Alexandre Martin Mina

**Estudo das etapas de fabricação de dispositivos eletro-
termo-ópticos utilizando o interferômetro Mach-Zehnder**

São Paulo

2008

Alexandre Martin Mina

Estudo das etapas de fabricação de dispositivos eletro-termo-ópticos utilizando o interferômetro Mach-Zehnder

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.

São Paulo
2008

Alexandre Martin Mina

Estudo das etapas de fabricação de dispositivos eletro-termo-ópticos utilizando o interferômetro Mach-Zehnder

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Microeletrônica

Orientador: Professor Doutor Marco Isaías Alayo Chávez

São Paulo
2008

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 26 de agosto de 2008.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Mina, Alexandre Martin

Estudo das etapas de fabricação de dispositivos eletro-termo-ópticos utilizando o interferômetro Mach-Zehnder / A.M. Mina. -- ed.rev.--São Paulo, 2008.

116 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1. Óptica 2. Processos de microeletrônica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, João e Anita, verdadeiros amigos.

Ao meu querido irmão, Fernando.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu orientador, o Prof. Dr. Marco Isaías Alayo Chávez, pela valiosa orientação e apoio incondicional durante todos os períodos deste trabalho.

A todos os membros do grupo GNMD, pelo apoio, pelas sugestões e críticas ao longo do trabalho.

Aos meus pais, João Mina e Anita Avanço Martin, pelos incentivos e ensinamentos durante toda a minha trajetória de vida. Ao meu irmão Fernando Martin Mina, pela amizade e companheirismo.

Aos amigos Ary, Daniel Orquiza, Daniel Baraldi, Gustavo Martins, Hector, Marcus, Mirele e Tiago, pela amizade e apoio durante a realização do trabalho.

Aos colegas Gustavo Rehder, Alexandre Lopes, Alessandro Oliveira, Denise Criado, Kátia Franklin e Márcia Ribeiro, pelo apoio e dicas valiosas que contribuíram para o engrandecimento do trabalho.

A Tereza, Rita, Christina, João e Marcos pelo apoio durante os processos realizados na sala limpa do LME.

A CNPq e FAPESP pelo apoio financeiro.

Resumo

Neste trabalho é realizado o estudo das etapas de fabricação de um dispositivo eletro-termo-óptico. O dispositivo baseia-se em um interferômetro Mach-Zehnder (IMZ) onde um micro-resistor é colocado em um dos braços do IMZ. Este interferômetro foi construído usando guias de onda ARROW (Anti-Resonant Reflecting Optical Waveguide) onde filmes de oxinitreto de silício e carbeto de silício amorfo hidrogenado foram utilizados como materiais constituintes. Estes materiais foram depositados pela técnica de PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) a baixas temperaturas ($\sim 300^{\circ}\text{C}$) usando silano (SiH_4), nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2), óxido nítrico (N_2O) e metano (CH_4) como gases precursores. Para isolar termicamente a região de aquecimento do dispositivo, parte do braço sensor do IMZ foi suspenso através da corrosão superficial do substrato de silício em solução de hidróxido de potássio (KOH). Basicamente o dispositivo termo-eletro-óptico utiliza para seu funcionamento o efeito termo-óptico dos materiais constituintes. Neste caso, com a aplicação de uma corrente elétrica no micro-resistor localizado em uma pequena região de um dos braços do IMZ é produzido uma variação na temperatura e no índice de refração dos filmes próximos ao micro-resistor. Com isto, o aparecimento de uma diferença de fase entre as ondas propagantes dos dois braços do IMZ é ocasionado e, como consequência, uma interferência eletromagnética dependente da diferença de fase das ondas propagantes causada pela variação de temperatura é originado. Dessa maneira, é possível fabricar um dispositivo termo-eletro-óptico onde uma variação da corrente aplicada no micro-resistor produz uma alteração da potência óptica na saída do interferômetro.

Abstract

In this work, a study of the steps to fabricate an electro-thermo-optical device is realized. This device is based in a Mach-Zehnder interferometer (IMZ) where a micro-resistor is placed in one of the IMZ arms. The Mach-Zehnder interferometer was fabricated using Anti-Resonant Reflecting Optical Waveguide (ARROW) where oxynitride and amorphous hydrogenated silicon carbide films were used as constituent materials. These materials were deposited by PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) technique at low temperatures (~ 300 °C) using silane (SiH_4), nitrogen (N_2), hydrogen (H_2), nitrous oxide (N_2O) and methane (CH_4) as precursor gases. In order to isolate thermally the heating region of the structure, part of the IMZ sensor arm was suspended by the surface etching of the silicon substrate in KOH solution. Basically, the electro-thermo-optical device is based in the Thermo-Optic Effect of the constituent materials. In this case, with the application of an electrical current in the micro-resistor located in a small region of the sensor arm of the IMZ, a change in the temperature and in the refractive index of the films close to the micro-resistor is produced. So, a phase difference between the electromagnetic waves that travel by the two arms of the IMZ is produced and, as consequence, an electromagnetic interference dependent of the temperature variation is originated. In this way, it is possible fabricate an electro-thermo-optical device where the optical power output depends of the electrical current applied to a micro-resistor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 -	Raio de luz confinado em um guia de onda.	6
Figura 2.2 -	Ilustração do interferômetro de Mach-Zehnder.	7
Figura 2.3 -	Gráfico da intensidade relativa da saída do interferômetro de Mach- Zehnder em função da diferença de fase.....	8
Figura 2.4 -	Perdas de radiação devido a curvatura das guias de ondas.....	9
Figura 2.5 -	Perdas de radiação devido a irregularidades das paredes laterais do núcleo do guia.....	10
Figura 2.6 -	Formatos das junções Y: junção com braços retos (a) e junção com braços em formato curvo (b).	10
Figura 2.7 -	Ilustração do dispositivo enfatizando a região de aquecimento.	11
Figura 2.8 -	Representação da reflexão interna dos raios de luz.	13
Figura 2.9 -	Propagação do raio de luz na região aquecida de um guia.	16
Figura 2.10 -	Gráfico da variação da intensidade óptica relativa em função da variação de temperatura para um guia monomodo com uma região de aquecimento de 600 μm de comprimento	18
Figura 2.11 -	Gráfico da variação da intensidade óptica relativa em função da variação de temperatura para um guia monomodo com região de aquecimento de 6000 μm de comprimento	19
Figura 2.12 -	Gráfico da variação da intensidade óptica relativa em função da variação de temperatura para um guia com 5 modos com região de aquecimento de 600 μm de comprimento	20
Figura 2.13 -	Gráfico da variação da intensidade óptica relativa em função da variação de temperatura para um guia com 5 modos com região de aquecimento de 6000 μm	21
Figura 2.14 -	Gráfico da variação da intensidade óptica relativa em função da variação de temperatura para um guia com 10 modos e com região de aquecimento de 600 μm de comprimento	22

Figura 2.15 - Gráfico da variação da intensidade óptica relativa em função da variação de temperatura para um guia com 10 modos e região de aquecimento de 6000 μm de comprimento	23
Figura 2.16 - Gráfico da variação da intensidade óptica relativa em função da variação de temperatura para um guia com 10 modos e com região de aquecimento de 6000 μm de comprimento	23
Figura 2.17 - Ilustração de um guia de onda convencional.	25
Figura 2.18 - Gráfico da distribuição do campo elétrico em função do eixo y do guia para um guia convencional monomodo com núcleo de 4 μm	26
Figura 2.19 - Gráfico da distribuição do campo elétrico em função do eixo y do guia para um guia convencional monomodo com núcleo de 1 μm	27
Figura 2.20 - Gráfico da distribuição do campo elétrico em função do eixo y do guia para um guia convencional com 5 modos.	28
Figura 2.21 - Ilustração de um guia ARROW.	29
Figura 2.22 - Equipamento de Sputtering que se localiza no Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da USP.....	32
Figura 2.23 - Ilustração do posicionamento do filamento de cromo em relação ao núcleo (a) e a máscara utilizada (b)	33
Figura 2.24 - Representação da região de aquecimento no braço sensor do IMZ.....	34
Figura 2.25 - Isolação térmica por corrosão traseira do substrato de silício.....	35
Figura 2.26 - Representação da isolamento térmica por corrosão frontal do substrato de silício.	35
Figura 2.27 - Célula cúbica do silício.....	37
Figura 2.28 - Representação dos planos cristalinos do silício.....	37
Figura 2.29 - Representação da corrosão no silício com abertura inclinada em 45°	38

Figura 2.30 - Representação da corrosão no silício com aberturas paralelas ao plano (110).....	39
Figura 2.31 - Lâmina embutida.....	40
Figura 2.32 - Processo de lixamento da amostra.	41
Figura 2.33 - Foto do equipamento que realiza o polimento das amostras.	41
Figura 2.34 - Sistema para acoplamento da fibra óptica.	42
Figura 2.35 - Parte da máscara utilizada para abertura da região de acoplamento.....	43
Figura 2.36 - Lâmina pós-processo de corrosão em KOH.	43
Figura 3.1 - Representação esquemática do reator PECVD.....	44
Figura 3.2 - Índice de refração em função dos fluxos dos gases.	47
Figura 3.3 - Taxa de deposição de filmes de 2µm.....	49
Figura 3.4 - Taxa de deposição de filmes de 4 µm.....	49
Figura 3.5 - Esquema para medição de stress dos filmes.....	50
Figura 3.6 - Gráfico do stress em função dos fluxos dos gases N ₂ O e N ₂	52
Figura 3.7 - Ilustração da bancada óptica onde o dispositivo será caracterizado.....	53
Figura 3.8 - Foto da bancada óptica com os microposicionadores, agulhas de contato e o microscópio óptico.....	53
Figura 4.1 - Lâmina de silício cortada em quadrados de 1" x 1".....	55
Figura 4.2 - Configurações do guia ARROW.....	55
Figura 4.3 - Deposição da primeira camada de oxinitreto de silício.	56
Figura 4.4 - Deposição da camada de cromo.....	57
Figura 4.5 - Máscara para definir as geometrias das resistências de cromo.....	58
Figura 4.6 - Máscara utilizada no processo de fabricação (a). Ampliação da geometria do filamento de cromo na região suspensa (b).	58
Figura 4.7 - Definição da geometria do filamento de cromo.	60

Figura 4.8 -	Etapa de deposição da camada anti-ressonante do ARROW.....	61
Figura 4.9 -	Deposição da camada do núcleo.....	61
Figura 4.10 -	Máscara utilizada para definir as geometrias do núcleo dos guias.	62
Figura 4.11 -	Medidas do IMZ utilizado na fabricação do dispositivo.	62
Figura 4.12 -	Taxa de corrosão do oxinitreto de silício em $\text{SF}_6 + \text{O}_2$	64
Figura 4.13 -	Etapa de corrosão por plasma para definição da geometria do núcleo. (a) Fotogração do cromo para realizar a corrosão por plasma e (b) núcleo definido após a remoção do cromo de proteção.	65
Figura 4.14 -	Foto tirada no MEV de uma lâmina que sofreu corrosão por plasma de SF_6	66
Figura 4.15 -	Foto tirada no MEV de uma lâmina que passou por tratamento em tricoloro, acetona e álcool.	67
Figura 4.16 -	Foto tirada no MEV de uma lâmina que passou por tratamento em RCA.....	67
Figura 4.17 -	Foto do MEV de uma lâmina que passou por tratamento em KOH.	68
Figura 4.18 -	Foto do MEV de uma lâmina que passou por tratamento em BOE.	69
Figura 4.19 -	Etching de cromo da máscara invertida a) e máscara de cromo da geometria do núcleo sobre a camada do núcleo b).	70
Figura 4.20 -	Corrosão da camada do núcleo até a camada de etch stop a) e o núcleo definido pós remoção da camada de etch stop e da máscara b).....	70
Figura 4.21 -	Fotos tiradas no MEV para lâminas que passaram pelo processo de etch stop a) e lâminas que não passaram por esse processo.	71
Figura 4.22 -	Foto mostrando a rugosidade lateral do guia originada pela corrosão úmida do cromo.	72

Figura 4.23 - Ilustração do processo que utiliza o SU-8 para melhorar as superfícies de corrosão em plasma.	73
Figura 4.24 - Foto tirada no microscópio óptico mostrando as irregularidades do fotolito.....	73
Figura 4.25 - Guia utilizando máscara com processo de fotolito (a) e um guia feito com a máscara do CenPRA (b).....	74
Figura 4.26 - Etapa de deposição da cobertura.	75
Figura 4.27 - Máscara utilizada para definir as regiões de acoplamento, contatos elétricos e cavidades de isolamento térmico.	76
Figura 4.28 - Lâmina com a máscara de cromo para abertura das cavidades e região de acoplamento.....	76
Figura 4.29 - Lâmina após a corrosão em plasma e remoção da máscara de cromo.	77
Figura 4.30 - Foto da região de suspensão do braço focando a parte mais funda da cavidade (a) e focando a região da guia (b).....	77
Figura 4.31 - Foto tirada no MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) da região suspensa.....	78
Figura 4.32 - Fotos tiradas no MEV da região de acoplamento (a) e da superfície frontal do guia (b) onde ocorre a inserção da luz no núcleo.	78
Figura 4.33 - Lâmina após corrosão em KOH.	79
Figura 4.34 - Foto tirada no MEV da lâmina pós-fabricação.	80
Figura 4.35 - Sinal de potência óptica em função da tensão.....	81
Figura 4.36 - Sinal de potência óptica em função do tempo.	82
Figura 4.37 - Sinal onda quadrado elétrico (a) e sinal de potência óptica (b).	83
Figura 4.38 - Potência luminosa em função da potencia elétrica aplicada ao resistor de cromo de um dispositivo sem cavidade.....	84
Figura 4.39 - Ilustração de um guia ARROW RIB com rugosidade na parede lateral do núcleo.....	85

Figura 4.40 - Confinamento do campo eletromagnético para um guia RIB com baixa profundidade de corrosão a) e outro guia rib com profundidade de corrosão maior b)	86
Figura 4.41 - Superfície tratada com lixamento e polimento (a) e superfície de acoplamento de guias com acoplamento em estrutura semelhante ao V-Groove (b).....	87
Figura 4.42 - Valor da resistência de cromo em função da tensão aplicada.	89
Figura 4.43 - Gráfico da temperatura em função da tensão aplicada no resistor de cromo para um dispositivo sem cavidade	90
Figura 4.44 - Corrente elétrica no resistor de cromo em função da tensão aplicada.....	91
Figura 4.45 - Valor da resistência de cromo em função da tensão aplicada.	92
Figura 4.46 - Gráfico da temperatura em função da tensão de polarização do resistor de cromo no dispositivo com cavidade.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 -	Parâmetros do guia simulado para a obtenção de um modo	17
Tabela 2-2 -	Parâmetros do guia monomodo com uma região de aquecimento 10 vezes maior.	18
Tabela 2-3 -	Parâmetros do guia simulado para a obtenção de 5 modos.	20
Tabela 2-4 -	Parâmetros do guia com 5 modos com uma região de aquecimento 10 vezes maior.	20
Tabela 2-5 -	Parâmetros do guia simulado para a obtenção de 10 modos.	21
Tabela 2-6 -	Parâmetros do guia com 10 modos com uma região de aquecimento 10 vezes maior.	22
Tabela 2-7 -	Parâmetros para a simulação de um guia convencional monomodo.	25
Tabela 2-8 -	Parâmetros para a simulação de um guia convencional com núcleo de 4 μm	27
Tabela 2-9 -	Condições para deposição do cromo no sputtering.	32
Tabela 3-1 -	Fluxos utilizados para fabricação dos filmes.	45
Tabela 4-1 -	Configurações do guia ARROW.....	56
Tabela 4-2 -	Condições para deposição do filme de oxinitreto de silício no reator.....	56
Tabela 4-3 -	Dimensões do filamento de cromo.	59
Tabela 4-4 -	Condições para deposição do filme de carbeto de silício no reator.....	61
Tabela 4-5 -	Condições para deposição do filme de oxinitreto de silício no reator.....	61
Tabela 4-6 -	Características da corrosão em $\text{SF}_6 + \text{O}_2$	64
Tabela 4-7 -	Condições para deposição do filme de oxinitreto de silício no reator.....	75

Tabela 4-8 -	Atenuação dos guias ARROW RIB em função da profundidade de corrosão do núcleo.....	86
--------------	---	----

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS	1
1.1. Introdução	1
1.2. Estado da Arte.....	4
1.3. Objetivos	5
CAPÍTULO 2 - TEORIA	6
2.1. Guias de Onda Ópticos	6
2.2. Interferômetro Mach-Zehnder.....	7
2.3. Efeito Termo-óptico	10
2.4. Estudo da influência do ruído multimodo	12
2.4.1. Guia monomodo	17
2.4.2. Guia Multimodo	19
2.5. Análise dos tipos de guias	24
2.5.1. Guia Retangular Convencional.....	24
2.5.2. Guias ARROW	28
2.6. Etapa de Aquecimento	30
2.7. Isolação térmica	33
2.7.1. Estudo da corrosão de KOH em silício.....	36
2.7.2. Abertura com inclinação de 45°	38
2.7.3. Abertura com inclinação de 0°.....	39
2.8. Acoplamento	39
CAPÍTULO 3 - DEPOSIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES	44
3.1. PECVD	44
3.2. Índice de refração.....	46
3.3. Taxa de Deposição.....	47

3.4. Medida de Stress.....	50
3.5. Infra-Estrutura para Caracterização dos Dispositivos.....	52
CAPÍTULO 4 - ETAPAS DE FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO E RESULTADO.....	54
4.1. Processo de Fabricação.....	54
4.1.1. Limpeza e Deposição do Cladding.....	54
4.1.2. Deposição da Resistência de Aquecimento	56
4.1.3. Deposição da Camada Anti-Ressonante e do Núcleo do Guia.....	60
4.1.4. Definição da Geometria do Núcleo.....	62
4.1.5. Deposição da Cobertura e Abertura das Cavidades	74
4.2. Caracterização Óptica	80
4.3. Caracterização Térmica	88
CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	95
5.1. Conclusões.....	95
5.2. Sugestões para Trabalhos futuros.....	97
5.3. Trabalhos Decorrentes	98

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

1.1. INTRODUÇÃO

A microeletrônica tem permitido o desenvolvimento de inúmeras tecnologias que vão desde as telecomunicações até os sistemas de informação mundiais. Hoje em dia, por exemplo, já são fabricados circuitos integrados (CI's) que trabalham em altas velocidades e com tamanhos geométricos reduzidos. Tudo isto foi, e continua sendo possível, graças à contínua miniaturização dos transistores e o aumento de densidade de empacotamento dos componentes eletrônicos.

Porém, com o grande aumento da densidade e da velocidade de processamento destes circuitos eletrônicos, a interferência eletromagnética tem aumentado significativamente. Esse aumento de interferência tem impedido uma maior miniaturização dos circuitos integrados [1,2] e uma limitação no aumento da velocidade. Outro fator que tem limitado a miniaturização dos circuitos integrados é a espessura do dielétrico de porta nos transistores MOS (Dispositivos básicos na fabricação do CI's). Neste caso, devido à diminuição dos componentes, o afinamento do dielétrico tem sido requisitado. No entanto, existe um limite mínimo de espessura para que não ocorra o aparecimento de correntes indesejáveis (correntes de fuga) ou, no pior dos casos, para que não ocorra o rompimento desse dielétrico. Outra característica limitante que podemos citar no processo de miniaturização é o limite para encurtamento do canal entre o dreno e a fonte nos transistores. Todas estas limitações impedem uma maior miniaturização desses componentes [3].

Em vista dessas limitações, a ciência tem buscado novas tecnologias com o objetivo de transpor essas dificuldades ou, em todo caso, contorná-las. Dentro deste contexto temos visto um aumento significativo de pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de circuitos ópticos para redes de telecomunicações globais, fundamentalmente porque o tratamento da informação utilizando pulsos de luz pode ser realizado a velocidades maiores que usando sinais elétricos. A fibra óptica, por exemplo, foi um sucesso tecnológico no século XX, convertendo-se em um meio eficiente e barato de transmitir informação a grandes distâncias e a altas velocidades. Porém, o processamento de informação continua sendo realizado pelos

sistemas eletrônicos, pois os sistemas ópticos não possuem, ainda, a capacidade de realizar esse tipo de tarefas. Ademais, os dispositivos ópticos e os dispositivos microeletrônicos estão sendo desenvolvidos separadamente, mas as exigências relacionadas com o aumento da velocidade do envio de informação obrigam a unir estas duas tecnologias em uma só, união chamada atualmente de óptica integrada [4,5].

