

VANESSA JULIA GAMERO SOBERO

Fabricação e caracterização de um dispositivo óptico desenvolvido com tecnologia CMOS de 0,35 μm .

SÃO PAULO

2020

VANESSA JULIA GAMERO SOBERO

Fabricação e caracterização de um dispositivo óptico desenvolvido com tecnologia CMOS de 0,35 μm .

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

SÃO PAULO

2020

VANESSA JULIA GAMERO SOBERO

Fabricação e caracterização de um dispositivo óptico desenvolvido com tecnologia CMOS de 0,35 μm .

Versão Corrigida

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

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos-Microeletrônica.

Orientador:

Prof. Dr. Marco Isaías Alayo Chávez.

Co-orientador:

Prof. Dr. Gustavo Pamplona Rehder.

SÃO PAULO

2020

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

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

São Paulo, 17 de fevereiro de 2020

Assinatura do autor: [assinatura]

Assinatura do orientador: [assinatura]

Catlogação-na-publicação

Gamero Sobero, Vanessa Julia

Fabricação e caracterização de um dispositivo óptico desenvolvido com tecnologia CMOS de 0,35 um / V. J. Gamero Sobero -- versão corr. -- São Paulo, 2020.

90 p.

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

1.óptica integrada 2.Integração monolítica 3.tecnologia CMOS 4.Fonte óptica incandescente 5.Pós-processamento I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

Dedico este trabalho à minha família pelo apoio,
compreensão e por abrigar sempre os meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

- ❖ À minha mãe Emilia pelo carinho eterno e força dada e ao meu pai Wuilen pelo carinho e apoio.
- ❖ Ao meu irmão Willy pelo suporte para vir a São Paulo e à minha irmã Patty por entender a distância e as dificuldades de uma pesquisa.
- ❖ Ao meu orientador o Prof. Dr. Marco Alayo pela oportunidade dada, ajuda, paciência e a motivação para avançar nos meus estudos.
- ❖ Ao Prof. Dr. Gustavo Rehder que agiu como co-orientador disponibilizando os equipamentos necessários para os trabalhos de caracterização.
- ❖ Aos técnicos Teresa, Rita, Mario, Igor, Alexandre, Jair e Henrique pelo auxílio na parte experimental deste trabalho.
- ❖ Ao meu colega Robert e Deisy pelo apoio valioso e pela sua amizade.
- ❖ À minha colega Angela pela sua amizade e pelos nossos inúmeros cafés.
- ❖ Ao meu amigo Gustavo da Unicamp pelo suporte, ajuda e a amizade de muitos anos.
- ❖ Aos meus amigos peruanos na USP Persing, David, Carlos e Alembert pelas nossas conversas do dia a dia.
- ❖ Aos meus amigos no Peru pela constante motivação.
- ❖ Às minhas amigas do CRUSP pela motivação para terminar este trabalho.
- ❖ Ao Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais da FATEC, Prof. Dr. Davinson pela sua ajuda nas imagens MEV.
- ❖ Ao funcionário Alfredo do CCSNano da Unicamp pelo apoio com o FIB.
- ❖ À CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

O foco do trabalho é o desenvolvimento de dispositivos ópticos integrados com tecnologia CMOS comercial. Assim, desenvolveu-se um dispositivo óptico composto por uma fonte óptica incandescente, um guia de onda e um fotodiodo, fabricado com a tecnologia comercial CMOS de 0,35 μm da *Austria Micro Systems* (AMS).

A fonte óptica incandescente, chamada microlâmpada, e o guia de onda foram projetados na seção BEOL (*Back-End-Of-Line*) da tecnologia enquanto o fotodiodo foi projetado na seção FEOL (*Front-End-Of-Line*). A microlâmpada foi feita entre duas camadas metálicas conectadas por vias de tungstênio que agem como filamentos incandescentes cobertos por camadas de óxido dielétrico, que evitam sua oxidação. O núcleo do guia de onda de onda foi acoplado à microlâmpada para uma fabricação simples, sob o princípio de Reflexão Interna Total (RIT). Finalmente, o fotodiodo foi acoplado no final do guia de onda no substrato de silício.

Este trabalho teve como objetivos, o estabelecimento de uma metodologia para a etapa de pós-processamento que permitisse o isolamento da microlâmpada e do guia de onda, e, como segundo objetivo a caracterização do dispositivo óptico para conhecer suas propriedades ópticas e elétricas.

Os resultados da etapa de pós-processamento mostraram com os testes MEV e FIB que se atingiu a suspensão da microlâmpada e do guia de onda em 75% ou mais dos dispositivos ópticos em um chip. Não entanto, a metodologia de pós-processamento precisa ser otimizada para conservar a camada de passivação do dispositivo óptico e obter assim medidas de resistência da microlâmpada mais próximas ao valor projetado.

