SiC}} = 2,565$ , enquanto o substrato é composto por sílica, com um índice de refração de  $n_{\text{SiO}_2} = 1,444$ , conforme ilustrado na Figura 3.2.

A Figura ?? apresenta um esquema representativo de um guia de ondas com três nanofios de carbetto de silício. Para compreender as propriedades de propagação, foram realizados cálculos das relações de dispersão para os modos TE e TM, levando em consideração o deslocamento em relação ao eixo  $\Delta x$ .

Esses cálculos permitir uma compreensão da influência do deslocamento lateral ( $\Delta x$ ) na propagação dos modos TE e TM dentro dos guias de onda. Ao considerar o deslocamento em relação ao eixo  $\Delta x$ , obtivemos resultados mais detalhados sobre como as propriedades específicas desses modos são sensíveis a mudanças, proporcionando uma análise mais abrangente das características do guia de ondas em questão. Esses resultados contribuem significativamente para o entendimento do comportamento do guia de ondas e são essenciais para otimizar seu design em aplicações práticas.

Foram realizados cálculos das relações de dispersão para os modos TE e modos TM, considerando o deslocamento em relação ao eixo  $\Delta x$ . Esses cálculos foram fundamentais para compreender a influência do deslocamento lateral ( $\Delta x$ ) na propagação dos modos TE e TM dentro dos guias de onda.

Ao considerar o deslocamento em relação ao eixo  $\Delta x$ , foi possível avaliar de maneira mais detalhada como as propriedades dos modos TE e TM são sensíveis a mudanças nesse parâmetro específico. A variação do deslocamento lateral apresenta implicações importantes na forma como a luz ou ondas eletromagnéticas se propagam ao longo do guia de onda, influenciando diretamente as propriedades de guiamento desses modos, conforme as Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 5.12, 4.6.

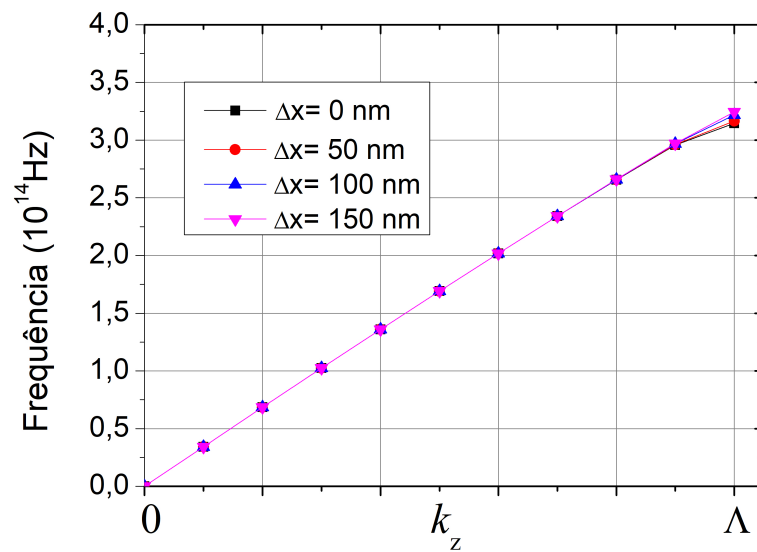


Figura 4.1: Curvas de dispersão para nanofios de carbeto de silício com raio igual a 40nm, modo TE.

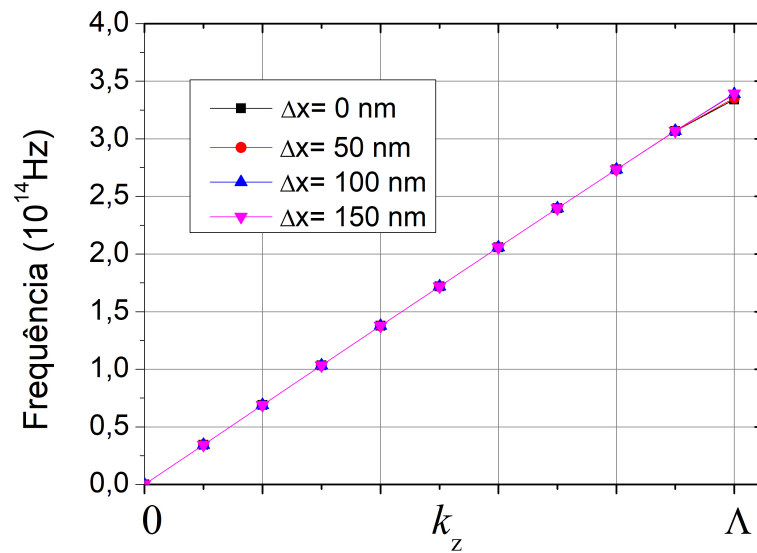


Figura 4.2: Curvas de dispersão para nanofios de carbeto de silício com raio igual a 40nm, modo TM.

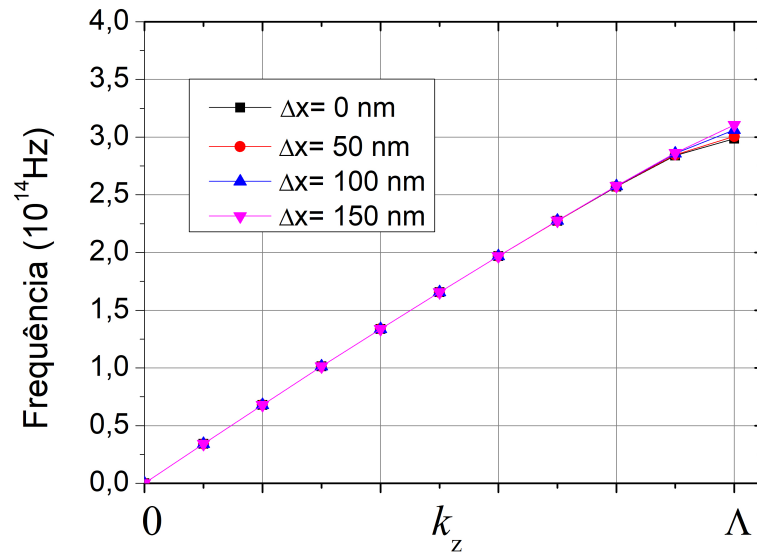


Figura 4.3: Curvas de dispersão para nanofios de carbeto de silício com raio igual a 50nm, modo TE.

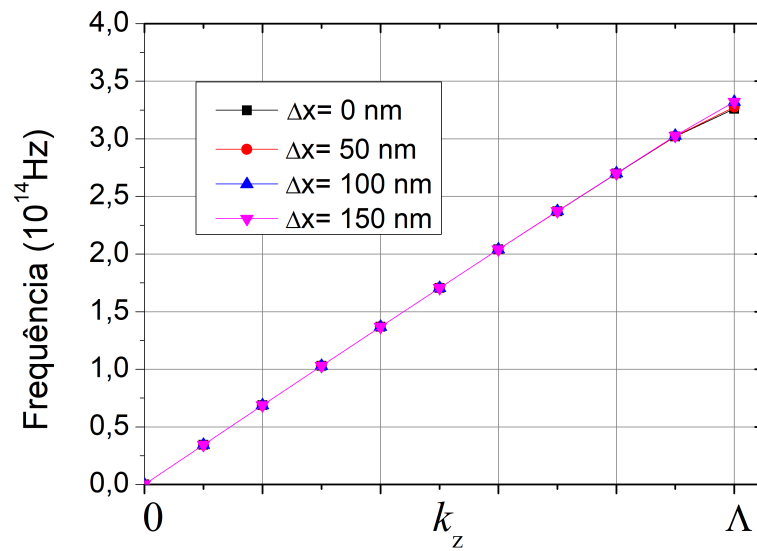


Figura 4.4: Curvas de dispersão para nanofios de carbeto de silício com raio igual a 50nm, modo TM.

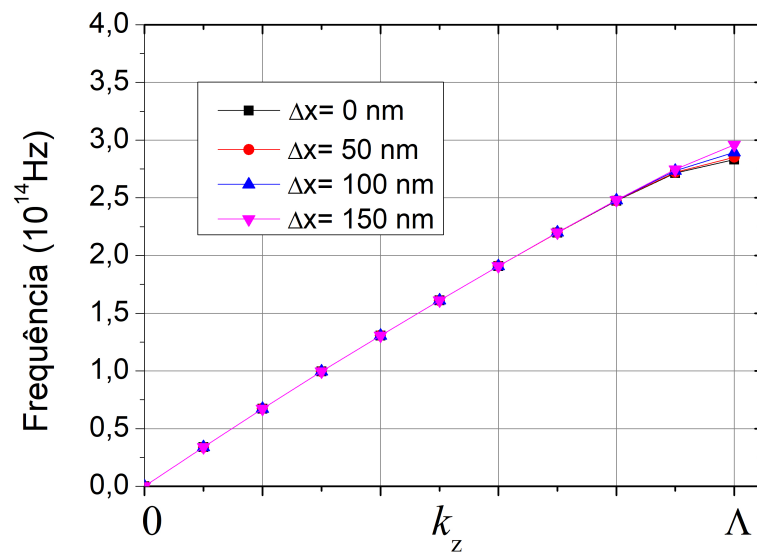


Figura 4.5: Curvas de dispersão para nanofios de carbeto de silício com raio igual a 60nm, modo TE.

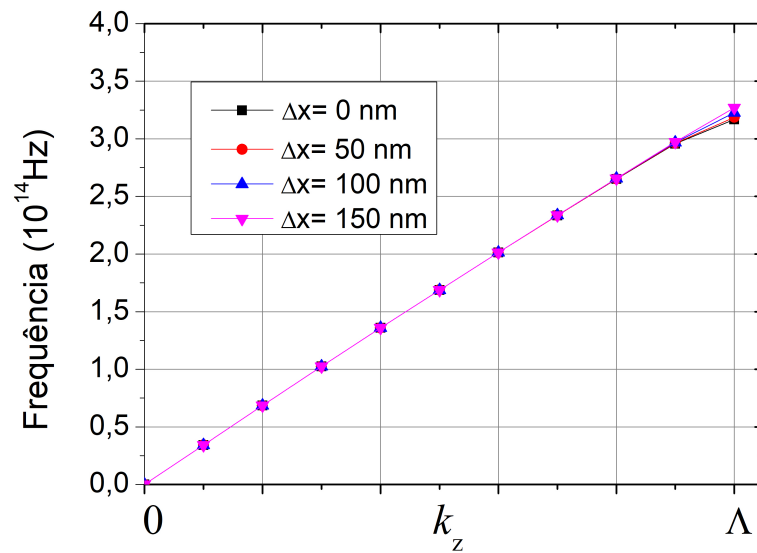


Figura 4.6: Curvas de dispersão para nanofios de carbeto de silício com raio igual a 60nm, modo TM.