O conceito de óptica integrada foi criado no fim da década de 60 e propunha essencialmente a integração em um único substrato de diversas funcionalidades de processamento de sinal óptico, mediante a integração híbrida ou monolítica [6,7,8]. Esta integração pode trazer inúmeras vantagens como: o aumento de taxa de transmissão de dados (devido à redução do retardo de propagação), baixa sensibilidade às radiações eletromagnéticas e o aumento da densidade de empacotamento dos circuitos ópticos e microeletrônicos [7,9]. Esta tecnologia, permite integrar circuitos VLSI com múltiplos dispositivos ópticos (emissores, detectores, sensores, conversores) permitindo um aumento significativo da densidade de integração com relação a sistemas ópticos e microeletrônicos convencionais, condensando em poucos chips, com entradas e saídas ópticas integradas, a funcionalidade presente em muitos chips separados [9].

Também, com a óptica integrada, algumas etapas do processamento passam a ser efetuadas no domínio óptico, ou seja, o sinal é transmitido e também processado opticamente. As funções que podem ser efetuadas com esta tecnologia incluem entre outras, divisão de potência óptica, chaveamento, multiplexação e demultiplexação óptica [10].

Por outro lado, assim como os dispositivos ópticos estão tentando substituir alguns dispositivos microeletrônicos dentro do campo de processamento de sinais, o campo de sensoriamento é também considerado suficientemente atrativo para os dispositivos ópticos, pois estes novos dispositivos serão insensíveis ao ruído eletromagnético, livres de curto-circuito e laços de terra, seguros em ambientes combustíveis e relativamente baratos [11].

Buscando essa evolução do sensoriamento dentro da óptica integrada temos visto muitos trabalhos realizados nessa área, como: sensores de campo [12], biológicos [13], químicos [14], de pressão [15], aceleração [16] e de temperatura [17], muitos dos quais utilizando a interferometria para a implementação. Na

atualidade, por exemplo, já estão disponíveis comercialmente sensores bioquímicos [18].

Cabe ressaltar aqui a grande importância e a utilidade dos sensores na sociedade atual. Esses dispositivos têm sido utilizados nos mais diversos setores da tecnologia, desde a biomedicina até o setor aeroespacial. Um grande exemplo de aplicação de sensores está no monitoramento da cadeia produtiva das indústrias, permitindo um grande controle da qualidade dos processos produtivos. Mais especificamente, com relação aos sensores de temperatura, notamos a sua grande importância quando analisamos as suas aplicações dentro da área industrial. A temperatura é um parâmetro muito importante no controle de qualidade dos produtos. Caso a temperatura de uso nos processos de fabricação não seja a desejada, a qualidade final do produto será comprometida e, além disso, em indústrias onde existe um grande uso de energia elétrica para o aquecimento, uma temperatura acima da necessária causa grandes custos adicionais com energia elétrica. Portanto, o sensoramento da temperatura e de outras características dentro da indústria se tornou peça fundamental para a inserção dessas no atual mercado competitivo, que exige produtos de alta qualidade a preços competitivos. Esse é apenas um exemplo de aplicação de sensores, que, no entanto, se entende para as mais diversas áreas do mercado atual, mostrando a sua grande importância nos dias de hoje.

Atualmente, existem vários equipamentos utilizados para sensoramento de temperatura, entre eles podemos citar os seguintes: termopares, termo-resistências, termístores e pirômetros. Esses equipamentos, como citados anteriormente, estão sujeitos a interferências eletromagnéticas, o que pode implicar no aparecimento de erros nas medidas devidos aos circuitos eletrônicos desses equipamentos. Uma outra desvantagem desses equipamentos em relação aos sensores da óptica integrada é com relação à capacidade de alterar as características de sensibilidade das medidas. Nos dispositivos ópticos, com mudanças simples no projeto, podemos alterar significativamente a sensibilidade, permitindo assim uma maior flexibilidade no uso desses dispositivos.

1.2. ESTADO DA ARTE

Vários trabalhos estão sendo realizados na área de dispositivos termo-eletrópticos. O princípio de funcionamento desses dispositivos está na utilização do efeito termo-óptico (ETO) dos materiais, que consiste na mudança do índice de refração dos materiais devido a uma variação da temperatura. Com a mudança do índice de refração no material, as características ópticas dos dispositivos são alteradas, podendo, dessa maneira, detectar mudanças de temperatura ou de alguma característica indireta, como corrente ou tensão elétrica, que alimentam um resistor e provoca a mudança da temperatura, por exemplo.

Podemos citar como estruturas utilizadas, o Interferômetro Mach-Zehnder (IMZ) e as cavidades ressonantes [19]. Nas duas estruturas, o princípio de funcionamento é a interferometria óptica, que consiste na interferência entre as ondas eletromagnéticas propagantes nesses meios e que determinam as características de funcionamento de cada estrutura. Essas características podem sofrer mudanças com alterações da temperatura, devido ao ETO. As características de funcionamento do IMZ serão melhor definidas no próximo capítulo.

Nos trabalhos com IMZ é visto a utilização de filmes de oxinitreto de silício e polímeros como composição das camadas dos guias de onda. As características mais enfatizadas nesses trabalhos são: a potência utilizada para o chaveamento óptico, a velocidade de chaveamento e os métodos utilizados para isolamento térmico na região de aquecimento [17,20,21,22].

Em moduladores a base de silício um dos problemas está no alto consumo de potência (1W) devido à alta condutividade térmica do substrato de silício (150 W/ m K) que provê alta dissipação de calor e causa, assim, o alto consumo de potência [19].

Já a velocidade de resposta do dispositivo, geralmente está inversamente ligada ao consumo de potência, visto que, nesse caso, o substrato de silício funciona como dissipador de calor, aumentando assim a possibilidade do aumento da velocidade de chaveamento [19]. Na literatura, a alternativa mais usada para a melhora da performance desse tipo de dispositivo é a utilização de cavidades no substrato de silício. São reportadas nesses trabalhos potências mínimas conseguida para chaveamento da ordem de 100mW [23] e em [19] foi conseguido o

chaveamento com uma potência de 50mW. Em relação à velocidade tem se reportado na literatura o tempo de ~1ms [24,25,26]. No entanto, quando se faz análises de tempo de chaveamento, deve ser levada em consideração a região efetiva de aquecimento do braço sensor, pois dependendo desse comprimento a curva característica de potência x temperatura muda, ou seja, a potência fica mais ou menos sensível à mudança de temperatura. Portanto a análise de velocidade deve ser feita para um dado comprimento de região efetiva de aquecimento.

Outro aspecto importante da utilização dessas cavidades que tem sido citadas nos trabalhos [21] é a importância da retenção do calor na região desejada do braço sensor, evitando assim a propagação desse para o outro braço do IMZ, o que poderia influenciar nas medidas da potência óptica de saída do dispositivo.

1.3. OBJETIVOS

Este projeto de pesquisa tem como objetivo principal estudar todas as etapas de fabricação de dispositivos eletro-termo-ópticos, baseado no interferômetro Mach-Zehnder e no efeito termo-óptico (ETO) dos materiais usados na fabricação do dispositivo, capaz de transformar dados térmicos ou elétricos em dados ópticos. Basicamente, serão realizadas análises dos materiais e das geometrias que devem ser utilizadas no intuito de otimizar as etapas de fabricação. Para isso, serão estudados os processos de deposição, corrosão, fotogração e de acoplamento.

CAPÍTULO 2 - TEORIA

2.1. GUIAS DE ONDA ÓPTICOS

Os guias de onda ópticos são estruturas capazes de confinar ondas eletromagnéticas na região do visível ou do infravermelho próximo. A teoria de reflexão interna total da óptica geométrica diz que quando uma onda que se propaga em um meio com um índice de refração n_1 encontra a fronteira com um outro meio que tem um índice de refração n_0 (sendo $n_1 > n_0$), essa onda tende a realizar reflexão total se o ângulo de incidência for maior que $\arcsen(n_1 / n_0)$. A estrutura do guia é basicamente composta por três camadas: núcleo, onde ocorre o confinamento das ondas e as duas camadas de cobertura. Na Figura 2.1 ilustramos um guia de onda com as suas principais estruturas. Neste caso, θ deve ser menor que $\arcsen(n_1^2 - n_0^2)^{-1/2}$ para satisfazer a condição de reflexão interna total na interface núcleo/cobertura. Desta maneira, satisfazendo a condição de reflexão interna total, a luz fica confinada no meio com índice de refração maior.

Figura 2.1 - Raio de luz confinado em um guia de onda.

Em nosso trabalho, essas camadas serão filmes de oxinitreto de silício (SiO_xN_y) depositadas pela técnica PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition). A técnica de PECVD será detalhada na seção 3.1.

A utilização desses filmes na composição estrutural do guia se deve ao fato de que esses são transparentes para o comprimento de onda de luz utilizada no nosso laboratório (633nm). Dizemos que um material é transparente quando não absorve energia luminosa. Esses materiais possuem índice de refração com parte imaginária nula, ou seja, seu coeficiente de extinção é igual a zero.

2.2. INTERFERÔMETRO MACH-ZEHNDER

Baseado no confinamento de luz produzido por reflexão interna total é construído um dispositivo conhecido como Interferômetro Mach-Zehnder. Abaixo temos uma figura que ilustra o formato do interferômetro Mach-Zehnder (IMZ).

Figura 2.2 - Ilustração do interferômetro de Mach-Zehnder.

Esta estrutura possui a propriedade de dividir igualmente a intensidade luminosa entre os dois braços do interferômetro. Quando consideramos um interferômetro ideal, ou seja, sem perdas de atenuação e radiação, e com caminhos ópticos iguais (braços com o mesmo comprimento) temos que a intensidade de luz da entrada deve ser a mesma na saída. Isto ocorre, pois a luz que chega na primeira junção Y está em fase, e se o caminho óptico desses dois braços do interferômetro forem iguais, a luz que entrou em fase chegará em fase na segunda junção Y. Dessa maneira haverá interferência construtiva das ondas eletromagnéticas, e assim, a intensidade de saída será igual à intensidade da entrada.

Supondo agora que os caminhos ópticos sejam diferentes ou ocorra alteração do índice de refração em um dos braços, teremos a introdução de uma fase entre a onda de luz de um braço em relação à onda de luz do outro braço. Dessa maneira as ondas dos dois braços poderão não chegar mais em fase, acontecendo dessa maneira interferência não construtiva na segunda junção Y. Isso implicará na

mudança da intensidade na saída do IMZ. A intensidade da luz na saída do interferômetro é dependente da fase introduzida em um dos braços. A equação abaixo mostra a relação entre a fase e a intensidade de saída [27,28,29].

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{2} \cdot (1 + \cos(\alpha)) \quad (2.1)$$

onde I_{out} é a intensidade de saída (W), I_{in} a intensidade de entrada (W) e α é a diferença de fase da luz nos dois braços.

Neste caso, se a diferença de fase entre os dois braços for igual a zero, a intensidade de luz na entrada é igual à intensidade de luz na saída, tal como foi falado anteriormente. Já para uma diferença de 180° temos uma interferência totalmente destrutiva, implicando em uma saída igual a 0.

Na Figura 2.3 plotamos um gráfico representando o comportamento da intensidade de saída da luz em função da diferença de fase dos dois braços do interferômetro.

Figura 2.3 - Gráfico da intensidade relativa da saída do interferômetro de Mach-Zehnder em função da diferença de fase.

Depois de analisado os aspectos de operação do IMZ, iniciamos um estudo na literatura para definir as geometrias dessa estrutura de forma a maximizar o seu desempenho, eliminando, por exemplo, o máximo de perdas por radiação devido às regiões curvas e às junções Y.

As perdas por radiação se devem a vários fatores, entre eles ao raio de curvatura. Dessa maneira, como no IMZ temos regiões curvas, devemos minimizar essas perdas nessas regiões. Como podemos observar na Figura 2.4, nas regiões curvas existe uma probabilidade maior dos raios não cumprirem com o ângulo mínimo de reflexão total e, portanto, aumentar assim as perdas por radiação.

Figura 2.4 - Perdas de radiação devido a curvatura das guias de ondas.

Uma das alternativas para diminuir essas perdas é diminuir o ângulo de abertura das junções Y, aumentando, assim, o raio de curvatura. Foi verificado na literatura que a diminuição do ângulo de abertura da junção Y realmente diminui as perdas [30,31,32,33]. Para diminuir o valor desse ângulo devemos diminuir a distância entre os braços e ou aumentar o comprimento total do IMZ. Como será visto na seção 2.7, nosso dispositivo possui cavidades entre os braços do IMZ, limitando uma aproximação muito grande entre os braços (menor que 80 μm). Essa limitação de aproximação limita o tamanho mínimo do IMZ. Dessa maneira, as perdas de radiação devido ao caminho óptico mais extenso aumentam. Esse problema é agravado devido às irregularidades nas paredes laterais do núcleo do guia, verificadas através de fotos tiradas no microscópio eletrônico de varredura (MEV), as quais serão vistas mais adiante. Na Figura 2.5 é visto como que as irregularidades nas paredes do núcleo provocam as perdas por radiação.

Figura 2.5 - Perdas de radiação devido a irregularidades das paredes laterais do núcleo do guia.

Outro fator para a diminuição das perdas na região da junção Y é o formato dessa junção. Os formatos das junções analisados na literatura são mostrados na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Formatos das junções Y: junção com braços retos (a) e junção com braços em formato curvo (b).

Verificamos na literatura o estudo feito com esses dois formatos de junções. Foi mostrado que para o formato de braços curvos as perdas eram menores. Em alguns casos a transmissão na junção Y para aberturas de 3° eram de 100% para o formato curvo e 70% para o formato linear [32,34]. Dessa maneira adotamos a segunda opção para o nosso projeto.

2.3. EFEITO TERMO-ÓPTICO

O efeito termo-óptico é uma propriedade do material onde o índice de refração desse material se altera com a mudança de temperatura. Esse fenômeno será o responsável pela defasagem entre os braços do interferômetro. Com a mudança do

índice de refração em uma parte do braço sensor do interferômetro, a luz que se propaga nessa região terá um adiantamento ou um atraso de fase em relação à luz que está se propagando pelo outro braço do interferômetro (braço de referência). Ao se juntarem eles interferirão não mais construtivamente. Isso implicará na mudança da intensidade de saída da luz no interferômetro. Portanto dessa maneira, poderemos identificar a mudança de um dos parâmetros analisados, temperatura ou corrente elétrica. A diferença de fase introduzida no braço sensor é dada pela seguinte equação [27]:

$$\Delta\alpha = \frac{2\pi.\Delta n.L}{\lambda} \quad (2.2)$$

onde Δn é a variação do índice de refração, L é o comprimento do guia onde existe a mudança de temperatura e λ é o comprimento de onda da luz no núcleo. Δn é dado por:

$$\Delta n = \Delta T.cto \quad (2.3)$$

onde ΔT é a variação de temperatura e cto é o coeficiente termo-óptico do material. Foi verificado, na literatura, que o coeficiente termo-óptico do oxinitreto de silício é aproximadamente $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ [35].

Figura 2.7 - Ilustração do dispositivo enfatizando a região de aquecimento.

2.4. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO RUÍDO MULTÍMODO

Como foi comentado, em princípio, o nosso objetivo é fabricar um dispositivo eletro-termo-óptico, mas para fazer isto é necessário utilizar guias monomodo como tem sido reportado na literatura [36]. Para fazer isto é necessário fazer máscaras com larguras de guias menores que 10 μm . No entanto, devido à limitação dos equipamentos do nosso laboratório, os guias mais estreitos que conseguimos são de 20 μm . Embora não consigamos fazer dispositivos monomodo com estes valores, estas dimensões permitem obter guias com poucos modos. Para analisar a influência desses modos, decidimos realizar um estudo das influências desses no desempenho do dispositivo mas antes disso, uma breve explicação do que é um modo é conveniente.

Para explicar o aparecimento dos modos nos guias de onda, utilizamos a teoria de óptica geométrica. A teoria óptica diz que pela lei de reflexão interna total, qualquer ângulo menor que o ângulo crítico (abertura numérica) é guiado, porém se eles não satisfazem com a equação de dispersão eles vão interferir destrutivamente e vão desaparecer depois, à medida que se propagarem no guia. Aqueles que satisfazem com a equação são chamados de modos. Nessa teoria cada modo é associado com um raio de luz, com um determinado ângulo de propagação, e através de interferências destrutivas e construtivas desses raios, alguns permanecem (e são chamados de modos) e outros desaparecem.

Vamos considerar uma onda propagando-se na direção z de uma guia e que a fase da frente da onda plana propagante é perpendicular ao raio de luz. Na Figura 2.8 vemos a propagação de dois raios de luz com o mesmo ângulo ϕ . Temos o comprimento de onda que é dado por λ/n_1 e o número de onda $k \cdot n_1$, onde n_1 é o índice de refração do núcleo do guia, λ é o comprimento de onda da luz no ar e k , a constante de propagação no vácuo, dada por $2\pi/\lambda$.

Figura 2.8 - Representação da reflexão interna dos raios de luz.

Nessa figura aparecem as componentes da constante de propagação no eixo x e z que são expressas por:

$$\begin{aligned}\beta &= k.n_1.\cos\phi \\ \kappa &= k.n_1.\sin\phi\end{aligned}\quad (2.4)$$

Antes de analisarmos a formação dos modos, devemos conhecer o efeito da reflexão dos raios na mudança de suas fases. Para isso analisemos o coeficiente de reflexão de Fresnell do raio totalmente refletido e com polarização perpendicular mostrado na figura acima. O coeficiente de reflexão de Fresnell é dado por [37]:

$$r = \frac{A_r}{A_i} = \frac{n_1.\sin\phi + j\sqrt{n_1^2.\cos^2\phi - n_0^2}}{n_1.\sin\phi - j\sqrt{n_1^2.\cos^2\phi - n_0^2}}\quad (2.5)$$

Este coeficiente também pode ser escrito da seguinte forma:

$$r = A + jB = \sqrt{A^2 + B^2} \angle \tan^{-1}(B/A)\quad (2.6)$$

Portanto, a mudança de fase na reflexão é dada por:

$$\tan^{-1}(B/A) = -2 \tan^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 \cdot \cos^2 \phi - n_0^2}}{n_1 \cdot \sin \phi} = \varphi \quad (2.7)$$

Sabendo agora o efeito da reflexão na mudança de fase, podemos dar prosseguimento ao estudo da formação de modos.

Analisando a Figura 2.8 vemos que nos pontos P e R a onda propagante deve ter a mesma fase, pois como já havíamos dito, a fase da frente de uma onda plana (direção perpendicular à propagação) é igual ou um múltiplo de 2π . Seguindo essa idéia, vemos que o raio 1 após as reflexões no ponto R e ponto S deve ter a mesma fase, ou uma diferença múltipla de 2π , do raio 2 que propagou-se do ponto P ao ponto Q. Satisfazendo essa condição, podemos concluir que haverá interferência construtiva entre esses raios, e portanto, eles continuarão a se propagar. Se não satisfizerem com esta equação, estas ondas terão interferência não construtiva e, portanto desaparecerão no caminho.

Para chegar na equação que representa a condição que permite a propagação destes raios com ângulo ϕ , devemos considerar a mudança de fase devido ao caminho óptico percorrido pelos raios 1 e 2 (distâncias L_1 e L_2). As mudanças de fase nesses dois casos são dadas por:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_1 &= k \cdot n_1 \cdot L_1 = k \cdot n_1 \cdot 2a \left(\frac{1}{\sin \phi} - 2 \cdot \sin \phi \right) \\ \Delta\alpha_2 &= k \cdot n_1 \cdot L_2 = k \cdot n_1 \cdot \frac{2a}{\sin \phi} \end{aligned} \quad (2.8)$$

No caso do raio 1 devemos considerar ainda as mudanças de fase devido às duas reflexões realizadas nos pontos R e S. Essa mudança é dada por 2φ (Equação 7). Dessa forma, para satisfazer a condição de interferência construtiva temos a seguinte equação:

$$(k \cdot n_1 \cdot L_2 + 2\varphi) - k \cdot n_1 \cdot L_1 = 2m\pi \quad (2.9)$$

onde m é um inteiro.

Substituindo as equações (2.4) e (2.5) em (2.6) temos:

$$\tan(k.n_1.a.\sin\phi - \frac{m.\pi}{2}) = \frac{\sqrt{n_1^2.\cos^2\phi - n_0^2}}{n_1.\sin\phi} \quad (2.10)$$

As distribuições de campo que satisfazem essa condição de propagação (equação de dispersão) são chamadas de modos, e o modo correspondente ao menor ângulo é chamado de modo fundamental ou modo 0 [11].

Portanto, a partir da teoria de óptica geométrica, deduzimos as equações que descrevem o aparecimento dos modos guiados.

Agora iniciaremos o estudo do comportamento desses modos quando influenciados pela mudança do índice de refração em uma região do guia quando alterada a temperatura nessa região.

