# UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA - EPUSP PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

### FILIPE DE OLIVEIRA PEREIRA DELBONI

Utilização da arquitetura pedestal para fabricação de guias de onda com ilhas de ouro visando desenvolvimento de dispositivos fotônicos que operem na região do infravermelho

SÃO PAULO

2022

### FILIPE DE OLIVEIRA PEREIRA DELBONI

# Utilização da arquitetura pedestal para fabricação de guias de onda com ilhas de ouro visando desenvolvimento de dispositivos fotônicos que operem na região do infravermelho

Versão Corrigida

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Microeletrônica

Orientador(a): Prof.<sup>a</sup> Dra. Luciana Reyes Pires Kassab

SÃO PAULO

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

São Paulo, <u>15</u>	le junho	de 2022
		00000-
Assinatura do autor:	filipe de l	. P. helon

#### Catalogação-na-publicação

Delboni, Filipe de Oliveira Pereira Utilização da arquitetura pedestal para fabricação de guias de onda com ilhas de ouro visando desenvolvimento de dispositivos fotônicos que operem na região do infravermelho / F. O. P. Delboni – versão corr. – São Paulo, 2022. 108 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Poli-Integra.

1.Guias de onda 2.Pedestal 3.Infravermelho 4.Sputtering 5.Ilhas de ouro I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Poli-Integra II.t.

### FILIPE DE OLIVEIRA PEREIRA DELBONI

## Utilização da arquitetura pedestal para fabricação de guias de onda com ilhas de ouro visando desenvolvimento de dispositivos fotônicos que operem na região do infravermelho

Versão Corrigida

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

SÃO PAULO

2022



Universidade de São Paulo

#### ATA DE DEFESA

### Fanus

Aluno: 3140 - 11312263 - 2 / Página 1 de 1

Ata de defesa de Dissertação do(a) Senhor(a) Filipe de Oliveira Pereira Delboni no Programa: Engenharia Elétrica, do(a) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Aos 06 dias do mês de maio de 2022, no(a) realizou-se a Defesa da Dissertação do(a) Senhor(a) Filipe de Oliveira Pereira Delboni, apresentada para a obtenção do título de Mestre intitulada:

"Utilização da arquitetura pedestal para fabricação de guias de onda com ilhas de ouro visando desenvolvimento de dispositivos fotônicos que operem na região do infravermelho"

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra ao candidato para exposição e a seguir aos examinadores para as devidas arguições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:

Nome dos Participantes da Banca	Função	Sigla da CPG	Resultado
Luciana Reyes Pires Kassab	Presidente	FATEC-SP(EP)	APROVADO
Maria Lucia Pereira da Silva	Titular	Especialista-EP	APROVADO
Vanessa Duarte Del Cacho	Titular	FATEC - Externo	APROVADO

Resultado Final: APROVADO

#### Parecer da Comissão Julgadora \*

Eu, Elias Alves de Almeida \_\_\_\_\_\_, lavrei a presente ata, que assino juntamente com os(as) Senhores(as). São Paulo, aos 06 dias do mês de maio de 2022.

Pl Dureau luje lug las Varb

Pl Dieucu Jugs Prostand

Luciana Reyes Pires Kassab Presidente da Comissão Julgadora

\* Obs: Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório.

A defesa foi homologada pela Comissão de Pós-Graduação em \_\_\_\_\_\_e, portanto, o(a) aluno(a) \_\_\_\_\_\_jus ao título de Mestre em Ciências obtido no Programa Engenharia Elétrica - Área de concentração: Microeletrônica.

Presidente da Comissão de Pós-Graduação

#### AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Luciana Reyes Pires Kassab, pela oportunidade, orientação, paciência e dedicação no desenvolvimento do presente trabalho.

Ao Prof. Dr. Marco Isaías Alayo e ao Prof. Dr. Emerson Gonçalves de Melo, pelas discussões durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Me. Ricardo Cardoso Rangel, por ter fabricado, organizado e fornecido detalhes do processo de construção dos guias pedestais fabricados sem máscara de cromo.

Ao Prof. Dr. Davinson Mariano da Silva, por ter auxiliado na caracterização dos guias e por transmitir informações preciosas pela sua experiência em guias de onda.

Ao auxiliar Dr. Leonardo Bontempo, pelas deposições dos núcleos realizadas com e sem as ilhas de ouro.

À Me. Camila Dias da Silva Bordon pelo auxílio nos arranjos para as medidas de perda e transmitância deste trabalho.

Ao auxiliar docente Me. José Augusto Martins Garcia, por se disponibilizar nos processos práticos bem como durante a caracterização dos guias.

À Profa. Dra. Vanessa Duarte Del Cacho, por ter indicado literaturas de grande valor para a confecção teórica desta pesquisa.

À FATEC-SP, pelo espaço cedido, o Laboratório de Tecnologia de Materiais Fotônicos e Optoeletrônicos (LTMFO), à pesquisa.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia - INCT de Fotônica/CNPq, pela compra de materiais permanentes e de consumo.

Aos colegas Marcos Vinicius de Morais Nishimura, Daniel Kendji Kumada, Maurício Eiji Camilo e Evellyn Santos Magalhães, pelo incentivo e palavras que serviram como injeção de ânimo nos momentos de dificuldade.

À minha família, por serem o motivo do meu esforço e ajudarem em tudo que podiam para vencermos mais esta etapa.

#### RESUMO

Este trabalho tem como objetivo produzir guias de onda passivos utilizando a estrutura pedestal com as matrizes  $TeO_2 - ZnO$  (TZ) e  $GeO_2 - PbO$  (GP), a fim de testar o guiamento da luz nas regiões do visível e do infravermelho próximo. Foi usado um novo processo para a fabricação dos guias de onda que substitui a máscara de cromo pelo uso da máscara de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>). O perfil dos guias foi analisado através de Microscopia Eletrônica de Varredura e a técnica de Microscopia de Força Atômica foi usada para caracterizar as ilhas de ouro. Os filmes foram produzidos usando a técnica de Sputtering e as medidas de perda por propagação foram feitas usando a técnica de vista superior usando *laser* de 632 nm e 980 nm. Os guias com núcleo de GP não demonstraram guiamento no visível e por isto foi estudada a influência de O<sub>2</sub> na deposição deste filme, porém não influenciou satisfatoriamente no processo. Os guias com núcleo de TZ demonstraram guiamento nas regiões do visível (632 nm) e infravermelho próximo (980 nm). Para os casos dos guias produzidos com ilhas de ouro, a nucleação foi feita através de diversos tratamentos térmicos seguindo procedimentos estabelecidos anteriormente pelo grupo. A presença das ilhas de ouro reduziu significativamente a perda por propagação na região do infravermelho próximo (980 nm) para todos os guias (de 1-10 µm e 80 µm de largura) com núcleo de GP. Para o caso dos guias com núcleo de TZ, a referida redução foi mais significativa para os guias mais estreitos (1-10 µm de largura). Por fim, a menor perda obtida na região do visível foi de 2 dB/cm para o guia de 80 µm de largura com núcleo de TZ sem ilhas de ouro e, em 980 nm foi de 2,08 dB/cm em guia de 80 µm de largura com núcleo de GP, com ilhas de ouro. Cabe ressaltar que o guia GP sem as ilhas de ouro apresentou em 980 nm perda de 3,31 dB/cm em guia de 80 µm de largura. Simulações foram realizadas para determinar teoricamente os modos guiados e comparar com os resultados experimentais. Este novo processo de produção com plataforma pedestal traz vantagens, pois, promove uma baixa rugosidade de superfície, eliminando a preocupação sobre o efeito *micromasking* decorrente do uso da máscara de cromo e simplifica as etapas de processos, permitindo o uso de técnicas convencionais da microeletrônica já consolidadas (litografia, oxidação e corrosão) baseadas na tecnologia do silício para a construção do pedestal, demonstrando ser aplicável na construção de dispositivos fotônicos.

Palavras – chave: Guias de onda. Pedestal. Infravermelho. Sputtering. Ilhas de ouro.

#### ABSTRACT

This work aims to produce passive waveguides using a pedestal structure with  $TeO_2 - ZnO$  (TZ) and  $GeO_2 - PbO$  (GP) matrices, in order to test the guidance of light in the visible and near infrared regions. A new process was used to manufacture the waveguides that replaces the chromium mask by the use of the silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>). The profile of the guides was analyzed by Scanning Electron Microscopy and the Atomic Force Microscopy technique was used to characterize the gold islands. Films were produced using the Sputtering technique and propagation loss measurements were made using the top view technique using 632 nm and 980 nm laser. The guides with GP core did not demonstrate guidance in the visible and therefore the influence of O<sub>2</sub> on the deposition of this film was studied, but it did not influence satisfatorily the process. Guides with TZ core demonstrated guidance in the visible (632 nm) and near infrared (980 nm) regions. For the cases of guides produced with gold islands, nucleation was carried out through several thermal treatments following procedures previously established by the group. The presence of gold islands significantly reduced the propagation loss in the near infrared region (980 nm) for all guides (1-10 µm and 80 µm wide) with GP core. For the case of guides with TZ core, this reduction was more significant for the narrower guides (1-10 µm in width). Finally, the lowest loss obtained in the visible region was 2 dB/cm for the 80 µm width guide with TZ core without gold islands and in the near infrared region it was 2.08 dB/cm for the 80 µm width guide with GP core with gold islands. It is important to highlight that guides with GP core without gold islands, showed at 980 nm, loss of 3.31dB/cm, for 80 µm width guide. Simulations were performed to theoretically determine guided modes and compare them with experimental results. This new production process with a pedestal platform brings advantages, as it promotes a low surface roughness, eliminating the concern about the micromasking effect resulting from the use of the chrome mask and simplifies the process steps, allowing the use of conventional microelectronic techniques already consolidated (lithography, oxidation and corrosion) based on silicon technology for the construction of the pedestal, proving to be applicable in the construction of photonic devices.

Keywords: Waveguides. Pedestal. Infra-red. Sputtering. Gold islands.

### LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema do processo de Sputtering em uma câmara de vácuo	21
Figura 2 - Demonstração do processo de Sputtering convencional (à esquerda) e do	
Magnetron Sputtering (a direita)	23
rigura 3 - Fibra oplica vista em cone longitudinal (a esquerda) e em cone transversal (a diroito)	24
Figure 4 – Porfil do quia do onda tino podostal	24
Figura 5 - Penni do guía de onda lipo pedesial	24
nontilhado) a partir de um raio incidido em uma interface	25
Figura 6 - Representados o raio incidente (ângulo A formado com relação a normal), o raio	2J N
refletido ( $\theta_c = \theta_i$ ) e o raio refratado ou transmitido (ângulo $\theta_c$ formado com relação a normal). À	,
esquerda, situação ocorre quando $\theta_i$ é menor que o ângulo crítico ( $\theta_{crit}$ ). Ao centro, situação	
ocorre quando $\theta_i$ é igual ao $\theta_{crit}$ . E à direita, ocorre quando $\theta_i$ é maior que ao $\theta_{crit}$ , onde, ocorre	
apenas a reflexão	26
Figura 7 - Representação da relação entre o ângulo de aceitação e o ângulo que incidirá	
internamente do guia em sua interface com a casca	27
Figura 8 – Raios introduzidos em um guia de onda a partir de uma fonte luminosa	28
Figura 9 - Exemplo de guiamento multimodo captado no fim do guia de onda	29
Figura 10 - Duas ondas propagando ao longo do mesmo eixo em fase(a) e defasada(b)	30
Figura 11 – Diferentes intensidades luminosas devida à sobreposição de raios propagados	s
internamente ao guia de onda	30
Figura 12 - Onda eletromagnética propagada no eixo z seccionada em sua componente	
tangencial elétrica (azul) oscilando no eixo x e sua componente tangencial magnética	
(vermelha) oscilando no eixo y	32
Figura 13 - Demonstração de ajuste automático da velocidade das componentes devido a	
ultrapassagem da componente eletrica em diferentes meios.	32
Figura 14 - Distribuição gaussiana da intensidade luminosa propagada do inicio ao fim do	
guia com campo evanescente dentro do guia sem absorção pelo substrato (a) e com	22
Eigura 15 - Ilustração das configurações utilizadas para realização do confinamento de luz	, ,
em quias de onda. Confinamento do eixo x: quias slab do tipo degrau (a) e índice gradual	-
(b) confinamento lateral: raisedstrin (c) canal (d) rib (e) e pedestal (f)	34
Figura 16 - Etapas para confecção dos guias de onda tipo rib	35
Figura 17 - Resultados obtidos em guias de onda tipo rib de perda por propagação com	55
diferentes comprimentos de onda (à esquerda) e resultados de ganho interno com e sem	
nanopartículas (à direita)	36
Figura 18 - Estrutura pedestal construída sem núcleo (esquerda) e guia com núcleo	
depositado e isolado sem necessidade de corrosão posterior (direita)	36
Figura 19 - Guia de onda tipo pedestal	37
Figura 20 - Esquema para oscilação Plasmônica de uma esfera, mostrando o deslocamen	ito
de uma nuvem dos elétrons de condução em relação ao núcleo	38
Figura 21 - Espectro de Absorbância de nanopartículas de prata (esquerda) e ouro (direita	)
	38
Figura 22 – Interferência da forma das NPs na posição das bandas de absorção dos	
plasmons de superfície em coloides com NPs de prata	39
Figura 23 – Resultados obtidos de perda por propagação em guias sem e com NPs	_
depositadas durante 10 e 20 minutos, tratados por 1 hora	40
Figura 24 - Visualização bidimensional (vista superior a esquerda) e visualização	
tinumensional (a direita) do dispositivo projetado	41
rigura 25 - Obtenição dos modos guiados no simulador OPTIFDTD	41

Figura 26 - Representação de um guia de onda tipo rib (a) e um guia de onda tipo pedestal (b). Imagens de MEV de guias ARROW (c) e de guias de onda pedestal com aplicações em dispositivos de polarização única (d)
Figura 27 - Imagens obtidas por MEV de guia de onda tipo rib (à esquerda) e tipo pedestal (à direita)
Figura 28 - Representação simplificada do processo com máscara de cromo utilizado para construção dos guias de onda pedestais
Figura 29 - Imagens obtidas por MEV demonstrando o antes (à esquerda) e o depois (à direita) das otimizações empregadas para diminuir a rugosidade lateral dos guias
máscara da espessura da máscara de cromo em 70%
Figura 33 - Resultados de perda por propagação em guias de onda de $Bi_2O_3 - WO_3 - TeO_2$ sem dopantes (a), os modos obtidos na saída dos guias com diferentes larguras (b) e
estrutura Mach-Zehnder construida simultaneamente aos guias de onda (c)
Figura 35 - Processo atual (sem máscara de cromo) de construção dos guias de onda 48 Figura 36 - Imagem obtida por MEV demonstrando a eliminação da rugosidade lateral após a eliminação da máscara de cromo no processo de construção
Figura 37 - Comparação entre os resultados de perda por propagação para guias construídos com máscara de cromo e sem máscara de cromo
de construção 50
Figura 39 – Ilustração do guia de onda após o processo de limpeza da lâmina 53 Figura 40 - Ilustração do guia de onda após o processo de oxidação térmica seca do silício 
Figura 41 - Placa de quartzo com um filme de cromo contendo o layout transferido para a superfície da lâmina
Figura 42 - Ilustração do guia de onda após o processo de litografia óptica
SIIICIO
Figura 45 - Ilustração do guia de onda após o processo de corrosão do silício
Figura 46 - Ilustração do guia de onda após o processo da nova limpeza da lâmina
Figura 48 - Esquema do equipamento de RF Magnetron Sputtering instalado na FATEC-SP
Figura 49 - Equipamento de RF Magnetron Sputtering instalado na FATEC-SP
Figura 50 - Interior da câmara de deposição do equipamento de Sputtering da FATEC-SP. 62
Figura 51 - Ilustração do guia de onda apos o processo de deposição da matriz
formação das ilhas de ouro
Figura 53 - Ilustração do guia de onda após o processo de deposição das ilhas de ouro 64
Figura 54 – Equipamento que realiza a Microscopia Eletrônica de Varredura instalado na FATEC-SP