Na caracterização elétrica do dispositivo óptico feita usando o coeficiente linear de resistência de temperatura (TCR) dos filamentos da microlâmpada, se encontrou que esta poderia atingir como máximo 230 °C com 48 mA. Segundo o espectro do modelo do corpo negro, a essa temperatura o filamento irradia na região do infravermelho de 2,5-5 μm .

No guia de onda foram encontradas dificuldades para seu funcionamento segundo o princípio RIT devido à presença das camadas padrões de TiN da tecnologia CMOS depositadas acima e abaixo do núcleo.

O fotodiodo mostrou resultados de funcionamento na região do visível, dado que a microlâmpada irradia principalmente na região do infravermelho não foi possível usá-lo para a caracterização óptica da microlâmpada.

Palavras chave: Óptica integrada, Integração monolítica, CMOS, Fonte óptica incandescente, pós-processamento, RIE, Silox Vapox.

ABSTRACT

The focus of this work is the development of optical devices with standard CMOS technology. In this context, an optical device composed by an incandescent optical source, a waveguide and a photodiode was implemented with standard CMOS technology of 0,35 μm of The Austria Micro System (AMS) foundry.

The incandescent optical source, called microlamp, and the waveguide were fabricated in the Back-End-Off-Line (BEOL) section of the CMOS technology and the photodiode in the Front-End-Off-Line (FEOL). The microlamp was built between two metal layers interconnected by tungsten vias behaving as filaments, protected from oxidation by dielectric layers. The waveguide core was coupled to the microlamp for the simplest fabrication and to match the Total Internal Reflection (TIR) principle. Finally, the photodiode was coupled to waveguide end and substrate anchored

The present work aimed two objectives. First, set a post-processing methodology to isolate the microlamp and waveguide structures and second, make the characterization of the optical device to know its electrical and optical properties.

Results of the post-processing showed through MEV and FIB tests, that isolation of the microlamp and waveguide structures was accomplished in over 75 % of optical devices in a chip. However, the methodology needs an optimization to keep the passivation layer for getting a microlamp resistance measure closer to the projected value.

The electric characterization of the microlamp through the lineal temperature coefficient resistance (TCR) of the filaments showed it reaches a maximum temperature of 230 $^{\circ}\text{C}$ with 48 mA. According to the Black Body spectrum model, irradiation at that temperature is in the medium infrared waveguide lengths (2,5 - 5 μm)

The waveguide has some issues to work properly due to standard CMOS layer of TiN not specified by the foundry. Because of that it didn't follow the TIR principle. Finally, the photodiode showed a properly behavior in the visible region but it was not able to measure the microlamp irradiation.

Keywords: Integrated optics, Monolithic Integration, CMOS, Incandescent optical source, post-processing, RIE, Silox Vapox.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-Componentes de um dispositivo óptico integrado para sensoriamento.....	19
Figura 2-Componentes da microlâmpada, o filme resistivo e a membrana dielétrica.....	23
Figura 3-Espectro da energia irradiada por um corpo negro.	25
Figura 4-Condutor elétrico com seção transversal A e comprimento L.	26
Figura 5-Perdas de calor na microlâmpada	28
Figura 6-Seção transversal de um guia de onda.	29
Figura 7-Feixes de luz percorrendo o núcleo de um guia de onda de espessura 2a.	30
Figura 8-Perdas por espalhamento devido à rugosidade das paredes do núcleo.	32
Figura 9-Geração de um par elétron-lacuna pela incidência de um fóton.	33
Figura 10-Formação da região de depleção no fotodiodo de junção p-n.	33
Figura 11-Seção transversal de um fotodiodo de Si p-n.....	34
Figura 12-Curva corrente (I)-Tensão (V) do fotodiodo.	35
Figura 13-Filamento e membrana dielétrica da fonte óptica incandescente.	36
Figura 14-Vista da seção transversal do dispositivo sensor de gás.	37
Figura 15- Emissor IR, modelo I, II e III.	38
Figura 16-Dispositivo sensor de gás com a fonte óptica incandescente e as camadas sacrificiais de SiO ₂ e de Al.	38
Figura 17-Etapas de pós-processamento do dispositivo. (a) Dispositivo após a fabricação sem pós-processamento. (b) Gravado da máscara metálica de Ti/Pt com a técnica lift-off para a corrosão de SiO ₂ . (c) Corrosão de SiO ₂ pela técnica RIE. (d) Corrosão úmida de Al e suspensão do emissor.	39
Figura 18-Acomplamento guia de onda e fotodiodo. (a) Vista transversal do acoplamento. (b) Percorrido da luz injetada no guia de onda até o fotodiodo. (c) Sobreposição guia de onda-fotodiodo. A: sem sobreposição, B: sobreposição parcial, C: sobreposição quase total.....	40
Figura 19-Acomplamento guia de onda e fotodiodo. (Direita) Seção transversal. (Esquerda) Vista superior.....	41
Figura 20-Diagrama de blocos do dispositivo óptico.....	42
Figura 21-Seção transversal da tecnologia CMOS 0.35 μm da AMS.	42
Figura 22- Seção transversal do dispositivo óptico, mostrando os filamentos e a membrana dielétrica da microlâmpada.	44
Figura 23-Perdas de calor na microlâmpada por condução devido ao contato com outras camadas metálicas.	44
Figura 24-Modelo elétrico da microlâmpada.....	45
Figura 25-Vista superior da microlâmpada, mostrando o conjunto emissor, trilhas e pads.	46
Figura 26-Vista lateral do dispositivo óptico com o guia de onda é destacado em linhas pontilhadas.	47
Figura 27-Vista lateral do dispositivo óptico, o fotodiodo é destacado em linhas pontilhadas.	47
Figura 28-Responsividade do fotodiodo PHDNWA850.	48
Figura 29-Dispositivo óptico em um chip apresentado seus componentes.....	48
Figura 30-Dimensões do dispositivo óptico.	49