Foram conduzidas simulações por meio do método de elementos finitos para analisar um guia de ondas composto por vários segmentos. Essas simulações permitem estudar a propagação e o comportamento das ondas eletromagnéticas no guia de ondas, bem como sua interação com os diferentes materiais que o compõem. No contexto específico do estudo, o guia de ondas é constituído por um núcleo de carbeto de silício, com um índice de refração de  $n_{\text{SiC}} = 2.565$ , e um substrato de sílica, que possui um índice de refração de  $n_{\text{SiO}_2} = n_{\text{SiO}_2} = 1,444$ . Conforme a Figura 3.17

Foram realizados cálculos das relações de dispersão para os modos TE e modos TM, considerando o deslocamento em relação ao eixo  $\Delta y$ . Esses cálculos foram fundamentais para compreender a influência do deslocamento lateral (*gap*) na propagação dos modos TE e TM dentro dos guias de onda.

Ao considerar o deslocamento em relação ao eixo  $\Delta Y$ , foi possível avaliar de maneira mais detalhada como as propriedades dos modos TE e TM são sensíveis a mudanças nesse parâmetro específico. A variação do deslocamento lateral apresenta implicações importantes na forma como a luz ou ondas eletromagnéticas se propagam ao longo do guia de onda, influenciando diretamente as propriedades de guiamento desses modos, conforme as Figuras 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12.

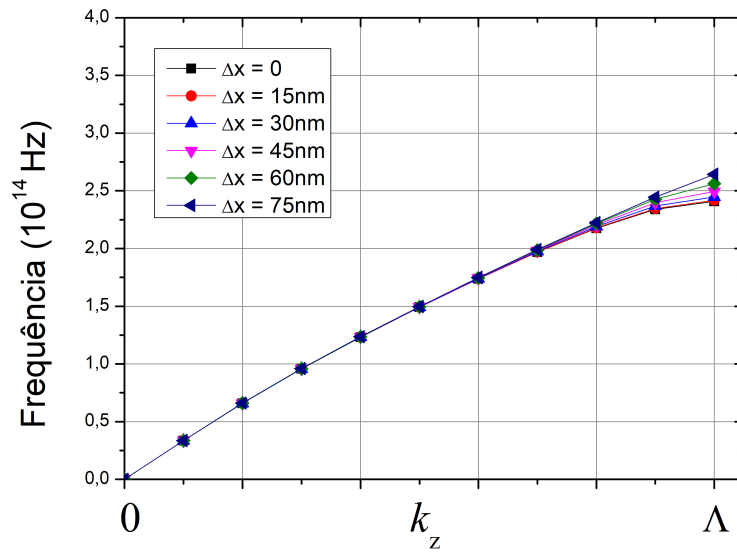


Figura 4.7: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de carbetto de silício para *gap* de 10nm, modo TE.

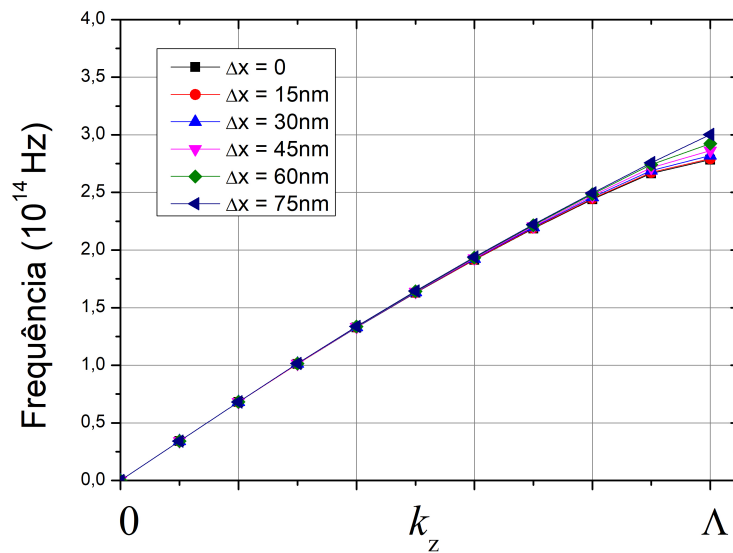


Figura 4.8: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de carbetto de silício para *gap* de 10nm, modo TM.

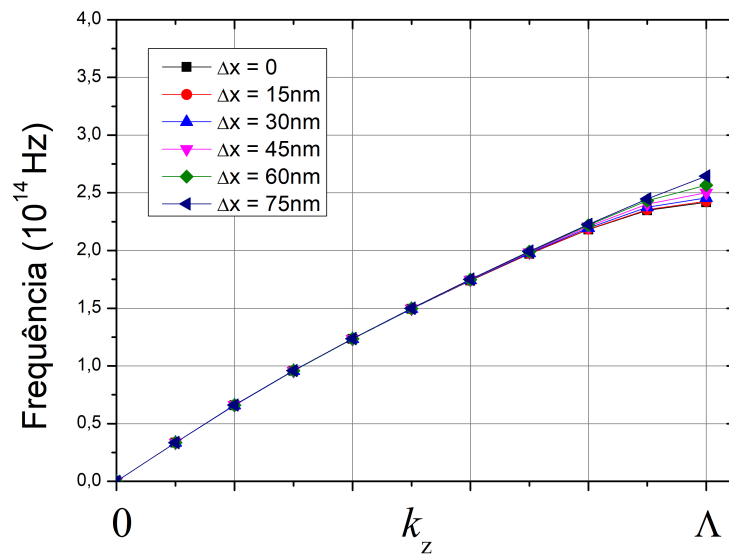


Figura 4.9: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de carbeto de silício para *gap* de 15nm, modo TE.

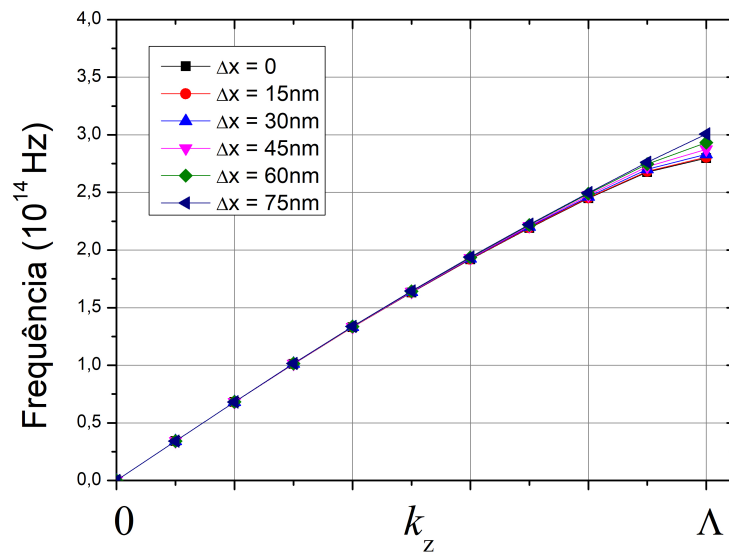


Figura 4.10: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de carbeto de silício para *gap* de 15nm, modo TE.

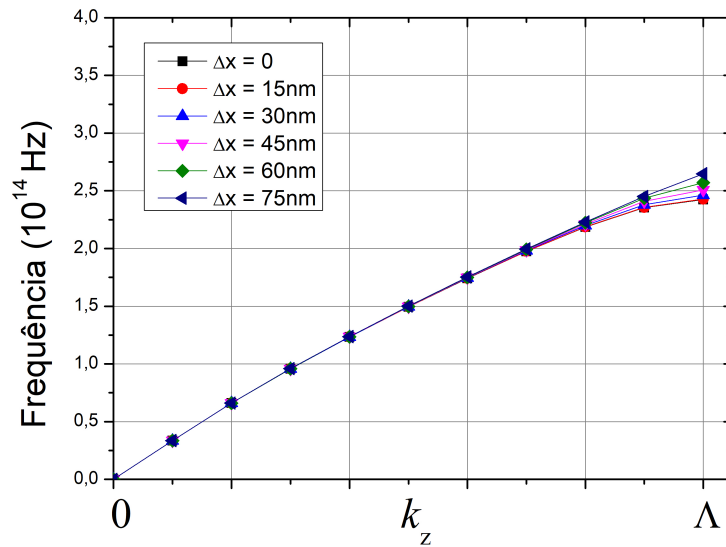


Figura 4.11: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de carbeto de silício para *gap* de 20nm, modo TM.

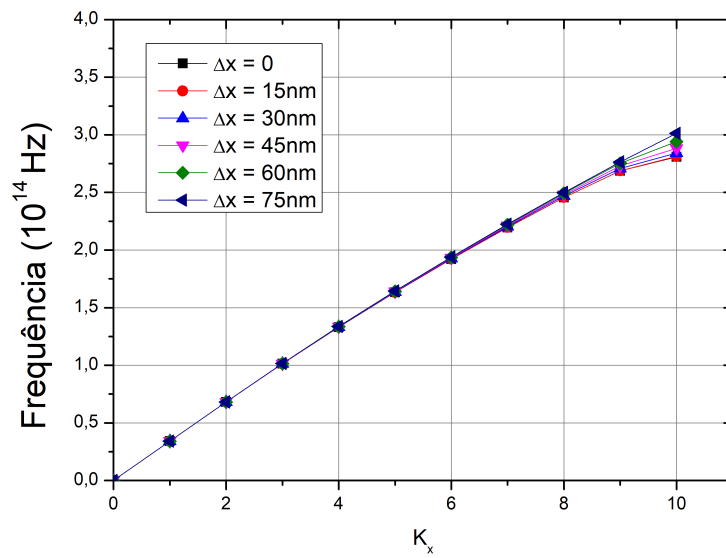


Figura 4.12: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de carbeto de silício para *gap* de 20nm, modo TM.