Figura 55 – Arranjo usado para técnica de vista superior
com acoplamento e espalhamento da luz (à direita)
Figura 57 - Gráfico da intensidade luminosa capturada pela câmera CCD em função do
comprimento do guia de onda
Figura 58 – Arranio com a adição de uma lente objetiva para ampliação e detecção dos
modos quiados
Figure 50 Dripoínio de um equinomente de microscopio de force atômico
Figura 60 - Distanciamento e larguras dos guías de onda capturados por MEV
Figura 61 - Lâmina de silício com os guias (à esquerda) e o vidro de SiO <sub>2</sub> (à direita) após tratamento térmico de 2 horas
Figura 62 – Perfil do quia de onda TZ obtido por MEV
Figura 63 - Espessura final do óxido obtida por MEV
Figura 64 - Comparação entre o guiamento na região do infravermelho (980 nm) e na região
do visíval (632 pm) pos quias do ondo com púcloo do TZ tratados por 2 boros (ospossura do
570 pm): a inact mastra a quiamante de luz visíval a infravormalha próxima pos quias TZ
570 mm), o inset mostra o guiamento da luz visiver e initravermento proximo nos guias 12
Figura 65 - Modos guiados obtidos em guias de onda com nucleo de 12 em 980 nm 75
Figura 66 - Comparação entre o guiamento na região do infravermelho (980 nm) nos guias
de onda com núcleo de TZ (570 nm de espessura) sem e com ilhas de ouro com diferentes
tempos de tratamento térmico
Figura 67 – Perfil dos guias de onda de GP com espessuras de 480 nm(a), 410 nm(b) e 675
nm(c) obtido por MEV
Figura 68 - Perda por vista superior, na região do infravermelho (980 nm), em guias de onda
com núcleo de GP sem ilhas de ouro, com diferentes espessuras e tratados por 1h
Figura 69 - Comparação entre a perda de propagação na região do infravermelho em guias
de onda com diferentes tempos de tratamento térmico
Figura 70 - Modos guiados obtidos em guias de onda com púcleo de GP em 980 pm 81
Figura 71 - Comparação entre a perda de propagação na região do infravermelho (980 nm)
em filmes sem e com ilbas de ouro em diferentes espessuras de núcleo de GP: o inset
mostra o quiamonto da luz nos quias GP (675 pm do espessura) com o som ilhas do ouro 82
Figure 72. Comportação entre o pordo do propagação no região do infrovormelho (020 nm)
rigura 72 - Comparação entre a perda de propagação na região do initravermento (900 mm)
em guias de onda com nucleo de 12 (570 nm de espessura) e GP (480 nm de espessura)
com linas de ouro com mesmo tempo de tratamento termico
Figura 73 – Distribuição dos raios das linas de ouro (a esquerda) e vista superior (a direita)
obtida pela tecnica de Microscopia de Força Atomica para guia de onda tratado por 5 horas
com núcleo de TZ com espessura de 570 nm(a), núcleo de GP com espessura de 480 nm(b)
e 675 nm(c)
Figura 74 - Alturas das ilhas de ouro obtidas pela técnica de Microscopia de Força Atômica
para guia de onda tratado por 5 horas com núcleo de TZ com espessura de 570 nm(a),
núcleo de GP com espessura de 480 nm(b) e 675 nm(c) 85
Figura 75 - Distâncias entre as ilhas de ouro obtidas pela técnica de Microscopia de Força
Atômica para guia de onda tratado por 5 horas com núcleo de TZ com espessura de 570
nm(a), núcleo de GP com espessura de 480 nm(b) e 675 nm(c)
Figura 76 - Exemplo de estrutura do um quia de onda com núcleo GP com largura 1 um e
0,5 µm de espessura, utilizado na simulação dos modos quiados: a escala a direita
apresenta os valores dos índices de refração
Figura 77 - Exemplo do guia de onda construído pelo simulador OPTIEDTD observado por
vista superior (à esquerda) e sua visualização tridimensional (à direita)
Figura 78 - Simulação dos modos quiados em quias de onda com 0.5 um de espessura o 1
um de largura com núcleo de CD (a) o TZ (b) om 020 pm
אוו עד ומוצעום נטווו וועטבט עד טד (מ) פ דב (ט) פווו אטט וווון

Figura 79 - Simulação dos modos guiados em guias de onda com 0,5 µm de espessura e 10 µm de largura com núcleo de GP (a) e TZ (b) em 980 nm	
Figura 84 - Demonstração dos modos existentes obtidos a partir da parte real e imaginária do índice efetivo	
Figura 85 - Amostras GP: depositada no vidro de SiO <sub>2</sub> com tonalidade amarelada sem tratar (à esquerda), tratada e cristalizada (à direita) e a amostra lilás escuro de Si sem tratar usada na obtenção da espessura do filme (PS547)	
JUU C	

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros utilizados na técnica de spin coating	. 54
Tabela 2 - Parâmetros da corrosão do silício	. 58
Tabela 3 - Parâmetros da oxidação térmica úmida	. 60
Tabela 4 - Parâmetros utilizados na deposição das ilhas de ouro	. 64
Tabela 5 - Parâmetros utilizados na deposição da matriz de TeO2-ZnO sob os pedestais	. 71
Tabela 6 - Parâmetros utilizados no tratamento térmico nos guias de onda e vidro de SiO2	2
com TeO2-ZnO depositado em suas superfícies	. 72
Tabela 7 - Parâmetros utilizados no tratamento térmico dos guias de onda e vidro de SiO <sub>2</sub>	2
em matriz TeO <sub>2</sub> -ZnO com ilhas de ouro	. 76
Tabela 8 - Parâmetros utilizados na deposição da matriz de GeO <sub>2</sub> -PbO sob os guias de	
onda e vidro de SiO <sub>2</sub>	78
Tabela 9 - Parâmetros utilizados no tratamento térmico nos guias de onda e vidro de SiO <sub>2</sub>	2
com GeO <sub>2</sub> -PbO depositado em suas superfícies	. 80
Tabela 10 - Parâmetros utilizados na deposição do filme GeO2-PbO com acréscimo do gá	IS
de oxigênio (processo PS547)	. 94
Tabela 11 - Parâmetros utilizados no processo de deposição de GeO <sub>2</sub> -PbO com o aument	to
da taxa de $O_2$ (PS548)	. 95
Tabela 12 - Parâmetros utilizados no tratamento térmico das amostras vítreas de GeO <sub>2</sub> -Pl	bO
dos processos PS547 e PS548 com acréscimo do O <sub>2</sub> no processo de deposição	. 97
Tabela 13 - Parämetros utilizados no novo tratamento térmico das amostras vítreas de	~
GeO <sub>2</sub> -PbO dos processos PS547 e PS548 com acréscimo do O <sub>2</sub> no processo de deposiçã	эо
	99

### SUMÁRIO

1. INTR	<b>DDUÇÃO</b> 18
2. REVI	SÃO BIBLIOGRÁFICA 21
2.1. A	TÉCNICA DE PRODUÇÃO DE FILMES FINOS POR SPUTTERING 21
2.2. 0	GUIAS DE ONDA
2.2.1.	Princípios de Funcionamento 25
2.2.2.	Modos de Propagação 28
2.2.3.	Atenuação 31
2.3. F	ROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE GUIAS DE ONDA
2.3.1.	Guias de onda com estrutura rib 35
2.3.2. crom	Guias de onda com estrutura pedestal fabricadas com e sem máscara de 36
2.4. F DE GUI	LASMONS DE SUPERFÍCIE E A INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES ÓPTICAS AS DE ONDA
2.5. 5	IMULAÇÕES EM GUIAS DE ONDA COM O PROGRAMA OPTIFDTD 40
2.6. E	STADO DA ARTE
3. MATI	ERIAIS E MÉTODOS
3.1. F MÁSCA	ROCESSOS DE FABRICAÇÃO DOS GUIAS DE ONDA PEDESTAIS SEM RA DE CROMO
3.1.1.	Limpeza das lâminas 52
3.1.2.	Oxidação térmica seca do silício54
3.1.3.	Litografia óptica 54
3.1.4.	Corrosão úmida do dióxido de silício56
3.1.5.	Corrosão do silício 57
3.1.6.	Remoção total do fotorresiste 58
3.1.7.	Oxidação térmica úmida do silício 59
3.1.8.	Deposição da matriz com e sem fluxo de O <sub>2</sub> 60
3.2. E	EPOSIÇÃO DAS ILHAS DE OURO NOS GUIAS DE ONDA
3.3. C	ARACTERIZAÇÃO DOS GUIAS DE ONDA PEDESTAIS64
3.3.1.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)65
3.3.2.	Caracterização óptica dos guias 66
3.3.3.	Análise dos modos de propagação 68
3.3.4.	Microscopia de Força Atômica (AFM) 69
4. RESI	ILTADOS E DISCUSSÕES
4.1. F	RODUÇÃO DOS GUIAS DE ONDA DO TIPO PEDESTAL
4.1.1.	Resultados obtidos em guias de onda com núcleo de TeO <sub>2</sub> – ZnO (TZ) 71
4.1.2.	Resultados obtidos em guias de onda com núcleo de GeO2 – PbO (GP). 77

	4.1.3.	Resultados obtidos pela técnica de Microscopia de Força Atômica (AFI	M)
			84
	4.2. R ONDA G	ESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE MODOS (E PERDAS) DE GUIAS DE GeO2-PbO E TeO2-ZnO	. 87
	4.3. IN GUIAS (	NFLUÊNCIA DO FLUXO DE O2 NAS DEPOSIÇÕES POR <i>SPUTTERING</i> EM GeO2-PbO	. 94
5.	CONC	CLUSÕES	100
6.	REFE	RÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

### 1. INTRODUÇÃO

A Fotônica é a área da ciência em que é estudada a geração, detecção e manipulação da luz e que demonstra promissores avanços tecnológicos em diversos setores, como o das telecomunicações, militar, indústrias farmacêuticas, entre outros. Alguns países, inclusive o Brasil, têm fomentado pesquisas que desenvolvam dispositivos ópticos a fim de serem aplicados na agricultura (com sistemas de precisão e sensoriamento), nas tecnologias digitais (com computadores quânticos) e na Defesa (com sensores de infravermelho e sistemas de controle e comando, navegação) [1].

Com foco na manipulação da luz, ou seja, na sua emissão, transmissão e detecção, o grupo em que este trabalho se insere, tem buscado desenvolver técnicas inovadoras, rentáveis e que proporcionem uma diminuição considerável na perda por propagação das ondas eletromagnéticas guiadas, empenhando-se na produção de guias de onda [2-15], assim, como a pesquisa realizada neste trabalho.

A diminuição da perda de propagação da luz permitirá a miniaturização e precisão dos dispositivos ópticos como sensores (ex.: Interferômetro de Mach Zehnder), amplificadores ópticos, guias de onda, etc., a fim de complementar ou substituir elementos que limitam o avanço da tecnologia atual, como por exemplo, a velocidade de transmissão e interferências eletromagnéticas, além de minimizar os aquecimentos promovidos pelo efeito Joule.

Desta forma, no presente trabalho, foram produzidos guias de onda de estrutura pedestal sobre um substrato de silício (Si) monocristalino seguindo as etapas de processos convencionais da microeletrônica, dentre elas, a limpeza, oxidação, litografia, corrosão e deposição.

A estrutura inicialmente desenvolvida pelo grupo consistia no tipo "*rib*", mas, a etapa de corrosão parcial da camada de núcleo, restringia a possibilidade de uso de matrizes vítreas para formação do próprio núcleo, tornando vantajoso o investimento no tipo de estrutura pedestal [5]. Ressalta-se que em guias tipo "*rib*", para cada matriz era preciso desenvolver um procedimento para corrosão do material que constituía o núcleo, porém, para formar o núcleo em guias pedestais é somente

realizada a deposição da matriz, não sendo necessária a etapa de corrosão, o que consequentemente, aumenta a quantidade de materiais que podem ser aplicados.

Mediante o aumento das possibilidades de matrizes vítreas viabilizadas pelos guias de onda tipo pedestal, usou-se para a fabricação dos núcleos dos guias de onda as matrizes vítreas de germanato e telurito, que por sua vez, foram depositadas através da técnica de *Magnetron Sputtering* resultando numa deposição uniforme, controlada e com filme de boa aderência [2]. Neste procedimento, o material que forma o núcleo é depositado sob o pedestal que possui o dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) em sua superfície, preparado por técnicas conhecidas pela microeletrônica (litografia, oxidação e corrosão).

Ressalta-se que durante as etapas de processos usadas na construção dos guias de onda, foi retirada a máscara de cromo, anteriormente utilizada pelo grupo, para definição dos guias [5] e substituída pela máscara de SiO<sub>2</sub>, permitindo a simplificação do processo.

Este trabalho se divide nos seguintes capítulos:

No capítulo 2, são mostrados os fundamentos teóricos como forma de sustentação e justificativa aos assuntos abordados.

O capítulo 3 mostra a especificação de cada etapa de processo e material aplicado para fabricação dos guias e o relato das técnicas de caracterização utilizadas a fim de conceder os resultados experimentais.

No posterior, capítulo 4, a descrição dos resultados com fatos e suposições obtidos durante o avanço da pesquisa.

O capítulo 5 apresenta as perspectivas e considerações finais sobre o trabalho.

E por último, o capítulo 6, identifica os trabalhos e obras consultadas para confecção deste trabalho.

### OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo, primeiramente de, produzir guias de onda passivos utilizando a arquitetura pedestal para fabricação de dispositivos fotônicos que operem na região do infravermelho. Os pedestais são produzidos usando técnicas de microeletrônica em sala limpa sem uso de máscara de cromo para evitar o efeito *micromasking*. E têm-se como objetivo, determinar as perdas por propagação em guias com diferentes núcleos (GeO<sub>2</sub> – PbO e TeO<sub>2</sub> – ZnO) produzidos por *Sputtering* com e sem ilhas de ouro. A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura foi utilizada para verificação do perfil dos guias e a técnica de Microscopia de Força Atômica para caracterizar as ilhas de ouro. Simulações são realizadas para comparar os modos guiados para comparar com os resultados obtidos experimentalmente.

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. A TÉCNICA DE PRODUÇÃO DE FILMES FINOS POR SPUTTERING

A incorporação dos filmes finos que compuseram o núcleo dos guias de onda consiste no processo de deposição física a vapor, devido as vantagens em relação à deposição a partir de líquidos que se referem a: aplicabilidade em qualquer material, ajuste de temperatura do substrato e acesso a superfície durante a deposição.

A deposição física a vapor engloba, principalmente, a técnica de evaporação e a técnica de pulverização catódica (*Sputtering*). Esta pesquisa utilizou somente a técnica de *Sputtering*, onde, as partículas que formaram o núcleo foram arrancadas fisicamentede uma fonte sólida (alvo) pelo impacto de íons extraídos de uma nuvem de plasma e se deslocaram até o substrato onde se condensam na forma de um filme, tudo em um ambiente (câmara) de pressão controlada [2], conforme Figura 1.



Figura 1 - Esquema do processo de Sputtering em uma câmara de vácuo

Fonte: Del Cacho (2010, p. 22).

As etapas que compõem o *Sputtering* podem ser divididas, sequencialmente, em cinco partes:

- a) Geração de plasma por meio da descarga elétrica;
- b) Aceleração de íons positivos na bainha do catodo em direção ao alvo;
- c) Colisão e ejeção de átomos do alvo através do choque com os íons positivos e transferência de momento linear;
- d) Transporte de átomos ejetado para o substrato;
- e) Condensação dos átomos e formação do filme fino sobre o substrato.

Para controle e operação correta do *Sputtering* deve-se ajustar três parâmetros: o gás do processo, a pressão e a potência. O gás pode ser reativo, quando interage com a superfície do substrato (por exemplo, oxigênio e nitrogênio), fazendo parte da composição do filme depositado ou pode ser um gás não reativo, quando é inerte (por exemplo, argônio) e não comporá o filme fino depositado. A pressão típica é de 10mTorr a 200mTorr e deve ser bem controlada para resultar em uma morfologia satisfatória ao desejado, ou seja, obter uma espessura e isolamento do núcleo como esperado. A potência aplicada parte de centenas de volts a poucos milhares de volts (até 5kV), pois ela induzirá um elevado rendimento de *Sputtering*, ou seja, um elevado número de átomos ejetados do alvo por cada íon incidente.

Controlados os parâmetros descritos anteriormente, obtém-se, uniformidade, controle da taxa e controle de espessura do material depositado, também, observase ausência de emissão de raio X e melhor cobertura de degrau (quando comparado com evaporação por feixe de elétrons).

Os tipos mais comuns de *Sputtering* são: de Corrente Continua (DC – *direct current*) e Rádio Frequência (RF). Como o material a ser depositado, nesta pesquisa, é isolante, o *Sputtering* tipo DC é inviável, pois estes materiais fazem com que a corrente DC não flua e consequentemente, o plasma se anule. Dessa forma, utilizou-se o *Sputtering* tipo RF, onde, a frequência de 13,56MHz induz um movimento de vai-e-vem dos elétrons e aumenta a ionização do plasma resultando em maior remoção de partículas do alvo (acelerando o processo de deposição). Também com o objetivo de maximizar a eficiência de ionização, utilizou-se o reator *Magnetron Sputtering* que contém imãs no verso do catodo (fixado abaixo do alvo), que por sua vez, confinam e aumentam a quantidade de elétrons próximos ao alvo, conforme Figura 2.





Fonte: Del Cacho (2010, p. 23).

Esse confinamento de elétrons aumenta a eficiência de ionização permitindo a redução da pressão do processo e aumento do livre caminho médio (distância média entre duas partículas dentro da câmara). Essas mudanças aumentam a energia dos átomos ejetados à superfície e melhoram a cobertura de degrau (caso exista o degrau).

Assim, o processo utilizado nesta pesquisa conta com um reator de *Magnetron Sputtering*, configurado como RF resultando em filmes uniformes e com espessuras bem controladas na formação do núcleo dos guias de onda.

### 2.2. GUIAS DE ONDA

Guias de onda são dispositivos que confinam e transportam a luz acoplada de uma extremidade a outra. Esse transporte é realizado dentro de um núcleo envolto de uma casca, basicamente, obedecendo o princípio de reflexão interna total (RIT). Para melhor ilustração de um guia de onda, é possível compará-lo a um dispositivo mais difundido na sociedade atual, a fibra óptica [16], conforme a Figura 3.



Figura 3 - Fibra óptica vista em corte longitudinal (à esquerda) e em corte transversal (à direita)

Fonte: Ribeiro (1999, p. 5).

A fabricação dos guias de onda desse trabalho consiste em etapas sequenciais de processos utilizados na fabricação de Circuitos Integrados (CI), como será apresentada na subseção 3.1. As etapas são estabelecidas conforme o perfil final que se deseja construir, por exemplo, o perfil adotado nesse trabalho, o pedestal, conforme Figura 4.



Fonte: autor.

A definição do perfil dos guias de onda tem grande impacto na produção de um guia de alta qualidade, pois, traz consigo diferentes níveis de rugosidade de superfície, maximizando ou minimizando a quantidade de impurezas, inomogeneidades e dependendo do processo de fabricação, pode-se restringir ou abranger a diversificação de óxidos impostos como núcleo do guia. Dentre os pontos anteriormente destacados, a rugosidade, impureza e inomogeneidade estão dentre os maiores atenuadores de sinal, conforme será abordado com mais detalhes na subseção 2.2.3. O perfil pedestal permite a incorporação de diferentes óxidos como núcleo, dentre eles, o telurito (subseção 4.1.1) e o germanato (subseção 4.1.2), aplicados nesse trabalho. A escolha destes óxidos como filme fino para a construção do guia foi baseada nos estudos já realizados por trabalhos anteriores [2-15] que se adequam ao fundamento teórico que está apresentado a seguir.

### 2.2.1. Princípios de Funcionamento

Ao estudar o funcionamento de um guia de onda, deve-se compreender primeiramente o comportamento da luz que será propagada através dele, para assim, justificar sua estrutura fundamental e os materiais utilizados.