Como vimos anteriormente, a intensidade de saída do interferômetro é dado por:

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{2} \cdot (1 + \cos(\alpha)) \quad (2.11)$$

Já a fase introduzida pela alteração da temperatura na região aquecida é dada por:

$$\Delta\alpha = \frac{2.\pi.\Delta n.L}{\lambda} \quad (2.12)$$

Portanto, das equações (2.11) e (2.12) tiramos a equação que define a intensidade de saída do interferômetro em função da fase introduzida pela mudança de temperatura em parte do caminho óptico do braço sensor. Esta equação é dada por:

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{2} (1 + \cos(\frac{2.\pi.\Delta n.L}{\lambda})) \quad (2.13)$$

O caminho total percorrido pelo raio de luz não é L, e sim, L/cos(φ). Isso é mostrado na Figura 2.9 abaixo.

Figura 2.9 - Propagação do raio de luz na região aquecida de um guia.

Vemos então, que a distância percorrida pelo raio de luz na região aquecida é dada por $L/\cos(\phi)$, onde ϕ é o ângulo do modo correspondente.

Caso o guia estudado seja multimodo, teremos vários raios de luz com diferentes ângulos, e, portanto, devemos fazer uma análise considerando os demais raios existentes nesse guia.

A partir das considerações acima e considerando que a distribuição de energia entre os primeiros modos propagantes no guia seja igual, desenvolvemos um programa em Matlab para simular a saída do IMZ em função da alteração da quantidade de modos existentes, analisando assim a influência do ruído multimodo. Também foi considerado o uso de uma fonte de luz monocromática.

A equação da intensidade de saída de luz baseada na equação (2.14) e na análise feita para um guia multimodo é dada por:

$$I_{out} = \sum_1^m \frac{I_{in}}{2.m} \cdot (1 + \cos(\frac{2.\pi.\Delta n.L}{\lambda.\cos(\phi_m)})) \quad (2.14)$$

onde ϕ_m representa o ângulo de cada modo e m é o número de modos propagantes no guia.

Quando falamos em modos, devemos esclarecer a existência de dois tipos de modos: Transversal Elétrico (TE) e Transversal magnético (TM). A diferença entre esses dois tipos está relacionada com a polarização dos campos elétrico e magnético. No modo TE, o campo elétrico é transversal à direção de propagação, e no modo TM o campo magnético é transversal à direção de propagação.

Para avaliar a influência do ruído multimodo, foi feito um programa em Mathematica capaz de fornecer os ângulos desses modos TE e TM em um guia Slab. A teoria utilizada é mostrada no Anexo A.

Na estrutura Slab consideramos apenas a análise modal vertical, desconsiderando a análise horizontal do guia (eixo infinito). Esse programa, juntamente com uma rotina feita para a simulação da equação 12 foi utilizada para simular guias Slab com 1, 5 e 10 modos TE e TM. Os resultados são mostrados na próxima seção.

2.4.1. Guia monomodo

Para a realização das simulações do guia convencional utilizamos como espessura do núcleo igual o diâmetro da fibra óptica que possuímos em nosso laboratório, visando maior acoplamento (diâmetro do núcleo da fibra $\sim 4 \mu\text{m}$). Já o índice de refração utilizado da cobertura foi ajustado de forma a obter a quantidade de modos desejados. Inicialmente fizemos as simulações para um guia monomodo.

Tabela 2-1 - Parâmetros do guia simulado para a obtenção de um modo

Índice do núcleo	Índice da cobertura	Espessura do núcleo(μm)	L(μm)	λ (nm)	CTO($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
1,65	1,649	4	600	632,8	1 .10-5

Figura 2.10 - Gráfico da variação da intensidade óptica relativa em função da variação de temperatura para um guia monomodo com uma região de aquecimento de 600 μm de comprimento

Na Figura 2.10, que representa a intensidade relativa da luz na saída em função da variação de temperatura na região de aquecimento, notamos uma curva senoidal sem atenuação. Portanto conseguimos obter oscilações de energias bem altas na saída, sendo possível assim, realizar medidas com um grau de confiabilidade bem alto.

Para analisar também o efeito da mudança do tamanho da região de aquecimento, fizemos uma simulação para o mesmo guia, no entanto com uma região de aquecimento 10 vezes maior do que a simulação anterior. Os resultados são mostrados na Figura 2.11.

Tabela 2-2 - Parâmetros do guia monomodo com uma região de aquecimento 10 vezes maior.

Índice do núcleo	Índice da cobertura	Espessura do núcleo (μm)	$L(\mu\text{m})$	λ (nm)	$\text{CTO} (^{\circ}\text{C}^{-1})$
1,65	1,649	4	6000	632,8	1×10^{-5}

Figura 2.11 - Gráfico da variação da intensidade óptica relativa em função da variação de temperatura para um guia monomodo com região de aquecimento de 6000 μm de comprimento

Com o aumento da região de aquecimento, notamos um aumento da frequência da curva obtida na simulação. Concluimos então, que um aumento da região de aquecimento para um guia monomodo aumenta a sensibilidade do dispositivo a mudanças de temperatura. Para efeito comparativo, vamos analisar os gráficos na região até 100 $^{\circ}\text{C}$. Para o gráfico da Figura 2.10 o que se nota é a ocorrência de apenas um ciclo, já para o gráfico da Figura 2.11 ocorre aproximadamente 5 ciclos, o que mostra o aumento da sensibilidade do dispositivo ao aumento do comprimento da região de aquecimento.

2.4.2. Guia Multimodo

Para verificar o comportamento da resposta do dispositivo para um guia com 5 modos foi realizado uma simulação com os parâmetros desse guia dados na Tabela 2-3. O resultado dessa simulação é mostrado na Figura 2.12.

Tabela 2-3 - Parâmetros do guia simulado para a obtenção de 5 modos.

Índice do núcleo	Índice da cobertura	Espessura do núcleo (μm)	L(μm)	$\lambda(\text{nm})$	CTO($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
1,65	1,61	4	600	632,8	1×10^{-5}

Figura 2.12 - Gráfico da variação da intensidade óptica relativa em função da variação de temperatura para um guia com 5 modos com região de aquecimento de 600 μm de comprimento

Podemos notar no resultado da simulação para o guia com 5 modos que aparece um achatamento da curva senoidal muito pequena, principalmente quando analisamos o gráfico para variações de temperatura menor do que 300 $^{\circ}\text{C}$.

Tabela 2-4 - Parâmetros do guia com 5 modos com uma região de aquecimento 10 vezes maior.

Índice do núcleo	Índice da cobertura	Espessura do núcleo (μm)	L(μm)	$\lambda(\text{nm})$	CTO($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
1,65	1,61	4	6000	632,8	1×10^{-5}

Figura 2.13 - Gráfico da variação da intensidade óptica relativa em função da variação de temperatura para um guia com 5 modos com região de aquecimento de 6000 μm

É possível observar que além do aumento da frequência da curva, é também observado um aumento do achatamento da curva para a região de 0 a 500 $^{\circ}\text{C}$. Vemos, por exemplo, que o achatamento para a variação de temperatura em torno de 400 $^{\circ}\text{C}$ chega a 80%.

Agora, para um guia com 10 modos, notamos um aumento do achatamento da curva senoidal obtida. Quando comparamos essa característica do guia com 10 modos com o guia monomodo, vemos que o achatamento na região de variação de 500 $^{\circ}\text{C}$ é bem nítido. Para o guia com 10 modos o achatamento chega em torno de 40 %, diferente do guia monomodo que não apresenta esse achatamento (Figura 2.14).

Tabela 2-5 - Parâmetros do guia simulado para a obtenção de 10 modos.

Índice do núcleo	Índice da cobertura	Espessura do núcleo (μm)	L(μm)	λ (nm)	CTO($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
1,65	1,48	4	600	632,8	1×10^{-5}

Figura 2.14 - Gráfico da variação da intensidade óptica relativa em função da variação de temperatura para um guia com 10 modos e com região de aquecimento de 600 μm de comprimento

Simulamos também esse guia para um aumento da região de aquecimento. Como notado na simulação para um guia com 5 modos, a frequência da curva senoidal aumenta e com isso o efeito da atenuação se torna mais visível. Esse efeito do aumento da região de aquecimento pode ser visto nas Figura 2.15 e Figura 2.16.

Tabela 2-6 - Parâmetros do guia com 10 modos com uma região de aquecimento 10 vezes maior.

Índice do núcleo	Índice da cobertura	Espessura do núcleo (μm)	$L(\mu\text{m})$	$\lambda(\text{nm})$	$\text{CTO} (^{\circ}\text{C}^{-1})$
1,65	1,48	4	6000	632,8	1.10^{-5}

Figura 2.15 - Gráfico da variação da intensidade óptica relativa em função da variação de temperatura para um guia com 10 modos e região de aquecimento de 6000 μm de comprimento

Figura 2.16 - Gráfico da variação da intensidade óptica relativa em função da variação de temperatura para um guia com 10 modos e com região de aquecimento de 6000 μm de comprimento

Em resumo, nas simulações realizadas para verificar a influência do ruído multimodo, foi possível observar também a influência da variação do tamanho da

região de aquecimento na sensibilidade do dispositivo. Quando era aumentado o tamanho da região de aquecimento era observada uma resposta mais rápida na saída para variações menores de temperatura. Já quando essa região era encurtada, notávamos a diminuição da sensibilidade da resposta em função da temperatura. Portanto para analisar o quão crítica é o ruído multimodo, devemos em primeiro lugar analisar qual será a aplicação do sensor. Se desejarmos um dispositivo com resposta rápida à mudança de temperatura e com grandes variações de temperatura, então necessitamos de um dispositivo com guia monomodo, visto que a atenuação nesse caso para guias multimodos é muito alta, impossibilitando a detecção do chaveamento e com regiões de aquecimento grandes. Já quando não desejamos um dispositivo com alta velocidade de resposta e baixas variações de temperatura, um guia com alguns modos não afetará o desempenho do dispositivo e necessitamos de regiões curtas de aquecimento. Cabe destacar que estes resultados são aproximados, e um estudo usando equações de Maxwell poderão dar uma idéia mais precisa sobre o efeito do ruído multimodo.

2.5. ANÁLISE DOS TIPOS DE GUIAS

Depois de realizado o estudo da influência do ruído multimodo e das suas conseqüências para o desempenho do dispositivo, iniciamos o estudo dos possíveis tipos de guias que poderiam ser utilizados. Durante a análise da viabilidade de fabricação desses guias e dos requisitos para a fabricação, foram levados em conta a capacidade e limitações dos nossos equipamentos. Os tipos de guias estudados foram o guia retangular convencional e o guia ARROW.

2.5.1. Guia Retangular Convencional

Para realizar o estudo dos guias convencionais Slab, utilizamos um programa feito em Mathematica, capaz de obter as distribuições dos campos, elétrico e magnético. A teoria encontra-se no Anexo A.

Nessas simulações utilizamos diferentes combinações de índices de refração e espessuras de núcleo. Também foram feitas análises comparativas para obtenção de um guia convencional monomodo, avaliando assim as vantagens e desvantagens desse guia em relação ao guia ARROW.

Figura 2.17 - Ilustração de um guia de onda convencional.

Inicialmente, para efeito de comparação dos tipos de guias convencionais e ARROW, definimos o núcleo dos nossos guias como sendo de 4 μm . A utilização desse diâmetro nas simulações se deve ao fato de que como nossas fibras possuem núcleo de 4 μm , e para obter um bom acoplamento, o núcleo do guia deve possuir a mesma área do núcleo da fibra. Portanto, os cálculos realizados para obtenção dos guias monomodo terão em todas as simulações essa espessura de núcleo.

A primeira simulação foi feita adequando os índices das coberturas e do núcleo de forma a obter um guia monomodo em uma análise tipo Slab. Os índices de refração necessários para obter o guia monomodo com uma espessura do núcleo de 4 μm é mostrado na Tabela 2-7. É importante ressaltar que o índice de refração do núcleo escolhido para simulação do guia convencional é o mesmo utilizado no guia ARROW.

Tabela 2-7 -Parâmetros para a simulação de um guia convencional monomodo.

Índice do núcleo	Índice do cladding 1 e 2	Espessura do núcleo (μm)	Espessura necessária do cladding (μm)
1,65	1,649	4	> 6

Figura 2.18 - Gráfico da distribuição do campo elétrico em função do eixo y do guia para um guia convencional monomodo com núcleo de 4 μm .

Como podemos observar na Figura 2.18, a distribuição de campo elétrico atinge uma distância maior que 10 μm do centro do núcleo. Portanto, devemos ter uma camada de isolamento maior que 6 μm entre o núcleo e o silício. Isso se deve ao fato de que o silício possui um coeficiente de absorção diferente de zero. Esse coeficiente é responsável pela absorção de energia do sinal propagado. Portanto, devemos impedir que o campo evanescente (cauda do campo elétrico) atinja o substrato para evitar perdas por absorção.

Concluimos então que, para obter um guia monomodo, além de necessitar de uma cobertura muito espessa (o que pode ocasionar problemas de stress dos filmes, que não é bom para o desempenho do dispositivo em virtude de possíveis desalinhamentos e/ou trincamentos das películas), necessitamos também de um controle muito preciso do índice de refração (da ordem da terceira casa decimal como observado na Tabela 2.7). Isso torna inviável a fabricação desse guia, visto que nosso equipamento de deposição PECVD não conta com essa precisão. Não devemos esquecer que os nossos guias são curvados (IMZ), e que o efeito de radiação em curvas é proporcional à diferença dos índices do núcleo e da cobertura. Portanto com uma diferença muito pequena dos índices o efeito das perdas por radiação nas curvaturas se torna crítico.

Outra possibilidade de se obter guias convencionais monomodo é fazer o núcleo muito fino. Em simulações feitas em nosso programa, observamos que para um núcleo com espessura de 1 μm , por exemplo, e com índice do núcleo de 1,65 e

índice das coberturas de 1,62, conseguimos obter um guia monomodo com espessura das coberturas em torno de $1,5\mu\text{m}$. Dessa maneira a espessura das coberturas já não é mais o ponto crítico do projeto, no entanto o maior problema agora é o acoplamento da luz da fibra óptica com o núcleo do guia. Na Figura 2.19 vemos o resultado da simulação, onde o eixo x do gráfico representa a posição no núcleo do guia e o no eixo y a intensidade relativa do campo nesses pontos.

Figura 2.19 - Gráfico da distribuição do campo elétrico em função do eixo y do guia para um guia convencional monomodo com núcleo de $1\mu\text{m}$.

A próxima simulação foi feita adequando os índices das coberturas e do núcleo de forma a obter 5 modos TE e 5 modos TM em uma análise tipo Slab, dando assim uma aproximação da quantidade de modos que apareceriam em um guia retangular. Os resultados das simulações são mostrados na Figura 2.20.

Tabela 2-8 - Parâmetros para a simulação de um guia convencional com núcleo de $4\mu\text{m}$.

Índice do núcleo	Índice do cladding 1 e 2	Espessura do núcleo(μm)	Espessura necessária do cladding(μm)
1,65	1,61	4	0,6

Figura 2.20 - Gráfico da distribuição do campo elétrico em função do eixo y do guia para um guia convencional com 5 modos.

Como podemos notar, esse guia com essa configuração é facilmente obtido, pois a diferença de índices entre o núcleo e a cobertura não são muito próximas e, portanto conseguimos obter esse guia sem maiores dificuldades, pois não exige um controle muito preciso do índice de refração. Outra característica que deve ser notada é o fato de que a cobertura não precisa ser muito espessa, pois como a diferença de índice entre o núcleo e a cobertura é relativamente alta, o campo elétrico fica mais confinado, não necessitando assim de coberturas espessas.

2.5.2. Guias ARROW

A solução que tem sido mais reportada na literatura [38] para obtenção de guias monomodos é a utilização dos guias ARROW (*Anti-Resonant Reflecting Optical Waveguides*).

A utilização desse tipo de guia se deve às várias vantagens dessa estrutura quando o objetivo é obter guia monomodo, comparada aos guias convencionais. Foi visto nas simulações anteriores com relação aos guias convencionais que quando desejamos obter o guia monomodo com um núcleo relativamente espesso ($4\ \mu\text{m}$), necessitamos de um controle muito grande do índice de refração depositado e também é necessária uma cobertura muito espessa devido ao espalhamento do campo eletromagnético. Já na estrutura ARROW, as espessuras da cobertura são relativamente pequenas quando comparadas aos guias convencionais, para núcleo

da ordem de 4 μm a cobertura utilizada é de aproximadamente 2 μm . Outra vantagem é com relação à tolerância dos parâmetros ópticos que é relativamente grande quando comparados ao guia convencional, possibilitando assim a obtenção dos dispositivos desejados sem muitas dificuldades. É apresentado, na literatura [39] que esse tipo de guia funciona como um filtro dos modos TM, ou seja, nesse tipo de estrutura os modos TM são fortemente atenuados e a estrutura acaba funcionando como um filtro de modos TM, diminuindo assim o ruído multimodo no dispositivo.

Outra característica importante é o índice de refração do núcleo. O índice do núcleo é menor do que da cobertura, possibilitando assim diferenças menores entre o índice de refração do núcleo e o índice do ar. Essa diferença menor diminui as perdas por acoplamento.

Abaixo apresentamos uma estrutura ARROW Rib. A estrutura ARROW nesse caso deve ser analisada verticalmente, visto que essa garante o monomodo no confinamento vertical (eixo y), já o rib garante monomodo na direção horizontal (eixo x) da propagação [40].

Figura 2.21 - Ilustração de um guia ARROW.

As dimensões do núcleo e as espessuras utilizadas foram retiradas das simulações realizadas por um integrante de nosso grupo [41].

Para realizar as simulações dos guias de onda ARROW foram utilizados os métodos TMM (Transfer Matrix Method) e o método FDM (Finite Difference Method). O método TMM foi utilizado para calcular a espessura das camadas ARROW, que se situam entre o núcleo e o substrato de silício, para que estas estejam em anti-ressonância. Assim, através deste método, é possível calcular a atenuação de uma

estrutura SLAB, dados os índices de refração e as espessuras das camadas que a compõem. Dessa forma, é possível calcular as espessuras das camadas ARROW correspondentes à menor atenuação, ou seja, as espessuras de anti-ressonância.

Já o método de diferenças finitas permite calcular a atenuação e a distribuição modal para uma dada seção transversal de guia de onda. Através deste método foi possível projetar a altura do rib e calcular a largura do guia, abaixo da qual este é monomodo. As dimensões e especificações do guia foram retiradas de um trabalho de mestrado [41].

2.6. ETAPA DE AQUECIMENTO

Para a introdução da variação da fase em um dos braços do IMZ é requerido um sistema de aquecimento. Nesse sistema de aquecimento é necessário definir a forma geométrica da resistência, o material que será usado como resistência, e sua disposição na lâmina.

Na etapa da definição geométrica da resistência, nosso objetivo é definir uma geometria para a resistência de forma a concentrar a maior parte da dissipação de calor na região isolada termicamente, ou seja, na região onde será realizada a corrosão do silício. Esse é um dos pontos importantes do projeto, pois com uma maior concentração da dissipação de calor na região desejada, necessitaremos de menos potência para obter o chaveamento óptico, além de evitar que o calor dissipado na região não isolada termicamente influencie na mudança das características ópticas de outras regiões do IMZ.

Para definir a melhor forma geométrica dessa resistência, utilizamos a conhecida equação:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (2.15)$$

onde ρ é a resistividade, L é o comprimento, A é a área e R a resistência.

Com esses parâmetros podemos trabalhar a geometria da resistência de forma a concentrar a maior parte da resistência em uma região determinada.

Sabendo, portanto, que a resistência é diretamente proporcional à resistividade e ao comprimento, e inversamente proporcional à área, na região de isolamento térmico deveremos ter o maior comprimento possível e uma área bem pequena, e na região que não desejamos que ocorra dissipação de calor, a área deverá ser grande e o comprimento o menor possível.

Depois de realizado o estudo para definição do formato do filamento metálico, iniciamos o processo de escolha do material a ser utilizado como resistência. Os dois metais que poderíamos optar no laboratório eram o alumínio e o cromo.

Sendo assim iniciamos um estudo das propriedades elétricas e químicas dos dois metais, buscando identificar as vantagens e limitações dos dois metais.

Quanto à temperatura de fusão, os dois apresentavam temperaturas bem elevadas. O alumínio possui uma temperatura de fusão da ordem de 660°C e o cromo possui uma temperatura de fusão da ordem 1830°C . Como no processo utilizado (PECVD) a temperatura atinge 320°C , esse fator não impediria o uso de nenhum dos dois. Outra característica que analisamos foi a condutividade elétrica. Os dois metais apresentam alta condutividade, sendo a condutividade elétrica do alumínio 6 vezes maior que a do cromo. Nesse aspecto, o uso do cromo é mais favorável, visto que o objetivo do uso do resistor é a eliminação de calor. Apesar da vantagem de utilização do cromo nesse caso, esse fator não implica na eliminação do uso do alumínio. O fator decisivo para a escolha do metal, foi com relação à capacidade de resistir à solução de KOH. Durante o processo de fabricação do nosso dispositivo, uma parte do filamento metálico é descoberta, e entra em contato com a solução de KOH que usamos para corroer o silício. Dessa forma esse metal deve ser resistente ao KOH. Foi verificado em trabalhos anteriores no nosso laboratório [42] que o alumínio não é tão resistente à solução de KOH quanto o cromo. Devido a esse fator o cromo foi escolhido para ser usado como filamento de aquecimento do nosso dispositivo.