Foram realizadas diversas simulações utilizando o método de elementos finitos para investigar um guia de ondas composto por múltiplos segmentos. Este guia apresenta um núcleo feito de carbetto de silício, caracterizado por um índice de refração  $n_{\text{SiC}} = 2,565$ , enquanto o substrato é constituído por sílica, com um índice de refração  $n_{\text{SiO}_2} = 1,444$ . Durante as simulações, foram analisados diversos aspectos, incluindo a propagação de ondas eletromagnéticas ao longo do guia, interações entre os materiais constituintes, efeitos de dispersão, entre outros. Essas investigações visam aprofundar o entendimento do comportamento óptico e das propriedades de transmissão desse guia de ondas multi-segmentado, com potenciais aplicações em dispositivos fotônicos e sistemas de comunicação óptica. Conforme a Figura 3.25

Foram realizados cálculos das relações de dispersão para os modos TE e modos TM, considerando o deslocamento em relação ao eixo  $\Delta x$ . Esses cálculos foram fundamentais para compreender a influência do deslocamento lateral ( $\Delta x$ ) na propagação dos modos TE e TM dentro dos guias de onda.

Ao considerar o deslocamento em relação ao eixo  $\Delta x$ , foi possível avaliar de maneira mais detalhada como as propriedades dos modos TE e TM são sensíveis a mudanças nesse parâmetro específico. A variação do deslocamento lateral apresenta implicações importantes na forma como a luz ou ondas eletromagnéticas se propagam ao longo do guia de onda, influenciando diretamente as propriedades de guiamento desses modos, conforme as Figuras 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18.

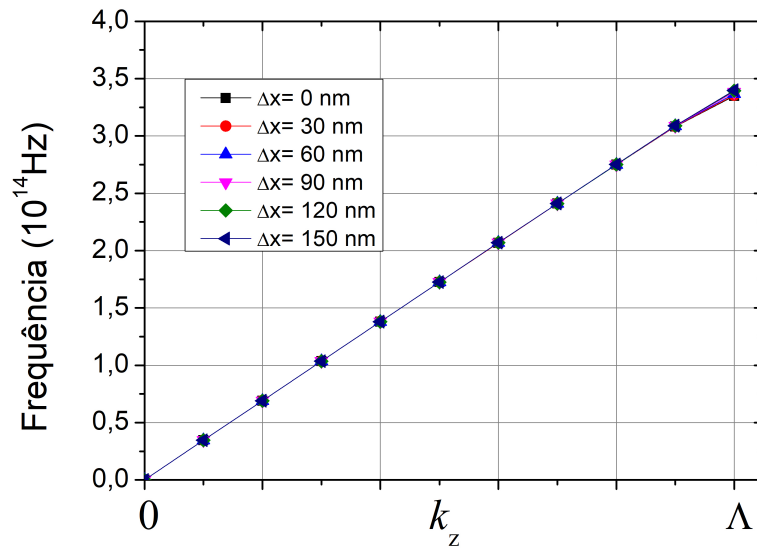


Figura 4.13: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de carbeto de silício com  $l = 30\text{nm}$ , modo TE

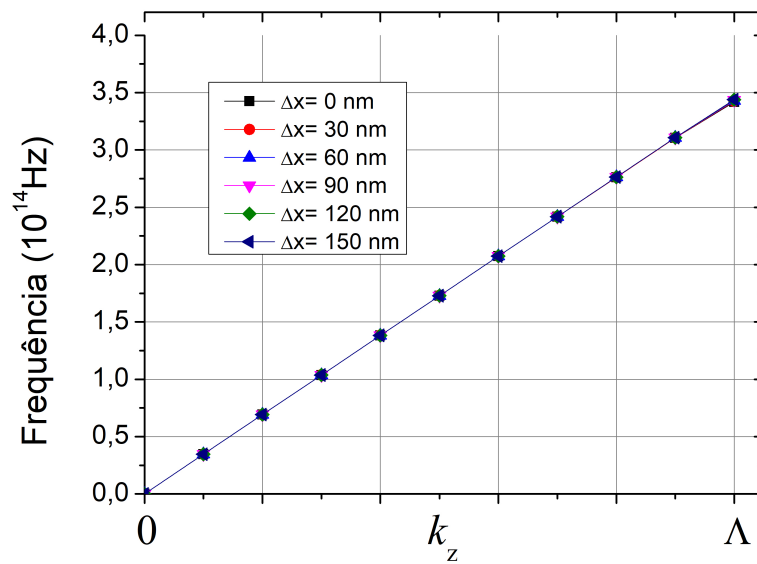


Figura 4.14: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de carbeto de silício com  $l = 30\text{nm}$ , modo TM.

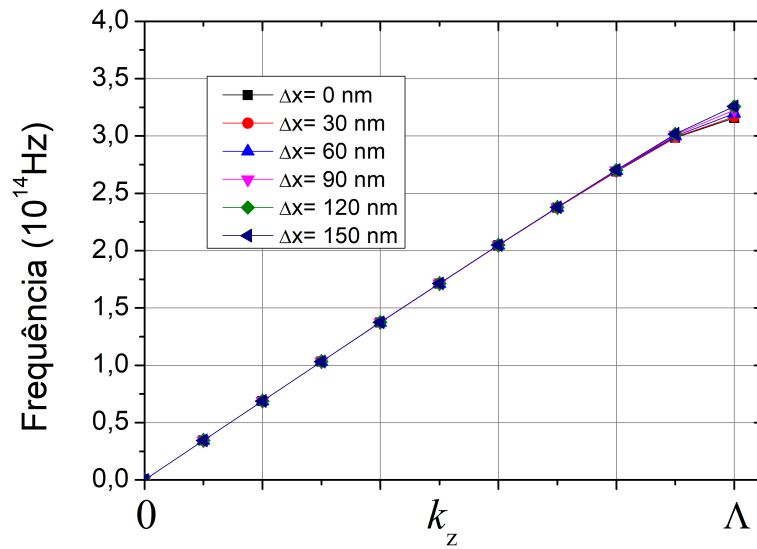


Figura 4.15: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de carbeto de silício com  $l = 60\text{nm}$ , modo TE.

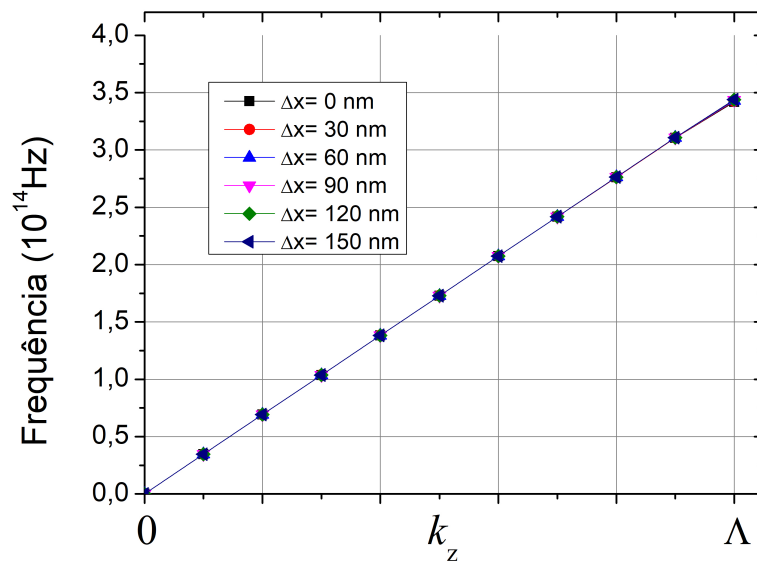


Figura 4.16: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de carbeto de silício com  $l = 60\text{nm}$ , modo TM.

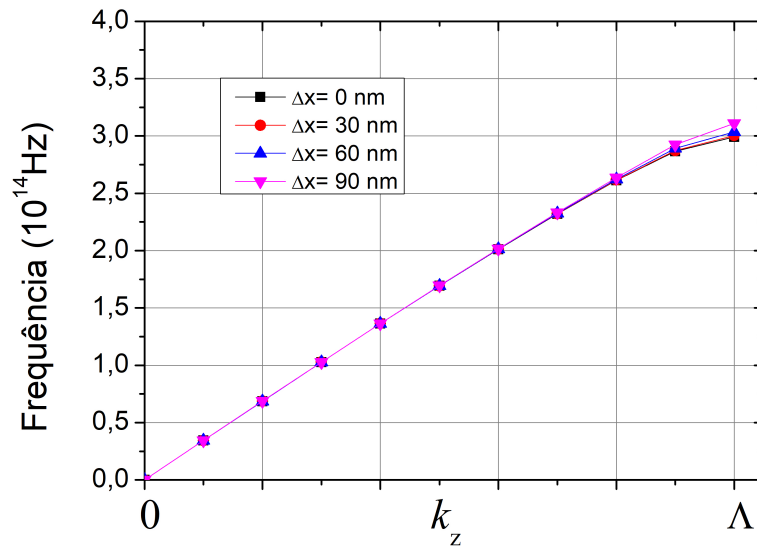


Figura 4.17: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de carbeto de silício com  $l = 90$ nm, modo TE.

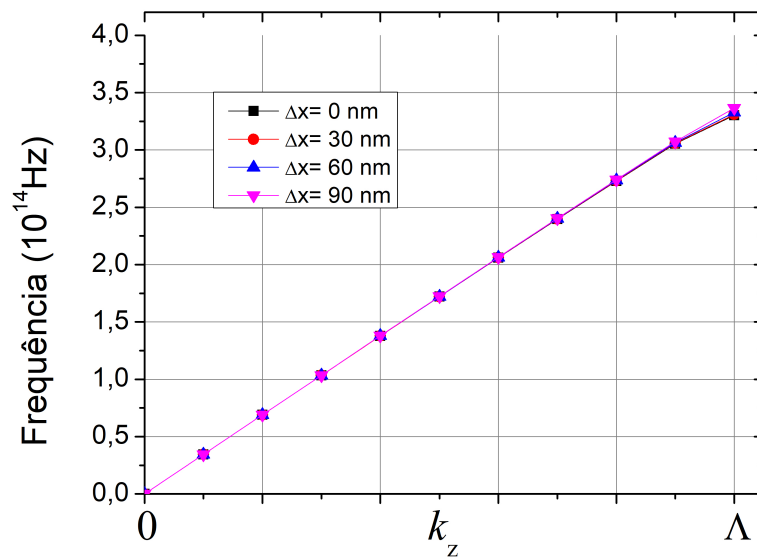


Figura 4.18: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de carbeto de silício com  $l = 90$ nm, modo TM.



### 4.3 Conclusão

Neste capítulo, foram introduzidas três configurações de guias de ondas com núcleo de carbetto de silício. Conduziram-se simulações, considerando o deslocamento dessas geometrias dentro do núcleo do guia. Observou-se que tais deslocamentos resultaram em interferências mínimas na propagação do guia, permitindo que os campos permanecessem confinados em seus respectivos núcleos.