Iniciando pela óptica geométrica, que basicamente, trata a luz como um feixe (raio) ou uma partícula, simplifica-se a compreensão dos conceitos de reflexão e refração. Reflexão: é o efeito que ocorre quando a luz incidida em uma superfície (interface), retorna ao mesmo meio de propagação de origem. Refração: é o efeito complementar ao da reflexão, ou seja, a luz incidida em uma superfície é transmitida para outro meio, diferente ao de origem, conforme Figura 5.



Figura 5 - Representação do efeito de refração (raio vermelho) e reflexão (raio azul pontilhado) a partir de um raio incidido em uma interface

Fonte: autor.

Sendo assim, pode-se considerar que para confinar a luz que é propagada no núcleo do guia de onda se deve anular o efeito de refração e manter somente o efeito de reflexão, esse fenômeno já foi estudado e nomeado como Reflexão Interna Total (RIT). O efeito de RIT é obtido quando existem dois meios com índice de refração diferentes e propaga-se a luz no meio de maior índice de refração; através desse meio (de maior índice de refração), a luz incidida na interface núcleo-casca deve respeitar um ângulo acima do ângulo crítico (em relação a reta normal) e resultar, idealmente, na anulação do efeito de refração. Esse ângulo crítico ( $\theta_{crit}$ ) é o limiar entre a existência ou não da refração; desta forma, caso a luz fosse incidida formando exatamente o ângulo crítico seria propagada na própria interface, formando um ângulo de 90° com a reta Normal [17], conforme Figura 6.

Figura 6 - Representados o raio incidente (ângulo  $\theta_i$  formado com relação a normal), o raio refletido ( $\theta_r = \theta_i$ ) e o raio refratado ou transmitido (ângulo  $\theta_t$  formado com relação a normal). À esquerda, situação ocorre quando  $\theta_i$  é menor que o ângulo crítico ( $\theta_{crit}$ ). Ao centro, situação ocorre quando  $\theta_i$  é igual ao  $\theta_{crit}$ . E à direita, ocorre quando  $\theta_i$  é maior que ao  $\theta_{crit}$ , onde, ocorre apenas a reflexão



Fonte: Catelli e Mesquita (2019).

A relação de casca e núcleo do guia de onda tem que possibilitar a criação desse efeito (RIT), porém, na entrada do guia, deve-se acoplar uma fibra perpendicularmente ao guia apontando para a reta Normal (Z) ou dentro de uma faixa de posicionamento que, caso o feixe, colida com a interface núcleo-casca, seja incidido com ângulo maior do que o ângulo crítico ( $\theta_{crit}$ ); este intervalo é intitulado ângulo de aceitação ( $\theta_a$ ), conforme Figura 7.

Figura 7 - Representação da relação entre o ângulo de aceitação e o ângulo que incidirá internamente do guia em sua interface com a casca



Fonte: autor.

A partir deste intervalo do ângulo de aceitação, introduz-se um conceito importante que é, a Abertura Numérica (AN), parâmetro característico de um sistema óptico que relaciona o índice de refração do núcleo (n<sub>1</sub>) e da casca (n<sub>2</sub>) com o seno do ângulo de aceitação ( $\theta_a$ ) e o meio externo (n<sub>0</sub>), sendo expressa pela seguinte equação [18]:

$$AN = n_0.sen\theta_a = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$
(1)

Porém, como o  $n_0$  é aproximadamente 1 para o ar, pode-se simplificar para: AN = sen $\theta_a = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$  (2)

A AN é um parâmetro utilizado para medir a eficiência de acoplamento entre a fonte e o guia de onda, além de, influenciar o número de modos de propagação que atravessarão o guia de onda e serão captados na sua extremidade oposta à extremidade de entrada do guia, onde a luz transmitida é acoplada pela fibra.

#### 2.2.2. Modos de Propagação

Na óptica geométrica, anteriormente exposta, o índice de refração (n) de um meio é considerado como sendo homogêneo e o seu valor, provém da razão entre as diferentes velocidades de propagação da luz em cada meio (v) em relação a velocidade dela ao se propagar pelo vácuo (c), conforme equação a seguir:

$$n = \frac{c}{v} \tag{3}$$

Como todo meio, exceto o vácuo, retarda a propagação da luz, observa-se que todos terão índice de refração maiores que 1. E conclui-se também que, o núcleo do guia (que possui maior índice de refração que a casca) será a região na qual a propagação da luz terá menor velocidade de toda a estrutura do guia de onda.

Sendo assim, a luz ao ser incidida na interface núcleo-casca se depara com essa mistura entre os dois meios (que induzem velocidades diferentes entre si), fazendo com que a luz que retorna ao núcleo apresente uma defasagem em relação a luz incidida. Além disso, nem todos os raios introduzidos pela fonte irão colidir com o mesmo ângulo nesta interface. Desta forma, os raios que são introduzidos e guiados até a extremidade de saída do guia são divididos em dois: raios meridionais e raios enviesados. Raios meridionais: são os raios que atravessam o eixo longitudinal do guia de onda. Raios enviesados: são os raios que tendem a se propagarem de forma mais inclinada e assim, não atravessam o eixo longitudinal [16], conforme Figura 8.





Fonte: Ribeiro (1999, p. 6).

Então, observa-se que, ambos os raios formam ângulos maiores do que o ângulo crítico ( $\theta_{crit}$ ) e são confinados no núcleo do guia, porém, os raios meridionais tendem a formar um ângulo mais próximo do valor do ângulo crítico ( $\theta_{crit}$ ) e os raios enviesados formam ângulos mais obtusos (por isso, o nome "enviesados"). Também, vale ressaltar, que os raios meridionais colidirão mais vezes na interface núcleocasca do que os raios enviesados, logo, os raios meridionais cedem mais energia à casca e aumentam a perda de intensidade luminosa na saída do guia. Sendo assim, observa-se que o comprimento do guia de onda começa a interferir também nessa perda, justamente por esta razão, costuma-se apresentar esse valor de perda com a unidade de medida dB/km ou dB/cm. Ou seja, calcula-se a perda de forma proporcional ao comprimento, pois relaciona com o aumento de reflexões que os raios irão formar no interior do guia.

Outro fator que o comprimento do guia pode interferir é na obtenção dos modos guiados. Modos guiados são definidos por conglomerado de raios que sofrem reflexão no núcleo do guia e se estendem até a outra extremidade. Pela óptica geométrica ainda, nota-se que, um raio pode sobrepor outro dependendo do ponto de obtenção no eixo de propagação da luz, ou seja, em alguns pontos os raios colidem e se interferem e em alguns pontos os raios se propagam independentemente, formando assim os modos guiados, conforme Figura 9.

Figura 9 - Exemplo de guiamento multimodo captado no fim do guia de onda



Fonte: autor.

A partir deste ponto, para compreender o conceito de interferência e a formação da imagem acima, necessita-se adentrar aos conceitos de óptica física que tratam a luz não apenas como um raio, mas como uma onda eletromagnética.

Ao tratar a luz como uma onda eletromagnética, atribui-se características que anteriormente, na óptica geométrica, eram desconsideradas. As características fundamentais são: comprimento de onda ( $\lambda$ ), frequência (f) e velocidade de propagação (v). Dessa forma, considerando a luz como uma onda resultante dos campos elétricos e magnéticos e que se propaga em uma direção apenas, pode-se sintetizar a demonstração de interferência construtiva e destrutiva na Figura 10 [19].



Figura 10 - Duas ondas propagando ao longo do mesmo eixo em fase(a) e defasada(b)

Fonte: Adaptado do site Mundo Educação.

Conforme demonstrado, em um ponto específico "x" de distância, verifica-se a formação de uma onda resultante originada por duas outras que se sobrepuseram e dependendo de suas fases, pode ocorrer a soma de suas amplitudes (interferência construtiva) ou pode ocorrer a subtração de suas amplitudes (interferência destrutiva). Então, completando com os conceitos da óptica geométrica anteriormente expostos, conclui-se que, existem raios que colidem mais com a interface núcleo-casca e geram uma defasagem com os demais raios. Esses raios, na verdade, são ondas que ao se encontrarem na saída do guia terão uma superposição podendo anular uma com a outra ou intensificar uma com a outra, por isso, a variação de cores no padrão apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Diferentes intensidades luminosas devida à sobreposição de raios propagados internamente ao guia de onda



Fonte: autor.

As regiões brancas são resultado da soma de várias ondas que se intensificaram e as regiões mais escuras ou azuladas, são as regiões nas quais as ondas se anulam. Desta forma, várias convergências segregadas de ondas que se sobrepõem e se somam, classificam um guiamento multimodo e apenas um ponto de sobreposição de várias ondas somadas, classifica um guiamento monomodo.

### 2.2.3. Atenuação

A atenuação é a diminuição da intensidade luminosa propagada internamente a um guia de onda, ou seja, é a diferença entre a potência luminosa inserida na entrada do guia e a potência captada no fim. O estudo dos guias de onda divide a atenuação em alguns fatores que permitem avaliar, separadamente, quais são as causas da atenuação observada. Esses fatores estão relacionados ao processo de fabricação dos guias através da escolha dos materiais e métodos que são empregados em sua construção. Esses fatores são divididos em:

Perdas por Absorção – Associa-se com a dissipação da potência a) luminosa em forma de calor, sendo perdida devido ao material empregado. A presença de contaminantes no material dielétrico acentua essa perda, porém, excluindo-os dos materiais dielétricos, a absorção pode ser considerada nula. O uso de um substrato de silício, na construção de guias de ondas, torna este mecanismo de atenuação relevante na análise, pois o substrato de silício absorve no comprimento de onda da luz visível, consequentemente, o substrato deve ser isolado do filme que forma o núcleo do guia de onda por uma camada dielétrica com espessura suficiente para minimizar a transferência de potência da luz propagada para o substrato [20]. A espessura (~1 µm) necessária para essa isolação é realizada, nesta pesquisa, pela técnica de oxidação térmica e optou-se por oxidação térmica úmida (subseção 3.1.7) para minimizar o tempo desse processo. Essa oxidação faz uso de vapor d'água (H<sub>2</sub>O), criando uma camada de SiO<sub>2</sub> (que servirá como casca do guia), porém agregada a íons hidroxila (OH<sup>-</sup>), que por sua vez, absorvem comprimentos de onda na faixa do infravermelho, mais especificamente, em 720 nm, 820 nm, 945 nm e 2,73 µm [16]. Por esta razão, utiliza-se comprimentos

de onda de 1,3  $\mu$ m e 1,55  $\mu$ m (ou entre 1  $\mu$ m e 1,7  $\mu$ m), que são consideradas janelas de baixa atenuação, ou seja, comprimentos de onda que são menos afetados por este tipo de perda.

b) Perdas por Espalhamento – Associa-se às irregularidades e composições dos filmes da estrutura, ocasionando na mudança da direção de propagação e consequentemente, a diminuição da amplitude.

c) Perdas por Irradiação – Trata-se da diminuição da energia do campo guiado devido à probabilidade de alguns fótons escaparem do guia de onda nas interfaces do núcleo devido a curvaturas dispostas no mesmo. Na interface do núcleo com a casca, o campo guiado deve satisfazer as condições de contorno, exigidas pelas leis da teoria eletromagnética, ou seja, a componente tangencial elétrica e a componente tangencial magnética que compõem a luz [21], devem se propagar com a mesma velocidade para serem mantidas, conforme Figura 12.

Figura 12 - Onda eletromagnética propagada no eixo z seccionada em sua componente tangencial elétrica (azul) oscilando no eixo x e sua componente tangencial magnética (vermelha) oscilando no eixo y



Fonte: Adaptado do Site da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porém, ao curvar o guia de onda, uma das componentes sairia do núcleo e percorreria uma maior distância do que a outra componente e esta situação requer um ajuste automático na velocidade, para que essa onda eletromagnética não se perca, conforme Figura 13.

Figura 13 - Demonstração de ajuste automático da velocidade das componentes devido a ultrapassagem da componente elétrica em diferentes meios.



Fonte: autor.

Esse ajuste automático é limitado a uma distância crítica, que seria a distância no qual a velocidade de ajuste (v) requerida seja menor do que a velocidade da luz propagada no vácuo (c). Caso contrário, por ser fisicamente impossível, que a velocidade de ajuste do meio seja igual ou superior a velocidade da luz propagada no vácuo, perde-se energia dessas ondas propagadas nas interfaces curvas e são gerados os modos de irradiação, que são as ondas menos intensas que os modos guiados (ondas que, idealmente, não sofrem atenuações). Esses modos de irradiação formam o campo evanescente [20], conforme Figura 14, que pode ou não ser absorvida pelo substrato caso entre em contato com ele.





Fonte: Siarkowski (2007, p. 26).

A fim de minimizar este tipo de perda em guias de onda, deve-se aplicar um alto contraste de índice de refração devido ao alto confinamento óptico da luz na região do núcleo [5] ou diminuir o comprimento de onda para que não seja ultrapassada a distância crítica das condições de contorno comentadas anteriormente.

d) Perda por Acoplamento – Associa-se às rugosidades e defeitos presentes na face de entrada de um guia construído sobre substrato de silício, devido ao corte da lâmina, também à aplicação de um comprimento de onda maior do que a dimensão do núcleo e principalmente a reflexão da luz observada na entrada do guia. As irregularidades dificultam o acoplamento da luz em um guia de onda, pois o acoplamento depende da sua focalização na extremidade do guia, do ângulo de inserção, das dimensões do guia e dos índices de refração das camadas que envolvem o núcleo. O acoplamento em ângulos inadequados ou em guias com
dimensões muito menores do que metade do comprimento de onda incidente comprometem a quantidade de luz acoplada, podendo causar altas perdas. Por este motivo, busca-se otimizar as irregularidades do guia para aumentar a quantidade de energia efetiva dentro dos mesmos [9].

#### 2.3. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE GUIAS DE ONDA

Considerando os conceitos acima, inicia-se o projeto do guia de onda, ou seja, a construção de suas dimensões. Sabe-se que o guia é composto por núcleo e casca, assim como as fibras ópticas, que por sua vez, apresenta formato cilíndrico e diversas camadas, porém, na microeletrônica, geralmente, utiliza-se o formato paralelogramo, conforme Figura 15, possibilitado pelo processo de fabricação utilizado na construção de transistores e tantos outros componentes de dimensões micrométricas [5].





Fonte: Camilo (2014, p. 28).

Nota-se pela Figura 15 que, as dimensões são semelhantes, porém, o que as diferem são as etapas de suas construções. Com foco em obter a melhor transmissão da luz e reduzir o custo do processo de fabricação, esta pesquisa bibliográfica demonstra, pelo processo de evolução que já passou [2-15], um resultado promissor sobre os guias de onda do tipo pedestal.

Na sequência, serão apresentadas as primeiras pesquisas do grupo (subseção 2.3.1) e em seguida, as motivações e justificativas da alteração na

configuração e o aprimoramento alcançado em relação à esta nova estrutura adotada (subseção 2.3.2).

#### 2.3.1. Guias de onda com estrutura rib

Os guias de onda *rib* são construídos, primeiramente, em uma sobreposição (deposições sucessivas) de camadas e depois em etapas de litografia e corrosão [4], conforme Figura 16.

1. Limpeza da Lâmina	5. Exposição
2. Oxidação Térmica Seca	6. Revelação
3. Deposição do Filme vitreo por rf- sputtering	7. Corrosão parcial por plasma

Figura 16 - Etapas para confecção dos guias de onda tipo rib

Deposição do Fotoresis

4. Deposição do Fotoresiste 8. Remoção do Fotoresiste

Fonte: Da Silva (2013, p. 104).

A partir da lâmina de Si, realizava-se a limpeza e oxidação dela, criando uma camada de SiO<sub>2</sub> de 1 µm. Depois, efetuava-se a deposição do filme fino por RF-*Sputtering* que formaria o núcleo, sobre o SiO<sub>2</sub>. Realizava-se a litografia para delimitar as regiões que formariam o guia de onda e corroíam-se parcialmente as laterais do guia por corrosão por plasma. Essa corrosão por plasma continha a configuração *RIE* (*Reactive Ion Etching*) e injetava-se um gás eficiente para a corrosão do material do núcleo. Porém, este processo limitava a diversificação das matrizes que poderiam compor o núcleo do guia devido a etapa de corrosão a ser realizada no mesmo.

Ainda assim, os guias de onda *rib* apresentaram baixos valores de perda por propagação e significativos valores de ganho interno (conforme Figura 17), onde, também demonstram ser eficazes para aplicações em amplificadores ópticos [10].

Figura 17 - Resultados obtidos em guias de onda tipo *rib* de perda por propagação com diferentes comprimentos de onda (à esquerda) e resultados de ganho interno com e sem nanopartículas (à direita)



Fonte: Da Silva (2014).

# 2.3.2. Guias de onda com estrutura pedestal fabricadas com e sem máscara de cromo

Os guias de onda pedestais consistem, primeiramente, em formar a estrutura (em forma de pedestal) e depois em depositar o filme que forma o núcleo, sem a corrosão do mesmo, conforme Figura 18.

Figura 18 - Estrutura pedestal construída sem núcleo (esquerda) e guia com núcleo depositado e isolado sem necessidade de corrosão posterior (direita).





Fonte: autor.

Os métodos (sem ou com máscara de cromo, descritos na subseção 2.6) para formação da estrutura pedestal apresentam vantagens em relação aos guias de onda *rib* ao proporcionar maior diversificação de matrizes para formação do núcleo, pois esta camada não será corroída, excluindo, por sua vez, estudos sobre quais gases, soluções ou processos são mais adequados para sua remoção, resultando no perfil final apresentado na Figura 19.





Fonte: autor.

## 2.4. PLASMONS DE SUPERFÍCIE E A INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES ÓPTICAS DE GUIAS DE ONDA

Para otimizar o confinamento da luz na região do ultravioleta ao infravermelho pode ser utilizado o efeito estudado pela Plasmônica denominado plasmons de superfície (PS) [22]. Este efeito é decorrente das oscilações coletivas de elétrons na superfície das nanopartículas (com diâmetro de até 100 nm), após a interação com a radiação eletromagnética. PS são ondas que se propagam na superfície de condutores (nesse caso, metal) e são essencialmente ondas de luz armadilhadas na superfície, conforme Figura 20 [23-26].