Para deposição dos filmes metálicos, utilizamos a técnica de Sputtering, que consiste em um processo de evaporação a vácuo que remove fisicamente porções de uma cobertura chamado alvo, e deposita um filme sobre uma outra superfície adjacente. O processo ocorre por bombardeamento sobre um alvo utilizando íons gasosos acelerados por uma alta tensão. Esses íons colidem com o alvo, e removem átomos ou moléculas inteiras que são ejetados e direcionados para uma

superfície onde se deseja realizar a deposição desse material. Abaixo temos uma foto do equipamento de Sputtering localizado no Laboratório de Microeletrônica do Depto. de Engenharia de Sistemas Eletrônicos da USP.

Figura 2.22 - Equipamento de Sputtering que se localiza no Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da USP.

As condições usadas no sputtering para deposição do cromo são dadas na tabela abaixo.

Tabela 2-9 - Condições para deposição do cromo no sputtering.

Pressão	Potência	Fluxo de Argônio
2mTorr	100W	15sccm

Com essas condições a taxa de deposição verificada pela medida de perfilometria foi de 16nm/min. A espessura utilizada para o filamento de cromo no aquecimento foi aproximadamente 400nm. Essa foi a espessura usada, pois para espessuras maiores teríamos problemas com *stress* e, também foi verificado em

testes com injeção de corrente na resistência uma boa durabilidade com essa espessura.

Nessa etapa também foi definida em que camada ficaria a resistência e a posição desta em relação ao núcleo.

Decidimos colocar o filamento de cromo entre o núcleo e a cavidade, pois dessa maneira não existiria a possibilidade do metal depositado influenciar no guiamento da luz no núcleo (campo evanescente) e também eliminar o problema de degrau entre a região acima do núcleo e a região corroída com plasma. A altura do degrau é importante na deposição do cromo pois uma altura grande pode fazer que a deposição nessa região seja pequena e portanto fácil de rompido quando aplicado uma corrente elétrica.

Com relação ao posicionamento em relação às camadas decidimos colocar a resistência na segunda camada e também sobre a última camada, podendo analisar assim as diferenças em relação ao gasto de potência e à velocidade de chaveamento para as duas posições (melhor visto no capítulo 4).

Figura 2.23 - Ilustração do posicionamento do filamento de cromo em relação ao núcleo (a) e a máscara utilizada (b) .

2.7. ISOLAÇÃO TÉRMICA

Como dito anteriormente, nosso trabalho tem como objetivo desenvolver um dispositivo eletro-termo-óptico. Portanto para a realização desse trabalho devemos ter uma fonte de calor capaz de realizar o aquecimento de uma região específica de um dos braços do interferômetro Mach-Zehnder. Essa fonte de calor será um

filamento de cromo, como foi mostrado na seção anterior. Essa região específica de aquecimento é mostrada na Figura 2.24.

Figura 2.24 - Representação da região de aquecimento no braço sensor do IMZ.

Para obter um dispositivo com um grau de confiabilidade alto nas suas medidas, devemos ter essa região aquecida bem definida, ou seja, o ideal seria que apenas a região mostrada na figura acima sofresse aquecimento. Isso se deve ao fato de que todos os cálculos são baseados na hipótese de que o calor esteja restrito apenas a esta região. Imaginemos que este calor se propague para outras regiões da lâmina e atinja o outro braço do interferômetro, aí, esse calor provocará mudanças na característica óptica do material do outro braço e, dessa forma, acarretará mudanças na velocidade de propagação da luz nesse meio, aparecendo assim uma fase não considerada nos nossos cálculos. Isso impede um confronto dos dados teóricos obtidos em simulações com as medidas realizadas em laboratório.

Pensando nos problemas que essa propagação de calor poderia provocar no desempenho do nosso dispositivo, iniciamos um estudo para, de alguma forma, realizar a isolamento da região de aquecimento.

Inicialmente buscamos respostas a esse problema em trabalhos já realizados por outros pesquisadores [29]. Foi visto nos trabalhos que a isolamento da região de aquecimento era feita com cavidades pela corrosão traseira do substrato de silício. Na Figura 2.25 ilustramos essa corrosão.

Figura 2.25 - Isolação térmica por corrosão traseira do substrato de silício.

Analisando esse processo utilizado, concluímos que não seria adequado para o nosso dispositivo, visto que, o tempo de processamento deste em solução de KOH é muito demorado (da ordem de 7 horas), o que implicaria em um possível ataque das nossas estruturas. Portanto, acabamos desistindo dessa solução.

A solução para resolver este problema foi à abertura da cavidade no substrato de silício pela região frontal do substrato. Na Figura 2.26 é mostrado o resultado final do processo. A sequência do processo para a isolação térmica é mostrada no capítulo 4.

Figura 2.26 - Representação da isolação térmica por corrosão frontal do substrato de silício.

Outro fator que nos motivou a utilizar a cavidade foi com relação à possível diminuição da potência necessária para a realização do chaveamento óptico. Isso se deve ao fato de que o silício possui alta condutividade térmica que prove alta

dissipação do calor. Portanto, uma região isolada do silício provavelmente necessitará de menos potência para realizar o chaveamento, pois a dissipação do calor será menor do que se estivesse em contato com o silício.

Com a utilização das cavidades, outra característica importante desse tipo de dispositivo será afetada: a velocidade de chaveamento. Sem o silício para dissipar o calor na região de aquecimento é esperada uma diminuição da velocidade de chaveamento devido à conservação do calor nessa região.

Portanto, para estudar o comportamento dessas duas características foi feita uma máscara com disposições diferentes das cavidades, de forma a podermos analisar o comportamento dessas características em situações diferentes.

Depois de idealizado o processo de abertura frontal, foi estudado a disposição dessa isolamento em relação à região de aquecimento.

A idéia para a isolamento era deixar uma parte do guia totalmente suspensa. No entanto precisávamos conhecer as características de corrosão do silício em KOH. Então iniciamos um estudo teórico e prático da corrosão úmida do silício em KOH.

2.7.1. Estudo da corrosão de KOH em silício

As lâminas utilizadas como substrato no nosso trabalho foram lâminas de Si tipo P, com orientação cristalográfica $\langle 100 \rangle$. A constatação dessa orientação cristalográfica é feita pelo chanfro que vem na lâmina e consultando uma tabela de referência.

O silício é um material cristalino, e, portanto, possui um arranjo periódico de seus átomos. Cada período desse arranjo ou repetição é chamado de célula unitária. Para identificar um plano ou direção utilizamos os índices de Miller. Na Figura 2.27 representamos uma célula cúbica com as indicações das direções (as direções são colocadas entre parênteses).

Figura 2.27 - Célula cúbica do silício.

A parte mais importante no nosso estudo com relação ao silício é com relação aos planos cristalinos desse material, isso porque o estudo em relação aos planos nos permitirá entender o comportamento da corrosão do silício em KOH. Na Figura 2.28 são mostrados os três grupos ou famílias de planos existentes no silício.

Figura 2.28 - Representação dos planos cristalinos do silício.

Cada plano desses possui taxas de corrosões diferentes quando atacados pela solução de hidróxido de potássio (KOH). O plano (100) possui uma taxa de corrosão 400 vezes maior que o plano (111). Por isso, o plano (111) é conhecido como “*etch stop plane*” do silício. Já a taxa do plano (110) é cerca de 600 vezes maior do que o do plano (111) [43].

Com o objetivo de conseguir cavidades completas e tendo o conhecimento das características da corrosão do silício em KOH, realizamos corrosões nas lâminas fazendo máscaras com aberturas horizontais e com inclinação de 45° . As disposições das aberturas em relação aos planos do silício e os resultados das corrosões são ilustrados a seguir.

2.7.2. Abertura com inclinação de 45°

Na Figura 2.29, tanto a inclinação do guia como a abertura estão em 45° em relação ao plano (110). A região preta representa o plano (111) que possui inclinação de $54,74^\circ$. A região amarela representa parte da máscara de óxido suspensa, pois a corrosão avança nesta direção de forma perpendicular, deixando as paredes verticais, como podemos ver na Figura 2.29 que representa o plano (110), que é vertical. Essas cores usadas da representação da corrosão têm como objetivo se assemelhar à foto vista em um microscópio óptico.

Figura 2.29 - Representação da corrosão no silício com abertura inclinada em 45° .

A região preta representa inclinação das paredes, pois não havendo reflexão da luz no sentido vertical, a vista no microscópio é preta. Os resultados dos testes realizados serão vistos no capítulo 4.

2.7.3. Abertura com inclinação de 0°

A outra maneira que encontramos para realizar a abertura, foi colocando o guia paralelo ao plano (110). Essa alternativa se mostrou inadequada, visto que o tempo para a abertura da cavidade era muito maior. Isso ocorre, pois, nessa orientação, o plano (111) impede a corrosão rápida no sentido transverso ao guia.

Figura 2.30 - Representação da corrosão no silício com aberturas paralelas ao plano (110).

Dessa maneira decidimos fazer nossos guias com inclinação de 45°, ou seja, o interferômetro Mach-Zehnder deve ficar inclinado 45° com relação ao plano (110).

2.8. ACOPLAMENTO

Um dos fatores mais importantes para o bom funcionamento do nosso dispositivo está relacionado ao acoplamento da luz entre a fibra óptica e o guia de onda. A proximidade entre a fibra e o guia e a qualidade da superfície lateral do guia onde será feita a inserção da luz pela fibra são fundamentais para eliminar as perdas de inserção.

Inicialmente, no nosso grupo, o tratamento da superfície de inserção da luz era feito através de lixamento e polimento da superfície. Esse processo se inicia com o embutimento da lâmina com os guias. A resina acrílica da EXTEC é usada para fazer o embutimento por apresentar rápido enrijecimento, fácil manuseio do embutimento no lixamento e polimento, e fácil remoção da amostra de seu interior (usando acetona por algumas horas), além de visibilidade parcial da amostra em seu interior, dado que é feita de material translúcido. A Figura 2.31 mostra uma lâmina de silício embutida, pronta para iniciar o processo de lixamento.

Figura 2.31 - Lâmina embutida.

Uma vez embutidas, as amostras são levadas ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, onde se localiza a lixadeira.

Neste local as amostras passam por etapas de lixamento de diversas granulações, partindo das lixas “mais grossas” (A400 e A600), com grãos de várias centenas de micrômetros até as mais finas (A1200), com apenas alguns micrômetros. Na Figura 2.32 é mostrado o processo de lixamento.

Figura 2.32 - Processo de lixamento da amostra.

Depois de realizado o lixamento, a amostra é levada para o equipamento que realiza o polimento. O equipamento utilizado é uma politriz MINIMET 1000 da BUEHLER, mostrado na Figura 2.33.

Figura 2.33 - Foto do equipamento que realiza o polimento das amostras.

O polimento é realizado em duas etapas. Inicialmente utiliza-se pasta de diamante de 1 μm e posteriormente uma solução de sílica de 0,1 μm .

No processo descrito acima os guias utilizados não tinham rotação em relação aos planos cristalinos da lâmina de silício, portanto quando a lâmina era posicionada para o embutimento os guias ficavam perpendiculares à superfície do cilindro polimérico, possibilitando assim o lixamento e polimento da amostra. No entanto, como no nosso dispositivo os guias sofrem rotação de 45°, foi necessária a inclinação da lâmina em 45° no momento de embutimento. A mudança é realizada e

o processo é completado com sucesso em relação ao lixamento e polimento das amostras.

Outro aspecto diferente em nosso projeto, é que existe uma região suspensa e frágil que pode facilmente se romper no momento de remoção do polímero. Dessa maneira, concluímos que deveríamos mudar a seqüência de fabricação, colocando o lixamento e polimento como uma etapa antes da abertura da cavidade, ou solucionando esse problema utilizando algo parecido ao sistema V-groove. Na Figura 2.34 temos uma foto com o mecanismo de acoplamento V-groove.

Figura 2.34 - Sistema para acoplamento da fibra óptica.

A opção adotada para esse problema foi a eliminação do processo de embutimento, e por consequência dos processos de lixamento e polimento utilizando um esquema semelhante ao V-groove mas não igual. Na Figura 2.35 mostramos a máscara utilizada para a abertura da região de acoplamento.

Figura 2.35 - Parte da máscara utilizada para abertura da região de acoplamento.

Em toda a região externa à parte amarela o filme é removido para a corrosão de KOH. Como podemos observar, as paredes na região de entrada e saída do IMZ estão inclinadas em 45° . Dessa forma quando realizamos a corrosão em KOH o plano atacado nessa interface é o $\langle 110 \rangle$. Isso implica que a parede é corroída verticalmente, possibilitando a aproximação máxima da fibra com a guia, diferentemente do sistema V-Groove, em que o plano 111 impossibilita a aproximação da fibra. A Figura 2.36 é mostrado como deve ficar a lâmina após a corrosão de KOH.

Figura 2.36 - Lâmina pós-processo de corrosão em KOH.

Os resultados dessas etapas serão mostrados no capítulo 4.

CAPÍTULO 3 - DEPOSIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES

3.1. PECVD

A técnica de Deposição Química a Vapor Assistida por Plasma (PECVD) consiste na deposição de filmes sólidos usando gases que contêm as moléculas precursoras para a formação destas películas. Essas deposições são feitas em baixas pressões (da ordem de alguns mTorr) e baixas temperaturas ($\sim 320^\circ\text{C}$), quando comparadas por exemplo à deposição química à vapor (CVD), onde as temperaturas chegam a 600°C . Próximo ao porta-substrato tem-se duas grades paralelas acoplados a dois eletrodos onde aplica-se uma potência de radiofrequência de 13.56 MHz para a excitação dos gases. Esse sistema de duas placas paralelas e um porta-substrato consiste em uma configuração tipo triodo conforme a Figura 3.1.

Figura 3.1 - Representação esquemática do reator PECVD.

Esse tipo de configuração permite ao porta-substrato funcionar como um terceiro eletrodo, podendo ser polarizado positiva ou negativamente em relação ao

eletrodo ativo da fonte de r.f. Assim, os gases são injetados dentro da câmara de deposição, excitados pela radiofrequência ocorrendo então uma descarga luminosa ou plasma no interior da câmara. Posteriormente estes radicais se recombinaem no porta-substrato aquecido formando a película desejada.

O processo de deposição dentro do plasma possui uma química muito complexa devido à grande diversidade de espécies ativas, que reagem quimicamente e podem originar ligações não desejáveis no filme depositado como, por exemplo, Si-OH, Si-H, N-H, etc. Também, no intuito de evitar problemas com bombardeamento de íons, o plasma é mantido afastado da superfície do porta substrato.

As razões para a importância desta técnica estão na versatilidade para depositar controladamente uma grande variedade de filmes com alto grau de pureza, utilizando temperaturas na faixa de 300 °C para a deposição. Outra grande vantagem dessa técnica é a relativa facilidade em obter controladamente materiais com composições variadas dependendo dos parâmetros de deposição.

Para o nosso trabalho foi utilizado a combinação dos gases de Silana (SiH₄), óxido nitroso (N₂O) e nitrogênio (N₂), que combinados com fluxos diferentes, nos permitiu obter filmes desde o óxido de silício (SiO₂) até o nitreto de silício (Si₃N₄). Isso implica na vantagem de obtenção de filmes com grande variedade de índices de refração, facilitando a obtenção de guias com as mais variadas características. Na Tabela 3-1 mostramos os fluxos utilizados para a obtenção dos filmes estudados. Todas estas películas foram depositadas a uma potência de RF de 200 W e a uma temperatura de 320 °C [44].

Tabela 3-1 - Fluxos utilizados para fabricação dos filmes.

Nomenclatura	75/0	60/15	45/30	30/45	15/60	0/75
Fluxo N ₂ (sccm)	0	15	30	45	60	75
Fluxo N ₂ O (sccm)	75	60	45	30	15	0
Fluxo SiH ₄ (sccm)	30	30	30	30	30	30

*sccm=Standard Cubic Centimeters per Minute

Na seção 3.2 será mostrada a medida dos índices de refração das películas depositadas com as condições da Tabela 3.1.

3.2. ÍNDICE DE REFRAÇÃO

Para obter uma grande faixa de índices de refração foram estudados os índices de algumas composições do oxinitreto de silício. Esses filmes foram obtidos através do processo PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition), descrito na seção anterior.

Para obtenção de toda a faixa de estudo foi utilizado a combinação de gases de SiH_4 , N_2O e N_2 , variando a quantidade de fluxo desses gases conforme mencionado na Tabela 3.1. Em todos os filmes o fluxo de SiH_4 utilizado foi de 30 sccm e o fluxo de N_2O e N_2 variou de 0 a 75 sccm, sendo que a soma desses dois fluxos se mantivesse sempre constante em 75 sccm para cada condição. Para facilitar a codificação das amostras, adotamos a seguinte nomenclatura: fluxo $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$. Portanto um filme de óxido de silício, onde o fluxo de N_2O é de 75sccm e o fluxo de N_2 é 0 sccm a amostra foi chamada de 75/0 [45,46]. Adotaremos essa nomenclatura na seqüência da descrição do nosso projeto.

A medida dos índices de refração foi feita utilizando o elipsômetro do Laboratório de Sistemas Integráveis da Escola Politécnica da USP. Para a realização dessas medidas foram utilizados filmes de aproximadamente 90 nm. Essa espessura foi calculada baseada no intuito de obter resultados de índice de refração confiáveis através da técnica elipsométrica (anexo B).

Depois de definidas as espessuras dos filmes e realizada as deposições, iniciamos as medidas.

O resultado das medidas é mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Índice de refração em função dos fluxos dos gases.

Como podemos observar no gráfico obtido, a variação do índice de refração vai de aproximadamente 1,47 (para um filme parecido ao SiO_2) a 1,91 (Para um filme parecido ao Si_3N_4), permitindo, assim, uma ampla faixa de índices de refração para a fabricação de guias de onda.

3.3. TAXA DE DEPOSIÇÃO

Sabendo da necessidade da obtenção de filmes com espessuras bem definidas, foram realizadas, antes do início da fabricação dos dispositivos, estudos da taxa de deposição das diferentes combinações de gases.

Para realizar as medidas de espessura, utilizamos o perfilômetro da sala limpa do Laboratório do Microeletrônica (LME) do Depto. de Engenharia de Sistemas Eletrônicos (PSI). Este equipamento é composto por uma agulha fina de diamante que realiza movimentos horizontais sobre a superfície da amostra. As mudanças verticais nessa agulha são detectadas pelas mudanças elétricas de um transformador diferencial linearmente variável (LVDT). O aparelho utilizado foi um perfilômetro Tencor, modelo Alpha Step 500.

Durante as medidas de espessura dos filmes depositados, um fato chamou a atenção: as taxas de deposição eram diferentes para o mesmo filme quando depositávamos filmes em torno 2 μm e quando depositávamos filmes mais espessos, em torno de 4 μm . Notamos que a taxa aumentava com o aumento do tempo de deposição. Em virtude deste fato e de que precisávamos de filmes em torno de 2 μm e de 4 μm , fizemos um estudo para as duas taxas. Outro fato que chamou nossa atenção foi com relação ao método utilizado para medir a espessura. Inicialmente as medidas eram feitas utilizando um degrau mecânico, ou seja, pequenas lâminas de silício eram utilizadas para cobrir parte de outras lâminas, deixando dessa forma uma parte exposta ao plasma e outra parte coberta. Quando utilizávamos esse tipo de técnica para medir a espessura no perfilômetro a linha do gráfico observada não era a de um degrau, como esperávamos, mas sim uma linha curva.

Analizando o degrau mecânico, notamos na interface da região coberta e da região descoberta, faixas com cores diferentes. Isso indicava uma deposição não uniforme na região da interface, o que explicava a curva observada no perfilômetro. Em decorrência deste fenômeno, começamos a medir a espessura de uma forma diferente. Lâminas totalmente descobertas, ou seja, sem degrau mecânico, eram colocados durante a deposição. Depois da deposição eram cobertos parcialmente com fotoressiste, e colocados em BOE (*Buffered Oxide Etch*, 86% NH_4F 14% de HF), removendo o filme de oxinitreto na região descoberta. Dessa maneira, obtínhamos uma região de interface uniforme, o que possibilitou uma medida mais precisa.

Na Figura 3.3 e Figura 3.4 temos os resultados obtidos das taxas de deposição para os filmes de 2 μm e para os filmes de 4 μm .

Figura 3.3 - Taxa de deposição de filmes de $2\mu m$.

Figura 3.4 - Taxa de deposição de filmes de $4\mu m$.

Observando os resultados, concluímos que a taxa de deposição aumenta à medida que aumentamos o tempo de deposição. Ainda não fica claro porque ocorre essa variação na taxa. Maiores estudos deverão ser realizados em trabalhos futuros.