Para os guias de onda com nanofios foram observados, que para o modo  $H_z$ , foi o modo menos afaetado com os deslocamentos simulados na direção  $\Delta x$ , mas o guia se propagou de maneira satisfatória, atingindo uma frequência na casa de 300 THz para o modo  $E_z$  e a frequência de 340 THz para o modo  $H_z$ . Outro parâmetro observado para esse guia proposto, foi que, a a variação no raio dos nanofios, não mudaram de forma significativa a frequência de operação máxima que o guia pode operar, apenas no modo  $H_z$ .

O guia de onda com 1 *slot*, foi observado o impacto que o aumento no tamanho do *gap* provocaram variações mínimas na propagação do guia proposto, que atingiu a frequência em torno de 250 THz para para o modo  $E_z$  e 300 THz para o modo  $H_z$ . Os deslocamentos para direção  $\Delta x$  já provocou uma influência considerável na propagação do guia para ambos os modos, já podendo ser observadas em frequências a partir de 200 THz.

Para o guia de onda com 2 *slots*, foram observados que a medida que aumentou-se a largura do segmento no núcleo do guia, provocou-se a alteração na frequência de propagação do guia que variou entre 300 THz até 350THZ para o modo  $E_z$  e para o modo  $H_z$  foi menos impactado, apresentando propagação na frequência próximo de 350 THz, mesmo aumentado o tamanho do segmento no núcleo do guia.

# Capítulo 5

## Desempenho dos Guias de Onda Com Núcleo de Nitreto de Silício

*“Quem gosta de ler não morre só.”*

– Ariano Suassuna

### 5.1 Nitreto de Silício

Estruturas de guias de onda de nitreto de silício (SiN) com revestimento de sílica foram demonstradas desde os anos 1970, mas os dispositivos integrados de SiN foram primeiro demonstrados nos anos 1990. Nas últimas décadas, a fotônica de SiN alcançou uma combinação atrativa de baixa perda de guia de onda e compacidade, tornando-a adequada para diversas aplicações (Xiang et al., 2022). Nos últimos anos, o SiN tem recebido atenção para a realização de dispositivos fotônicos integrados devido à sua flexibilidade de fabricação e propriedades intrínsecas vantajosas que podem ser adaptadas para atender aos requisitos de diversas aplicações fotônicas lineares e não lineares (Bucio et al., 2019).

Em guias de onda de núcleo fino, a rugosidade na parede lateral é minimizada, resultando em uma maior sobreposição de modos com o revestimento superior/inferior de  $SiO_2$  e exigindo uma qualidade superior no material de revestimento.

Um dos pontos fortes do SiN é sua ampla cobertura espectral, abrangendo quase UV até 2,35 microns na borda do infravermelho próximo. Portanto, o SiN é compatível com faixas de comprimento de onda 'tradicionais' usadas para aplicações de telecomunicações (1300 nm, 1520-1660 nm), mas também abre o visível (450-750 nm) e uma parte distinta do espectro do infravermelho próximo (750 nm). -1000 nm). (Photondelta, 2024).

Por possuir compatibilidade com a tecnologia padrão de semicondutores de óxido

metálico complementar (CMOS), que aproveita a evolução contínua na indústria de microeletrônicos e permite uma redução de custos viável em grandes escalas de fabricação. O contraste de índice de refração não é tão alto quanto o do silício, reduzindo significativamente as perdas por espalhamento, o menor contraste de índice torna os dispositivos resultantes mais tolerantes a imperfeições de fabricação. (Romero-García et al., 2013).

Guias de onda de nitreto de silício (SiN) com perda óptica ultrabaixa permitem aplicações fotônicas integradas, incluindo lasers de baixo ruído e largura de linha estreita, fotônica não linear em escala de chip e fotônica de micro-ondas. (Xiang et al., 2021).

A Figura 5.1 resume várias demonstrações essenciais da integração fotônica utilizando nitreto de silício, evidenciando o progresso de três abordagens distintas: integração passiva monolítica, integração ativa híbrida e integração ativa heterogênea.

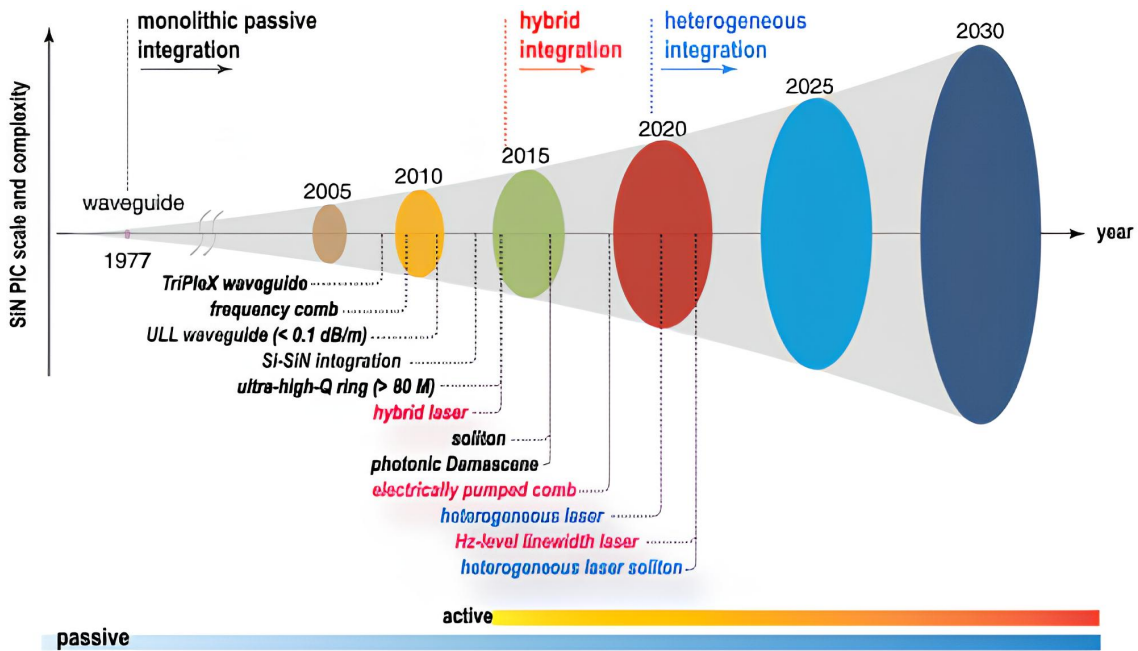


Figura 5.1: Progresso da integração fotônica baseada em nitreto de silício com demonstrações-chave rotuladas com o ano de lançamento. (Xiang et al., 2022)

Devido às suas propriedades, citadas anteriormente, o uso recorrente do Nitreto de silício, tem sido amplamente explorado na literatura, em (Roeloffzen et al., 2013) são apresentados funcionalidades de processamento fotônico de micro-ondas baseadas em combinações de filtros Mach-Zehnder e ressonadores de anel usando a tecnologia de guia de onda de nitreto de silício de alto índice de contraste.

Em (Sacher et al., 2018) refere-se ao desenvolvimento de plataformas fotônicas integradas (guias de onda, acopladores de grade multinível, cruzamentos) com múltiplas camadas de guias de onda de nitreto de silício (SiN) sobre uma camada fotônica de

silício (Si). Essa integração monolítica permite a criação de estruturas mais complexas para dispositivos fotônicos, capitalizando as propriedades específicas do SiN e do Si em diferentes camadas para atender a requisitos específicos de funcionalidade e desempenho em aplicações fotônicas integradas.

Foi demonstrado em (Senichev et al., 2022) a integração de emissores quânticos intrínsecos com guias de ondas planares compostos de SiN de baixa autofluorescência e o acoplamento de emissão de fóton único no modo de guia de ondas.

## 5.2 Guia de onda com núcleo de Nitreto de Silício

Utilizou-se o método de elementos finitos para investigar os guias de onda, analisando um guia composto por múltiplos segmentos. O núcleo deste guia é constituído de nitreto de silício, com um índice de refração  $n_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 1,977$ , enquanto o substrato é formado por sílica, com um índice de refração  $n_{\text{SiO}_2} = 1,444$ .

A estrutura da célula unitária adotada apresenta uma largura  $w = 300$  nm na direção  $x$ . A abordagem de simulação foi aplicada em um domínio computacional com dimensões  $x \times y = 0,3\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ , resultando em uma malha composta por aproximadamente 4500 nós e 9400 elementos, como esquematizado na Figura 3.2.

Essas simulações foram realizadas com o objetivo de explorar a propagação de ondas eletromagnéticas ao longo do guia, bem como investigar as interações entre os diferentes materiais presentes, considerando também os efeitos de dispersão e outras propriedades ópticas relevantes.

Vale ressaltar que as mesmas considerações serão lavados em considerações com os guias de onda apresentados no capítulo anterior, aqueles com sílica em seu núcleo, ou seja, como as estruturas são periódicas, os espelhamentos entre as geometrias, os espaçamento e os deslocamentos entre os nanofios, conforme as Figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7.

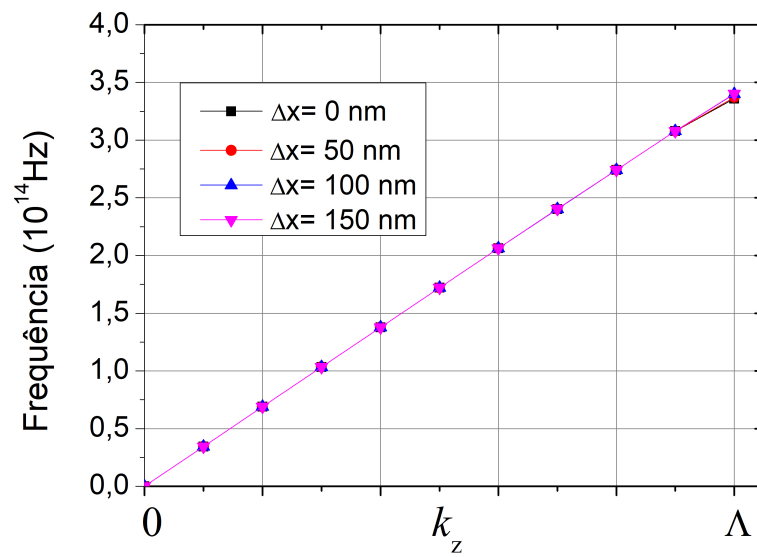


Figura 5.2: Curvas de dispersão para nanofios de nitreto de silício com raio igual a 40nm, modo TE.