Figura 20 - Esquema para oscilação Plasmônica de uma esfera, mostrando o deslocamento de uma nuvem dos elétrons de condução em relação ao núcleo

Fonte: Da Silva (2007, p. 45).

Nota-se também que, as bandas de absorção associadas aos plasmons são diferentes entre si, pois variam de acordo às características das NPs, bem como com o tipo de material, forma, distribuição de tamanhos e o meio hospedeiro onde se encontram [23, 24, 27], conforme Figura 21.





Fonte: Pereira (2009, p. 21).

A posição e forma da banda de absorção das NPs dependem da função dielétrica do meio envolvente, portanto, um aumento da função dielétrica acarreta um aumento na intensidade e largura da banda de plasmon; partículas facetadas, por exemplo, favorecem o deslocamento do comprimento de onda de ressonância para valores maiores (em direção ao infravermelho), conforme Figura 22 [27].



Figura 22 – Interferência da forma das NPs na posição das bandas de absorção dos plasmons de superfície em coloides com NPs de prata

Fonte: Bomfim Jr. (2008, p. 21).

Verifica-se também os efeitos que podem influenciar a luminescência dos íons de terras-raras na presença de nanopartículas metálicas. Um dos efeitos refere-se ao aumento do campo local em torno das nanopartículas metálicas que aumenta a densidade de íons excitados posicionados a distâncias adequadas, nas vizinhanças das nanopartículas. Este efeito é maior para nanopartículas pequenas e facetadas. Outro efeito refere-se ao aumento das taxas radiativas. Cabe acrescentar ainda que a influência das nanopartículas na eficiência da luminescência dos íons de terrasraras será maior quando a frequência da luz incidente (excitação) e da transição associada aos íons de terras raras estiverem próximas a da frequência de ressonância dos plasmons. Entretanto, a redução da luminescência é observada, quando há transferência de energia dos íons de terras-raras para a nanopartícula, o que ocorre quando os íons de terras-raras se encontram a uma distância menor do que  $\approx$  5 nm da nanopartícula metálica. Quando a distância for maior compreendiada entre 5 e 20 nm e a excitação se der em frequência próxima ou igual a dos plasmons poderá haver transferência de energia das nanopartículas metálicas para os íons de terras-raras e ocorrência do aumento da luminescência.

Descobriu-se também que deve haver concentração adequada das nanopartículas depositadas em guias de onda; grandes concentrações depositadas podem comprometer o guiamento da luz e o desempenho do guia de onda. Desta forma, é necessário controle adequado da deposição que deve ocorrer em curto período [12], conforme Figura 23, que mostra que maiores tempos de deposição conduzem a maiores perdas por propagação (sobretudo para os guias mais estreitos), com consequências no ganho, conforme será visto no item a seguir.



Figura 23 – Resultados obtidos de perda por propagação em guias sem e com NPs depositadas durante 10 e 20 minutos, tratados por 1 hora

Fonte: De Assumpção (2017, p. 523).

#### 2.5. SIMULAÇÕES EM GUIAS DE ONDA COM O PROGRAMA OPTIFDTD

O programa OPTIFDTD (Programa de simulação de fotônica de domínio de tempo de diferença finita) foi escolhido para efetuar simulações dos guias de onda construídos nesta pesquisa, a fim de, demonstrar a quantidade de modos propagados no seu interior e permitir a comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

Inicialmente, deve-se incluir os materiais a serem utilizados, informando o índice de refração de cada um deles. Em seguida, são introduzidas as dimensões que compõem o perfil do dispositivo a ser construído, como, por exemplo, o material das camadas (pedestal e núcleo) com suas respectivas larguras e espessuras. Por fim, introduz-se o comprimento e se obtém a projeção bidimensional e tridimensional do dispositivo projetado, conforme Figura 24.





Fonte: OptiFDTD: Tutorials (2013, p.44).

Após a construção do dispositivo, é possível simular o número de modos guiados que são obtidos em cada estrutura para um determinado comprimento de onda. Desta forma, o programa apresenta a quantidade total de modos encontrados, bem como sua distribuição no dispositivo, conforme Figura 25.



Figura 25 - Obtenção dos modos guiados no simulador OPTIFDTD

Fonte: OptiFDTD: Tutorials (2013, p. 94).

A escolha desse simulador foi motivada pelos resultados de trabalhos desenvolvidos na área da Óptica Integrada [28-30] e a sua versão 32*bits*[31] ser gratuita para utilização.

#### 2.6. ESTADO DA ARTE

A origem da linha de estudos aplicados nessa pesquisa, provém de uma sequência de otimizações realizadas pelo grupo, onde, partiu-se de guias de onda tipo *rib*, apresentados na subseção 2.3.1 e que resultou em guias de onda tipo pedestal, conforme subseção 2.3.2.

O processo de construção estabelecido consistia em corroer o núcleo do guia de onda para criar a estrutura *rib*, conforme Figura 26(a) e para o caso do guia pedestal a corrosão era feita em dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), conforme Figura 26(b).

Figura 26 - Representação de um guia de onda tipo *rib* (a) e um guia de onda tipo pedestal (b). Imagens de MEV de guias ARROW (c) e de guias de onda pedestal com aplicações em dispositivos de polarização única (d)





Ao analisar o perfil de ambos, percebia-se alta rugosidade lateral nos guias de onda tipo pedestal, conforme Figura 27.



Figura 27 - Imagens obtidas por MEV de guia de onda tipo rib (à esquerda) e tipo pedestal (à direita)

Fonte: Da Silva (2013, p. 160).

Devida a alta rugosidade lateral dos guias pedestais, foram realizados novos testes para aprimorar sua construção. A maioria dos testes realizados consistiram em contornar o problema ocasionado ao utilizar a máscara de cromo, até então, necessária para obtenção do perfil do guia pedestal.

A máscara de cromo era necessária para manter a região do guia protegida durante o processo de corrosão do SiO<sub>2</sub>, caso contrário, a superfície do guia também ficaria irregular, lembrando que, o fotorresiste também é atacado durante essa etapa de corrosão e por isso, era inviável ser utilizado como máscara para a definição da região do guia. O problema trazido pela máscara de cromo é conhecido como efeito *micromasking*, nome dado à migração de algumas partículas da máscara de cromo para a superfície do material a ser corroído (SiO<sub>2</sub>), criando uma micromáscara que impede a corrosão uniforme do material desejado, resultando em alta rugosidade a superfície lateral ao guia. O processo de construção dos guias está apresentado na Figura 28.



# Figura 28 - Representação simplificada do processo com máscara de cromo utilizado para construção dos guias de onda pedestais

Fonte: Bomfim Jr. (2016, p. 79).

Os testes e otimizações realizados consistiram em controle e mudanças nas etapas de processos utilizados com a finalidade de diminuir a rugosidade lateral dos guias. Foi realizado o controle na imersão da lâmina (*dip*) em solução de ácido nítrico (RCA) após cada etapa de corrosão, a fim de, remover partículas de cromo da superfície corroída [5]. Outra otimização obtida foi pela definição da estrutura pedestal a partir do controle na repetição das etapas de corrosão por plasma com CHF<sub>3</sub>/O<sub>2</sub>, conciliada com o controle dos *dips* após o processo de corrosão e acrescentada da redução da espessura da máscara de cromo em 70% (de 400 nm passou a ser 120 nm) [7, 8], permitindo assim, a redução de rugosidade lateral do guia, conforme Figura 29.

Figura 29 - Imagens obtidas por MEV demonstrando o antes (à esquerda) e o depois (à direita) das otimizações empregadas para diminuir a rugosidade lateral dos guias



Fonte: Bomfim Jr. (2015, p. 198).

Como consequência a diminuição das perdas por propagação e o aumento do ganho interno máximo foram verificados, como demonstram a Figura 30. Porém, por mais efetivo que fosse, não era eliminado o efeito de *micromasking*.

Figura 30 - Resultados de perda por propagação (à esquerda) e do ganho interno (à direita) após controle na repetição das etapas de corrosão por plasma com CHF<sub>3</sub>/O<sub>2</sub> e redução da máscara da espessura da máscara de cromo em 70%





Este novo processo foi também aplicado em guias GeO<sub>2</sub>-PbO dopados com Yb<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup> cujos resultados de ganho estão apresentados na Figura 31.



Figura 31 - Resultados de ganho relativo em guias de GP dopados com Yb<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup>

Fonte: De Assumpção (2017, p. 523).

O mesmo procedimento foi usado em guias de  $Bi_2O_3 - WO_3 - TeO_2$  dopados com íons de  $Er^{3+}$  e Yb<sup>3+</sup> para amplificação em ~1500 nm onde os resultados principais são apresentados na Figura 32.





Fonte: Del Cacho (2014, p. 202).

E sem dopante para estudos com interferômetro de Mach Zehnder, conforme Figura 33.



Figura 33 - Resultados de perda por propagação em guias de onda de Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> –WO<sub>3</sub>-TeO<sub>2</sub> sem dopantes (a), os modos obtidos na saída dos guias com diferentes larguras (b) e estrutura Mach-Zehnder construída simultaneamente aos guias de onda (c)

Fonte: Camilo (2014, p. 228).

Ainda na linha de pedestais de germanato foram realizados estudos em guias de GeO<sub>2</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> codopados com íons de Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup> e nanopartículas de Si para amplificação em 1530 nm, conforme Figura 34.

Figura 34 - Resultados de Ganho Relativo em guias de GeO<sub>2</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com e sem NPs de silício



Fonte: Wetter (2019, p. 124).

Por fim, foi proposto um novo processo de construção dos guias de onda, que ao invés de criar o pedestal no SiO<sub>2</sub>, cria-se o pedestal no substrato de Si usando somente a máscara de fotorresiste, conforme Figura 35 [9, 13].



Figura 35 - Processo atual (sem máscara de cromo) de construção dos guias de onda

Fonte: Bomfim Jr. (2016, p. 89).

Como comentado, durante o processo de corrosão do SiO<sub>2</sub>, o fotorresiste também é atacado, porém, com este processo desenvolvido, não há importância em ocorrer este ataque, pois o SiO<sub>2</sub> usado como máscara para a corrosão do Si, após a corrosão, é totalmente removido, eliminando assim, as imperfeições que carrega em sua superfície. Uma nova oxidação é realizada, garantindo a planicidade e o degrau para a deposição do material que formará o núcleo. O resultado do perfil obtido por esse novo processo está apresentado na Figura 36.

Figura 36 - Imagem obtida por MEV demonstrando a eliminação da rugosidade lateral após a eliminação da máscara de cromo no processo de construção



Fonte: Bomfim Jr. (2018, p. 436).

Este avanço proporcionou grandes vantagens, pois diminuiu as irregularidades laterais do guia, minimizou a quantidade de etapas do processo de obtenção da estrutura pedestal e maximizou o seu desempenho; resultados a seguir mostram diminuição da perda por propagação para guias de GeO<sub>2</sub>-PbO feitos sem máscara de cromo emcomprimento de onda de 1068 nm, conforme Figura 37.





Fonte: Bomfim Jr. (2018, p. 437).

Também foi possível obter ganho de 7,8 dB/cm, usando a mesma composição de núcleo [13] dopado com íons de Yb<sup>3+</sup> e Er<sup>3+</sup> e nanopartículas de ouro, conforme Figura 38.



Figura 38 - Resultados de ganho interno após eliminação da máscara de cromo no processo de construção

Fonte: Bomfim Jr. (2018, p. 438).

As NPs têm demonstrado aumento no ganho relativo dos guias quando comparados aos mesmos guias sem NPs adicionadas, independentemente da estrutura, ser *rib* ou pedestal. Este efeito foi abordado com guias compostos de núcleos codopados com terras-raras e foi justificado pelo aumento na fotoluminescência dos íons de terra-rara provocados por essa nucleação superior advinda das NPs.

Quanto ao material do núcleo, o grupo produziu guias usando as composições GeO<sub>2</sub>-PbO e Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WO<sub>3</sub>-TeO<sub>2</sub> [4-13]. Para o primeiro caso foram produzidos guias *rib* passivos e guias *rib* dopados com  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  e NPs de ouro [4,10], guias pedestais dopados com Yb<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup> e NPs de ouro [7, 12] e com  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  e NPs de ouro [4, 8, 9, 13]. Para o segundo núcleo acima citado, foram produzidos guias pedestais dopados com  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  [11] e estruturas Mach-Zehnder [5, 6]. Baseando-se nos resultados promissores já obtidos e com a finalidade de reproduzir o novo processo desenvolvido para a estrutura pedestal, sem máscara de cromo, esta pesquisa faz uso do núcleo de GeO<sub>2</sub>-PbO (GP) já estudado para guias

ativos dopados com Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> [13] para otimizar as perdas por propagação na presença de ilhas de ouro em guias passivos. A outra contribuição do trabalho, refere-se ao uso do núcleo de TeO<sub>2</sub>-ZnO (TZ) em guias pedestais, também produzidos sem a máscara de cromo, não estudado anteriormente pelo grupo.

Pretende-se otimizar as perdas por propagação na presença de ilhas de ouro em guias passivos com núcleos GP e TZ e também desenvolver novos procedimentos que permitam o guiamento no visível para o núcleo GP na ausência da máscara de cromo. Cabe ressaltar, que guias *rib* e guias pedestal com máscara de cromo apresentam guiamento no visível quando usado o núcleo GP. [3, 8]

#### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DOS GUIAS DE ONDA PEDESTAIS SEM MÁSCARA DE CROMO

A construção dos guias de onda tipo pedestal se inicia com lâminas de silício pré-fabricadas tipo P com orientação cristalográfica (100) que serão processadas sequencialmente conforme a seguir.

#### 3.1.1. Limpeza das lâminas

Efetua-se o processo de limpeza, para garantir uma boa qualidade de superfície e diminuir possíveis contaminações na lâmina de silício. A limpeza aplicada consiste na sequência padronizada a seguir [5]:

1. Enxágue em água deionizada (DI) por 5 minutos para remoção de particulados;

2. Imersão em solução de 4H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ácido sulfúrico) + 1H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (peróxido de hidrogênio) por 10 minutos. Esta etapa é denominada de limpeza piranha e produz uma reação exotérmica cuja temperatura da solução é maior do que 100°C, o que não necessita de aquecimento. É utilizada para remoção de compostos orgânicos, pois o ácido sulfúrico carboniza compostos orgânicos e o peróxido de hidrogênio oxida a lâmina de silício;

3. Enxágue em água DI por 5 minutos para remoção da solução anterior;

4. Imersão em solução de 1HF (ácido fluorídrico) + 20H<sub>2</sub>O por alguns segundos até a lâmina sair seca. Esta solução é utilizada para remoção do dióxido de silício formado na etapa anterior, como o silício é hidrofóbico, quando todo dióxido for removido da superfície, ela sairá totalmente seca;

5. Enxágue em água DI por 5 minutos para remoção da solução anterior;

6. Imersão em solução de 1NH<sub>4</sub>OH (hidróxido de amônio) + 1H<sub>2</sub>0<sub>2</sub> + 5H<sub>2</sub>O por 10 minutos a uma temperatura de 60-70°C. Esta etapa é utilizada para remoção de material particulado e contaminação metálica. O hidróxido de amônio remove alguns metais através da formação de um íon complexo solúvel em água;

7. Enxágue em água DI por 5 minutos para remoção da solução anterior;

8. Imersão em solução de 1HCl (ácido clorídrico) + 1H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 5H<sub>2</sub>O por 10 minutos a uma temperatura de 65-70°C. Esta etapa, juntamente com a etapa 6, é denominada de limpeza RCA. A solução a base de ácido clorídrico remove todos os metais que não são removidos na etapa 6. O peróxido de hidrogênio oxida a lâmina e os metais;

9. Enxágue em água DI por 5 minutos para remoção da solução anterior;

10. Imersão em solução de 1HF + 20H<sub>2</sub>O por alguns segundos até a lâmina sair seca. Esta limpeza tem a mesma função da limpeza explicada na etapa 4

11. Enxágue em água DI por 5 minutos para remoção da solução anterior.

A seguir, na Figura 39, demonstra-se o estado do substrato de silício após afinalização deste processo.



Figura 39 – Ilustração do guia de onda após o processo de limpeza da lâmina

Fonte: Adaptado de Bomfim Jr. (2016, p. 89).

#### 3.1.2. Oxidação térmica seca do silício

Após a limpeza, as lâminas são introduzidas no forno convencional da *Thermco Systems* no Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) da USP, onde, permanecem durante 50 minutos a uma temperatura de 1150°C com fluxo de gás oxigênio (O<sub>2</sub>) em uma vazão constante. Terminado o período, é esperado cerca de 140 nm de espessura de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>). Nesse filme será transferido o padrão com as dimensões dos guias de onda e servirá de máscara de corrosão do silício.

A seguir, na Figura 40, demonstra-se o estado do filme de dióxido de silício após a finalização deste processo.



Figura 40 - Ilustração do guia de onda após o processo de oxidação térmica seca do silício

Fonte: Adaptado de Bomfim Jr. (2016, p. 89).

#### 3.1.3. Litografia óptica

O processo de litografia consiste na transferência do padrão (desenho de vista superior do guia) para a lâmina. A máscara utilizada para a corrosão do dióxido de silício foi o fotorresiste, que envolve a lâmina através da técnica de *spin coating* configurado conforme Tabela 1.

Tabela 1	- Parâmetros	utilizados na	técnica	de spin coating
----------	--------------	---------------	---------	-----------------

Velocidade (rpm)	4000
Tempo (s)	50

O fotorresiste é um composto orgânico que é sensibilizado pela radiação ultravioleta (UV), alterando suas ligações moleculares e ficando mais suscetível ou não a sua remoção ao ser imergido na composição do revelador. A combinação entre a máscara (placa de quartzo) e fotorresiste é que define as regiões que serão sensibilizadas ou não. Por exemplo, neste trabalho, utilizou-se fotorresiste positivo e máscara de campo claro. O fotorresiste positivo ao ser sensibilizado por radiação ultravioleta tende a ser removido no ácido que compõe o revelador e a máscara de campo claro protege as regiões que formarão os guias, permitindo a sensibilização somente das regiões laterais dos mesmos, para assim, criar a separação entre eles, conforme Figura 41.