3.4. MEDIDA DE STRESS

A medida de stress dos filmes depositados é importante pois a totalidade da espessura do nosso dispositivo pode chegar a 8 μm e, como existem regiões suspensas, o stress do filme pode provocar uma envergadura do filme, prejudicando o desempenho do nosso dispositivo. Ainda mais, devido às espessuras grossas, o dispositivo pode trincar pelo alto stress submetido às películas constituintes. Pensando nisso, medidas de stress foram realizadas.

A medida de tensão mecânica (stress) de filmes é realizada utilizando uma técnica que mede por métodos ópticos a variação na curvatura do substrato de silício produzida pela deposição do filme. Na Figura 3.5 ilustramos o esquema para medir o stress dos filmes.

Figura 3.5 - Esquema para medição de stress dos filmes.

O sistema possui um laser de He-Ne com comprimento de onda de 632,8 nm, sendo o feixe incidente redirecionado à lâmina de silício através do espelho M₁. O feixe refletido no substrato, por outro lado, é redirecionado através dos espelhos M₂ e M₃ sucessivamente a fim de aumentar o percurso total e, assim, incrementar a

resolução da medida. No final, o feixe refletido incide ao longo da superfície paralela ao porta-substrato onde se mede o deslocamento produzido.

A medição da curvatura é feita transladando a lâmina de silício uma distância conhecida ΔX , ao longo da direção cristalina (100) perpendicular ao feixe incidente e medindo o deslocamento ΔY produzido no feixe refletido. O raio de curvatura (R_a) da estrutura pode ser calculado como:

$$R_a = 2L_L \frac{\Delta X}{\Delta Y} \quad (3.1)$$

onde L_L é a distancia percorrida pelo feixe após a reflexão na superfície da lâmina de silício.

Estabelecida a curvatura da lâmina de silício antes e depois da deposição do filme, a tensão mecânica total pode ser calculada usando a seguinte equação [47]:

$$\sigma = \frac{E_s}{6(1-\nu)} \cdot \frac{D^2}{d} \left[\frac{1}{R_{sf}} - \frac{1}{R_s} \right] \quad (3.2)$$

onde σ é a tensão mecânica, E_s é o Modulo de Young do substrato de silício, ν é a relação de Poisson do substrato de silício, D é a espessura do substrato de silício, d é a espessura do filme, R_{sf} é o raio de curvatura do substrato de silício após a deposição do filme e R_s é o raio de curvatura do substrato de silício antes da deposição do filme.

A constante elástica biaxial $E_s/(1-\nu)$ para o silício com orientação (100) é 180,5 Gpa [48]. Este valor é constante para qualquer direção dentro do plano (100). A tensão mecânica total é, por convenção, negativa para amostras convexas (tensão de filme compressivo) e positiva para amostras côncavas (tensão de filmes tensivos).

Na Figura 3.6 apresentamos os resultados das medidas de stress para diferentes composições.

Figura 3.6 - Gráfico do stress em função dos fluxos dos gases N₂O e N₂.

A partir dos dados obtidos, podemos observar que na região onde o fluxo de N₂O é de 45 sccm o stress do filme é praticamente nulo. Dessa maneira, para camadas grossas o ideal é usar filmes com composições próximas à citada acima, visando diminuir a probabilidade de curvamento e até quebra do filme depositado.

3.5. INFRA-ESTRUTURA PARA CARACTERIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS

Para caracterização dos dispositivos utiliza-se a infraestrutura do Laboratório de Microeletrônica (LME) da USP, onde se encontra a sala de caracterização óptica.

Esta sala é composta por uma bancada óptica anti-vibratória onde é posicionado um canhão de laser de He-Ne de comprimento de onda de 632,8 nm e os micro-posicionadores mecânicos, que possibilitam o alinhamento ótimo para o acoplamento do laser com os dispositivos ópticos. Nesta mesma bancada, encontra-se também um detector de potência de laser, capaz de medir a potência óptica até da ordem de picowatts. A estrutura é apresentada na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Ilustração da bancada óptica onde o dispositivo será caracterizado.

Para realizar a polarização do resistor de cromo, utilizamos micro-pontas com posicionadores, que permitem ajustar a posição dessas micro-pontas de forma precisa na região de contato do nosso dispositivo. Além disso, a bancada óptica possui um microscópio posicionado acima da região onde é colocada a lâmina, auxiliando, assim, no posicionamento das micro-pontas e no alinhamento das fibras ópticas. Na Figura 3.8 podemos visualizar melhor o posicionamento dos aparelhos.

Figura 3.8 - Foto da bancada óptica com os microposicionadores, agulhas de contato e o microscópio óptico.

CAPÍTULO 4 - ETAPAS DE FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO E RESULTADO

4.1. PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Nesta seção, elucidaremos todas as etapas utilizadas para a fabricação do nosso dispositivo IMZ utilizando o guia ARROW. As etapas serão descritas desde a primeira, que é a limpeza inicial da lâmina de silício até a última etapa de corrosão do silício para a abertura das cavidades de isolamento térmico e acoplamento.

4.1.1. Limpeza e Deposição do Cladding

A lâmina de silício utilizada no processo possui um formato circular com diâmetro de 4 polegadas. No entanto, o padrão dos porta-substratos de nosso laboratório são para lâminas quadradas de “1”x”1”. Portanto, as lâminas devem ser cortadas de forma a permitir a utilização no equipamento. O corte dessas lâminas é feito paralelo ao chanfro da lâmina ou perpendiculares a esse chanfro, pois, nessas direções temos o plano 110, que é facilmente clivado. Depois de realizado os cortes das lâminas, essas passam por um processo de limpeza, para eliminar sujeiras que prejudiquem o filme de oxinitreto que será depositado sobre essa lâmina. As condições do processo de limpeza iniciais são descritas abaixo.

- 15 min (3:1) H_2SO_4 – H_2O_2 (105°C)
- Lavar 10 minutos em água corrente
- 5 minutos de cascatinha
- 15 minutos (5:1:1) H_2O – NH_4OH – H_2O_2 (até 75°C)
- Lavar em água corrente 10 minutos
- 5 minutos de cascatinha
- 15 segundos em DLV
- Lavar 15 minutos em água corrente
- 15 minutos (6:1:1) H_2O – H_2O_2 – HCl (80°C)

- 10 minutos de cascatinha
- Secar em N₂

Na Figura 4.1 é ilustrada a lâmina de silício.

Figura 4.1 - Lâmina de silício cortada em quadrados de 1" x 1".

Depois de realizada a limpeza, é iniciado o processo de deposição do oxinitreto de silício. As configurações do guia que será utilizado no dispositivo, como espessura e índice de refração, são dados na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Configurações do guia ARROW.

Tabela 4-1 - Configurações do guia ARROW.

	Índice de Refração	Espessura (μm)
Cladding	1,65	2
Camada Anti-Ressonante	2,4	0,13
Núcleo	1,65	4
Cobertura	1,47	2

A primeira camada ARROW a ser depositada é um filme de oxinitreto de silício com composição 15/60 cujo índice de refração é de 1,65. Essa camada deve possuir 2 μm de espessura. Como dito anteriormente, essa deposição é realizada pelo processo PECVD e com as configurações dadas na Tabela 4-2:

Tabela 4-2 - Condições para deposição do filme de oxinitreto de silício no reator.

Fluxo de $\text{SiH}_4(\text{sccm})$	Fluxo de $\text{N}_2\text{O}(\text{sccm})$	Fluxo de $\text{N}_2(\text{sccm})$	Potência (W)	Tempo (min)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
30	15	60	200	90	320

Na Figura 4.3 é ilustrada a lâmina de silício com a primeira camada de filme de oxinitreto depositada.

Figura 4.3 - Deposição da primeira camada de oxinitreto de silício.

4.1.2. Deposição da Resistência de Aquecimento

Com a primeira camada depositada, o próximo passo é depositar um filme de cromo que será utilizado como filamento para aquecimento. A localização desse filme como segunda camada, se deve ao fato de que, quando na penúltima etapa formos realizar a abertura dos filmes sobre o silício para a corrosão em KOH, a parte

do contato do filamento ficará exposta ao plasma por um tempo bem menor do que sendo esse filme de cromo depositado em outras camadas superiores. Esse filme de cromo, como dito anteriormente na seção 2.6, deve possuir uma espessura de 400 nm. Antes de realizar a deposição de cromo, a lâmina passa por um processo de limpeza. O processo de limpeza é descrito a seguir.

- 15 minutos em tricloroetileno fervente
- 15 minutos em acetona fervente
- 15 minutos em álcool isopropílico fervente
- Secar em N_2

Na Figura 4.4 é ilustrada a lâmina após a deposição de cromo.

Figura 4.4 - Deposição da camada de cromo.

Com a deposição do cromo, devemos, agora, definir a geometria desse filamento. Para isso utilizamos o processo de fotogravação que consiste inicialmente na deposição inicial de um fotoressiste sobre a lâmina. A aplicação é feita com a lâmina em rotação para uma distribuição uniforme do fotoressiste (~1mm de espessura). Este é posteriormente endurecido por aquecimento. O fotoressiste altera as suas características com a incidência de luz ultravioleta, tornando-se resistente (negativo) ou sensível (positivo) à remoção por um solvente orgânico. Após a ação do solvente teremos regiões com material exposto que pode ser removido (etching) e outras protegidas. Desta forma podemos criar padrões com diferentes geometrias.

A máscara utilizada para o processo de fotogravação é vista na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Máscara para definir as geometrias das resistências de cromo.

A definição da geometria dessa máscara foi baseada nos estudos teóricos da seção 2.6. Baseado nesses dados, desenhamos a nossa máscara em AutoCad. A Figura 4.6 ilustra o resultado final da geometria da resistência.

Figura 4.6 - Máscara utilizada no processo de fabricação (a). Ampliação da geometria do filamento de cromo na região suspensa (b).

Como visto Figura 4.6, a região onde o filme ficará suspenso possui um filamento bem estreito de cromo, aumentando assim a resistência nessa região. Já nas demais regiões a área é bem maior e, portanto uma resistência bem menor, implicando em uma menor dissipação de calor nessa região.

Durante a definição das geometrias da resistência, algumas restrições não nos permitiram otimizar mais ainda a geometria da resistência. A primeira restrição foi com relação à dimensão mínima do filamento na região isolada. A dimensão mínima

que foi verificada, era de 20 μm de largura. Para dimensões menores que essa, o filamento rompia-se muito facilmente, implicando na não garantia do funcionamento da etapa de aquecimento. Outra restrição foi com relação ao comprimento da resistência não isolada. O ideal seria ter essa resistência com um comprimento bem pequeno, mas como durante a etapa de aquecimento utilizaríamos uma agulha para injetar tensão nesse filamento, o comprimento não podia ser pequeno demais, pois dificultaria muito no momento de realizar o contato com as agulhas de polarização.

Para estimar a razão entre as resistências da área isolada termicamente e da região não isolada, medimos os comprimentos e as áreas aproximadas dessas duas regiões e estimamos a razão entre elas. Na tabela 4.3 estão as dimensões aproximadas das duas regiões.

Tabela 4-3 - Dimensões do filamento de cromo.

	Comprimento (μm)	Área (μm^2)
Região Isolada	500	20*e
Região não Isolada	3000	380*e

onde e é a espessura do filme.

Com essas medidas as resistências ficam:

$$R_{RI} = \frac{\rho \cdot 500}{20 \cdot e} = \frac{\rho \cdot 25}{e} \Omega \quad (4.1)$$

$$R_{RNI} = \frac{\rho \cdot 3000}{380 \cdot e} = \frac{\rho \cdot 7,89}{e} \Omega \quad (4.2)$$

Onde o sub-índice R_I indica resistência isolada e R_{NI} , resistência não isolada.

Portanto a resistência total do filamento de cromo é dada por:

$$R_T = \frac{\rho \cdot 32,89}{e} \Omega \quad (4.3)$$

Fazendo a razão entre R_{RI} e R_T temos:

$$\frac{R_{RI}}{R_T} = 0.7601 \quad (4.4)$$

Dessa forma, vemos que, aproximadamente, 76% da resistência total concentra-se na região isolada termicamente, e o restante, fora da região isolada.

Definida a geometria e realizada o processo de revelação e etching de cromo, obtemos a estrutura apresentada na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Definição da geometria do filamento de cromo.

4.1.3. Deposição da Camada Anti-Ressonante e do Núcleo do Guia

Depois de definido o filamento de cromo, iniciamos o processo de deposição da camada anti-ressonante ARROW. Antes de iniciar a deposição, devemos remover o fotoressiste que restou do processo de fotogravação do cromo e, após essa remoção, a lâmina passa pelo mesmo processo de limpeza utilizado anteriormente, com o mesmo objetivo de remover as sujeiras que possam ter caído na lâmina. Para esta camada, foi utilizado filmes de carbetto de silício amorfo hidrogenado (a-SiC:H) por possuir um alto índice de refração (2.4) e por já ter sido bastante estudado pelo nosso grupo [49]. A camada de carbetto de silício (a-SiC:H) deve possuir 0,13 μm de espessura. As condições utilizadas no reator para a deposição são dadas na Tabela 4-4. Cabe destacar que, para esta camada, pode ser usado óxido de titânio, que se mostrou muito adequado em testes realizados em [41].

Tabela 4-4 - Condições para deposição do filme de carbeto de silício no reator.

Fluxo de SiH ₄ (sccm)	Fluxo de H ₂ (sccm)	Fluxo de CH ₄ (sccm)	Potência (W)	Tempo (min)	Temperatura (°C)
3,6	300	32.4	100	13.2	320

Na Figura 4.8 é mostrada a lâmina pós-deposição do carbeto de silício.

Figura 4.8 - Etapa de deposição da camada anti-ressonante do ARROW.

Terminada a deposição do a-SiC:H, que no guia ARROW funciona como primeira camada anti-ressonante, iniciamos o processo de deposição da camada que será usada como núcleo do guia, e que deve ter uma espessura de 4 µm com índice de refração de 1,65. As condições utilizadas são mostradas na Tabela 4-5 e a lâmina pós-deposição do núcleo é mostrada na Figura 4.9.

Tabela 4-5 - Condições para deposição do filme de oxinitreto de silício no reator.

Fluxo de SiH ₄ (sccm)	Fluxo de N ₂ O(sccm)	Fluxo de N ₂ (sccm)	Potência (W)	Tempo (min)	Temperatura (°C)
30	15	60	200	165	320

Figura 4.9 - Deposição da camada do núcleo.

4.1.4. Definição da Geometria do Núcleo

Agora devemos definir a largura e a profundidade do núcleo do guia. Para definição da largura, foi utilizada uma máscara com as dimensões do IMZ. Nessa etapa de elaboração da geometria do IMZ, para o desenho da máscara em AutoCad, levamos em consideração toda a análise desse interferômetro feita na seção 2.2. Foi definido que a abertura do IMZ seria de 3° , possibilitando assim um balanceamento das perdas de radiação por irregularidades das paredes laterais (diminuição total do caminho óptico) do guia e por perdas devido à abertura na região Y do IMZ. O desenho da máscara é mostrado na Figura 4.10.

Figura 4.10 - Máscara utilizada para definir as geometrias do núcleo dos guias.

As medidas do IMZ da máscara utilizada são mostradas na Figura 4.11.

Figura 4.11 - Medidas do IMZ utilizado na fabricação do dispositivo.

Dando continuidade à fabricação do dispositivo, foi depositada uma camada de cromo sobre o núcleo de 300nm, que servirá como máscara de proteção no processo de corrosão.

Para a definição das geometrias das nossas guias é necessária a utilização de algum processo de corrosão. Baseado nos cálculos feitos nas simulações e nas espessuras definidas dos núcleos de nossos guias, foi verificado que necessitaríamos de corrosões com profundidade de 3,5 μm . Dessa maneira foi eliminado, inicialmente, o uso da corrosão úmida, pois este é um tipo de corrosão isotrópica e como necessitamos de paredes verticais, esse processo foi descartado. As corrosões utilizadas até então no grupo eram realizadas pela técnica de *Reactive Ion Etching* (RIE) utilizando $\text{CHF}_3 + \text{O}_2$ como gases reativos. Era notada, durante as corrosões, uma diminuição da taxa de corrosão no decorrer do tempo, ou seja, a taxa de corrosão não era constante. A explicação para essa diminuição da taxa de corrosão, possivelmente, se devia ao aparecimento de um polímero sobre a camada corroída, devido à presença de carbono no gás utilizado para a corrosão. Esse composto polimérico tem sido citado por outros autores [50]. As consequências disso são: impossibilidade do controle da profundidade corroída e um possível efeito maior de radiação dos modos guiados devido ao aparecimento do polímero em volta do núcleo do guia corroído. Em virtude desses fatos iniciamos um estudo da corrosão por plasma utilizando $\text{SF}_6 + \text{O}_2$.

Foi verificado, durante o estudo com SF_6 , que a taxa de corrosão mantinha-se constante e não aparecia o polímero antes visto na corrosão com CHF_3 . No entanto, foi notado um maior ataque desse plasma à máscara mecânica de cromo utilizada. Quando usado o plasma de CHF_3 o ataque era bem menos nocivo. O estudo feito da taxa de corrosão de $\text{SF}_6 + \text{O}_2$ visava verificar a constância da taxa em função do tempo de corrosão.

O plasma foi feito utilizando os gases $\text{SF}_6 + \text{O}_2$ com fluxos de 35 sccm e 50 sccm respectivamente, com pressão de 100 mTorr e com uma potência de RF de 150W.

Foram feitos estudos para todas as composições de oxinitreto. Na Tabela 4-6 é mostrado a corrosão de uma amostra de óxido de silício (75/0) em função do tempo.

Tabela 4-6 - Características da corrosão em $\text{SF}_6 + \text{O}_2$.

Profundidade(nm)	Tempo(min)	Taxa(nm/min)
170	5	34
341	10	34,1
685	20	34,4

O que observamos nessas taxas é que, com o decorrer do tempo, a taxa de corrosão não diminui, mas permanece constante. Esse comportamento foi verificado para todas as outras composições estudadas. Em virtude disso, foi feito a medida da taxa de corrosão para todas as outras condições de deposição. Na Figura 4.12 é mostrado o resultado das taxas de corrosões de todas as películas de SiOxNy com diferentes composições.

Figura 4.12 - Taxa de corrosão do oxinitreto de silício em $\text{SF}_6 + \text{O}_2$

É observado nos resultados que a taxa de corrosão é alta para o nitreto de silício. Já para as amostras que possuem alguma quantidade de oxigênio a taxa de corrosão cai aproximadamente seis vezes. Isto é um resultado interessante, pois observamos uma seletividade com relação ao nitreto de silício, o que, no futuro, talvez possa nos servir como camada sacrificial.

Depois de realizada a corrosão em plasma o resultado é visto na Figura 4.13.

(a) (b)
 Figura 4.13 - Etapa de corrosão por plasma para definição da geometria do núcleo. (a) Fotogravação do cromo para realizar a corrosão por plasma e (b) núcleo definido após a remoção do cromo de proteção.

Durante as etapas de corrosão do dispositivo, um fato chamou nossa atenção. Depois de realizada alguma corrosão por plasma com SF_6 sobre as lâminas, o cromo, que posteriormente era depositado sobre essa superfície, ficava escuro e não mais espelhado como quando era depositado sobre algum filme que não havia passado pelo processo de plasma. Esse filme de cromo, além de ficar escuro, possuía uma menor aderência e baixa resistência ao ataque do plasma. Inicialmente achávamos que o problema do filme poderia ser devido a alguma contaminação no sputtering do nosso laboratório. No entanto, filmes de cromo foram depositados em outro sistema sputtering do laboratório e o resultado foi o mesmo. Diante desses fatos iniciamos um estudo da superfície dos filmes pós-corrosão com plasma em SF_6 . O estudo feito tinha como objetivo inicial buscar respostas para o escurecimento do cromo depositado pós-corrosão em SF_6 .

Iniciamos nosso estudo depositando um filme 60/15 com espessura de 2 μm . Nessa lâmina fotgravamos uma máscara de cromo e realizamos a corrosão de 1,5 μm . Essa lâmina, depois de retirada da câmara de corrosão, foi levada para a deposição de ouro, pois, para a realização das fotos no MEV precisamos dessa camada metálica. A foto obtida esta na Figura 4.14.

Figura 4.14 - Foto tirada no MEV de uma lâmina que sofreu corrosão por plasma de SF₆.

Na Figura 4.14 podemos observar, na superfície atacada, o aparecimento de estruturas finas, que se assemelham a “pelinhos” e, abaixo dessas estruturas, é possível ver estruturas pontiagudas. Já nas paredes laterais, que definem a geometria do guia, vemos uma corrosão anisotrópica, com paredes verticais.

Com essas observações, concluímos que o escurecimento do cromo se devia, possivelmente, à alta irregularidade da superfície corroída, pois, com essas irregularidades, a superfície depositada de cromo não ficaria espelhada, mas sim, uma superfície difusa. Já a baixa aderência do cromo poderia ser explicada pelo aparecimento dos pelinhos, que durante o ataque físico se rompiam, implicando no descolamento do cromo.