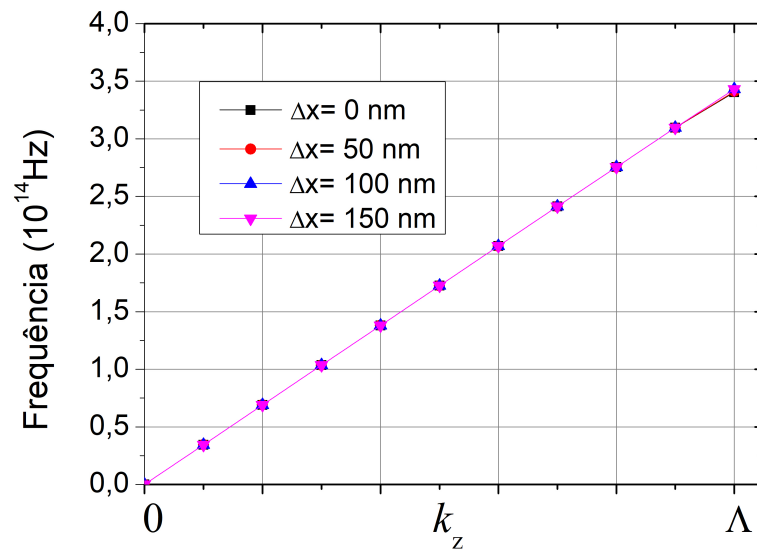


Figura 5.3: Curvas de dispersão para nanofios de nitreto de silício com raio igual a 40nm, modo TM.

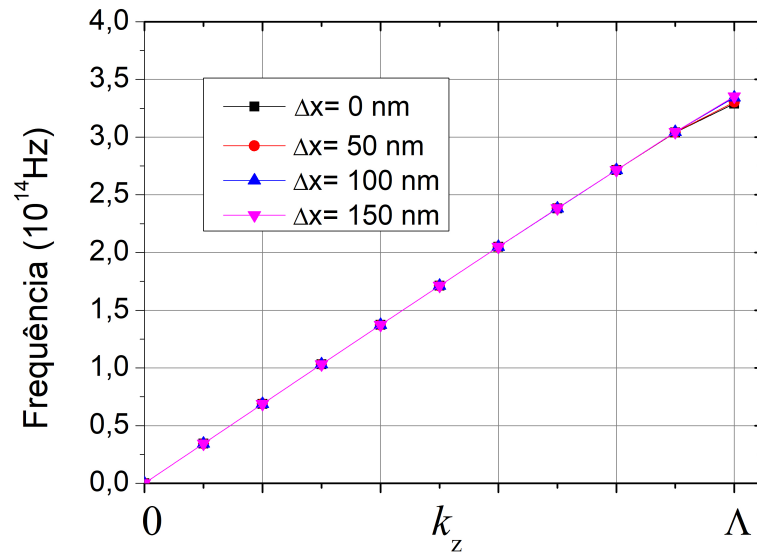


Figura 5.4: Curvas de dispersão para nanofios de nitreto de silício com raio igual a 50nm, modo TE.

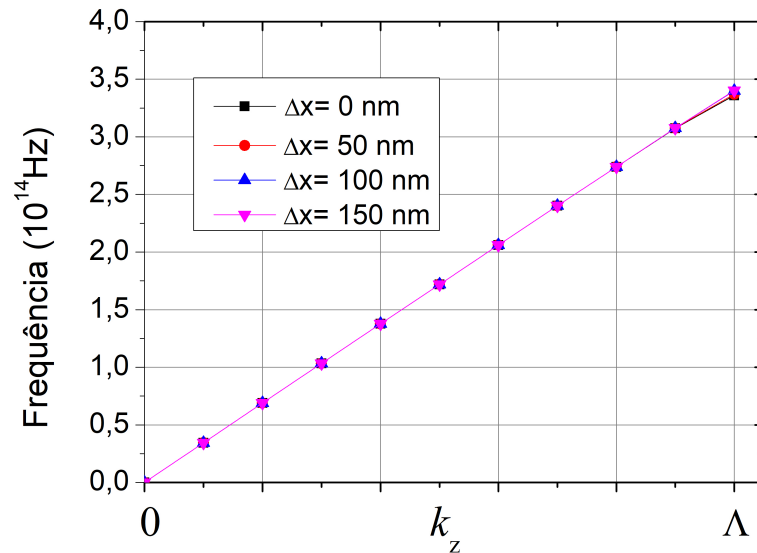


Figura 5.5: Curvas de dispersão para nanofios com raio igual a 50nm, modo TM.

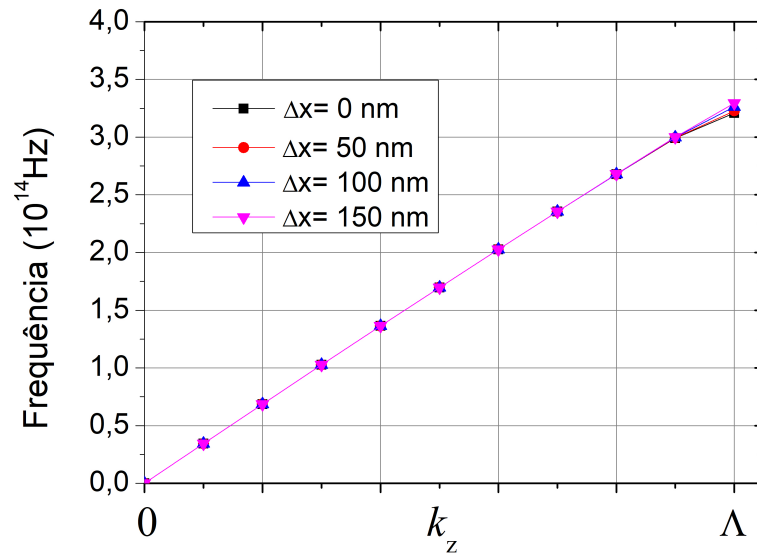


Figura 5.6: Curvas de dispersão para nanofios de nitreto de silício com raio igual a 60nm, modo TE.

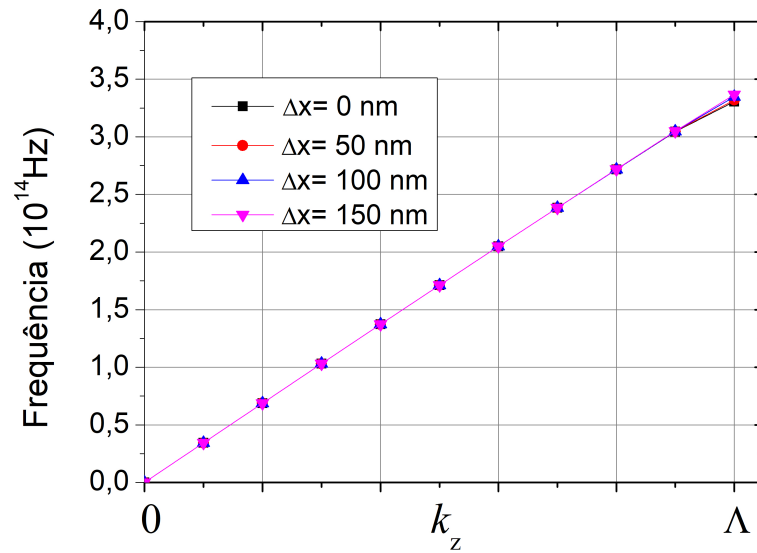


Figura 5.7: Curvas de dispersão para nanofios de nitreto de silício com raio igual a 60nm, modo TM.

Uma série de simulações foi conduzida empregando o método de elementos finitos, com o propósito de investigar minuciosamente um guia de ondas composto por diversos segmentos. Este guia apresenta um núcleo formado por carbeto de silício, caracterizado por um índice de refração  $n_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 1,977$ , enquanto o substrato é composto por sílica, exibindo um índice de refração  $n_{\text{SiO}_2} = 1,444$ .

Tais simulações foram essenciais para analisar a interação complexa entre os diferentes materiais ao longo do guia de ondas. O objetivo principal foi compreender os fenômenos ópticos que ocorrem durante a propagação das ondas eletromagnéticas, além de explorar aspectos como perdas, dispersão e eficiência de transmissão.

A representação visual do guia de ondas, conforme ilustrado na Figura 3.17, proporciona uma visão detalhada da estrutura e configuração do dispositivo estudado.

Foram realizados cálculos das relações de dispersão para os modos TE e modos TM, considerando o deslocamento em relação ao eixo  $\Delta y$ . Esses cálculos foram fundamentais para compreender a influência do deslocamento lateral (GAP) na propagação dos modos TE e TM dentro dos guias de onda.

Ao examinar o deslocamento em relação ao eixo  $\Delta y$ , uma análise mais detalhada pôde ser conduzida para compreender como as propriedades dos modos TE e TM são afetadas por variações nesse parâmetro específico. A variação do deslocamento lateral revelou implicações significativas na maneira como a luz ou ondas eletromagnéticas se propagam ao longo do guia de ondas, exercendo uma influência direta nas características de condução desses modos.

As Figuras 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 ilustram claramente as alterações nos perfis de propagação dos modos TE e TM em resposta a diferentes deslocamentos laterais. Essas representações visuais são cruciais para a análise e compreensão das complexas interações entre o deslocamento lateral e as características de propagação dos modos TE e TM no guia de ondas em questão.



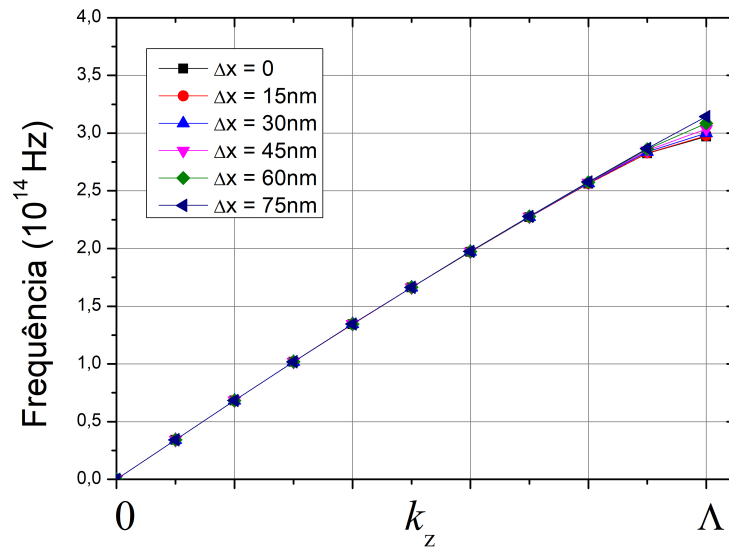


Figura 5.8: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício, *gap* de 10nm, modo TE.