Fonte: Da Silva (2013, p. 108).

Por estas razões, o fotorresiste é armazenado em frascos que não transpassem a luz (que podem conter uma parcela de raios UV) e mantido em ambientes de temperaturas abaixo da temperatura ambiente, caso contrário, perde sua propriedade de ser sensibilizado, pois o solvente presente no fotorresiste é evaporado, deixando-o duro e difícil de aplicá-lo.

Após essas considerações, a sequência estabelecida é padronizada nas seguintes etapas:

 Aplicação do fotorresiste com solvente por spin coating na superfície da lâmina;

- Evaporação parcial do solvente presente no fotorresiste, aquecendo-a em um hot plate a uma temperatura de 100°C por 50 segundos;
- 3. Exposição à radiação UV (durante 45 segundos);
- Revelação remoção das regiões sensibilizadas através da imersão da lâmina no revelador AZ 300 MIF Developer diluído em água na proporção de 4:1 (durante 40 segundos);
- Evaporação quase total do solvente, também em *hot plate* com temperatura de 115°C por 2 minutos, para fixação do fotorresiste restante na lâmina que será usado como máscara de corrosão do dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>).

A seguir, na Figura 42, demonstra-se o estado do fotorresiste após a finalização deste processo.



Figura 42 - Ilustração do guia de onda após o processo de litografia óptica

Fonte: Adaptado de Bomfim Jr. (2016, p. 89).

#### 3.1.4. Corrosão úmida do dióxido de silício

Com o padrão transferido e desenhado pelo fotorresiste endurecido, inicia-se o processo de corrosão do dióxido de silício. A solução utilizada que proporcionará uma alta seletividade (aproximadamente 100:1) entre o dióxido de silício e o silício é a solução BOE (*Buffer Oxide Etch*). Essa solução tampão conta com reagente, ácido fluorídrico (HF) e fluoreto de amônio (NH<sub>4</sub>F) para manter a taxa de corrosão constante e favorecer também a seletividade entre o dióxido de silício e o fotorresiste [9].

O processo durou cerca de 1 minuto e 40 segundos, sendo a taxa de corrosão de dióxido de silício de 100 nm/min. Dessa forma, os 140 nm de espessura de dióxido de silício foram removidos nas regiões não protegidas pelo fotorresiste.

A seguir, na Figura 43, demonstra-se o estado dos filmes após a finalização deste processo.



Figura 43 - Ilustração do guia de onda após o processo de corrosão úmida do dióxido de silício

Fonte: Adaptado de Bomfim Jr. (2016, p. 89).

#### 3.1.5. Corrosão do silício

O silício exposto será corroído parcialmente e para esse processo, utilizou-se um reator de plasma com fonte de Rádio Frequência (RF) configurado como RIE (*Reactive Ion Etching*) [32], conforme Figura 44. O equipamento utilizado está localizado no Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP).





Fonte: Yamamoto (2017).

Essa configuração promove um perfil anisotrópico, porém, o gás SF<sub>6</sub>, utilizado para corrosão do silício, promove um perfil isotrópico devido a presença do flúor, que reage espontaneamente com o silício em temperatura ambiente, resultando em um perfil parcialmente isotrópico na corrosão realizada. O processo removeu cerca de 1,1 µm de silício e contou com os parâmetros descritos na Tabela 2 [9].

Parâmetros	Condições
Pressão	68mTorr
Potência RF	100 W
Fluxo de SF <sub>6</sub>	26 sccm
Tempo	1 min e 45 segundos

Tabela 2 - Parâmetros da c	corrosão do silício
----------------------------	---------------------

Fonte: autor.

A seguir, na Figura 45, demonstra-se o estado do guia de onda após a finalização deste processo.

Figura 45 - Ilustração do guia de onda após o processo de corrosão do silício



Fonte: Adaptado de Bomfim Jr. (2016, p. 89).

#### 3.1.6. Remoção total do fotorresiste

Neste ponto, as regiões de separação entre os futuros guias já estão construídas e a próxima etapa será o crescimento do dióxido de silício para estabelecer as estruturas pedestais onde serão depositados os filmes que comporão

o núcleo do guia. Por esta razão, remove-se totalmente o fotorresiste. Para esse processo foram utilizados dois béqueres em superfície aquecida, onde, a lâmina foi imergida no primeiro, contendo acetona ((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO), durante 15 minutos e depois no segundo, contendo isopropanol (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O), também durante 15 minutos.

Também é reaplicada a limpeza descrita na subseção 3.1.1, que removerá as impurezas dos processos anteriores e a camada restante de dióxido de silício (que estava protegida pelo fotorresiste).

A seguir, na Figura 46, demonstra-se o estado do guia de onda após a finalização deste processo.



Figura 46 - Ilustração do guia de onda após o processo da nova limpeza da lâmina

Fonte: Adaptado de Bomfim Jr. (2016, p. 89).

#### 3.1.7. Oxidação térmica úmida do silício

Com a lâmina limpa e com os degraus formados no silício, executa-se a oxidação térmica úmida do silício para isolá-lo do núcleo do futuro guia, pois, o silício absorve a luz infravermelha, ou seja, absorve uma faixa dos comprimentos de onda que se deseja confinar nos guias deste trabalho. Para essa isolação é necessário um óxido espesso e por este motivo, usou-se a oxidação térmica úmida, pois ela promove um crescimento mais acelerado do óxido por usar vapor d'água como composto oxidante. O forno utilizado neste processo foi disponibilizado pelo Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP).Esse processo foi parametrizado conforme Tabela 3 para obter o dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) com espessura aproximada a 1,5 µm.

Parâmetros	Condições
Fluxo de O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	2 litros/min
Temperatura	1150 °C
Tempo	6 horas

Tabela 3 - Parâmetros da oxidação térmica úmida

Fonte: autor.

Além de isolante, o dióxido de silício servirá de casca para o guia e promoverá uma maior planicidade para deposição do filme que constituirá o núcleo.

A seguir, na Figura 47, demonstra-se o estado do guia de onda após a finalização deste processo.

Figura 47 - Ilustração do guia de onda após o processo de oxidação térmica úmida do silício



Fonte: Adaptado de Bomfim Jr. (2016, p. 89).

#### 3.1.8. Deposição da matriz com e sem fluxo de O2

Terminada as etapas anteriores, deposita-se o filme que comporá o núcleo. Para este processo, utilizou-se um equipamento RF *Magnetron Sputtering*, disponibilizado no Laboratório de Tecnologia em Materiais Fotônicos e Optoeletrônicos (LTMFO) na Fatec – SP. Esse equipamento obedece aos princípios descritos na subseção 2.1 e possuem sua configuração conforme Figura 48 e Figura 49.



Figura 48 - Esquema do equipamento de RF Magnetron Sputtering instalado na FATEC-SP

Fonte: Da Silva (2013, p.97).





Fonte: Da Silva (2013, p.97).

Cabe acrescentar que no interior da câmara de vácuo, observa-se a seguinte estrutura (conforme Figura 50):

1. Porta amostra: acomoda 4 lâminas de silício de 3 polegadas. O porta amostra está acoplado a uma haste giratória, para promover maior uniformidade na deposição e reduzir o efeito de sombras;

2. Medidor de espessura: é um sistema com um cristal de quartzo que possibilita a medição da espessura do filme depositado "in-situ" tendo como base a densidade do material;

3. Anteparo (*Shutter*): elemento móvel que controla a quantidade de material ejetado do alvo direcionado ao substrato. Na Figura 50, o anteparo está totalmente fechado, esta posição impossibilita a chegada de material ao substrato. Durante a deposição o anteparo permanece totalmente aberto. Cada porta alvo possui seu próprio anteparo;

4. Porta alvo 1: acomoda um dos alvos utilizados neste trabalho;

5. Porta alvo 2: acomoda um segundo alvo para co-deposição (deposição simultânea de dois materiais), caso seja necessário.

Figura 50 - Interior da câmara de deposição do equipamento de Sputtering da FATEC-SP



Fonte: Da Silva (2013, p.98).

A seguir, na Figura 51, demonstra-se o estado do guia de onda após a finalização deste processo.



Figura 51 - Ilustração do guia de onda após o processo de deposição da matriz

Fonte: Adaptado de Bomfim Jr. (2016, p. 89).

#### 3.2. DEPOSIÇÃO DAS ILHAS DE OURO NOS GUIAS DE ONDA

A deposição das ilhas de ouro na superfície do núcleo do guia é realizada no mesmo equipamento da subseção 3.1.8 (RF *Magnetron Sputtering*), porém, inclui-se o anteparo perfurado, apresentado na Figura 52.



Figura 52 - *Shutter* perfurado (forma de "peneira") usado no processo de deposição e formação das ilhas de ouro

Fonte: autor.

A razão de utilizar este anteparo consiste na ideia de pulverizar ouro na superfície do guia e evitar uma camada uniforme de ouro, pois, observa-se na literatura [12] e experimentalmente que, a partir de uma determinada quantia de ouro, extingue-se o sinal que seria confinado no guia. Com este cuidado, também, utiliza-se pequenos

tempos de deposição e baixa potência, por exemplo, os parâmetros [9] utilizados nestetrabalho, descritos na Tabela 4. Os resultados serão discutidos na subseção 4.1.

Parâmetros	Condições
Pressão de Trabalho	5mTorr
Potência	6 W
Fluxo de Gás de Argônio	18 sccm
Tempo	5 min

Tabela 4 - Parâmetros utilizados na deposição das ilhas de ouro

Fonte: autor.

A seguir, na Figura 53, demonstra-se o guia de onda após a finalização deste processo.



Figura 53 - Ilustração do guia de onda após o processo de deposição das ilhas de ouro

Fonte: Adaptado de Bomfim Jr. (2016, p. 89).

#### 3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS GUIAS DE ONDA PEDESTAIS

Os equipamentos e técnicas utilizadas para analisar o resultado do processo de construção e do confinamento da luz no guia de onda estão descritos nas subseções a seguir.

#### 3.3.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A primeira análise realizada nesta pesquisa consiste na observação do perfil resultante do processo de construção dos guias de onda. Através dessa análise, pode-se conferir a rugosidade de superfície, as camadas construídas e suas espessuras, além de, varrer todo o eixo longitudinal do guia em busca de trincas ou defeitos estruturais.

Para esta análise, cliva-se uma região da lâmina processada com os guias e aplica-se, uma das partes clivadas, no equipamento JEOL do Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais (LPCM) da Fatec – SP, conforme Figura 54.



Figura 54 – Equipamento que realiza a Microscopia Eletrônica de Varredura instalado na FATEC-SP

Fonte: autor.

O equipamento executa a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que consiste na emissão de um feixe de elétrons (originários de um filamento de tungstênio) que colide em uma região da superfície a ser analisada e reflete para o detector de elétrons ou fótons, convertendo essa informação em imagem. Uma técnica utilizada para otimizar a nitidez da imagem em materiais dielétricos é a deposição de uma fina camada de ouro sob toda a superfície da lâmina clivada antes de observá-la no microscópio eletrônico de varredura. Porém, torna-se um processo destrutivo para análise de perda por propagação nesta lâmina, por isso, é realizada a clivagem da lâmina processada. A vantagem desta técnica é sua precisão em definir dimensões nanométricas, sendo maior do que a precisão fornecida pelos microscópios ópticos.

65

Por esta razão, utilizou-se para observar o nível de rugosidade superficial que os guias de onda apresentam bem como a espessura final de cada camada construída.

#### 3.3.2. Caracterização óptica dos guias

Verificada a construção dos guias de onda, inicia-se a obtenção de dados quantitativos. A técnica utilizada para mensurar o valor de perda por propagação (dB/cm) de intensidade luminosa ao longo do guia foi a de vista superior. Ela consiste na captura de imagem do feixe propagado por uma câmera CCD (Dispositivo de Carga Acoplada) posicionada acima dos guias de onda. Supondo que a intensidade da luz espalhada é proporcional à potência luminosa guiada, pode-se medir a perda por propagação a partir da imagem de espalhamento capturada pela câmera CCD conectada ao computador. Sendo assim, para auxílio dessa obtenção, montou-se o arranjo conforme Figura 55.



Figura 55 – Arranjo usado para técnica de vista superior

Fonte: autor.

Este arranjo contém microposicionadores que possibilitam a correção e locomoção dos guias em relação a fibra que acoplará o sinal de entrada. O anteparo é utilizado para tampar o espalhamento causado entre a fibra e a entrada do guia, conforme mostra Figura 56.

Figura 56 - Fibra e guia alinhados sem acoplamento da luz (à esquerda) e comacoplamento e espalhamento da luz (à direita)



Fonte: autor.

No momento da obtenção de imagem, costuma-se apagar as luzes do ambiente e captar somente a luz confinada no guia. A imagem capturada é inserida no programa *Matrix Laboratory* (MatLab) que realiza a conversão da leitura da intensidade luminosa em valor numérico, através de uma rotina que relaciona a intensidade luminosa capturada em função do número de pixel com comprimento (L) do guia, conforme mostra Figura 57.

Figura 57 - Gráfico da intensidade luminosa capturada pela câmera CCD em função do comprimento do guia de onda



Fonte: Assumpção, (2015, p.99).

Assim, a perda por propagação ( $\alpha$ ) é calculada pela razão entre a potência de entrada e saída e entre as distâncias (inicial e final):

$$\alpha = -10 \times \frac{(\log(\frac{P_2}{P_1}))}{Z_2 - Z_1}$$
(4)

Na equação acima, P1 é a potência numa dada posição inicial Z1 e P2 é a potência em uma dada posição final Z2 (Z2>Z1) [20].

Dessa forma, foi possível determinar o valor das perdas por propagação em todos os guias.

#### 3.3.3. Análise dos modos de propagação

A obtenção de modos de propagação pode ser realizada simultaneamente ou separadamente da técnica de vista superior, sendo necessária a adição de uma lente objetiva de magnificação de 10 vezes do lado esquerdo do arranjo, conforme a Figura 58.

Figura 58 – Arranjo com a adição de uma lente objetiva para ampliação e detecção dos modos guiados



Fonte: autor.

Após a luz atravessar o guia e ser ampliada na referida lente, ajusta-se um fotodetector para capturar essa intensidade luminosa e convertê-la, através do programa *Newport LPB Series* em uma imagem. Desta forma, torna-se possível supor o número de modos guiados existentes em cada um dos guias.

#### 3.3.4. Microscopia de Força Atômica (AFM)

O estudo da morfologia das ilhas de ouro depositadas sobre os guias de onda nesta pesquisa foi realizado pela técnica de microscopia de força atômica (AFM). Esta técnica realiza a varredura do relevo disposto na superfície de uma amostra através de uma ponta de prova. A ponta de prova é fixada em um suporte denominado *cantilever* (microalavanca), sensível às forças de interação com a superfície. A varredura é realizada em x e em y. Durante a varredura, o *cantilever* sofre deflexões no eixo vertical devido à variação das alturas da superfície da amostra, onde, essas oscilações são convertidas em sinais elétricos que serão utilizados para o sistema de realimentação. Esse sistema de realimentação é responsável por manter a força entre a ponta e a superfície da amostra constantes, por meio da aplicação de potenciais em uma cerâmica piezoelétrica.

Assim, para medir essas deflexões, um feixe de laser incide no lado contrário ao da ponta, sendo refletido e capturado por um fotodetector, conforme Figura 59.



Figura 59 - Princípio de um equipamento de microscopia de força atômica

Fonte: Pascoali (2007, p.101).

A presença de rebaixos e sobressaltos na amostra causa deflexão momentânea no *cantilever*, desviando o feixe e a partir da detecção desse feixe refletido são desenhados os aspectos morfológicos da amostra.[33]
#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foram produzidos no laboratório guias do tipo *rib*; entretanto devido à dificuldade do processo de fabricação, não foi dada continuidade [5]. Eles foram substituídos pelos guias do tipo pedestal, que se demonstraram promissores e produziram resultados satisfatórios [4-9, 11-15]. Desde então, tem ocorrido o aprimoramento desta técnica, a fim de aperfeiçoar os processos para que conduzam a resultados cada vez melhores, conforme serão apresentados a seguir.

#### 4.1. PRODUÇÃO DOS GUIAS DE ONDA DO TIPO PEDESTAL

Os guias de onda a seguir, foram produzidos seguindo as etapas descritas anteriormente, que se iniciam no processo de limpeza (subseção 3.1.1) e finalizam no processo de deposição da matriz (subseção 3.1.8). Nesta pesquisa, foram utilizadas duas matrizes, sendo depositada cada uma em uma lâmina de silício monocristalino diferente, com um conjunto de guias pedestais já construído. A primeira matriz utilizada foi de  $TeO_2 - ZnO$  (TZ) que possui índice de refração igual a 2,08 [34] e a segunda de  $GeO_2 - PbO$  (GP) com índice de refração igual a 1,96 [35]. Iniciou-se a análise dos guias a partir da matriz de TZ, pois, além de ser promissora, observou-se o efeito de plasmons de superfície em 2018, ao incorporarmos as ilhas de ouro em sua superfície. A segunda matriz foi escolhida devido ao alto índice de refração (~2,0), larga transmissão do infravermelho (até 4,5 µm), baixa energia de fônons (máxima de 800 cm<sup>-1</sup>), alta durabilidade química e alta resistência mecânica [36], permitindo a comparação e formulação de resultados mais concretos e/ou aplicações futuras.

As lâminas de silício monocristalino após passarem pelo processo de obtenção da estrutura pedestal possuem em sua superfície conjuntos de guias de onda com largura que variam de 1 a 10 µm e mais um guia de 80 µm, totalizando 11 guias por conjunto. Todos os guias mantêm um distanciamento entre si de, aproximadamente, 90 µm, conforme Figura 60.