Figura 31-Camada de SiO ₂ e camada de Al do dispositivo óptico. (a) Seção transversal. (b) Vista lateral.	50
Figura 32-Equipamento RIE do LME.....	51
Figura 33-Perfil de corrosão isotrópica por RIE.	51
Figura 34-Corrosão isotrópica por <i>Silox Vapox</i>	52
Figura 35- Inspeção do dispositivo óptico após a corrosão da camada de Al sacrificial.	53
Figura 36-Aplicação do material fotorresiste nos pads e trilhas do dispositivo óptico (a) Amostra inicial com a superfície limpa. (b) Aplicação de fotorresiste em apenas uma região da amostra. (c) Amostra após a corrosão em tempos de 5, 10, 20 e 25 min. (d) Retiro do fotorresiste para medir o degrau da amostra com o perfilômetro Tencor Alpha Step 500.	54
Figura 37-Relação das taxas de corrosão por RIE com CF ₄ /Ar em amostras de SiO ₂ , Si ₃ N ₄ e Al com potências RF de 50, 100, 150 W. (a) Pressão de 50 mTorr. (b) Pressão de 100 mTorr.....	55
Figura 38- Suspensão da microlâmpada e do guia de onda após a corrosão da camada sacrificial de Al. (a) Suspensão sucedida. (b) Suspensão com problemas de adesão na base.....	56
Figura 39 -Diagrama de fases do CO ₂	57
Figura 40- Equipamento para secagem supercrítica.....	57
Figura 41-Evolução da corrosão por RIE da camada sacrificial de SiO ₂ . (a) Antes da corrosão. (b) Após 2 h de corrosão. (c) Após 5 h de corrosão. (d) Após 7 h de corrosão.	59
Figura 42- Dispositivo óptico depois da secagem supercrítica com prévia corrosão da camada sacrificial de SiO ₂ por RIE por 7 h e da corrosão da camada sacrificial de Al por 20 min.....	60
Figura 43-Evolução da corrosão por <i>Silox Vapox</i> da camada sacrificial de SiO ₂ . (a) Antes da corrosão. (b) Após 20 min de corrosão. (c) Após 30 min de corrosão. (d) Após 35 min de corrosão. (e) Após 40 min de corrosão.	61
Figura 44- Camada sacrificial de Al, nas aberturas da máscara.	62
Figura 45-Estado do dispositivo óptico depois da secagem supercrítica.....	63
Figura 46-Estado do dispositivo óptico depois da secagem supercrítica.	63
Figura 47-Plataforma de aquecimento mini-hotplate para testes de temperatura no dispositivo óptico.....	65
Figura 48-Estação de prova utilizada para a caracterização elétrica do dispositivo óptico.....	66
Figura 49-Imagem MEV da região do emissor em um dispositivo com corrosão RIE....	67
Figura 50-Região da microlâmpada, grudada na base.	68
Figura 51-Imagem MEV da região de um guia de ondas do dispositivo óptico.	68
Figura 52-Resistência da microlâmpada em função da temperatura.....	70
Figura 53-Estado dos pads e da camada de passivação das trilhas na medição de resistência da microlâmpada.	71
Figura 54- Resposta corrente I-V das microlâmpadas de 6 dispositivo ópticos com pós-processamento RIE.....	71
Figura 55-Varredura de tensão de 0-3,5 V nas microlâmpadas de 3 dispositivos ópticos com pós-processamento por RIE.....	72
Figura 56-Seção transversal da microlâmpada com FIB.....	73
Figura 57- Varrimento de tensão de 0-2,8V nas microlâmpadas de 3 dispositivos ópticos com pós-processamento por <i>Silox Vapox</i>	75