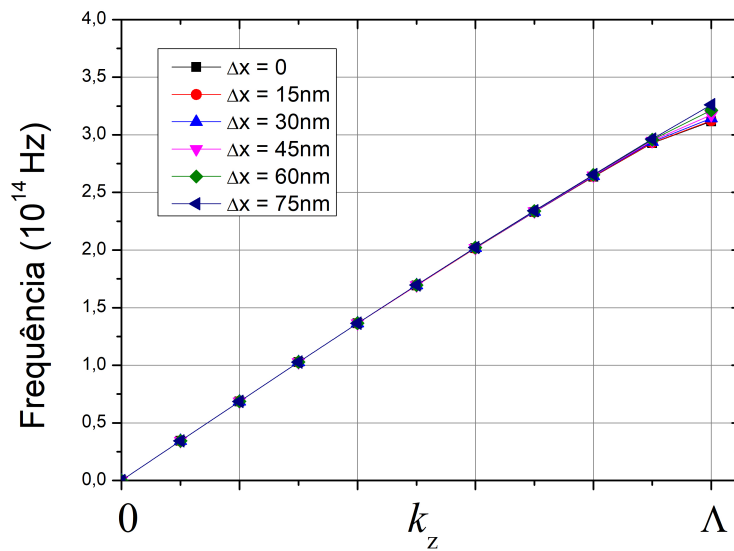


Figura 5.9: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício, *gap* de 10nm, modo TM.

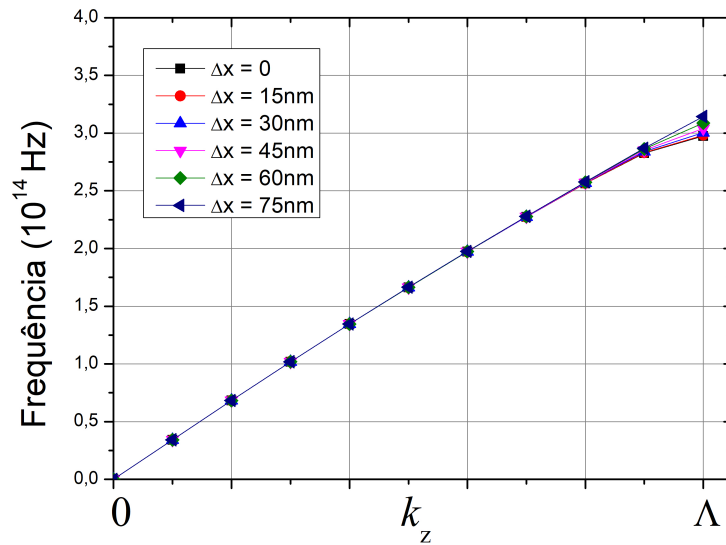


Figura 5.10: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício, *gap* de 15nm, modo TE.

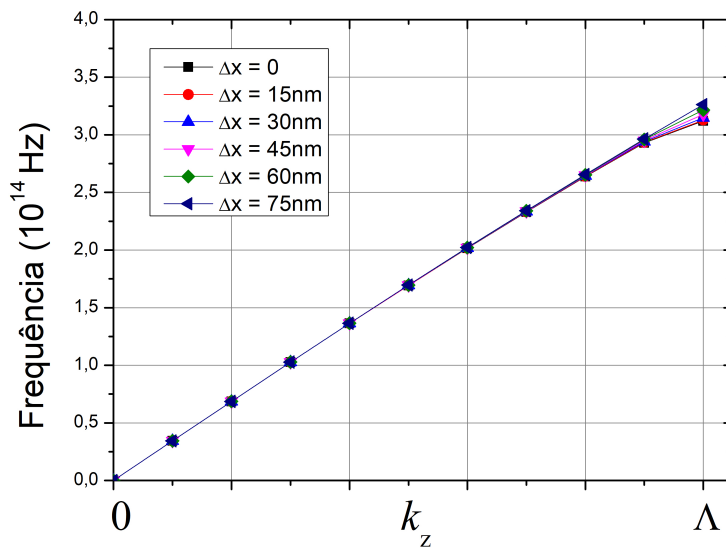


Figura 5.11: Curvas de dispersão para Gap guia de onda com núcleo de nitreto de silício, *gap* de 15nm, modo TM.

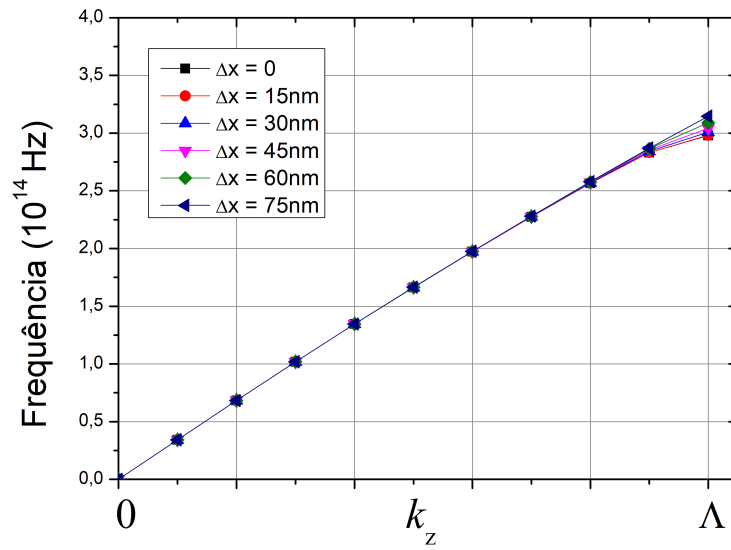


Figura 5.12: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício, *gap* de 20nm, modo TE.

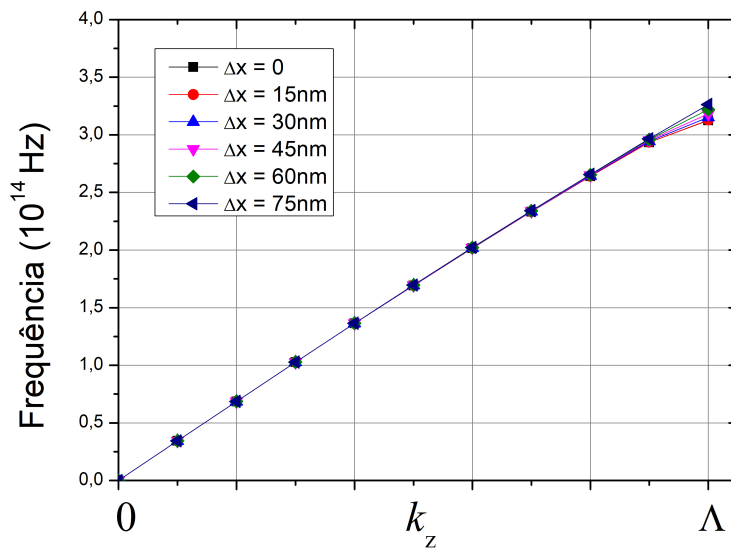


Figura 5.13: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício, *gap* de 20nm, modo TM.

Uma variedade de simulações foi conduzida por meio do método de elementos finitos, com o objetivo de realizar uma investigação detalhada sobre um guia de ondas composto por múltiplos segmentos. Este guia apresenta um núcleo composto de carbeto de silício, caracterizado por um índice de refração  $n_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 1,977$ , enquanto o substrato é composto por sílica, exibindo um índice de refração  $n_{\text{SiO}_2} = 1,444$ .

Essas simulações abrangeram uma ampla gama de parâmetros e condições, permitindo uma análise abrangente das propriedades ópticas e de propagação de ondas no guia de ondas em questão. Aspectos como perdas, dispersão, acoplamento de modo e eficiência de transmissão foram minuciosamente examinados e avaliados em várias configurações e cenários.

Uma análise detalhada das relações de dispersão foi conduzida para os modos TE e TM, levando em consideração o deslocamento lateral em relação ao eixo  $\Delta x$ . Estes cálculos foram de suma importância para uma compreensão abrangente da influência do deslocamento lateral ( $\Delta x$ ) na propagação dos modos TE e TM dentro dos guias de onda.

Ao examinar as relações de dispersão para ambos os modos, pôde-se observar como o deslocamento lateral afeta as características de propagação, incluindo frequências de ressonância, velocidades de fase e comprimentos de onda modais. Esses parâmetros são cruciais para determinar a eficácia do guia de onda em transmitir e manipular sinais ópticos.

Ao considerar o deslocamento em relação ao eixo  $\Delta x$ , foi possível avaliar de maneira mais detalhada como as propriedades dos modos TE e TM são sensíveis a mudanças nesse parâmetro específico. A variação do deslocamento lateral apresenta implicações importantes na forma como a luz ou ondas eletromagnéticas se propagam ao longo do guia de onda, influenciando diretamente as propriedades de guiamento desses modos, conforme as Figuras 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19.

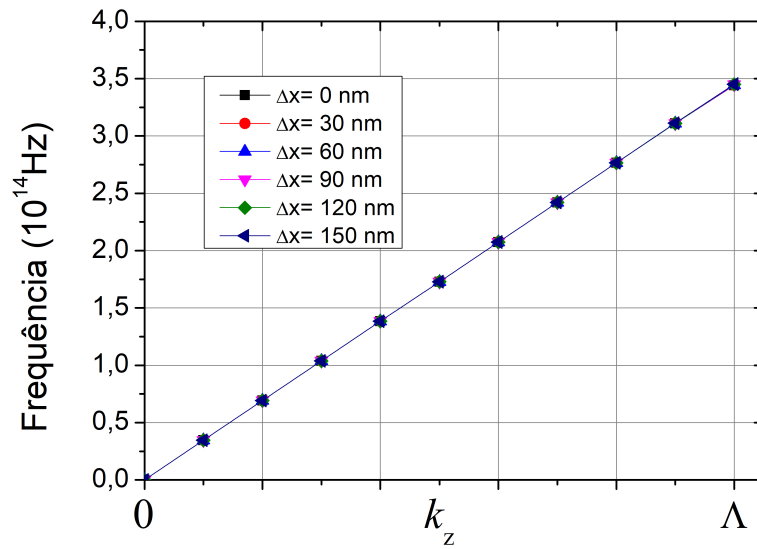


Figura 5.14: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício com  $l = 30\text{nm}$ , modo TE.