Figura 60 - Distanciamento e larguras dos guias de onda capturados por MEV

Obtida a estrutura completa em cada lâmina, caracterizou-se os guias de onda com ambas as matrizes separadamente, obtendo os resultados apresentados a seguir.

### 4.1.1. Resultados obtidos em guias de onda com núcleo de TeO<sub>2</sub> – ZnO (TZ)

A lâmina com núcleo de TZ foi depositada no LTMFO e seguiu as condições dispostas na Tabela 5.

Parâmetros	Condições
Pressão de Trabalho	5,5mTorr
Potência	50 W
Fluxo do Gás Oxigênio	6 sccm
Fluxo do Gás Argônio	18 sccm
Tempo	5 horas

Tabela 5 - Parâmetros utilizados na deposição da matriz de TeO<sub>2</sub>-ZnO sob os pedestais

Juntamente com a lâmina, neste processo de deposição, foi introduzido um vidro de SiO<sub>2</sub> (em outro porta amostra) para análises simultâneas do aspecto de transparência do filme depositado. A partir deste vidro, observa-se que primeiramente apresenta uma cor amarronzada e baixa transparência. Mediante a experiência obtida durante a realização da pesquisa antecessora a esta, realizou-se o tratamento térmico em ambas as partes (guias de onda e o vidro com o filme). Os parâmetros do tratamento térmico consistiram nos dados da Tabela 6.

Zho depositado em suas supernicies		
Parâmetros	Condições	
Temperatura	325 °C	
Taxa – Aquecimento	1 °C/min	
Tempo	2 horas	
Taxa – Resfriamento	1 °C/min	

Tabela 6 - Parâmetros utilizados no tratamento térmico nos guias de onda e vidro de SiO<sub>2</sub> com TeO<sub>2</sub>-ZnO depositado em suas superfícies

Fonte: autor.

Após o tratamento, observa-se maior transparência no vidro, conforme Figura 61 e consequentemente, maior transmissão da luz visível que fora imposta após o tratamento térmico nos guias de onda.





Fonte: autor.

Com a obtenção do aumento de transparência do filme, separou-se uma parte da lâmina contendo os guias de onda para obtenção do perfil do guia e outra para análises de perda por propagação. Para a visualização do perfil dos guias de onda pedestais com núcleo de TZ (pós-tratamento térmico), apresentado na Figura 62, foi utilizada a técnica de MEV, descrita na subseção 3.3.1.





Fonte: autor.

A espessura do núcleo de TZ foi de, aproximadamente, 570 nm. A espessura final do dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) que isola o núcleo do substrato de silício, obtida pelo processo de oxidação úmida (subseção 3.1.7), foi de, aproximadamente, 1,5 µm, conforme Figura 63.



Figura 63 - Espessura final do óxido obtida por MEV

Fonte: autor.

Observou-se na região do visível que para guias de 80 µm de largura a perda foi de 2 dB/cm (para comprimento de 4 mm) e para guias mais estreitos, de 3-10 µm de largura, as perdas ficaram abaixo de 6 dB/cm (para comprimento de 2 mm).Por outro lado, na região do infravermelho próximo, para guias com largura de 80  $\mu$ m a perda foi de 2,5 dB/cm e para guias mais estreitos, de 3-10  $\mu$ m, as perdas ficaram acima de 6 dB/cm; em ambos os casos o guiamento se deu ao longo de 1 mm. Os resultados são apresentados na Figura 64.

Figura 64 - Comparação entre o guiamento na região do infravermelho (980 nm) e na região do visível (632 nm) nos guias de onda com núcleo de TZ tratados por 2 horas (espessura de 570 nm); o *inset* mostra o guiamento da luz visível e infravermelho próximo nos guias TZ sem ilhas de ouro



Fonte: autor.

Nota-se que guias mais largos apresentam perdas menores do que os guias mais estreitos; isto ocorre nas regiões do visível e do infravermelho. Este fenômeno ocorre porque somente os modos de ordem superior, que possuem baixo fator de confinamento e transportam menor fração da energia total propagada, interagem com as rugosidades das paredes laterais em guias mais largos (acima de 20 µm de largura), enquanto que, em guias iguais ou mais estreitos que 20 µm de largura, os modos de ordem mais baixa, que transportam maior fração da energia total propagada, interagem também com as paredes laterais, tornando as imperfeições das paredes a fonte principal de perda nos guias mais estreitos.[37, 38]

Após a obtenção das perdas por propagação, foram obtidos os modos guiados, somente para a região do infravermelho (980 nm), conforme Figura 65, devido à quebra da fibra óptica para acoplamento da luz.



Figura 65 - Modos guiados obtidos em guias de onda com núcleo de TZ em 980 nm

Fonte: autor.

Observa-se que, para guias de onda com núcleo de TZ mais estreitos (4-10 um de largura) há a convergência de vários raios que se interferem de maneira construtiva (somando suas amplitudes) formando um ponto focal de guiamento, que poderia ser classificado como sendo, predominantemente, um quiamento monomodo por desta análise; entretanto, pelas simulações apresentadas na subseção 4.2., observa-se que se trata de um guiamento multimodo, devido ao fato de distância entre os picos de maior intensidade ser pequena, impedindo definir o número de modos existentes. O guia de 80 µm apresenta claramente guiamento multimodo. Nota-se que existe uma região de espalhamento da luz, logo abaixo do modo guiado no núcleo dos guias mais estreitos, decorrente do alto fator de confinamento proveniente do grande contraste entre os índices de refração do núcleo de TZ e o SiO<sub>2</sub>. Esse alto fator de confinamento, permite que o campo evanescente (composto pelos raios vazantes do núcleo) figue mais próximo ao núcleo, resultando em uma propagação (dos raios vazantes) pelo SiO<sub>2</sub> sem que haja absorção por parte do substrato de Si.

Após a obtenção destes resultados, foram depositadas partículas de ouro sobre esta lâmina seguindo os parâmetros e materiais descritos na subseção 3.2, a fim de obtero efeito de plasmons de superfície e verificar a influência nas perdas por propagação. Concluída a etapa de deposição do ouro é necessário um novo tratamento térmico para a formação das ilhas. Os parâmetros desse novo tratamento estão descritos na Tabela 7.

Parâmetros	Condições
Temperatura	325 °C
Taxa – Aquecimento	1 °C/min
Tempo	1 hora
Taxa – Resfriamento	1 °C/min

Tabela 7 - Parâmetros utilizados no tratamento térmico dos guias de onda e vidro de SiO<sub>2</sub> em matriz  $TeO_2$ -ZnO com ilhas de ouro

Fonte: autor.

Realizaram-se novas medidas de perda por vista superior na região do visível e do infravermelho para comparar com os resultados sem ilhas de ouro. Entretanto, não houve guiamento em ambos os comprimentos de onda após a incorporação das ilhas de ouro. Desta forma, foi repetido o tratamento térmico descrito na Tabela 7, onde, foi verificada a perda por propagação pela técnica de vista superior; neste caso, foi possível observar o guiamento para o guia com 80 µm de largura. Para guias mais estreitos há guiamento mais tênue que se dá somente no início da lâmina, apresentando altas perdas para guias estreitos (1-10 µm de largura). Realizou-se um novo tratamento totalizando cinco horas (sendo duas horas antes da deposição das ilhas e três horas após a deposição das ilhas). Após esse último tratamento, verificou-se a melhora no guiamento da luz na região do infravermelho no que diz respeito às perdas por propagação obtidas nos mesmos guias de onda com núcleo de TZ sem ilhas de ouro, conforme Figura 66.

Figura 66 - Comparação entre o guiamento na região do infravermelho (980 nm) nos guias de onda com núcleo de TZ (570 nm de espessura) sem e com ilhas de ouro com diferentes tempos de tratamento térmico



A perda por propagação, no infravermelho (980 nm), em guia de 80 µm de largura foi de, aproximadamente, 2,5 dB/cm, tanto para guias de TZ sem ilhas de ouro como para guias com ilhas de ouro. Entretanto, para guias estreitos (inferior e igual a 10 µm de largura), houve uma diminuição de 30%, aproximadamente, na perda por propagação; por exemplo, nos guias de 10 µm de largura a perda por propagação sem ilhas de ouro foi de 6,27 dB/cm, enquanto, para o mesmo guia, com ilhas de ouro, passou a ser de 4,66 dB/cm.

#### 4.1.2. Resultados obtidos em guias de onda com núcleo de GeO<sub>2</sub> – PbO (GP)

As lâminas com núcleo de GP também foram depositadas no LTMFO e seguiram as condições dispostas na Tabela 8.

Parâmetros	Condições
Pressão de Trabalho	5mTorr
Potência	50 W
Fluxo do Gás Argônio	18 sccm
Tempo	5 horas

Tabela 8 - Parâmetros utilizados na deposição da matriz de GeO<sub>2</sub>-PbO sob os guias de onda e vidro de SiO<sub>2</sub>

Neste processo de deposição, a espessura final foi de 480 nm. Também foi adicionado um vidro de SiO<sub>2</sub> com a mesma finalidade do primeiro processo descrito na subseção 4.1.1. Além desse processo, foram inclusas outras duas lâminas com diferentes tempos de deposição para comparar a perda por propagação em guias de onda com núcleo mais espesso e mais fino. O segundo processo constituiu o núcleo de GP com 410 nm de espessura (6 horas de deposição) e o terceiro processo resultou em 675 nm de espessura (10 horas de deposição). Após a deposição, também se separou uma parte de cada lâmina para obtenção do perfil do guia (por meio de MEV) e outra para verificação da perda por propagação.

Pela técnica de MEV, visualizou-se o núcleo de GP de todos os guias de onda, conforme Figura 67. Ressalta-se que todos os guias produzidos nesta pesquisa, apresentam elevações nas extremidades dos guias, independentemente do material e espessura que forma o núcleo gerado durante o processo de corrosão do silício e oxidação, que antecedem a etapa de deposição do filme que formará o núcleo [9]. Os demais parâmetros, como a espessura final do dióxido de silício (1,5 µm), o distanciamento entre guias e as larguras dos guias são iguais aos da lâmina de TZ, pois participaram do mesmo processo de fabricação.



Figura 67 –Micrografias dos guias de onda de GP com espessuras de 480 nm(a), 410 nm(b) e 675 nm(c)obtido por MEV

(C)

Fonte: autor.

Após a realização das medidas de MEV foi feito o tratamento térmico de uma hora, a fim de aliviar as tensões e aumentar a transparência óptica do filme [9]. Os parâmetros desse tratamento estão na Tabela 9.

Parâmetros	Condições
Temperatura	400 °C
Taxa – Aquecimento	1 °C/min
Tempo	1 hora
Taxa – Resfriamento	1 °C/min

Tabela 9 - Parâmetros utilizados no tratamento térmico nos guias de onda e vidro de SiO<sub>2</sub> com GeO<sub>2</sub>-PbO depositado em suas superfícies

Após o tratamento, foi realizada a medida de perda por propagação por vista superior usando *laser* de infravermelho (980 nm), conforme Figura 68. Cabe acrescentar que, os guias com 410 nm e 480 nm só apresentaram guiamento ao longo de 1 mm, enquanto que, para 675 nm o guiamento se deu em 3 mm para guias maiores do que 8 µm de largura; para os menores o guiamento se deu em aproximadamente 1 mm, devido ao aumento da perda por espalhamento.

Figura 68 - Perda por vista superior, na região do infravermelho (980 nm), em guias de onda com núcleo de GP sem ilhas de ouro, com diferentes espessuras e tratados por 1h



Fonte: autor.

Observa-se que com o aumento da espessura do núcleo de GP houve a diminuição da perda por propagação na região do infravermelho próximo.

Buscando diminuir os valores de perda foi repetido o tratamento térmico nos guias de onda com núcleo de GP de 480 nm de espessura (totalizando duas horas). A Figura 69 mostra o efeito do tratamento térmico nos resultados de perda por propagação no infravermelho. Após o tratamento de duas horas, a distância na qual o guiamento se dá alterou-se de 1 mm para 3 mm (comprimento total do guia é 4 mm) para guias maiores do que 8 µm de largura.





Fonte: autor.

Após a obtenção das perdas por propagação foram obtidos os modos guiados em cada um dos guias de onda de GP, conforme Figura 70.





Fonte: autor.

Observa-se que, assim como para os guias de onda com núcleo de TZ, os guias de onda com núcleo de GP demonstram a mesma tendência, onde, os mais

estreitos (1-10 µm de largura) apresentam, predominantemente, um guiamento monomodo e no guia de 80 µm de largura, um guiamento multimodo.

Em seguida, realizou-se a deposição de ilhas de ouro conforme descrito na subseção 3.2. seguido de tratamento térmico de uma hora para nucleação das ilhas de ouro. Inicialmente, não houve guiamento; somente após tratar por mais duas horas, totalizando três horas de tratamento térmico após a deposição das ilhas (total geral de cinco horas de tratamento térmico, duas horas antes da deposição das ilhas e três horas deposição dos guias sem ilhas de ouro como referência. Nesses casos, para o guia com 675 nm de espessura na presença do ouro, o guiamento se deu ao longo de 8 mm para os guias com largura superior a 8  $\mu$ m, e para os guias com larguras inferiores, o guiamento se deu por 4 mm. Cabe acrescentar que para os guias de 480 nm de espessura com e sem ouro, não houve mudança na distância do guiamento que se manteve em 3 mm para os guias com larguras superiores a 8  $\mu$ m.





As perdas de propagação em guia com ilhas de ouro diminuíram tanto para guias de onda estreitos (inferior e igual a 10  $\mu$ m), quanto para o mais largo, de 80  $\mu$ m, independentemente da espessura do núcleo. A diminuição nos guias com núcleo GP de 480 nm de espessura passou de 8,75 dB/cm para 3,82 dB/cm em guias de 80 $\mu$ m de largura. Para guia com 3  $\mu$ m de largura houve mudança de 20,39 dB/cm para 17,32 dB/cm. A menor perda se deu para os guias de onda com núcleo GP de 675 nm de espessura com acréscimo das ilhas de ouro; para o guia de 80  $\mu$ m de largura a perda passou de 3,31 dB/cm para 2,08 dB/cm (guiamento em 8 mm de comprimento). Para o guia com largura de 2  $\mu$ m passou de 22,17 dB/cm para 12,55 dB/cm.

Comparando com os resultados obtidos nos guias de onda com núcleo de TZ com ilhas de ouro (com 570 nm de espessura), observa-se um resultado muito semelhante aos guias de GP com 480 nm de espessura na região do infravermelho (980 nm), conforme Figura 72.

Figura 72 - Comparação entre a perda de propagação na região do infravermelho (980 nm) em guias de onda com núcleo de TZ (570 nm de espessura) e GP (480 nm de espessura) com ilhas de ouro com mesmo tempo de tratamento térmico



Fonte: autor.

Cabe ressaltar que na região do visível não houve guiamento nos guias com e sem ilhas de ouro.

#### 4.1.3. Resultados obtidos pela técnica de Microscopia de Força Atômica (AFM)

A Microscopia de Força Atômica foi usada para determinar a distância entre as ilhas de ouro, suas alturas, bem como, a formação de um filme de ouro contínuo ou não. A extração dos valores apresentados a seguir foi realizada com o auxílio do software *gwyddion* que, de forma automática, identifica as regiões que formam as ilhas de ouro e de forma manual, permite incluir escalas para medição dos três eixos (x, y e z).

Primeiramente, nota-se que não houve a formação de um filme contínuo. Como esperado, houve a formação de diversas ilhas com diferentes raios por estarem no estágio inicial de nucleação, o que foi obtido pelos sucessivos tratamentos térmicos descritos anteriormente, conforme mostrado na Figura 73.

Figura 73 – Distribuição dos raios das ilhas de ouro (à esquerda) e vista superior (à direita) obtida pela técnica de Microscopia de Força Atômica para guia de onda tratado por 5 horas com núcleo de TZ com espessura de 570 nm(a), núcleo de GP com espessura de 480 nm(b) e 675 nm(c)



Observou-se que as amostras de GP apresentaram raios maiores do que 100 nm, diferentemente da amostra de TZ. Isso é justificado pela diferença de temperatura no tratamento térmico, pois as amostras de GP são submetidas a 400°C enquanto, a amostra de TZ é submetida a 325°C para não cristalizar. Sendo assim, supõe-se que quanto maior a temperatura de tratamento maior serão os raios das ilhas de ouro.

Em seguida, foi efetuada a verificação da altura das ilhas de ouro em cada uma das amostras, conforme Figura 74.





Observou-se que a altura das ilhas é praticamente a mesma em ambas as amostras, sendo, aproximadamente de 42 nm. Este resultado é esperado, pois o processo de deposição do ouro foi o mesmo para ambas as amostras. Dessa forma, é possível definir que a altura das ilhas é dependente do processo de deposição do ouro, sendo controlada pelos parâmetros que o compõem, como, por exemplo, o tempo de deposição, potência e tipo de anteparo (*shutter* - peneira).

Com relação a distância entre as ilhas, observou-se que são maiores para menores ilhas; isto pode, provavelmente, ser atribuído ao relatado anteriormente, para os raios das ilhas, que são afetados diretamente pelo processo de tratamento térmico, conforme evidenciado na Figura 75.

Figura 75 - Distâncias entre as ilhas de ouro obtidas pela técnica de Microscopia de Força Atômica para guia de onda tratado por 5 horas com núcleo de TZ com espessura de 570 nm(a), núcleo de GP com espessura de 480 nm(b) e 675 nm(c)



(C)

Verifica-se, de modo análogo ao processo de automontagem de um origami de DNA analisado na literatura [39, 40], que quanto menor a distância entre as ilhas de ouro, maior o acoplamento do plasmon de superfície e consequentemente, pelos resultados obtidos experimentalmente nessa pesquisa, maior é a intensidade luminosa obtida na saída do guia. Em resumo, constata-se que quanto menor a distância entre as ilhas, menor será também a perda por propagação obtida no guia.