Para tentar melhorar a superfície pós-corrosão, iniciamos um estudo de tratamento da superfície com limpezas e com corrosões úmidas. A seguir descreveremos os métodos usados e seus respectivos resultados.

a) Limpeza da lâmina pós-corrosão com tricoloro, acetona e álcool.

Figura 4.15 - Foto tirada no MEV de uma lâmina que passou por tratamento em tricoloro, acetona e álcool.

Podemos observar na Figura 4.15 que a utilização desse método não teve resultados satisfatórios, visto que os “pelinhos” apenas mudaram de direção.

b) RCA

Figura 4.16 - Foto tirada no MEV de uma lâmina que passou por tratamento em RCA.

Já com esse método, notamos o desaparecimento dos pelinhos e a estrutura toda irregular, que foi observada anteriormente abaixo dos pelinhos. Nessa amostra percebemos um clareamento do cromo depositado, no entanto, ainda notávamos um escurecimento quando comparado com filmes depositados em superfícies não corroídas.

c) Corrosão em KOH por 30 min

Figura 4.17 - Foto do MEV de uma lâmina que passou por tratamento em KOH.

Nesse processo notamos também o desaparecimento dos pelinhos, no entanto ocorreu, como esperado, a corrosão indesejada das paredes laterais dos guias.

d) Corrosão em BOE por 10 s

Figura 4.18 - Foto do MEV de uma lâmina que passou por tratamento em BOE.

Visto que a taxa de corrosão do oxinitreto com DLV é muito alta, utilizamos apenas 10s de corrosão. Com essa corrosão vemos que os “pelinhos” foram arrancados também, no entanto, semelhantemente ao KOH, houve corrosão das paredes laterais dos guias.

Após essas análises, verificamos que a melhor opção seria a utilização do processo RCA, visto que é um processo rápido, não corroe as laterais dos guias e remove os “pelinhos”. Mesmo assim, a superfície ainda fica rugosa.

Também foi estudado o efeito da alteração da potência do plasma, no entanto, não foi verificada nenhuma melhora da superfície corroída.

Outra solução, adotada para a melhora das superfícies pós-corrosão em plasma, foi a adoção de uma camada de cromo com função de brecar a corrosão, a chamada camada etch stop. Essa técnica funciona da seguinte maneira: imaginemos que estamos na etapa de deposição da camada do núcleo. Primeiramente depositamos uma fina camada de cromo. Então utilizamos a máscara invertida da definição do guia para revelar essa forma na fina camada de cromo. A partir daí, depositamos a camada de oxinitreto de silício de 4 µm do núcleo. Em seguida depositamos uma nova camada de cromo que servirá como máscara para definir a geometria do guia, alinhada com aquela máscara invertida anteriormente

fotogravada. Depois de revelada, iniciamos o processo de corrosão com plasma para definir a geometria do guia.

Figura 4.19 - Etching de cromo da máscara invertida a) e máscara de cromo da geometria do núcleo sobre a camada do núcleo b).

A corrosão da camada de oxinitreto de silício ocorrerá até o momento de encontrar com aquela primeira camada de cromo depositada, a chamada camada de Etch Stop. Após verificarmos que a espessura corroída não aumenta, realizamos a remoção do cromo da máscara para definir a geometria do guia como do cromo utilizado como camada de proteção. E verificado, após a remoção do cromo, a alta qualidade da superfície de oxinitreto de silício protegida pelo cromo, como esperado.

Essa solução apresenta bons resultados, no entanto, adiciona duas etapas a mais para a fabricação de nosso dispositivo.

Figura 4.20 - Corrosão da camada do núcleo até a camada de etch stop a) e o núcleo definido pós remoção da camada de etch stop e da máscara b).

Na Figura 4.21 é mostrado as fotos do MEV comparando os processos utilizando a técnica de etch stop e a técnica anteriormente apresentada de tratamento da superfície pós-corrosão com RCA.

(a)

(b)

Figura 4.21 - Fotos tiradas no MEV para lâminas que passaram pelo processo de etch stop a) e lâminas que não passaram por esse processo.

Na Figura 4.21a é observada a boa qualidade da superfície utilizando o processo de etch stop. No entanto esse processo apresenta a dificuldade de realinhamento da máscara e que pode ser observado nas bordas laterais do núcleo na Figura 4.21a.

Não satisfeitos com os resultados obtidos, buscamos as respostas na literatura e encontramos um trabalho [51] que apresenta um estudo revelando os motivos de problemas como rugosidades das paredes laterais do núcleo e o surgimento dos pelinhos na superfície pós-corrosão com plasma. A seguir serão relatados os motivos e as soluções propostas para esses problemas. No trabalho é relatado que o aparecimento dos “pelinhos” é devido a uma re-deposição de cromo na superfície corroída arrancado da máscara de cromo devido à alta energia dos íons bombardeados no processo de corrosão por plasma. Esse cromo re-depositado funciona como uma nova “micro-máscara” formando durante a corrosão essas estruturas colunares parecidas com pelinhos. Uma solução proposta para eliminar esse problema é a utilização do fotoresiste de SU-8 como máscara, protegendo a superfície de cromo e eliminando esse problema.

Outro problema relatado e que foi constatado em nossas fotos é o problema da rugosidade das paredes laterais do núcleo. No trabalho estudado o aparecimento da rugosidade nas paredes laterais é devido ao problema de corrosão úmida para definição da geometria da máscara de cromo. Isso é constatado quando a definição

da máscara é feita pelo processo de corrosão por plasma. Com esse processo as paredes laterais ficam com qualidade melhor. Isso é explicado pela transferência das irregularidades da máscara de cromo que aparece quando é utilizada a corrosão úmida.

Figura 4.22 - Foto mostrando a rugosidade lateral do guia originada pela corrosão úmida do cromo.

Como é visto na Figura 4.22, existe o aparecimento de rugosidades na parede lateral, muito prejudicial ao guiamento da luz quando utilizamos a corrosão úmida.

Para a solução dos problemas citados acima, o autor do trabalho propõe a seguinte solução. Inicialmente deposita-se uma camada de cromo fina. Depois dessa camada, depositamos o SU-8 e define-se a geometria (a). O SU-8 funciona como proteção para o cromo, evitando a re-deposição de partículas de cromo. Em seguida é realizada a definição do cromo pelo processo de plasma etch (b). Dessa forma evitamos o processo de corrosão úmida que gera a rugosidade das paredes laterais. O processo continua com a definição do núcleo (c e d). O processo descrito acima é ilustrado na Figura 4.23.

Figura 4.23 - Ilustração do processo que utiliza o SU-8 para melhorar as superfícies de corrosão em plasma.

Neste momento estamos importando o SU-8 no intuito de utilizar esta técnica para corrosão das paredes verticais com plasma Etching. Essa técnica deverá ser utilizada em trabalhos futuros.

Também verificamos, que parte do problema de não linearidade dos guias, citadas acima, poderiam estar se originando de problemas provenientes da máscara utilizada. Partindo dessa suposição, observamos com um olhar mais criterioso os fotolitos utilizados para a fabricação das máscaras que definem a geometria do núcleo. Nessas observações foi verificado no microscópio óptico que as máscaras feitas utilizando esses fotolitos, possuíam pequenos problemas de não linearidade. Foi verificado que essas irregularidades eram originadas do próprio fotolito. Isso pode ser visto na Figura 4.24, onde a região escura é a parte que define a geometria das máscaras e a região clara é o suporte do microscópio.

Figura 4.24 - Foto tirada no microscópio óptico mostrando as irregularidades do fotolito.

Constatados esses problemas, resolvemos realizar um teste comparando a qualidade da linearidade dos guias utilizando as máscaras feitas com esse fotolito e as máscaras feitas no CenPRA que possuem um sistema de fabricação de máscaras de alta qualidade com resolução de até 1 μm . Essa máscara, feita no CenPRA, foi emprestada do Laboratório de Sistemas Integráveis - LSI.

Nesse processo utilizamos as mesmas condições no processo de deposição das camadas, na fotogração e na corrosão por plasma no intuito de poder comprar ambos resultados.

Os resultados são mostrados na Figura 4.25.

Figura 4.25 - Guia utilizando máscara com processo de fotolito (a) e um guia feito com a máscara do CenPRA (b).

São observadas nas fotos da Figura 4.25 que os guias feitos com a máscara do CenPRA (Figura 4.25b) apresentam boas características com relação à linearidade, diferente do guia fabricado com a máscara feita utilizando o fotolito (Figura 4.25a).

4.1.5. Deposição da Cobertura e Abertura das Cavidades

A próxima etapa consiste na deposição da cobertura do núcleo. Antes da deposição, devemos remover o cromo utilizado na etapa anterior como máscara. Essa nova camada deve possuir uma espessura de 2 μm e índice de refração baixo, que nesse caso foi de 1,47. As condições utilizadas na deposição são descritas na Tabela 4-7.

Tabela 4-7 - Condições para deposição do filme de oxinitreto de silício no reator.

Fluxo de SiH ₄ (sccm)	Fluxo de N ₂ O (sccm)	Fluxo de N ₂ (sccm)	Potência (W)	Tempo (min)	Temperatura (°C)
30	75	0	200	89	320

Na Figura 4.26 é ilustrada a lâmina pós-deposição da cobertura.

Figura 4.26 - Etapa de deposição da cobertura.

A próxima etapa no processo de fabricação tem como objetivo remover o filme depositado sobre a região onde haverá o contato das agulhas com o filamento de cromo, a remoção do filme na região onde será feita a cavidade de isolamento térmico e a remoção do filme nas extremidades do interferômetro para o acoplamento da fibra óptica. Para a realização dessa etapa foi utilizada uma máscara de cromo, de aproximadamente 400nm, que vai permitir remover uma espessura de filme de 4,8 μm .

A Figura 4.27 mostra a máscara utilizada.

Figura 4.27 - Máscara utilizada para definir as regiões de acoplamento, contatos elétricos e cavidades de isolamento térmico.

Nessa corrosão foi utilizado o plasma de CHF_3 , pois o tempo de corrosão é alto e o plasma de SF_6 é muito nocivo ao cromo. Com a utilização do plasma de CHF_3 , foi necessário utilizar alternadamente o plasma de O_2 com o objetivo de remover o polímero formado na corrosão e, assim, permitir o avanço da corrosão. A Figura 4.28 ilustra como fica a lâmina após revelação do cromo.

Figura 4.28 - Lâmina com a máscara de cromo para abertura das cavidades e região de acoplamento.

É nessa etapa que observamos porque o filamento de cromo deve ser depositado depois do cladding 1. Verificamos que depois da corrosão do cladding 2, do núcleo e do carbetto, o plasma de CHF_3 fica em contato com o filamento de cromo da resistência durante o tempo para corroer apenas o cladding 1, não afetando, assim o contato da resistência. Após a corrosão por plasma em CHF_3 e remoção do cromo a estrutura se apresenta como mostrado na Figura 4.29.

Figura 4.29 - Lâmina após a corrosão em plasma e remoção da máscara de cromo.

Nessa etapa de remoção do cromo, foi necessário colocar fotoressiste na região dos contatos do filamento de cromo para não remover o cromo da resistência.

Após essa etapa, iniciamos o processo de corrosão com KOH, com o objetivo de abrir a cavidade de isolamento térmico e permitir também um aprofundamento da região da entrada e saída dos guias para acoplamento das fibras ópticas. O tempo mínimo de corrosão deve ser de 65 min, visto que o raio da fibra óptica é de $65\ \mu\text{m}$ (incluindo o cladding) e a taxa de corrosão do silício na direção (100) é de $1\ \mu\text{m}/\text{min}$. Isto é importante para ter o núcleo da fibra óptica alinhada com o núcleo do guia na lâmina.

Na Figura 4.30 é mostrado o resultado da corrosão na região de isolamento térmico. Essas fotos foram tiradas do microscópio óptico.

(a)

(b)

Figura 4.30 - Foto da região de suspensão do braço focando a parte mais funda da cavidade (a) e focando a região da guia (b)

Na Figura 4.31 também é observada a região de isolamento térmico após a corrosão em KOH, no entanto a foto foi tirada no MEV.

Figura 4.31 - Foto tirada no MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) da região suspensa.

Já na Figura 4.32 é mostrada a região de acoplamento após a corrosão em KOH.

(a)

(b)

Figura 4.32 - Fotos tiradas no MEV da região de acoplamento (a) e da superfície frontal do guia (b) onde ocorre a inserção da luz no núcleo.

Uma vantagem verificada nessa etapa é que a parede do silício corroe de forma vertical abaixo do filme depositado, pois o guia está inclinado 45° em relação à lâmina, podendo, assim, aproximar a fibra óptica mais próxima do guia,

diferentemente de quando fazemos V-Groove em lâminas em que o guia não está inclinado a 45° e, assim, a fibra não se aproxima o máximo do guia pois encontra o plano 111 do silício com $54,74^\circ$ de inclinação.

É importante notar também o uso do cromo como resistência elétrica, pois, como este entrará em contato com o KOH, poderia haver corrosão, mas como o cromo é altamente seletivo, diferentemente do alumínio, o cromo suporta esta solução.

Após a corrosão em KOH temos o nosso dispositivo pronto para caracterização como mostrado na Figura 4.33.

Figura 4.33 - Lâmina após corrosão em KOH.

Na Figura 4.34 é mostrada uma foto tirada do MEV de um dispositivo pronto para caracterização óptica.

Figura 4.34 - Foto tirada no MEV da lâmina pós-fabricação.

4.2. CARACTERIZAÇÃO ÓPTICA

Antes de iniciar a caracterização óptica, foi realizado um estudo para verificar quais grandezas e características poderiam ser medidas no dispositivo termo-eletro-óptico. Foi visto em trabalhos semelhantes [52] que as principais características medidas nesse tipo de dispositivo eram: velocidade de chaveamento e a potência necessária para o chaveamento.

Nessas duas análises serão feitas comparações entre os dispositivos com cavidades e sem cavidades, de forma a verificar as vantagens e desvantagens desse mecanismo em relação às características de velocidade e potência. Com esses dados também será possível concluir a aplicabilidade desse dispositivo.

Portanto, antes de iniciar as caracterizações, devemos definir o que representa cada uma dessas características e também definir a seqüência de processos para realizar essas medidas, ou seja, definir um padrão de caracterização.

- Potência de chaveamento

Dentro da teoria de sinais digitais a palavra chaveamento significa a alteração de estado: de certo para errado, de sim para não, de verdadeiro para falso, de 0 para 1 ou vice-versa. No nosso dispositivo o sinal de saída é senoidal, e, portanto, o chaveamento significa sair do valor máximo da onda para o valor mínimo da onda ou o oposto.

Figura 4.35 - Sinal de potência óptica em função da tensão.

Portanto, podemos definir como potência necessária para o chaveamento:

$$P = \frac{(V_v - V_p)^2}{R} \quad (4.5)$$

onde V_v é a tensão quando a potência luminosa é mínima, V_p é a tensão quando a potência luminosa é máxima e R é a resistência do cromo.

Definido o conceito de potência de chaveamento, vamos definir agora a seqüência de procedimentos para realizar essas medidas.

Inicialmente, a tensão aplicada na resistência de cromo é zero e a potência na saída do interferômetro é máxima. Ao polarizarmos a resistência com baixa tensão a tendência é diminuir a potência óptica na saída em vista da interferência destrutiva que ocorrerá com a mudança de temperatura no braço sensor do IMZ. Essa potência na saída do IMZ diminuirá até chegar a zero, onde ocorre a interferência destrutiva total. A partir daí a potência luminosa deverá aumentar (derivada zero). Com o valor da tensão no ponto em que a potência luminosa é zero conseguimos obter a potência elétrica necessária para o chaveamento. A potência elétrica é dada por:

$$P = \frac{V_0^2}{R} \quad (4.6)$$

onde V_0 é a tensão no ponto onde ocorre o primeiro mínimo de potência óptica.

- Velocidade de Chaveamento

Outra característica importante em sistemas de chaveamento é a velocidade com que o circuito consegue mudar de estado, ou seja, é o tempo necessário para o circuito sair de um estado e mudar para outro estado com o sinal estabilizado. Na Figura 4.3636 é ilustrado o tempo de chaveamento.

Figura 4.36 - Sinal de potência óptica em função do tempo.

Para realizar a medida do tempo de chaveamento utiliza-se um gerador de funções de onda elétrica e um mecanismo de captura dos sinais do detector óptico. A medida é realizada da seguinte maneira:

Uma onda quadrada com amplitude obtida na seção anterior (potência elétrica necessária para o chaveamento) é injetada na resistência de cromo. Os dados da potência óptica obtida com detector óptico são adquiridos de forma discreta, ou seja, em intervalos de tempo pré-determinados. Dessa maneira, obtemos uma seqüência de pontos que podem ser plotados para a obtenção do gráfico de potência luminosa em função do tempo.

Figura 4.37 - Sinal onda quadrado elétrico (a) e sinal de potência óptica (b).

É visto na Figura 4.37 que um sinal elétrico quadrado que é injetado na resistência de cromo e a resposta do sinal óptico, visto no gráfico b. Como podemos notar, existe um intervalo de tempo ($t_2 - t_1$) de mudança entre a potência mínima e a potência máxima. Esse intervalo é o tempo de chaveamento do dispositivo.

- Características dos dispositivos com relação à velocidade de chaveamento e potência elétrica, em função das cavidades.

No nosso dispositivo foram usadas cavidades para isolar termicamente a região de aquecimento. Essas cavidades alteram as características de velocidade de chaveamento e a potência necessária para o chaveamento.

Isso se deve ao fato de que o silício possui alta condutividade térmica (150 W/mK) [52] que prove alta dissipação do calor, diferente do filme de óxido de silício que possui condutividade térmica baixa de 1,38W/mK [52]. Portanto, uma região isolada do silício, provavelmente necessitará de menos potência para realizar o chaveamento, pois a dissipação do calor será menor do que se estivesse em contato com o silício.

Com a utilização das cavidades outra característica importante desse tipo de dispositivo será afetada, a velocidade de chaveamento. Sem o silício para dissipar o calor na região de aquecimento é esperada uma diminuição da velocidade de chaveamento devido à conservação do calor nessa região.

Depois de realizado os estudos das características desses dispositivos é iniciada a caracterização óptica. Os resultados obtidos foram de um dispositivo com largura de guia de 30 μm e sem cavidade de isolamento térmica. Os resultados das medidas são mostrados na Figura 4.38.

Figura 4.38 - Potência luminosa em função da potencia elétrica aplicada ao resistor de cromo de um dispositivo sem cavidade.

Podemos observar no gráfico da Figura 4.38 que a potência luminosa atinge seu valor mínimo quando uma potência elétrica de aproximadamente 80 mW é aplicada. Notamos também que para potências elétricas maiores que 110 mW existe uma estabilização do sinal. Esta estabilização pode ser devida talvez à dilatação térmica do material, que provocou o desalinhamento do guia.

Para os outros dispositivos não foi possível realizar as medidas de caracterização óptica devido à baixa potência óptica obtida nas saídas desses dispositivos.

Em função da baixa potência óptica obtida na saída dos guias e, em vista das irregularidades das paredes laterais observadas nas fotos do MEV, imaginamos que poderíamos diminuir as perdas por radiação mudando a profundidade do guia RIB, devido à diminuição da área de região corroída. Estudos teóricos e experimentais realizados dentro de nosso grupo mostraram que essas perdas poderiam ser muito significativas dependendo do valor da rugosidade da parede lateral. Por exemplo, para rugosidades da ordem de 90 nm as perdas poderiam ser de até 10 dB/cm em guias de onda de 7 μm de largura [53,54]. Dessa maneira, imaginamos que com uma possível redução da profundidade de corrosão do RIB, a área do núcleo com irregularidades diminuiria, e conseqüentemente, as perdas por radiação nas paredes laterais do núcleo poderiam diminuir também. Assim, iniciamos um estudo na literatura e também verificamos em simulações feitas em Mathematica com guias de onda ARROW rib a influência da diminuição da profundidade de corrosão.

Na Figura 4.39 é ilustrada a região do guia com alta rugosidade.

Figura 4.39 - Ilustração de um guia ARROW RIB com rugosidade na parede lateral do núcleo.

Na Tabela 4-8 é mostrada a atenuação do guia ARROW rib para diferentes profundidades de corrosão com guias de largura de 30 μm obtidas no programa desenvolvido.

Tabela 4-8 - Atenuação dos guias ARROW RIB em função da profundidade de corrosão do núcleo.

Profundidade(μm)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
Atenuação(dB/m)	0,0369	0,0412	0,0456	0,0474	0,0462	0,0440	0,0428

É verificado também nas simulações que o confinamento do campo eletromagnético diminui com a diminuição da profundidade de corrosão.