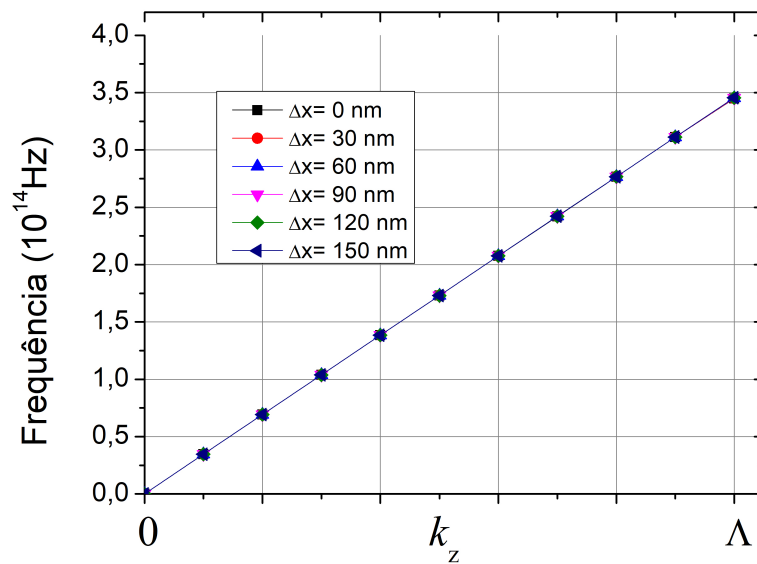


Figura 5.15: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício com  $l = 30\text{nm}$ , modo TM.

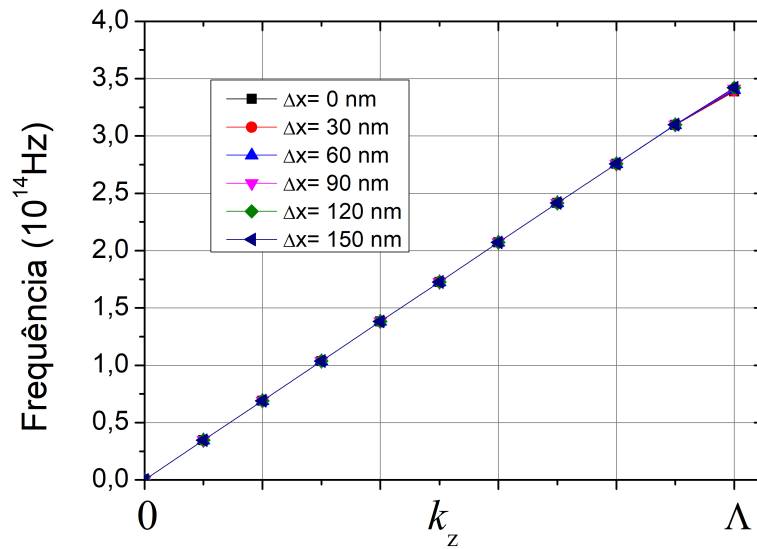


Figura 5.16: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício com  $l = 60\text{nm}$ , modo TE.

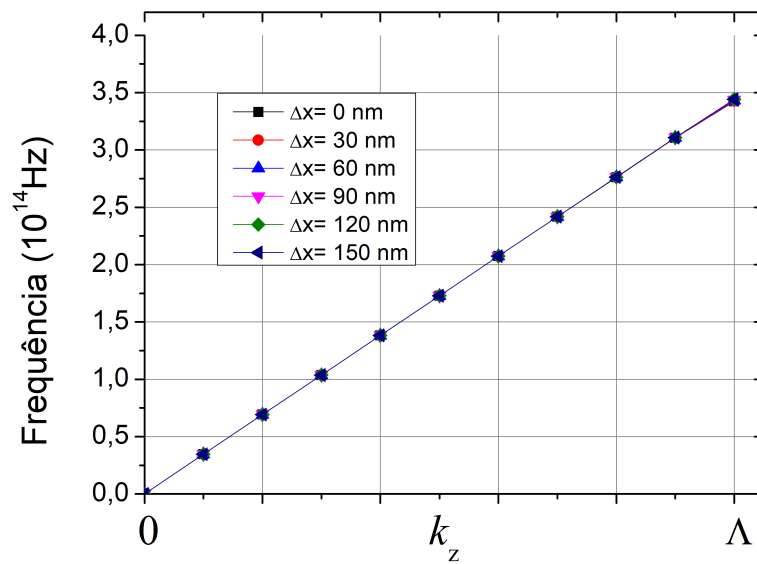


Figura 5.17: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício com  $l = 60\text{nm}$ , modo TM.

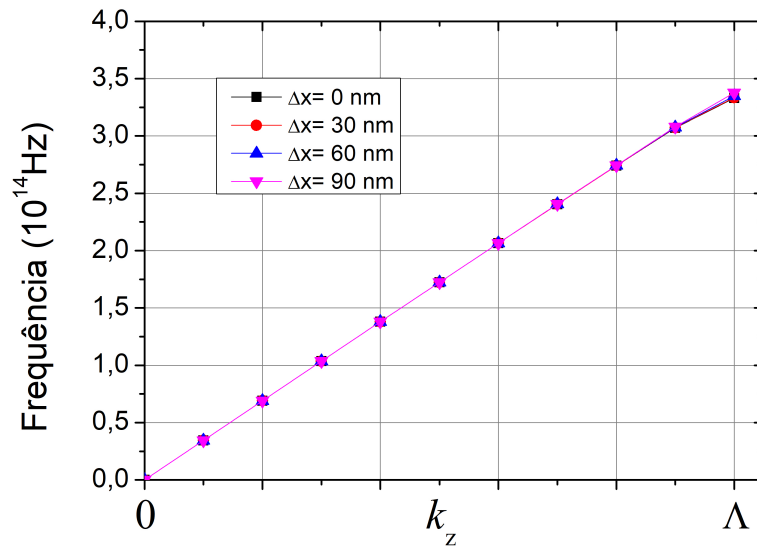


Figura 5.18: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício com  $l = 90$ nm, modo TE.

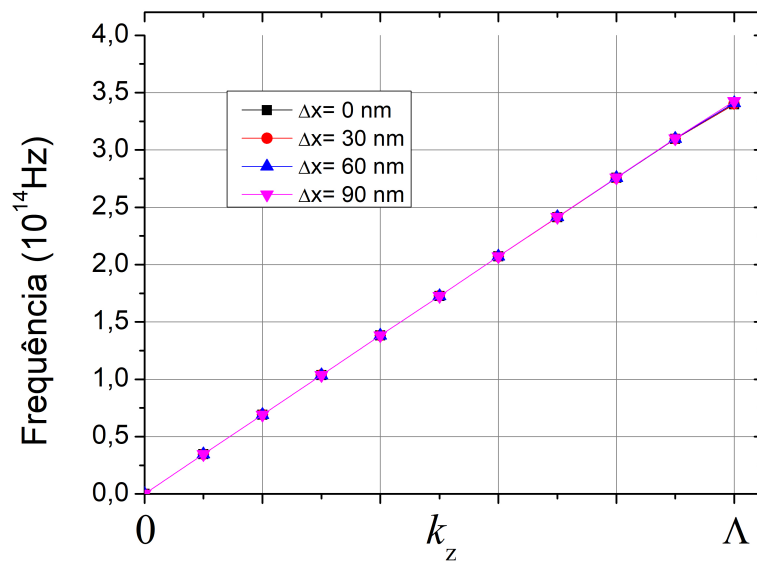


Figura 5.19: Curvas de dispersão para guia de onda com núcleo de nitreto de silício com  $l = 90$ nm, modo TM.

### 5.3 Conclusão

Neste capítulo, foram apresentadas três variações de guias de ondas com núcleo de nitreto de silício. Realizaram-se simulações, explorando o deslocamento dessas geometrias no interior do núcleo do guia. Verificou-se que tais deslocamentos provocaram interferências mínimas na propagação do guia, possibilitando que os campos permanecessem confinados em seus respectivos núcleos.

Para os guias de onda com nanofios foram observados, o guia se propagou de maneira satisfatória, atingindo uma frequência na casa de 320 THz para o modo  $E_z$  e para o modo  $H_z$ . Outro parâmetro observado para esse guia proposto, foi que, a a variação no raio dos nanofios, não mudaram de forma significativa a frequência de operação máxima que o guia pode operar, o desempenho do guia apresentou propagação muito semelhante para ambos modo de operação.

O guia de onda com 1 *slot* , foi observado o impacto que o aumento no tamanho do *gap* provocaram variações mínimas na propagração do guia proposto, que atingiu a frequência em torno de 300 THz para para o modo  $E_z$  e para o modo  $H_z$ . Os deslocamentos para direção  $\Delta x$  já provocou uma influência mínima na propagação do guia para ambos os modos.

Para o guia de onda com 2 *slots*, foi observado que mesmo alterando a largura da geometria interna no guia, ele se propagou de modo quase identico para ambos os modos, a frequência de propagação do guia manteve-se quase estável para ambos os modos, operando na faixa 350 THz.



# Capítulo 6

## Considerações Finais

Neste trabalho, foram apresentados alguns guias de onda periodicamente segmentados ao longo da distância de propagação. Essa estratégia visa explorar e otimizar as propriedades ópticas do guia de onda ao longo de sua extensão, introduzindo variações controladas que impactam diretamente no comportamento da propagação, utilizando o Método dos Elementos Finitos 2D. A análise centrou-se nas influências da geometria e composição material do guia de onda nas suas características de guiamento, empregando a Teoria de Modos Acoplados como ferramenta auxiliar. Inicialmente, as análises se concentraram estritamente na verificação das propriedades de guiamento da estrutura, sem uma consideração mais ampla sobre a faixa do espectro estudada.

No capítulo 2, foi exposta a teoria empregada tanto para a realização das simulações quanto para a análise dos resultados. A formulação do problema de autovalores, abordada neste capítulo em relação ao Método dos Elementos Finitos 2D, desempenhou um papel crucial na simplificação das simulações. Isso se deve à exploração da simetria inerente aos guias de onda SWG. A formulação, aliada a condições de contorno periódicas, capitaliza a periodicidade da estrutura, resultando na redução do domínio computacional para uma única célula unitária. Essa abordagem tem como benefício a significativa diminuição do esforço computacional necessário para simular uma estrutura tridimensional.