Desta forma, os resultados obtidos pelo AFM indicam que os núcleos GP apresentam menor perda em 980 nm pelo fato de as ilhas de ouro estar mais próximas entre si quando comparadas com as ilhas de ouro do núcleo TZ. Cabe lembrar que em 980 nm, a perda por propagação para os guias com 80 µm de largura passaram de 3,31 para 2,08 dB/cm (guia com 675 nm de espessura) e de 8,75 para 3,82 dB/cm (guia com 480 nm de espessura) nos guias GP, quando adicionadas as ilhas de ouro. Para o guia TZ de 80 µm de largura não houve alteração na perda por propagação em 980 nm quando adicionadas as referidas ilhas.

Os resultados mostram uma heterogeneidade na distribuição do tamanho das ilhas para o guia GP e TZ. Os efeitos plasmônicos referem-se somente para ilhas com diâmetros inferiores a 100 nm. Tal fato, poderia ser otimizado no futuro com controle maior na deposição do ouro, como por exemplo, diminuição de sua concentração.

# 4.2. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE MODOS (E PERDAS) DE GUIAS DE ONDA GeO<sub>2</sub>-PbO E TeO<sub>2</sub>-ZnO

Conforme descrito na subseção 2.5, foram construídos guias de onda no programa OPTIFDTD a partir dos materiais e dimensões dos guias de onda produzidos nesta pesquisa. Foram simulados os guias de onda com larguras de 1, 10 e 80 µm, para a obtenção dos modos guiados. Serão usados núcleos com espessura de 0,5 µm e 1 µm nessas simulações.

Foram adicionados os índices de refração do pedestal (SiO<sub>2</sub>) de 1,5, que é igual para ambos os núcleos, o índice de refração dos núcleos GP (n = 1,96) e TZ (n

= 2,08). Depois foram adicionadas as dimensões (largura e espessura) do perfil do guia de onda, conforme exemplifica a Figura 76.





Fonte: autor.

Em seguida, foram obtidas as visualizações bidimensional e tridimensional de cada guia simulado, conforme exemplifica a Figura 77.

Figura 77 - Exemplo do guia de onda construído pelo simulador OPTIFDTD observado por vista superior (à esquerda) e sua visualização tridimensional (à direita)



Fonte: autor.

E por fim, foram obtidos os resultados dos modos guiados em 980 nm e potência de 1 mW, como usado experimentalmente. Para guias de onda com 1 µm de largura, obteve-se, como esperado, um guiamento monomodo, conforme Figura 78.



Figura 78 - Simulação dos modos guiados em guias de onda com 0,5  $\mu m$  de espessura e 1  $\mu m$  de largura com núcleo de GP (a) e TZ (b) em 980 nm

Realizando a simulação dos guias de onda com larguras de 10 µm, obtém-se um guiamento multimodo, para ambos os núcleos, porém, sendo 7 modos guiados para o GP e 5 modos guiados para o TZ, conforme Figura 79.

Figura 79 - Simulação dos modos guiados em guias de onda com 0,5  $\mu m$  de espessura e 10  $\mu m$  de largura com núcleo de GP (a) e TZ (b) em 980 nm



Fonte: autor.

Essa diferença de modos guiados se deve ao contraste entre os índices de refração que compõem o pedestal de SiO<sub>2</sub> e o núcleo. Quanto maior o contraste

entre os índices de refração maior será o confinamento da luz e consequentemente, menores serão os números de modos.

Por fim, verificou-se que com o aumento da largura para 80 µm também houve o aumento da quantidade de modos em ambos os casos, conforme Figura 80, sendo sempre maior a quantidade de modos guiados no núcleo de GP do que no núcleo de TZ, conforme explicado anteriormente.

Figura 80 - Simulação dos modos guiados em guias de onda com 0,5 µm de espessura e 80 µm de largura com núcleo de GP (a) e TZ (b) em 980 nm



Cabe acrescentar que os resultados anteriormente obtidos seguem a tendência mostrada nas figuras 65 e 70.

Também foi realizada uma análise com relação aos diferentes comprimentos de onda, a fim de analisar o guiamento na região do infravermelho e do visível. Os comprimentos usados para esta comparação foram  $\lambda = 980$  nm e  $\lambda = 545$  nm, respectivamente. O guia de TZ, por apresentar maior índice de refração e resultar em uma tendência maior ao guiamento monomodo foi escolhido para esta análise, onde, percebe-se, conforme mostrado a seguir, que para comprimento de onda menores, maior será a quantidade de modos guiados, conforme Figura 81.



Figura 81 - Simulação dos modos guiados no mesmo guia de onda com 0,5 µm de espessura e 1 µm de largura com núcleo de TZ para o comprimento de onda de 980 nm(a) e 545 nm(b)

A partir do resultado obtido é possível concluir que com esta estrutura e com este contraste entre os índices de refração, teoricamente, não haverá guiamento monomodo na região do visível, mais especificamente para  $\lambda = 545$  nm, sendo possível obtê-lo somente para o IR. Para o GP seria obtido número de modos superior ao do TZ em 545 nm.

E por fim, analisou-se também a relação da espessura e os respectivos modos guiados. Neste caso, dobrou-se a espessura do núcleo de 0,5  $\mu$ m para 1  $\mu$ m e o cálculo foi feito para  $\lambda$  = 980 nm. Esta mudança ocasionou os resultados apresentados na Figura 82.



Figura 82 - Simulação dos modos guiados em guias de onda com 1 µm de espessura e 1 µm de largura com núcleo de GP (a) e TZ (b) em 980 nm

Mediante ao resultado obtido, observa-se que o contraste entre os índices de refração do pedestal de SiO<sub>2</sub> e do núcleo de TZ foi suficiente para manter o guiamento monomodo, porém, no guia com núcleo de GP o guiamento passa a ser multimodo. Isso significa dizer, que não é conveniente produzir guias GP com núcleo de 1 µm de espessura.

Todas as simulações acima só consideraram a parte real do índice de refração. A parte imaginaria do índice de refração se refere a perda dos modos guiados [41], ou seja, seria o campo evanescente existente no pedestal SiO<sub>2</sub>. Ilustrou-se tal efeito para o guia de GP com 1 µm de largura e 0,5 µm de espessura em 980 nm, onde são identificados modos vazantes para o pedestal de SiO<sub>2</sub>, sendo 1 guiado (Figura 83a) e 23 vazantes (Figura 83b), conforme Figura 83.

Figura 83 - Simulação dos modos guiados em guias de onda com 0,5 µm de espessura e 1 µm de largura com núcleo de GP com índice de refração puramente real (a) e com índice de refração complexo (b) em 980 nm



De forma a ilustrar, a Figura 84, a seguir, mostra duas situações, no qual a primeira desconsidera o campo evanescente e a segunda demonstra a energia vazante para fora do núcleo.





Fonte: de Carvalho (2008, p. 26).

Os modos dentro de um guia de onda podem ser classificados de acordo com os valores de seus índices efetivos ( $n_{eff}$ ), como ilustrado na Figura 84. Considerando que o índice de refração do núcleo seja  $n_n$  e do meio externo tenha índice de refração  $n_{ext}$ , para os modos guiados, o índice efetivo é puramente real e seu valor estará entre o intervalo de  $n_{ext}$  e  $n_n$  ( $n_{ext} < n_{eff} < n_n$ ). Para esses modos o campo decai

exponencialmente a zero nas direções transversais ao eixo de propagação e fica confinado dentro do núcleo do guia de onda, por reflexão interna total como demonstra a Figura 84b.

Por outro lado, se um modo se propaga na direção dos valores positivos do eixo de propagação (z) e tem um índice efetivo complexo com 0<Re(n<sub>eff</sub>)<n<sub>ext</sub> e Im(n<sub>eff</sub>)<0, esse modo é dito *leaky*(vazante). Nesse caso, a amplitude do campo, para direções transversais ao eixo de propagação, é oscilatória. Além disso, a parte imaginária do índice efetivo corresponde a uma atenuação, de forma que a amplitude do campo na direção do eixo de propagação (z) é oscilatória, mas com um "envelope" decrescente. Essa atenuação por *leakage* deve ser interpretada como o "vazamento" de energia para fora do núcleo do guia de onda [41, 42].

# 4.3. INFLUÊNCIA DO FLUXO DE O2 NAS DEPOSIÇÕES POR SPUTTERING EM GUIAS GeO2-PbO

Buscando aumentar a transparência do filme de GeO<sub>2</sub>-PbO (GP) para obter guiamento no visível e minimizar a duração do processo de tratamento térmico foi depositada a matriz (GP) em fragmentos de lâminas de silício sem guias de onda e em pequenos vidros de SiO<sub>2</sub> acrescentado o gás de oxigênio (O<sub>2</sub>) no processo de deposição juntamente com o Argônio (Ar).

O primeiro processo, identificado como PS547 foi realizado com os parâmetros contidos na Tabela 10.

Parâmetros	Condições
Pressão de Trabalho	5mTorr
Potência	50 W
Fluxo do Gás Oxigênio	3,6 sccm
Fluxo do Gás Argônio	14,4 sccm
Tempo	2 horas

Tabela 10 - Parâmetros utilizados na deposição do filme GeO<sub>2</sub>-PbO com acréscimo do gás de oxigênio (processo PS547)

Verificou-se a espessura final do filme depositado sob a lâmina de silício através do refletômetro *NanoCalc* que resultou em 250 nm. A amostra vítrea de SiO<sub>2</sub> foi separada em dois pedaços, sendo um deles tratado conforme as demais amostras de GP anteriormente produzidas, seguindo os parâmetros descritos na Tabela 9 (subseção 4.1.2.); a outra amostra não foi tratada para ser usada como referência. Como resultado, observa-se que sem tratar, o filme de GP apresenta a cor amarelada; por outro lado com o tratamento mencionado (Tabela 9), o filme cristalizou, conforme Figura 85.

Figura 85 - Amostras GP: depositada no vidro de SiO<sub>2</sub> com tonalidade amarelada sem tratar (à esquerda), tratada e cristalizada (à direita) e a amostra lilás escuro de Si sem tratar usada na obtenção da espessura do filme (PS547)



Fonte: autor.

Após a cristalização da amostra, confirmou-se a influência do O<sub>2</sub> em relação a estequiometria do filme pois essa amostra cristalizou com uma hora de tratamento; cabe acrescentar que para as amostras preparadas sem O<sub>2</sub> durante a deposição só houve cristalização após 10 horas de tratamento.

Para analisar o efeito da taxa do O<sub>2</sub> na deposição, foi efetuado um novo processo seguindo os parâmetros descritos na Tabela 11 (PS548).

Parâmetros	Condições
Pressão de Trabalho	5mTorr
Potência	50 W
Fluxo do Gás Oxigênio	5,4 sccm
Fluxo do Gás Argônio	12,6 sccm
Tempo	2 horas

Tabela 11 - Parâmetros utilizados no processo de deposição de GeO<sub>2</sub>-PbO com o aumento da taxa de O<sub>2</sub> (PS548)

Com o aumento de O<sub>2</sub> representando agora 30% da quantidade total dos gases (18 sccm) injetados na câmara, determinou-se pelo refletômetro *NanoCalc* a espessura da amostra GP em silício obtendo valor de 220 nm, ou seja, espessura menor com relação ao processo PS547 no qual O<sub>2</sub> representava 20% da quantidade total dos gases, indicando mudança da taxa de deposição. Obteve-se também a cor amarelada na amostra GP depositada em SiO<sub>2</sub> e a cor lilás escuro na amostra com GP depositada na lâmina de Si, conforme Figura 86.

Figura 86 – Amostras GP depositadas nas seguintes condições: duas acima (Si e SiO<sub>2</sub>, respectivamente) sem tratamento térmico e as duas abaixo (Si e SiO<sub>2</sub>, respectivamente) com tratamento térmico (PS548)



Fonte: autor.

As duas amostras situadas na região inferior da Figura 86, sendo a amostra da esquerda de Si e a da direita de SiO<sub>2</sub>, passaram por um tratamento térmico de 150°C por quinze minutos, pois nesse momento, durante a rampa de aquecimento do forno, houve queda de energia e o processo foi interrompido. Porém, nota-se que neste pequeno intervalo de tempo de tratamento já houve um pequeno clareamento de ambas as amostras, quando comparadas as amostras situadas na região superior da Figura 86. Então, comparou-se as três amostras vítreas com relação as suas transmitâncias tanto na região do visível como na do infravermelho, onde, a primeira é a amostra vítrea sem tratamento do processo PS548 e a terceira, a amostra vítrea do processo PS548 onde o processo de tratamento térmico foi interrompido (quinze minutos de permanência)<del>.</del> A diferenciação das duas amostras do processo PS548 estão descritas pelo tempo total de tratamento decada uma, conforme Figura 87.



Figura 87 - Transmitâncias na região de 400-950 nm (à esquerda) e de 950-1650 nm (à direita) de amostras de GeO<sub>2</sub>-PbO depositadas com O<sub>2</sub>

Analisando os resultados, observa-se que a amostra PS547 com 20% de O<sub>2</sub>, em sua maioria, demonstrou melhor resultado do que ambas as amostras PS548 com 30% de O<sub>2</sub>. Também, é possível visualizar que a amostra PS548 com quinze minutos de tratamento, demonstrou melhor transmitância na região de 400-950 nm e menor transmitância na região de 950-1650 nm. Mediante este ocorrido da queda de energia, pode-se notar uma alteração entre as transmitâncias da PS548 sem tratamento e PS548 com curto período de tratamento, motivando assim, alterações no processo de tratamento térmico, que seriam de 400°C inicialmente.

Dessa forma, foi realizado um novo tratamento térmico nas três amostras, seguindo os parâmetros contidos na Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros utilizados no tratamento térmico das amostras vítreas de GeO <sub>2</sub> -PbO dos
processos PS547 e PS548 com acréscimo do O2 no processo de deposição

Parâmetros	Condições
Temperatura	250 °C
Taxa – Aquecimento	1 °C/min
Tempo	15 min
Taxa – Resfriamento	1 °C/min

Fonte: autor.

Repetiu-se a medida de transmitância para avaliar a influência da taxa de O<sub>2</sub>, conforme Figura 88.

Figura 88 - Transmitâncias na região de 400-950 nm (à esquerda) e de 950-1650 nm (à direita) de amostras de GeO<sub>2</sub>-PbO depositadas com O<sub>2</sub> após novo tratamento térmico



Observa-se que, após o tratamento térmico, houve um aumento na transmitância da amostra PS548 com trinta minutos de tratamento, que se igualou a da amostra PS547 tanto na região de 400-950 nm, quanto na região de 950-1650 nm. Também, nota-se que houve pequeno aumento da transmitância do PS548 com 15 minutos de tratamento na região de 950-1650 nm. Por outro lado, a amostra PS547 demonstrou uma pequena queda de transmitância na região de 950-1650 nm, passando a ~87%.

Em relação a transmitância em 400-950 nm, nota-se que ambas as amostras PS547 e PS548 com trinta minutos de tratamento atingem transmitância de ~90% para um comprimento de onda de 700 nm.

Foi repetido o tratamento térmico com os mesmos parâmetros descritos, porém, o que não causou diferenças significativas nas transmitâncias anteriormente apresentadas.

Então, decidiu-se aumentar o tempo e a temperatura do novo tratamento. Os novos parâmetros do tratamento térmico são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros utilizados no novo tratamento térmico das amostras vítreas de GeO<sub>2</sub>-PbO dos processos PS547 e PS548 com acréscimo do O<sub>2</sub> no processo de deposição

Parâmetros	Condições
Temperatura	300 °C
Taxa – Aquecimento	1 °C/min
Tempo	30 min
Taxa – Resfriamento	1 °C/min

Esse novo tratamento da Tabela 13 foi aplicado duas vezes e os resultados estão na Figura 89. As maiores transmitâncias em 400-950 nm e em 950-1350 nm ocorrem para as amostras do processo PS548 com cento e cinco minutos de tratamento e PS547.

Figura 89 - Transmitâncias na região de 400-950 nm (à esquerda) e de 950-1350 nm (à direita) de amostras de GeO<sub>2</sub>-PbO depositadas com O<sub>2</sub> usando o tratamento térmico de 300°C



Fonte: autor.

Dessa forma, é possível concluir que o processo PS547 com 20% de O<sub>2</sub> apresentou-se como mais vantajoso em função das maiores transmitâncias obtidas para todos os tratamentos realizados; além disto, a maior transmitância se deu para o processo PS547 com 20% de O<sub>2</sub>, se deu para tratamento de 90 minutos.

Esses testes foram feitos somente em lâmina de vidro não tendo sido realizado em guias de onda, o que pode ser feito em trabalhos futuros.

#### 5. CONCLUSÕES

Este trabalho produziu guias de onda passivos usando a estrutura pedestal com as matrizes  $TeO_2 - ZnO$  (TZ) e  $GeO_2 - PbO$  (GP) para obtenção do guiamento da luz nas regiões do visível e do infravermelho próximo (980nm).

Foi usado um novo processo para a fabricação dos guias de onda onde foi substituída a máscara de cromo pela de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>). Essa substituição ocasiona na remoção do efeito *micromasking* (micromáscara) que resultava em uma alta rugosidade lateral nos guias de onda, originando fontes de perda por propagação da luz.

Para visualizar o perfil dos guias de onda e comprovar a inexistência do efeito *micromasking*, foi utilizada a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura. Esta técnica também permitiu determinar as dimensões (espessura e largura) de cada camada constituinte dos guias de onda. Dentre as camadas que compõem o guia de onda, têm-se o núcleo, composto por um filme fino produzido a partir das matrizes (TZ e GP) depositadas pela técnica de *Sputtering* (pulverização catódica). É pelo núcleo que é realizado o confinamento da luz guiada e são obtidas as perdas por propagação. Também foi usada a técnica de *Sputtering* para depositar ouro sobre o núcleo a fim de investigar a influência nas perdas por propagação. Estas perdas por propagação foram determinadas pela técnica de vista superior. A Microscopia de Força Atômica foi usada para caracterizar as ilhas de ouro formadas sobre o núcleo.