Figura 4.40 - Confinamento do campo eletromagnético para um guia RIB com baixa profundidade de corrosão a) e outro guia rib com profundidade de corrosão maior b)

Observando essas características, imaginamos inicialmente que devido às regiões curvas do IMZ poderíamos aumentar as perdas de atenuação nas curvas com a diminuição da profundidade do rib devido a esse maior espalhamento do campo eletromagnético. Iniciamos então uma busca na literatura para confirmar essas suspeitas. Na literatura encontramos um trabalho que confirmou nossas expectativas [55]. Outra característica importante notada no trabalho era que o aumento da largura do guia diminuía as perdas nas regiões curvas dos guias rib, no entanto não podíamos aumentar muito a largura dos guias, pois queríamos guias com poucos modos e, o aumento da largura do guia ocasiona o aumento do número de modos propagantes.

Em vista disso, realizamos a fabricação de guias com diferentes alturas de rib para verificar em qual deles ocorreria menor atenuação. Na caracterização foi

verificada que o aumento da largura dos guias permitiu maior propagação da luz. No entanto, mesmo com a diminuição das perdas, ainda não foi possível obter potência óptica mensurável na saída, necessária para a caracterização óptica. A análise foi feita visualmente.

Já com relação às medidas comparativas de altura de rib, foi verificado que os guias com maior profundidade, ou seja, $3,5\mu\text{m}$, apresentaram menor atenuação. Essas análises também foram feitas visualmente.

Visando ainda diminuir ao máximo as perdas nos guias iniciamos alguns testes para comparar a eficiência de acoplamento da luz entre guias que passaram pelo processo de lixamento e polimento e os guias que possuem o sistema de acoplamento semelhante ao V-Groove. Para efeito de comparação realizamos medidas nas amostras com as cavidades semelhantes ao V-Groove e após essas medidas, as lâminas foram embutidas para a realização do processo de lixamento e polimento. Toda a análise foi feita visualmente, visto que as perdas eram muito grandes e a potência na saída do IMZ era insuficiente para realizar as medidas.

Na Figura 4.41 é mostrado o resultado da superfície de acoplamento para os guias tratados com lixamento e polimento e, os guias que possuem a estrutura de acoplamento semelhante ao sistema V-Groove.

Figura 4.41 - Superfície tratada com lixamento e polimento (a) e superfície de acoplamento de guias com acoplamento em estrutura semelhante ao V-Groove (b).

É verificado na Figura 4.41 que a superfície de acoplamento que passou pelo processo de lixamento e polimento, apresenta qualidade melhor, ou seja, possui poucas irregularidades.

No entanto, foi visto melhoras quando realizamos as medidas de caracterização. Nesse processo a análise também foi feita visualmente, visto que as perdas eram muito grandes e não havia potência óptica suficiente na saída para realizar as medidas.

Acreditamos que, embora tenhamos conseguido alguns resultados preliminares, melhores resultados poderão ser conseguidos quando seja utilizada uma nova máscara com boa definição geométrica e o polímero SU-8 no processo de corrosão por plasma. Isto permitirá aumentar a potência óptica de saída possibilitando observar o efeito interferométrico com maior precisão.

4.3. CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA

- Dispositivo sem Cavidade

A seguir serão apresentados os resultados das medidas da corrente em função da tensão aplicada no resistor de cromo. Para realizar essas medidas polarizamos o resistor utilizando uma fonte de tensão contínua. Para realizar os contatos foram utilizados as agulhas com os posicionadores citados anteriormente. Em série com o resistor utilizamos um multímetro para medir a corrente.

Na Figura 4.42 é mostrado o gráfico da resistência em função da tensão elétrica aplicada no resistor.

Figura 4.42 - Valor da resistência de cromo em função da tensão aplicada.

Podemos verificar que o valor da resistência não aumenta com o aumento da tensão aplicada e, se mantém em uma faixa de valores pequena. Dessa maneira podemos concluir que no dispositivo sem cavidade o calor é dissipado para outras regiões. Isso se deve ao fato de que o silício está em contato direto com a região de aquecimento e, portanto, provê grande dissipação do calor.

Para comprovar essa hipótese de dissipação do calor por parte do silício, podemos fazer uma análise da temperatura no local de maior dissipação de potência térmica. Para isso usaremos a relação entre o valor de resistência de um material com a temperatura desse material. A seguir é mostrada a equação.

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (4.7)$$

onde R é a resistência em uma temperatura T, R_0 é a resistência em uma temperatura T_0 , ΔT é a variação de temperatura e α é o coeficiente de temperatura da resistência.

Como conhecemos a resistência do resistor na temperatura ambiente, o coeficiente de temperatura do cromo ($0.00214^\circ\text{C}^{-1}$) [56] e a resistência para a temperatura final, somos capazes de determinar a temperatura da região do resistor para as diferentes tensões aplicadas.

No gráfico da Figura 4.43 é mostrado o valor da temperatura em função da tensão aplicada.

Figura 4.43 - Gráfico da temperatura em função da tensão aplicada no resistor de cromo para um dispositivo sem cavidade

O que observamos no gráfico da Figura 4.43 é que a temperatura se mantém constante para o aumento da tensão aplicada, ou seja, mesmo com o aumento de dissipação térmica por parte da resistência, a temperatura se mantém constante. Isso se deve ao fato de que o silício é capaz de dissipar o calor para outras regiões da lâmina.

- Dispositivos com cavidade

O resultado das medidas realizadas para o dispositivo com cavidade é apresentado na Figura 4.44.

Figura 4.44 - Corrente elétrica no resistor de cromo em função da tensão aplicada.

É importante citar aqui, que durante as medidas foi observado que quando a tensão de polarização se aproximava de 2V o resistor se rompia na região suspensa.

Podemos observar nesse gráfico uma relação linear entre corrente e tensão no intervalo de tensão de 0 a 1,7V. No entanto a partir de 1,7V notamos a estabilização da corrente quando aumentamos a tensão. Isso implica que o valor da resistência aumentou nessa região, como pode ser visto na Figura 4.45.

Figura 4.45 - Valor da resistência de cromo em função da tensão aplicada.

O aumento da resistência se deve ao fato do aumento da temperatura nessa região.

Para comprovar esse fato, realizaremos o mesmo cálculo feito anteriormente para o dispositivo sem cavidade, no entanto, nesse caso faremos algumas mudanças para tentar obter o valor mais próximo da temperatura na região suspensa. Essa mudança do cálculo é justificada pelos resultados obtidos no cálculo da temperatura para o dispositivo sem cavidade. Foi observado que não houve variação da temperatura com o aumento da tensão elétrica aplicada. Portanto, no caso do dispositivo com cavidade, podemos considerar que na região não suspensa o resistor não sofre um aumento da temperatura, e que o aumento da resistência se deve apenas à região do resistor que está suspenso. Como foi visto nas seções anteriores, 75% da resistência se refere à região do resistor suspensa e os outros 25% a região não suspensa. O cálculo da temperatura foi feito da seguinte maneira:

Considerações Iniciais: Temperatura Ambiente=27°C

Resistência Medida na Temperatura Ambiente = 20Ω

Porcentagem da Resistência Suspensa=75%

Resistor não polarizado

$$R_T = R_S + R_{NS}$$

$$20 = 15 + 5$$

R_T = Resistência Total

R_S = Resistência Suspensa

R_{NS} = Resistência não suspensa

Resistor Polarizado

$$R_{TP} = R_{SP} + R_{NSP}$$

$$R_{TP} = 15(1 + \alpha(T_F - T_I)) + 5$$

R_{TP} = Resistência Total Polarizada

R_{SP} = Resistência Suspensa Polarizada

R_{NSP} = Resistência não Suspensa Polarizada

α = coeficiente de temperatura do cromo

T_I = Temperatura Inicial (Ambiente)

T_F = Temperatura Final

Isolando T_F obtemos a seguinte equação que nos fornece a temperatura na região suspensa:

$$T_F = \frac{R_{TF} - 5}{15 * \alpha} - \frac{1}{\alpha} - T_i \quad (4.8)$$

Na Figura 4.46 é mostrado o gráfico da temperatura em função da tensão aplicada no resistor.

Figura 4.46 - Gráfico da temperatura em função da tensão de polarização do resistor de cromo no dispositivo com cavidade.

Podemos concluir através do gráfico da Figura 4.46 que o calor dissipado pelo resistor na região suspensa não se propagou para outras regiões, visto o incremento de temperatura observado. Esse resultado já era esperado, pois, no dispositivo com cavidade, a transferência de calor ocorre apenas através do oxinitreto de silício, que possui baixa condutividade térmica se comparado ao silício. Nesse caso, não temos o silício que atua como dissipador de calor em contato com o resistor e, portanto, o calor fica concentrado da região isolada pela cavidade.

CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

Depois de realizado o estudo teórico, as caracterizações dos filmes, a fabricação do dispositivo e as caracterizações, térmica e óptica, do dispositivo, foi possível tirar várias conclusões com relação ao projeto para desenvolvimento de dispositivos termo-eletro-ópticos. Os estudos realizados permitem fazer uma análise de viabilidade e de aplicação desse tipo de dispositivo, além de mostrar várias técnicas melhoradas para a fabricação desses dispositivos dentro da óptica integrada. A seguir, será relatada as principais conclusões tiradas no trabalho de Mestrado, de forma resumida e objetiva.

Inicialmente, quando realizamos os estudos da influência do ruído multimodo no dispositivo, vimos que a existência de alguns modos não impede o bom desempenho do dispositivo, quando o comprimento da região aquecida no braço sensor gira em torno de 600 μm .

Vimos, também, que quando necessitamos de guia monomodo a melhor opção é o guia ARROW, pois apresenta as vantagens de flexibilidade nos parâmetros de espessura e índice de refração para a sua fabricação, diferente do guia convencional, que para núcleo em torno de 4 μm necessita de um controle muito grande do índice de refração, além da necessidade de coberturas espessas, inviabilizando, assim, este tipo de guia para aplicação em sensores que necessitam de guia monomodo.

Foi verificada, durante a caracterização dos filmes de oxinitreto de silício, a ampla faixa do índice de refração que podemos obter, permitindo, assim, alta flexibilidade no desenvolvimento de guias. Também verificamos o bom controle da espessura depositada que podemos ter nas deposições pela técnica PECVD, visto que a taxa situa-se em torno de 20 nm/min. Além desses pontos, vimos que as diferentes composições dos filmes apresentam “stress” diferente, possibilitando assim, deposições mais espessas com filmes com “stress” baixo.

Com relação ao desenvolvimento da isolamento térmica, conseguimos desenvolver um processo que permitiu a isolamento completa da região de aquecimento, com tempo de fabricação bem menor comparados aos trabalhos vistos em outros artigos, possibilitando a fabricação do dispositivo em tempo menor e com mais qualidade dos filmes resultantes pós-corrosões.

No acoplamento, criamos uma sequência de processos que permitiram eliminar as etapas de lixamento e polimento do processo de fabricação, semelhante à utilização das cavidades V-Groove, no entanto, com a vantagem da aproximação máxima da fibra durante a etapa de acoplamento. Porém, foi visto através de fotos do microscópio eletrônico de varredura que a superfície de acoplamento não tinha uma qualidade tão boa quanto à superfície tratada com lixamento e polimento.

No estudo da qualidade de corrosão dos filmes, verificamos as vantagens da utilização do plasma composto de SF_6 e O_2 com relação à utilização de CHF_3 e O_2 . Também realizamos um estudo da superfície dos filmes pós-corrosões e verificamos a necessidade do tratamento dessas superfícies para melhoramento da aderência e qualidade das superfícies. Foi apresentada uma técnica para o melhoramento da superfície corroída, a técnica etch stop. Essa apresenta bons resultados de superfície, no entanto existe o problema de realinhamento da máscara. Nesse sentido, também foi verificada na literatura a utilização do SU-8 para eliminar o problema de rugosidade das paredes laterais do núcleo e do aparecimento das estruturas colunares, nas superfícies pós-corrosão em plasma.

Na caracterização óptica verificamos através dos resultados do dispositivo multimodo com cavidade a alteração da potência óptica em função da alteração da temperatura no braço sensor. Não foi possível analisar a influência das cavidades com relação à velocidade chaveamento e à potência necessária para o chaveamento devido aos problemas de perdas ópticas descritas no trabalho.

Já com relação à caracterização térmica, pudemos verificar a influência das cavidades em relação à dissipação do calor na região de aquecimento. Foi verificado que nos dispositivos com cavidade a dissipação do calor é inferior em relação aos dispositivos sem cavidade, através do aumento da resistência do resistor de cromo. Esses resultados estão de acordo com dados obtidos em outros trabalhos.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi verificado no trabalho realizado a viabilidade de construção do dispositivo eletro-termo-óptico. No entanto, durante o trabalho, encontramos algumas dificuldades com relação às perdas ópticas nos guias. A sugestão para trabalhos futuros está relacionada com esses aspectos.

Foi visto a necessidade de utilização de um novo processo de definição das geometrias do núcleo, que envolve os processos de fotogração e corrosão. É sugerida, a utilização do composto SU-8 para solucionar os problemas de rugosidade das superfícies. Também, foi visto, a necessidade da utilização de máscaras com melhores definições, de forma a não propagar as irregularidades da máscara para a geometria do núcleo.

Além disso, existe a possibilidade de desenvolvimento de um sensor térmico. Para isso serão necessárias a remoção da resistência de cromo e a colocação de algum material escuro na região de isolamento térmico para absorção de radiação térmica dos corpos. Assim, faz-se possível, à construção de um sensor térmico.

5.3. TRABALHOS DECORRENTES

Artigos publicados em Revista Internacional Indexada

- Mina, A. M. ; Baez, H. ; Martins, G. S. P. ; Alayo, M. I. . Developing and Fabrication of an Optimized Thermo-Electro-Optic Device Using a Mach-Zehnder Interferometer. Journal of Non-Crystalline Solids, v. 354, p. 2565-2570, 2008.

Trabalhos publicados em Conferências Nacionais e Internacionais

- Mina, A. M. ; Baez, H. ; Alayo, M. I. . Fabrication and Characterization of a Thermo-Electro-Optic Device Using a Mach-Zehnder Interferometer. In: 22nd International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors (ICANS 22), 2007, Colorado - USA. Proceedings of the 22nd International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors (ICANS 22), 2007. p. ThP15.19.
- Martins, G. S. P. ; Mina, A. M. ; Alayo, M. I. . Fabrication of an Electro-Optical Temperature Sensor Based on Silicon Oxynitride Films Deposited by PECVD. In: Microelectronics Technology and Devices SBMICRO 2006, 2006, Belo Horizonte. Proceedings of the Microelectronics Technology and Devices SBMicro 2006, 2006. v. 4. p. 161-169.

Anexo A

Teoria de Maxwell

Como dito anteriormente, para a realização dos cálculos da distribuição de intensidade de luz entre os modos existentes nos guias para a simulação do efeito do ruído multimodo e para realizar o estudo de viabilidade de uso de guias de onda monomodo convencionais foi necessária o estudo da teoria de Maxwell para o desenvolvimento dos programas de simulação. A seguir, mostraremos a teoria usada nesses programas.

A teoria de Maxwell inicia com as equações principais da teoria eletromagnética que são dadas abaixo

$$\nabla \times E = -\mu \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \quad (\text{A.1})$$

$$\nabla \times H = \varepsilon \cdot \frac{\partial E}{\partial t} + J \quad (\text{A.2})$$

onde E representa o campo elétrico, H representa o campo magnético, J é a densidade de corrente, μ a permeabilidade do meio e ε a permissividade do meio.

Como as variações dos campos, elétrico e magnético, em função do tempo são da forma senoidal, estes campos podem ser representados da seguinte forma:

$$E(t) = |E| \cos(\omega t + \phi) \quad (\text{A.3})$$

$$H(t) = |H| \cos(\omega t + \phi) \quad (\text{A.4})$$

onde $|E|$ e $|H|$ são respectivamente as amplitudes do campo elétrico e magnético e ϕ é a fase.

Essas equações são comumente representadas por:

$$E(t) = \text{Re}\{E.e^{j\omega t}\} \quad (\text{A.5})$$

$$H(t) = \text{Re}\{H.e^{j\omega t}\} \quad (\text{A.6})$$

Até o momento foi considerada apenas a variação desses campos no tempo, no entanto o campo eletromagnético se propaga no espaço, o que implica que devemos considerar nas equações esse termo. Considerando que essa onda eletromagnética se propaga na direção z das coordenadas consideradas, podemos reescrever as equações da seguinte forma:

$$E = \text{Re}\{E(x, y).e^{j(\omega.t - \beta.z)}\} \quad (\text{A.7})$$

$$H = \text{Re}\{H(x, y).e^{j(\omega.t - \beta.z)}\} \quad (\text{A.8})$$

onde $E(x, y)$ e $H(x, y)$ representa a amplitude do campo elétrico e magnético em função das coordenadas x e y, e β é a constante de propagação no eixo z que é dada por:

$$\beta = k.n_1.\cos(\varphi) \quad (\text{A.9})$$

onde $k.n_1$ ($k = 2.\pi / \lambda$) é o número de onda e φ é o ângulo entre o eixo z e o raio de propagação.

Realizando as operações matemáticas, $\nabla \times E$ e $\nabla \times H$, das equações de Maxwell e, considerando que o meio de propagação das ondas eletromagnéticas seja um meio sem cargas ($J=0$), não magnético ($\mu = \mu_0$) e dielétrico sem perdas, obtemos as seguintes equações:

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y = -j\omega\mu_0 H_x \quad (\text{A.10})$$

$$-j\beta E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu_0 H_y \quad (\text{A.11})$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu_0 H_z \quad (\text{A.12})$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = j\omega\epsilon_0 n^2 E_x \quad (\text{A.13})$$

$$-j\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega\epsilon_0 n^2 E_y \quad (\text{A.14})$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon_0 n^2 E_z \quad (\text{A.15})$$

Derivando as equações (A.7) e (A.8) em função do tempo e de z, obtemos as seguintes equações.

$$\frac{\partial E}{\partial t} = j\omega E(x, y).e^{j(\omega.t - \beta.z)} \quad (\text{A.16})$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = j\omega H(x, y).e^{j(\omega.t - \beta.z)} \quad (\text{A.17})$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = -j\beta E(x, y).e^{j(\omega.t - \beta.z)} \quad (\text{A.18})$$

$$\frac{\partial H}{\partial z} = -j\beta H(x, y).e^{j(\omega.t - \beta.z)} \quad (\text{A.19})$$

Com as equações definidas até o momento, podemos iniciar o estudo do comportamento das ondas eletromagnéticas em um guia slab. Em guia slab os campos E e H não são funções da coordenada y e, portanto, podemos considerar que as derivadas parciais em relação a essa variável são iguais a zero.

Fazendo as considerações acima nas equações A.10 a A.19, obtemos as seguintes equações:

$$j.\beta.E_y = -j.\omega.\mu_0 H_x \quad (\text{A.20})$$

$$-j.\beta.E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu_0.H_y \quad (\text{A.21})$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -j\omega\mu_0.H_z \quad (\text{A.22})$$

$$j.\beta.H_y = j\omega\varepsilon_0.n^2.E_x \quad (\text{A.23})$$

$$-j.\beta.H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega\varepsilon_0.n^2.E_y \quad (\text{A.24})$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = j\omega\varepsilon_0.n^2.E_z \quad (\text{A.25})$$

Para obter o modo TE completo, que é definido pelos campos E_y , H_x e H_z vamos manipular algebricamente as equações obtidas até o momento.

Inicialmente vamos substituir H_x obtido em (A.20), na equação (A.24).

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} = j\left(\frac{\beta^2}{\omega\mu_0} - \omega\varepsilon_0.n^2\right)E_y \quad (\text{A.26})$$

Para obter a equação apenas em função de E_y devemos substituir o termo de H_z da equação acima. Para isso fazemos a derivada parcial da equação (A.22) em relação a x . A equação fica da forma:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = -j\omega\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (\text{A.27})$$

Substituindo agora o termo H_z na equação (A.26) e utilizando-se da igualdade $k^2 = \omega^2\mu_0\varepsilon_0$ obtemos:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (k^2.n^2 - \beta^2)E_y = 0 \quad (\text{A.28})$$

Essa equação juntamente com H_x de (A.20) e H_z da (A.22), e considerando que E_x, E_z e H_y iguais a 0, definimos o modo TE. Portanto as equações que definem o modo TE são dadas abaixo.

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (k^2 n^2 - \beta^2) E_y = 0 \quad (\text{A.29})$$

$$H_x = -\frac{\beta}{\omega \mu_0} E_y \quad (\text{A.30})$$

$$H_z = \frac{j}{\omega \mu_0} \cdot \frac{dE_y}{dx} \quad (\text{A.31})$$

$$E_x = E_z = H_y = 0 \quad (\text{A.32})$$

Fazendo as manipulações algébricas semelhantes ao que foi feito para o modo TE só que para o modo TM obtemos as equações que definem este modo. As equações são dadas abaixo.