No capítulo 3, são apresentados os resultados iniciais, os quais englobam uma análise preliminar do comportamento dos guias de onda SWG em diferentes modos de operação. A contribuição central deste capítulo para a dissertação reside nos gráficos que representam a propagação do guia de onda para os modos TE e TM e os gráficos dos campos para os modos de guiamento.

No capítulo 4 e 5 foram analisados o desempenho dos guias de ondas com núcleo de carbeto de silício e nitreto de silício, respectivamente, e foi observado que ao substituir o material no núcleo, interfere na frequência de operação do guia. Quanto menor for o índice de refração do material, maior será a frequência de operação

do guia. Para os guias propostos, o nitreto de silício, fez com o que os guias se propagassem de forma semelhante para os modos TE e TM.

Os resultados apresentados neste trabalho indicam que os guias de onda SWG (Subwavelength Gratings) exibem uma notável flexibilidade em relação às suas potenciais aplicações no âmbito da óptica integrada. Inicialmente, destacam-se por serem estruturas compactas, conferindo ao projetista de dispositivos ópticos a capacidade de controle localizado do índice de refração, aproveitando a região linear da curva de dispersão e introduzindo um novo grau de liberdade no design de dispositivos.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Esta dissertação focou na análise de propagação e polarização de guias de ondas segmentados utilizando o método dos elementos finitos 2D. Contudo ainda existem abordagens a serem elucidadas:

- Analisar o comportamento das geometrias propostas nesta dissertação no domínio 3D;
- Analisar o desempenho dos guias propostos com materiais que possuem características não-lineares;
- Trabalhar a influência angular, na propagação dos guias de ondas slot;
- Fixar o material do núcleo dos guias com Silício e testar outros materiais na casca.
- Realizar testes de robustez para os guias simulados;
- Realizar estudos e aplicações para esses guias, tais como acopladores, cruzadores, interfômetros.

# Referências

- Almeida, V. R., Xu, Q., Barrios, C. A., e Lipson, M. (2004). Guiding and confining light in void nanostructure. *Optics letters*, 29(11):1209–1211.
- Anika, N. J. e Mia, M. B. (2021). Design and analysis of guided modes in photonic waveguides using optical neural network. *Optik*, 228:165785.
- Aschiéri, P. e Doya, V. (2013). Snake-like light beam propagation in multimode periodic segmented waveguide. *JOSA B*, 30(12):3161–3167.
- Bucio, T. D., Lacava, C., Clementi, M., Faneca, J., Skandalos, I., Baldycheva, A., Galli, M., Debnath, K., Petropoulos, P., e Gardes, F. (2019). Silicon nitride photonics for the near-infrared. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 26(2):1–13.
- Castelletto, S., Peruzzo, A., Bonato, C., Johnson, B. C., Radulaski, M., Ou, H., Kaiser, F., e Wrachtrup, J. (2022). Silicon carbide photonics bridging quantum technology. *ACS Photonics*, 9(5):1434–1457.
- Costa, M. S., Oliveira, A. J., e Rodriguez-Esquerre, V. F. (2011). Propagation characteristics analysis of subwavelength grating waveguides. In *2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2011)*, páginas 674–678. IEEE.
- de Oliveira, A. J. R. (2012). Análise de dispositivos baseados em guias não convencionais para aplicações em telecomunicações. Dissertação de Mestrado, Brasil.
- DEVECCHI, M. e RUBIO-MERCEDES, C. (2015). Formação docente: Guias de onda periodicos segmentados para conversão de modos e acoplamento de luz em óptica integrada. *ANAIS DO ENIC*, (7).
- Doerr, C. R. e Kogelnik, H. (2008). Dielectric waveguide theory. *Journal of Lightwave Technology*, 26(9):1176–1187.
- Halir, R., Bock, P. J., Cheben, P., Ortega-Moñux, A., Alonso-Ramos, C., Schmid, J. H., Lapointe, J., Xu, D.-X., Wangüemert-Pérez, J. G., Molina-Fernández, Í., et al. (2015). Waveguide sub-wavelength structures: a review of principles and applications. *Laser & Photonics Reviews*, 9(1):25–49.

- Hammond, A. M. e Camacho, R. M. (2019). Designing integrated photonic devices using artificial neural networks. *Optics express*, 27(21):29620–29638.
- Meng, Y., Chen, Y., Lu, L., Ding, Y., Cusano, A., Fan, J. A., Hu, Q., Wang, K., Xie, Z., Liu, Z., et al. (2021). Optical meta-waveguides for integrated photonics and beyond. *Light: Science & Applications*, 10(1):235.
- Nazempour, R., Zhang, Q., Fu, R., e Sheng, X. (2018). Biocompatible and implantable optical fibers and waveguides for biomedicine. *Materials*, 11(8):1283.
- Osborne, E., Veluthandath, A. V., Ahmed, W., Boonsit, S., Mourgelas, V., Wilkinson, J. S., e Murugan, G. S. (2023). Amorphous germanium waveguides for medical diagnostics using mid-infrared spectroscopy. In *Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXVII*, volume 12424, páginas 206–211. SPIE.
- Ou, H., Shi, X., Lu, Y., Kollmuss, M., Steiner, J., Tabouret, V., Syväjärvi, M., Wellmann, P., e Chaussende, D. (2023). Novel photonic applications of silicon carbide. *Materials*, 16(3):1014.
- Patra, T. (2013). Numerical aperture of a plastic optical fiber. *Proceedings of International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJIET) vol, 2*:258–263.
- Photondelta (2024). Why can silicon nitride be an ideal platform for photonic integrated circuits? Disponível em: <https://www.photondelta.com/news/why-can-silicon-nitride-sin-be-ideal-platform-for-photonic-integrated-circuits/>. Acesso em: 20 de Janeiro 2024.
- Roeloffzen, C. G., Zhuang, L., Taddei, C., Leinse, A., Heideman, R. G., van Dijk, P. W., Oldenbeuving, R. M., Marpaung, D. A., Burla, M., e Boller, K.-J. (2013). Silicon nitride microwave photonic circuits. *Optics express*, 21(19):22937–22961.
- Romero-García, S., Merget, F., Zhong, F., Finkelstein, H., e Witzens, J. (2013). Silicon nitride cmos-compatible platform for integrated photonics applications at visible wavelengths. *Optics express*, 21(12):14036–14046.
- Sacher, W. D., Mikkelsen, J. C., Huang, Y., Mak, J. C., Yong, Z., Luo, X., Li, Y., Dumais, P., Jiang, J., Goodwill, D., et al. (2018). Monolithically integrated multilayer silicon nitride-on-silicon waveguide platforms for 3-d photonic circuits and devices. *Proceedings of the IEEE*, 106(12):2232–2245.
- Segundo, M. T. A. B. (2018). Análise de guias de onda ópticos segmentados com sequência quase periódica. Dissertação de Mestrado, Brasil.
- Senichev, A., Peana, S., Martin, Z. O., Yesilyurt, O., Sychev, D., Lagutchev, A. S., Boltasseva, A., e ShalaeV, V. M. (2022). Silicon nitride waveguides with intrinsic single-photon emitters for integrated quantum photonics. *ACS Photonics*, 9(10):3357–3365.

- Singer, J. A., Stramm, T., Fasel, J., Schween, O., Gelaeschus, A., Bahr, A., e Kuhl, M. (2023). Flexible polymer optical waveguides for integrated optogenetic brain implants. In *2023 IEEE 36th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, páginas 370–373. IEEE.
- Singh, P., Tripathi, D. K., Jaiswal, S., e Dixit, H. (2014). All-optical logic gates: designs, classification, and comparison. *Advances in Optical Technologies*, 2014.
- Steglich, P. e You, K. (2018). Silicon-on-insulator slot waveguides: Theory and applications in electro-optics and optical sensing. *Emerging Waveguide Technology*, páginas 187–210.
- Sun, L., Zhang, Y., He, Y., Wang, H., e Su, Y. (2020). Subwavelength structured silicon waveguides and photonic devices. *Nanophotonics*, 9(6):1321–1340.
- Wang, D., Kuzma, M. L., Tan, X., He, T.-C., Dong, C., Liu, Z., e Yang, J. (2021). Phototherapy and optical waveguides for the treatment of infection. *Advanced drug delivery reviews*, 179:114036.
- Wang, J. e Dong, J. (2020). Optical waveguides and integrated optical devices for medical diagnosis, health monitoring and light therapies. *Sensors*, 20(14):3981.
- Wu, C., Yu, H., Lee, S., Peng, R., Takeuchi, I., e Li, M. (2021). Programmable phase-change metasurfaces on waveguides for multimode photonic convolutional neural network. *Nature communications*, 12(1):96.
- Xiang, C., Guo, J., Jin, W., Wu, L., Peters, J., Xie, W., Chang, L., Shen, B., Wang, H., Yang, Q.-F., et al. (2021). High-performance lasers for fully integrated silicon nitride photonics. *Nature communications*, 12(1):6650.
- Xiang, C., Jin, W., e Bowers, J. E. (2022). Silicon nitride passive and active photonic integrated circuits: trends and prospects. *Photonics Research*, 10(6):A82–A96.
- Yi, A., Wang, C., Zhou, L., Zhu, Y., Zhang, S., You, T., Zhang, J., e Ou, X. (2022). Silicon carbide for integrated photonics. *Applied Physics Reviews*, 9(3).
- Zhang, S., Zhou, H., Wu, B., Jiang, X., Gao, D., Xu, J., e Dong, J. (2024). Redundancy-free integrated optical convolver for optical neural networks based on arrayed waveguide grating. *Nanophotonics*, (0).

# Apêndice A

## Produções Bibliográficas

- dos Santos Reis, Adriano, Ana Julia RF de Oliveira Barros, and Vitaly Felix Rodriguez-Esquerre. "Polarization effects analysis in tilted subwavelength periodical waveguides." *Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, Thin Films, and Devices XVIII*. Vol. 11802. SPIE, 2021. <https://doi.org/10.1117/12.2595194>

Abstract: Birefringence properties have been frequently achieved when subwavelength elements are used on waveguides or devices design and construction. In order to investigate this effect in details we analyze a tilted silicon-on-insulator periodically subwavelength waveguides composed of nanowires. The propagation properties are obtained by an efficient frequency domain finite element approach which takes into account the periodical boundary conditions. The dispersion properties of the waveguides are analyzed in details for several values of duty cycle, nanowires shape and tilting angles. We demonstrate that the resulting birefringence can be tailored by changing the structural parameters of the waveguides. The tilted nanowire based waveguide can work as a birefringent waveguide depending on the propagating polarization, an essential and important condition for a myriad of photonics circuit devices.