Os guias de onda com núcleo de TZ sem ilhas de ouro demonstraram guiamento nas regiões do visível e infravermelho próximo após duas horas de tratamento térmico. Observou-se, na região do visível (632 nm), que para guias de 80 µm de largura a perda foi de 2 dB/cm e para guias mais estreitos, menores ou iguais a 10 µm de largura, as perdas foram inferiores a 6 dB/cm. Por outro lado, na região do infravermelho próximo, para guias com largura de 80 µm a perda foi de 2,5 dB/cm e para guias mais estreitos, menores ou iguais a 6 dB/cm.

Os guias de onda com núcleo de GP sem ilhas de ouro demonstraram guiamento no infravermelho próximo. Na região do visível, entretanto, isto não foi

possível e por isto foi estudada a influência de O<sub>2</sub> na deposição dos filmes de GP. Entretanto, após várias tentativas não foi obtido sucesso.

Esses testes foram feitos somente em lâmina de vidro não tendo sidos realizados em guias de onda, o que pode ser feito em trabalhos futuros.

Dentre os guias com núcleo de GP foram realizadas três deposições diferentes para verificar a influência da espessura do núcleo com relação a perda por propagação. As espessuras finais de núcleo foram de 410 nm, 480 nm e 675 nm e foi constatado que, com o mesmo tempo de tratamento térmico (1h), a espessura maior (675 nm) apresenta menor perda por propagação na região do infravermelho próximo tanto para guias de 80 µm de largura quanto para guias mais estreitos, menores ou iguais a 10 µm de largura. As perdas por propagação obtidas nesses quias de 675 nm de espessura foram de 3,31 dB/cm para quia de 80 µm de largura e para guias mais estreitos, menores ou iguais a 10 µm, as perdas ficaram abaixo de 23 dB/cm. Verificou-se também que independentemente da espessura, o tratamento térmico com tempo adequado, ocasiona a diminuição da perda por propagação; por exemplo, os guias de onda de GP com 480 nm de espessura sem ilhas de ouro, com uma hora de tratamento térmico demonstraram perda de 15,74 dB/cm em guia de onda com 80µm de largura e perda máxima de 36,49 dB/cm em guia de onda com 1 µm de largura; com duas horas de tratamento térmico esses mesmos guias apresentaram perdas de 8,75 dB/cm em 80 µm de largura e perda máxima de 24,6 dB/cm em 1 µm de largura.

Após a caracterização dos guias de onda com núcleo de TZ e GP, foi realizada a deposição de ilhas de ouro para aumentar o confinamento da luz propagada no núcleo do guia pelo efeito de plasmons de superfície.

Para os casos dos guias produzidos com ilhas de ouro, a nucleação foi feita através de diversos tratamentos térmicos seguindo procedimentos estabelecidos anteriormente pelo grupo. Estes guias tiveram redução significativa na perda por propagação na região do infravermelho próximo e não demonstraram guiamento na região do visível, independentemente do filme que compõe o núcleo (TZ ou GP).

A perda por propagação (no IR) em guia com núcleo de TZ de 80 µm de largura foi de, aproximadamente, 2,5 dB/cm (em guias sem e com ilhas de ouro). Entretanto, para guias estreitos (inferior e igual a 10 µm de largura), houve uma

diminuição de aproximadamente 30% na perda por propagação, como por exemplo, nos guias de 10 µm de largura a perda por propagação sem ilhas de ouro foi de 6,27 dB/cm, enquanto, para o mesmo guia, com ilhas de ouro, passou a ser de 4,66 dB/cm. Não foi observado guiamento na região do visível na presença das ilhas de ouro.

As perdas de propagação (no IR) em guia com núcleo de GP com ilhas de ouro diminuíram tanto para guias de onda estreitos (inferior e igual a 10  $\mu$ m), quanto para o mais largo, de 80  $\mu$ m, tal comportamento se deu para guias com núcleos de diferentes espessuras. A perda por propagação nos guias com núcleo GP de 480 nm de espessura passou de 8,75 dB/cm para 3,82 dB/cm em guias de 80  $\mu$ m de largura e para guia com 3  $\mu$ m de largura houve mudança de 20,39 dB/cm para 17,32 dB/cm. A menor perda obtida foi nos guias de onda com núcleo de GP de 675 nm de espessura com acréscimo das ilhas de ouro. Para o guia de 80  $\mu$ m de largura a perda passou de 3,31 dB/cm para 2,08 dB/cm e para o guia com largura de 2  $\mu$ m passou de 22,17 dB/cm para 12,55 dB/cm. Não foi observado guiamento na região do visível na presença das ilhas de ouro.

Nota-se que guias mais largos apresentam perdas menores do que os guias mais estreitos, o que independe do acréscimo das ilhas, do filme que forma o núcleo e do comprimento de onda acoplado. Este fenômeno ocorre porque aumenta o confinamento do campo evanescente, sendo que, somente os modos de ordem superior, que possuem baixo fator de confinamento e transportam menor fração da energia total propagada, interagem com as rugosidades das paredes laterais em guias mais largos (acima de 20 µm de largura); em guias iguais ou mais estreitos do que 20 µm de largura, são os modos de ordem mais baixa, que transportam maior fração da energia total propagada, e que interage também com as paredes laterais, o que justifica as maiores perdas para guias mais estreitos. Desta forma, as imperfeições das paredes representam a fonte principal de perda nos guias mais estreitos.

Verificou-se pelo resultado obtido por Microscopia de Força Atômica (AFM) que quanto menor a distância entre as ilhas, menor será a perda por propagação obtida no guia. Inclusive, os resultados obtidos pelo AFM indicam que os núcleos GP apresentam menor perda em 980 nm pelo fato de as ilhas de ouro estarem mais próximas entre si quando comparadas com as ilhas de ouro do núcleo TZ. Cabe

lembrar que em 980 nm, a perda por propagação para os guias com 80 µm de largura passaram de 3,31 dB/cm para 2,08 dB/cm (guia com 675 nm de espessura) e de 8,75 dB/cm para 3,82 dB/cm (guia com 480 nm de espessura) nos guias GP, quando adicionadas as ilhas de ouro. Para o guia TZ de 80 µm de largura não houve alteração na perda por propagação em 980 nm quando adicionadas as referidas ilhas. Sugere-se para trabalhos futuros a otimização destas perdas com redução da concentração do ouro depositado a fim de que haja maior homogeneidade na distribuição de tamanho e sejam formadas somente ilhas nanométricas de forma a predominar os efeitos plasmônicos e maior confinamento da luz no núcleo.

Simulações foram realizadas para determinar teoricamente os modos. Notase que, os modos guiados em guias sem ilhas tendem a ser monomodo quanto mais estreitos (próximos a 1 µm de largura) forem os guias de onda e que há guiamento multimodo em guias mais largos como evidenciado nos guias de 80 µm de largura para o caso dos guias sem ilhas de ouro.

Desta forma, é possível concluir que este novo processo de produção com plataforma pedestal traz vantagens, pois, promove uma baixa rugosidade de superfície, eliminando a preocupação sobre o efeito *micromasking* decorrente do uso da máscara de cromo e simplifica as etapas de processos, permitindo o uso de técnicas convencionais da microeletrônica já consolidadas (litografia, oxidação e corrosão) baseadas na tecnologia do silício para construção do pedestal. Também é possível concluir que, as menores perdas obtidas na região do visível foram de 2 dB/cm para o guia de 80 µm de largura no guia de TZ sem ilhas de ouro e 2,08 dB/cm na região do infravermelho próximo, em guia GP (espessura de 675 nm) com 80 µm de largura na presença de ilhas de ouro, tornando-os aplicáveis na construção de dispositivos fotônicos.

A outra contribuição do trabalho, refere-se ao uso do núcleo de TeO<sub>2</sub>-ZnO (TZ) em guias pedestais, também produzidos sem a máscara de cromo, não estudado anteriormente pelo grupo. Como possíveis desdobramentos do presente trabalho, pode-se citar a produção de guias ativos com núcleo TZ que seguramente trará contribuições para a Fotônica, bem como para o grupo, que poderá ampliar as aplicações produzindo amplificadores que operem em diferentes comprimentos de onda, a partir do uso de diferentes íons de terras-raras.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] **MCTI publica duas portarias para incentivar o desenvolvimento da área de fotônica.** Governo Federal. Disponível em: <a href="https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2021/03/mcti-publica-duas-portarias-da-iniciativa-brasileira-de-fotonica-e-do-sistema-nacional-de-laboratorios-de-fotonica>. Acesso em: 19 de março de 2021.

[2] DEL CACHO, V. D. Produção e caracterização de guias de onda de telureto e germanato para aplicações em optoeletrônica. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

[3] DEL CACHO, V. D. et al. PbO–GeO<sub>2</sub> rib waveguides for photonic applications. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 509, p. S434-S437, 2011.

[4] DA SILVA, D. M. Fabricação e caracterização de guias de onda baseadas em filmes finos e vidros de óxido de metal pesado dopados com Er<sup>3+</sup> e Yb<sup>3+</sup> e contendo nanopartículas metálicas para aplicações em dispositivos fotônicos. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

[5] CAMILO, M. E. Produção de Interferômetros Mach-Zehnder utilizando guias de onda do tipo pedestal e filmes finos de Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WO<sub>3</sub>-TeO<sub>2</sub> para aplicações em sensores ópticos integrados. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

[6] CAMILO, M. E. et al. Fabrication and characterization of pedestal optical waveguides using TeO<sub>2</sub>–WO<sub>3</sub>–Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film as core layer. **Thin Solid Films**, v. 571, p. 225-229, 2014.

[7] ASSUMPÇÃO, T. A. A. **Produção e caracterização de filmes finos amorfos de germanato codopados com Tm<sup>3+</sup> e Yb<sup>3+</sup> contendo nanopartículas metálicas para a <b>produção de guias de onda**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

[8] BOMFIM JR., F. A. et al. Advances on the fabrication process of Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>: GeO<sub>2</sub>–PbO pedestal waveguides for integrated photonics. **Optical Materials**, v. 49, p. 196-200, 2015.

[9] BOMFIM JR., F. A. **Produção e caracterização de guias de ondas de germanato codopados com Er<sup>3+</sup> e Yb<sup>3+</sup> contendo nanopartículas metálicas para aplicações ópticas no infravermelho**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

[10] DA SILVA, D. M. et al. Influence of gold nanoparticles on the 1.53  $\mu$ m optical gain in Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>: PbO-GeO<sub>2</sub> RIB waveguides. **Optics Express**, v. 22, n. 13, p. 16424-16430, 2014.

[11] DEL CACHO, V. D. et al. Fabrication of Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup> codoped Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–WO<sub>3</sub>–TeO<sub>2</sub> pedestal type waveguide for optical amplifiers. **Optical Materials**, v. 38, p. 198-203, 2014.

[12] DE ASSUMPÇÃO, T. A. A. et al. Influence of gold nanoparticles on the 805 nm gain in Tm<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> codoped PbO-GeO<sub>2</sub> pedestal waveguides. **Optical Materials**, v. 72, p. 518-523, 2017.

[13] BOMFIM JR., F. A., et al. A new fabrication process of pedestal waveguides based on metal dielectric composites of  $Yb^{3+}/Er^{3+}$  codoped PbO-GeO<sub>2</sub> thin films with gold nanoparticles. **Optical Materials**, v. 86, p. 433-440, 2018.

[14] WETTER, N. U. et al. Improving performance in ytterbium-erbium doped waveguide amplifiers through scattering by large silicon nanostructures. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 794, p. 120-126.

[15] CARVALHO, D. O. et al. A review on pedestal waveguides for low loss optical guiding, optical amplifiers and nonlinear optics applications. **Journal of Luminescence**, v. 203, p. 135-144, 2018.

[16] RIBEIRO, J. A. J., **Características da propagação em fibras ópticas**. Instituto Nacional de Telecomunicações, 1999.

[17] CATELLI, F. et al. Construa você mesmo: sensor de chuva. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, São Paulo, v.41, n.1, e20180163, 2019. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S1806-11172019000100603&Ing=en&nrm=iso>. Acesso em: 24 de novembro de 2020.

[18] GIOZZA, W. F. et al. **Fibras ópticas: tecnologia e projeto de sistemas.** Rio de Janeiro: EMBRATEL; São Paulo: Makron, McGraw-Hill, 1991.

[19] TEIXEIRA, M. M. Interferência de ondas. Mundo Educação. Disponível em: <a href="https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/interferencia-ondas.htm">https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/interferencia-ondas.htm</a>. Acesso em: 28 de novembro de 2020.

[20] SIARKOWSKI, A. L. Implementação de sensores ópticos integrados para aplicações em análises químicas e ambientais. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

[21] SILVEIRA, F. L. **Ondas eletromagnéticas**: ganham energia ao aumentar a rapidez de propagação?. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em:

105
<a href="https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=ondas-eletromagneticas-ganham-energia-ao-aumentar-a-rapidez-de-propagacao>">https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=ondas-eletromagneticas-ganham-energia-ao-aumentar-a-rapidez-de-propagacao>">https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=ondas-eletromagneticas-ganham-energia-ao-aumentar-a-rapidez-de-propagacao>">https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=ondas-eletromagneticas-ganham-energia-ao-aumentar-a-rapidez-de-propagacao>">https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=ondas-eletromagneticas-ganham-energia-ao-aumentar-a-rapidez-de-propagacao>">https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=ondas-eletromagneticas-ganham-energia-ao-aumentar-a-rapidez-de-propagacao>">https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=ondas-eletromagneticas-ganham-energia-ao-aumentar-a-rapidez-de-propagacao>">https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=ondas-eletromagneticas-ganham-energia-ao-aumentar-a-rapidez-de-propagacao>">https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=ondas-eletromagneticas-ganham-energia-ao-aumentar-a-rapidez-de-propagacao>">https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=ondas-eletromagneticas-ganham-energia-ao-aumentar-a-rapidez-de-propagacao>">https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=ondas-eletromagneticas-ganham-energia-ao-aumentar-a-rapidez-de-propagacao>">https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=ondas-eletromagneticas-ganham-energia-ao-aumentar-a-rapidez-de-propagacao>">https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=ondas-eletromagneticas-ganham-energia-ao-aumentar-a-rapidez-de-propagacao>">https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=ondas-eletromagneticas-ganham-energia-ao-aumentar-a-rapidez-de-propagacao>">https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta-ao-aumentar-a-rapidez-de-propagacao>">https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta-ao-aumentar-a-rapidez-de-propagacao>">https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta-ao-aumenta-aumenta-aumenta-aum

[22] PEREIRA, M. K. **Ressonância de Plasmon de superfície localizado e espalhamento Raman em soluções coloidais de ouro**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2009.

[23] DA SILVA, D. M. Produção e caraterização de materiais vítreos de germanato com nanopartículas metálicas e íons de érbio para aplicações em fotônica. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

[24] PINTO, R. A. Síntese e caracterização de vidros de telureto dopados com íons de Eu<sup>3+</sup> e Tb<sup>3+</sup> com nanopartículas metálicas. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

[25] LINO, J. V. Preparação e caracterização de vidros de fosfato de tungstênio contendo nanopartículas metálicas de prata, ouro e platina. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Alfenas, Minas Gerais, 2013.

[26] AMÂNCIO, C. T. Produção e caracterização de vidros de telureto tridopados com íons de terras raras e nanopartículas metálicas para uso em displays coloridos. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

[27] BOMFIM JR, F. A. **Produção e Caracterização de Vidros de Óxidos de Metais Pesados Dopados com Terras-Raras e Nanopartículas Metálicas**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2008.

[28] BARSHE, S. et al. Designing and Characterization of Graphene-on-Silicon Waveguides. **International Research Journal of Engineering and Technology** (IRJET), v. 06, n. 03, p. 7000-70002, 2018.

[29] SUN, D. et al. Modeling and Numerical Analysis for Silicon-on-Insulator Rib Waveguide Corners. **Journal of Lightwave Technology**, v. 27, n. 20, p. 4610-4618, 2009, doi: 10.1109 / JLT.2009.2025609.

[30] ROY, P. et al. Hybrid Numerical-Analytical Effective Index Method for Designing Large Geometry Ridge Waveguides. **IEEE Photonics Conference** (IPC), pp. 1-2, 2018. doi: 10.1109/IPCon.2018.8527225.

[31] **OptiFDTD**: Tutorials. Canadá: OptiWave. 2013.

[32] YAMAMOTO, R. K. Aplicações Tecnológicas de Plasma. Slides. 2017.

[33] PASCOALI, S. et al. **Obtenção e caracterização de filmes de TiO<sub>2</sub> depositados sobre cerâmica de revestimento via magnetron sputtering DC**.Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

[34] ROLLI, R. et al. Optical spectroscopy of lanthanide ions in ZnO–TeO<sub>2</sub> glasses. **Spectrochimica Acta Part A**: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, v. 57, n. 10, p. 2009-2017, 2001.

[35] PHILLIPS, B. et al. Phase Relations and Glass Formation in the System PbO-GeO. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 48, n. 8, p. 398-401, 1965.

[36] WACHTLER, M. et al. Optical properties of rare-earth ions in lead germanate glasses. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 81, n. 8, p. 2045-2052, 1998.

[37] POULTON, C. G. et al. Radiation modes and roughness loss in high index-contrast waveguides. **IEEE Journal of selected topics in quantum electronics**, v. 12, n. 6, p. 1306-1321, 2006.

[38] TIEN, P.K. Light waves in thin films and integrated optics. **Applied optics**, v. 10, n. 11, p. 2395-2413, 1971.

[39] GÜR, F. N. et al. Efficient energy propagation through self-assembled gold nanoparticle chain waveguides. **Cornell University**, v.3, arXiv:1712.09141, 2018.

[40] DING, B. et al. Interconnecting gold islands with DNA origami nanotubes. **Nano letters**, v. 10, n. 12, p. 5065-5069, 2010.

[41] CARVALHO, D. O. Estudo e desenvolvimento de guias de onda ARROW, com camadas anti-ressonantes de a-SiC: H e TiOx, para aplicação em dispositivos de óptica integrada. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 2008.

[42] URANUS, H.P. Guiding Light by and beyond the Total Internal Reflection Mechanism. 210p. Tese (Doutorado) – Universidade de Twente, Holanda, 2005.

107