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{n^2} \cdot \frac{dH_y}{dx} \right) + (k^2 n^2 - \beta^2) H_y = 0 \quad (\text{A.33})$$

$$E_x = \frac{\beta}{\omega \epsilon_0 n^2} H_y \quad (\text{A.34})$$

$$E_z = \frac{-j}{\omega \epsilon_0 n^2} \cdot \frac{dH_y}{dx} \quad (\text{A.35})$$

$$E_y = H_x = H_z = 0 \quad (\text{A.36})$$

Definidos os modos TE e TM no guia slab, resolveremos agora as equações diferenciais para as diferentes posições no guia, do campo elétrico e magnético.

Inicialmente resolveremos as equações para o modo TE.

Para a cobertura, onde $x > a$ temos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \underbrace{(k^2 n_0^2 - \beta^2)}_{<0} E_{yc} = 0 \quad , \quad \sigma = \sqrt{\beta^2 - k^2 n_0^2} \\ \rightarrow \frac{d^2 E_{yc}}{dx^2} - \sigma^2 E_{yc} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.37})$$

$$E_{yc} = D.e^{-\sigma(x-a)} \text{ para } x > a$$

Para o núcleo $-a \leq x \leq a$

$$\frac{\partial^2 E_{yn}}{\partial x^2} + \underbrace{(k^2 n_1^2 - \beta^2)}_{>0} E_{yn} = 0 \quad \kappa = \sqrt{k^2 n_1^2 - \beta^2}$$

$$\rightarrow \frac{d^2 E_{yn}}{dx^2} - \kappa^2 E_{yn} = 0 \quad (\text{A.38})$$

$$E_{yn} = A \cdot \cos(\kappa x - \phi)$$

No revestimento onde $x < -a$ temos:

$$\frac{\partial^2 E_{ys}}{\partial x^2} + \underbrace{(k^2 n_s^2 - \beta^2)}_{<0} E_{ys} = 0 \quad \xi = \sqrt{\beta^2 - k^2 n_s^2}$$

$$\rightarrow \frac{d^2 E_{ys}}{dx^2} - \xi^2 E_{ys} = 0 \quad (\text{A.39})$$

$$E_{ys} = C \cdot e^{-\xi(x+a)}$$

Condições de contorno

1º condição.

$x = -a$

$$E_{yn}(x = -a) = E_{ys}(x = -a)$$

$$A \cdot \cos(-\kappa \cdot a - \phi) = C \cdot e^{-\xi(-a+a)} \rightarrow C = A \cdot \cos(-\kappa \cdot a - \phi) = A \cdot \cos(\kappa \cdot a + \phi) \quad (\text{A.40})$$

$x=a$

$$E_{yn}(x=a) = E_{yc}(x=a)$$

$$A.\cos(\kappa.a - \phi) = D.e^{-\sigma(a-a)} \rightarrow D = A.\cos(\kappa.a - \phi) \quad (\text{A.41})$$

$$E_y = \begin{cases} A.\cos(\kappa.a - \phi)e^{-\sigma(x-a)} & \dots\dots x > a \\ A.\cos(\kappa.x - \phi) & \dots\dots -a \leq x \leq a \\ A.\cos(\kappa.a + \phi)e^{-\xi(x+a)} & \dots\dots x < -a \end{cases} \quad (\text{A.42})$$

Lembrando que:

$$H_z = \frac{j}{w.\mu_0} \cdot \frac{dE_y}{dx}$$

$$H_z = \begin{cases} -\sigma.A.\cos(\kappa.a - \phi)e^{-\sigma(x-a)} & \dots\dots x > a \\ -\kappa.A.\cos(\kappa.x - \phi) & \dots\dots -a \leq x \leq a \\ \xi.A.\cos(\kappa.a + \phi)e^{-\xi(x+a)} & \dots\dots x < -a \end{cases} \quad (\text{A.43})$$

2º Condição de contorno

$x=a$

$$-\sigma.A.\cos(\kappa.a - \phi).e^{-\sigma(a-a)} = -\kappa.A.\sin(\kappa.a - \phi) \quad (\text{A.44})$$

$x=-a$

$$-\kappa.A.\sin(\kappa.(-a) - \phi) = \xi.A.\cos(\kappa.a + \phi).e^{\xi(-a+a)} \quad (\text{A.45})$$

Fazendo:

$$u = \kappa.a \quad w = \xi.a \quad w' = \sigma.a$$

$$w'.\cos(u - \phi) = u.\sin(u - \phi) \quad (\text{A.46})$$

$$u.\sin(u + \phi) = w.\cos(u + \phi) \quad (\text{A.47})$$

$$\tan(u + \phi) = \frac{w}{u} \quad \tan(u - \phi) = \frac{w'}{u}$$

$$u + \phi = \arctan\left(\frac{w}{u}\right) \quad (\text{A.48})$$

$$u - \phi = \arctan\left(\frac{w'}{u}\right) \quad (\text{A.49})$$

Somando as duas equações e subtraindo temos:

$$u = \frac{1}{2} \cdot \left(\arctan\left(\frac{w}{u}\right) + \arctan\left(\frac{w'}{u}\right) \right) \quad (\text{A.50})$$

$$\phi = \frac{1}{2} \cdot \left(\arctan\left(\frac{w}{u}\right) - \arctan\left(\frac{w'}{u}\right) \right) \quad (\text{A.51})$$

Devemos achar mais duas equações, pois temos 4 incógnitas e 2 equações.

$$\begin{aligned} u^2 + w^2 &= (\kappa.a)^2 + (\xi.a)^2 = a^2(\kappa^2 + \xi^2) \\ &= a^2(\kappa^2.n_1^2 - \beta^2 + \beta^2 - \kappa^2.n_s^2) \\ &= \kappa^2.a^2(n_1^2 - n_s^2) = v^2 \\ u^2 + w^2 &= v^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
w'^2 &= \sigma^2 + a^2 = (\beta^2 - \kappa^2 . n_0^2) . a^2 - w^2 + w^2 \\
w'^2 &= \beta^2 . a^2 - \kappa^2 . n_0^2 . a^2 - (\beta^2 - \kappa^2 . n_s^2) . a^2 + w^2 \\
w'^2 &= -\kappa^2 . n_0^2 . a^2 + \kappa^2 . n_s^2 . a^2 + w^2 \\
w'^2 &= \kappa^2 . a^2 (n_s^2 - n_0^2) + w^2 \\
w'^2 &= \kappa^2 . a^2 (n_1^2 - n_s^2) . \underbrace{\frac{(n_s^2 - n_0^2)}{(n_1^2 - n_s^2)}}_{\gamma} + w^2 \\
w'^2 &= \gamma . v^2 - w^2
\end{aligned} \tag{A.52}$$

Com as equações acima podemos definir a distribuição do campo elétrico de cada modo guiado e assim calcular os valores dos vetores de Poynting de cada modo. O valor do vetor de Poynting para o modo TE é dado por:

$$P = \frac{\beta}{2 . w . \mu_0} \int_{-\infty}^{\infty} |E_y|^2 dx \tag{A.53}$$

Já o valor do vetor de Poynting para o modo TM é dado por:

$$P = \frac{\beta}{2 . w . \epsilon_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{n^2} |H_y|^2 dx \tag{A.54}$$

Anexo B

Elipsometria

Primeiramente analisemos a reflexão de uma onda plana na interface de dois meios. Podemos dividir o campo elétrico dessa onda em dois termos. O termo paralelo ao plano de incidência e o termo perpendicular ao plano de incidência. Abaixo ilustramos a incidência desse raio.

Figura B.1 - Ilustração da incidência e reflexão de um raio de luz.

Em elipsometria utilizamos as propriedades dos raios refletidos, por isso será necessário conhecer o coeficiente de reflexão de Fresnel, que fornece a razão das amplitudes do raio refletido e do raio incidente. Os coeficientes de reflexão de Fresnel são dados abaixo.

$$r_{12}^p = \frac{\tilde{N}_2 \cdot \cos(\phi_1) - \tilde{N}_1 \cdot \cos(\phi_2)}{\tilde{N}_2 \cdot \cos(\phi_1) + \tilde{N}_1 \cdot \cos(\phi_2)} \quad r_{12}^s = \frac{\tilde{N}_1 \cdot \cos(\phi_1) - \tilde{N}_2 \cdot \cos(\phi_2)}{\tilde{N}_1 \cdot \cos(\phi_1) + \tilde{N}_2 \cdot \cos(\phi_2)} \quad (\text{B.1})$$

onde n_1 e n_2 são os índices de refração complexos dos meios 1 e 2 respectivamente, ϕ_1 é o ângulo de incidência e ϕ_2 é o ângulo refratado no meio 2.

Analisamos até agora a teoria para a reflexão em apenas uma interface. No entanto, para a medida no elipsômetro temos uma amostra com duas interfaces, e

devemos analisar o coeficiente de reflexão dessa amostra. Ilustramos abaixo a amostra analisada no elipsômetro.

Figura B.2 - Múltiplas reflexões de um raio em três camadas.

Nesse caso temos a reflexão dos raios na interface 1/2 e também na interface 2/3. Dessa maneira o coeficiente de reflexão total é dado por:

$$R^p = \frac{r_{12}^p + r_{23}^p \cdot \exp(-j2\beta)}{1 + r_{12}^p \cdot r_{23}^p \cdot \exp(-j2\beta)} \quad R^s = \frac{r_{12}^s + r_{23}^s \cdot \exp(-j2\beta)}{1 + r_{12}^s \cdot r_{23}^s \cdot \exp(-j2\beta)} \quad (\text{B.2})$$

onde r_{12} e r_{23} são os coeficientes de reflexão de Fresnel para as interface 1/2 e 2/3 respectivamente e β é a fase introduzida pelo caminho óptico percorrido no meio 2.

β é dado por:

$$\beta = 2\pi \left(\frac{d}{\lambda} \right) \cdot \tilde{N}_2 \cdot \cos(\phi_2) \quad (\text{B.3})$$

Com essa equação então, podemos relacionar a amplitude do raio incidente e do raio refletido. Na elipsometria utilizamos essa relação para determinar dois parâmetros: delta e PSI.

O parâmetro delta é dado por:

$$\Delta = \gamma_1 - \gamma_2 \quad (\text{B.4})$$

onde γ_1 é a diferença de fase entre as componentes paralela e perpendicular da onda incidente e γ_2 é a diferença de fase das componentes paralela e perpendicular da onda refletida.

O outro parâmetro utilizado nas medidas relaciona a magnitude dos coeficientes de reflexão total da onda. Esse parâmetro é conhecido como PSI e é dado pela seguinte equação:

$$\tan \psi = \frac{|R^p|}{|R^s|} \quad (\text{B.5})$$

A equação que relaciona esses dois parâmetros é dada abaixo. Essa equação, que será utilizada para traçar a curva Del/Psi, permitira concluir a espessura adequada do filme para as medidas de índice de refração. Essa equação é dada por:

$$\tan \psi \cdot e^{j\Delta} = \frac{R^p}{R^s} \quad (\text{B.6})$$

A partir da equação acima e dos valores n_3 , k_3 , n_2 ($k_2=0$, filme transparente) e da espessura do filme, podemos traçar as diversas curvas variando algum dos parâmetros considerados [57].

Dessa maneira foi desenvolvido anteriormente um programa em Mathematica que realizasse a plotagem das curvas dos índices de refração do óxido até o nitreto de silício, em função da espessura e do parâmetro PSI. Essas curvas são periódicas quando olhadas em função da espessura. Para obtenção da espessura adequada foi analisado apenas o primeiro período, pois dessa maneira teríamos um filme mais fino, o que implicaria em tempos de deposições menores e também se houvesse algum coeficiente de extinção nesse filme, a atenuação seria menor do que em filmes mais espessos. Analisando o gráfico obtido no programa em Mathematica, foi

verificado que a espessura mais adequada para as medidas gira em torno de 900 nm.

Referências Bibliográficas

- [1] Chatterjee, P.K. et al. The Future of Microelectronics, Invited Paper IEEE (2000). 1998. 176 p.
- [2] Hillenius, S. The Future of Silicon Microelectronics, IEEE (2004). 2004. 3 p.
- [3] Robertson, J. Band structure and offsets of high k dielectrics on Si. Appl. Surf. Science 190, 2002. 2 p.
- [4] Garcés, I. et al. Optical Letters. 23. 1998. 225 p.
- [5] Suhir, E. Microelectronic J. 31, 2000. 839 p.
- [6] Hunsperger, R. Integrated Optics: Theory and Technology. Springer, 2002. 472 p.
- [7] Desmulliez, M.P.Y. Mat. Sci. Eng. B-Solid. 74, 2000. 269 p.
- [8] Liu, A. et al. Nature. 427, 2004. 615 p.
- [9] Krishnamoorthy, A.V. Topics Quantum Electron. IEEE J. Select. 4, 1998. 899 p.
- [10] Ahn, J. T. et al. A stabilised fibre-optic Mach-Zehnder interferometer filter using an independent stabilisation light source. Research Laboratories, Electronics and Telecommunications Research Institute. 157, 1998. 62 p.
- [11] Okamoto, K. Fundamentals of Optical Waveguides. Academic Press, San Diego 2000.
- [12] Lee, T. et al. Electromagnetic Field Sensor Using Mach-Zehnder Waveguide Modulator. Microwave and Optical Technology Letters, 2006. 1897 p. v. 48.
- [13] Hong, J. et al. A Mach-Zehnder interferometer based on silicon oxides for biosensor applications, Analytica Chimica Acta. 2006. 97 p.
- [14] Kreuwel, H. Planar Waveguide Sensors for the Chemical Domain. PhD. Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands 1988
- [15] Wagner, C.; Frankenberger, J.; Deimel, P. P. Optical Pressure Sensor Based on a Mach-Zehnder Interferometer Integrated with a Lateral a-Si:H p-i-n Photodiode, IEEE Photonics Technology Letters. 1993. v. 5.

-
- [16] Bernhard W. et al. Waveguide ring resonators in glass for optical gyros, Proc DEGON Symp. on gyro techn., Stuttgart. 1986.
- [17] Wu, C. et al. Design optimization for micromachined low power Mach-Zehnder thermo-optic switch. Applied Physics Letters 89. 121121. 2006.
- [18] Robinson, G. The commercial development of planar optical biosensors. Sensors and Actuators B, 1995. 31 p. v. 29.
- [19] Zhang, B.; Kahrizi M. High-Temperature Bragg Grating Waveguide Sensor. Proceedings of the International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems, 2003.
- [20] Pelletier, N. et al. Single-Mode Rib Optical Waveguides on SOG/SU-8 Polymer and Integrated Mach-Zehnder for Designing Thermal Sensors. IEEE Sensors Journal. 2006. 565 p. v. 6
- [21] Kasahara, R. et al. New Structure of Silica-Based Planar Lightwave Circuits for Low-Power Thermooptic Switch and its Application to 8x8 Optical Matrix Switch. Journal of Lightwave Technology. 2002. 993 p. v. 20
- [22] Grusemann, U. et al. Integrated-optical wavelength sensor with self-compensation of thermally induced phase shifts by use of a LiNbO₃ unbalanced Mach-Zehnder interferometer. Applied Optics. 2002. 6211 p. v. 41
- [23] Espinola, R. L. et al. IEEE Photonics Technology Letters. 2003. 1366 p. v. 15.
- [24] Kasahara R. et al. IEEE Photonics Technology Letters. 1999. 1132 p. v. 11.
- [25] McLaughlin, A. J. et al. IEE Colloquium on Optoelectronic Integration and Switching. 1997. 3 p. v. 13.
- [26] Müller, B. A. et al. IEEE Photonics Technology Letters. 1993. 1415 p. v. 5.
- [27] Pelletier, N. et al. Single-Mode Rib Optical Waveguides on SOG/SU-8 Polymer and Integrated Mach-Zehnder for Designing Thermal Sensors, IEEE Sensors Journal. 2006. v. 6.
- [28] Mayer, R. A. et al. Thin-film thermo-optic Ge-Sil Mach-Zehnder interferometer. Optics Letters. 1992. v. 17.

-
- [29] Wu, C. et al. Design optimization for micromachined low power Mach-Zehnder thermo-optic switch, *Applied Physics Letters* 89, 121121, 2006
- [30] Chan, H.P.; Cheng, S.Y.; Chung, P.S. Low loss wide-angle symmetric Y-branch waveguide. *Electronics Letters*, 1996. 652 p. v. 32.
- [31] Murakami, Y.; Ikeda, M. Single-Mode Optical Y-Branching Circuit Using Deposited Silica Guides (DS Guides), *Electronics Letters*, 1981. v. 17.
- [32] Baets, R.; Lagasse, P. E. Calculation of radiation loss in integrated-optic tapers and Y-junctions, *Applied Optics*, 1982. v. 21.
- [33] Hanaizumi, O.; Miyagi, M.; Kawakam, S. Low Radiation Loss Y-Junctions in Planar Dielectric Optical Waveguides, *Optics Communications*, 1984. v. 51.
- [34] Weissman, Z.; Hardy, A.; Marom, E. Mode-Dependent Radiation Loss in Y junctions and Directional Couplers, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989. v. 25.
- [35] Xiao, G. Z. et al. Effects of Environment Temperature Induced Heater Resistance Change on the Attenuation of MZI Type Variable Optical Attenuators. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004. v. 16.
- [36] Heideman, R.G.; Lambeck, P.V. Remote opto-chemical sensing with extreme sensitivity: design, fabrication and performance of a pigtailed integrated optical phase-modulated Mach–Zehnder interferometer system. *Sensors and Actuators B* 61, 1999. 100 p.
- [37] Born, M.; Wolf, E. *Principles of Optics*, Oxford: Pergamon Press (1970)
- [38] Garcés, I. Et al. Bidimensional planar micro-optics for optochemical absorbance sensing. *Optical Letters*, 1997. 225 p. v. 23.
- [39] Abdullah, A.; Majid, M. A. Analysis of Multi-Layer ARROW, *Proceedings of the 2003 10th IEEE International Conference on Electronics Circuits and Systems*, United Arab Emirate, 2003.
- [40] Kassim, N.M. et al. Single Mode Rib Optical Waveguide Modeling Techniques. *RF and Microwave Conference*, 2004. Malasia.

-
- [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] Alayo, M.I. et al. Optical and structural characterization of PECVD-silicon oxynitride films for waveguide device applications. Proceedings of the International Society for Optical Engineering - Optoelectronic Integration on Silicon III, 2005. 250 p. v. 5730.
- [43] Madou, M. J. Fundamentals of Microfabrication, CRC Press, 2002.
- [44] Criado, D. Estudo e Produção de Filmes de Oxinitreto de Silício (SiOxNy) Pela Técnica de PECVD. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2003.
- [45] Alayo, M.I. et al. Fabrication and Characterization of PECVD Silicon Oxynitride based waveguides. Proceedings of the International Society for Optical Engineering – Integrated Optics: Devices, Materials and Technologies VIII 5355, 2004. 198 p.
- [46] Alayo, M.I. et al. Optical and Structural Characterization of PECVD-Silicon Oxynitride Films for Waveguide Device Applications, Proceedings of the International Society for Optical Engineering – Optoelectronic Integration on Silicon III, 5730, 2005. 250 p.
- [47] Hoffman, R.W. Phys. Thin Films 3, 1966. 211 p.
- [48] Brantley, W.A. J. Appl. Phys. 44, 1973. 534 p.
- [49] Prado, R. J. et al. Structural and morphological investigation of amorphous hydrogenated silicon carbide. Journal of Applied Crystallography, 2001.
- [50] Reyes–Betanzo, C.; Moshkalyov, S. A.; Swart, J. W. Silicon nitride etching in high- and low-density plasmas using SF₆/O₂/N₂ mixtures. J. Vac. Sci. Technol. A21(2), 2003
- [51] Zhou, L. et al. Study of the Plasma Etching Process for low-loss SiO₂ / Si Optical Waveguides. Thin Solid Films 489 (2005) 229.

-
- [52] Wu, C. et. al. Design Optimization for Micromachined low power Mach-Zehnder thermo-optic Switch. Applied Physics Letters 89, 121121 2006
- [53] Carvalho, D. O. and Alayo M. I. "ARROW Waveguides Fabricated with SiOxNy and a-SiC:H Films". Proceedings do RIAO/OPTILAS - VI Iberoamerican Meeting on Optics and IX Latinoamerican Meeting on Optics, Lasers and their Applications, Campinas, SP, 2007, pp. 755
- [54] Carvalho, D.O. and Alayo, M.I., "a-SiC:H anti-resonant Layer ARROW Waveguides". Aceito para publicação no Journal of Optics A: Pure and Applied Optics (2008).
- [55] Yuanyuan, C. et al. Structural Optimizations of SOI-based Single-mode Rib Waveguides Bends.
- [56] Rehder, G.; Carreño, M.N.P., Thermally actuated a-SiC:H MEMS fabricated by a PECVD process. Journal of Non-Crystalline Solids 352 (2006) 1822.
- [57] Tompkins, H. G. A user's guide to ellipsometry, Academic Press, 1993.