Figura 58-Curva I-V do fotodiodo.	75
Figura 59- Energia irradiada por um corpo negro em 150-250 °C tem a faixa de comprimento de onda de 0-6 μm.	76
Figura 60- Corpo negro a 150-250 °C irradiando principalmente na faixa de 0,9-1,4 μm de comprimento de onda.	76
Figura 61-Seção transversal do guia de onda. (a) Região do polimento. (b) Seção transversal do guia de onda.	77
Figura 62-Modelo microlâmpada-guia de onda com as camadas de Ti inclusas.....	77
Figura 63-Comportamento do guia de onda.	81
Figura 64-Deposição por PECVD. (a) Esquema de funcionamento. (b) Equipamento PECVD.	88
Figura 65-Deposição por PVD com o equipamento de evaporação.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Espessuras das camadas metálicas e isolantes da tecnologia da tecnologia CMOS 0.35 μm da AMS.	43
Tabela 2-Taxas de corrosão por Silox Vapox.	55
Tabela 3- Parâmetros para a corrosão de SiO_2 por RIE.	58
Tabela 4-Resistência da microlâmpada em função da temperatura.	69
Tabela 5- Condições de deposição dos filmes de SiO_2.	87
Tabela 6-Condições de deposição dos filmes de Si_3N_4 por PECVD.	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMS	Austria Micro System
ARROW	Guias de ondas ópticos baseados em reflexão anti-ressonante (<i>Anti-Resonant Reflecting Optical Waveguide</i>)
BEOL	Back End Of Line
CMOS	Complementary Metal Oxide Silicon
DRIE	Corrosão reativa por íons profunda (<i>Deep Reactive Ion Etching</i>)
FEM	Método dos elementos finitos (<i>Finite Element Method</i>)
FEOL	Front End Of Line
FTIR	Espectrometria no infravermelho com Fourier
FET	Transistor de efeito de campo (<i>Field Effect Transistor</i>)
FIB	Feixe de Íon Focalizado
GNMD	Grupo de Novos Materiais e Dispositivos
ILDFOX	Óxido Metal 1-Polissilício (<i>Metal 1-Poly oxide</i>)
Laser	Luz amplificada por radiação estimulada (<i>Light amplification by stimulated radiation</i>)
LED	Diodo emissor de luz (<i>Light Emitting Diode</i>)
LOCOS	Oxidação local do Silício (<i>Local Oxidation of Silicon</i>)
LME	Laboratório de Microeletrônica
LPCM	Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais
MET1	METAL1
MET2	METAL2
MET3	METAL3
MET4	METAL4
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NIR	Infravermelho próximo (<i>Near Infrared</i>)
PECVD	Deposição química a vapor assistida por plasma (<i>Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition</i>)
PSG	Óxido de silício dopado com fósforo (<i>Phosphosilicate glass</i>)
PVD	Deposição física a vapor (<i>Physical Vapor Deposition</i>)
RIE	Corrosão iônica reativa (<i>Reactive Ion Etching</i>)
RIT	Reflexão Interna Total
TCR	Coefficiente de resistência de temperatura (<i>Thermal Coefficient Resistance</i>)
SOI-CMOS	Tecnologia Silício sobre isolante (Silicon On Insulator) CMOS

a-SiC:H	Carbeto de Silício Amorfo Hidrogenado
Al	Alumínio
Ar	Argônio
Au	Ouro
CO ₂	Dióxido de Carbono (<i>Carbon dioxide</i>)
CF ₄	Tetrafluoreto de Carbono
HF	Fluoreto de Hidrogênio
N ₂	Nitrogênio
Si	Silício
SiH ₄	Silana
SiO ₂	Dióxido de Silício
Si ₃ N ₄	Nitreto de Silício
SiO _x N _y	Oxinitreto de Silício
TEOS	Tetro Ethyl Ortho Silicate
TiN	Nitreto de Titânio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 Motivação	18
1.2 Objetivos	21
1.3 Estrutura do trabalho.....	21
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	23
2.1 Fonte óptica incandescente	23
2.1.1 Princípio de funcionamento.....	23
2.1.2 Modelo do corpo negro aplicado à microlâmpada	24
2.1.3 Projeto da microlâmpada com CMOS.....	26
2.1.4 Perdas de calor na microlâmpada	28
2.2 Guias de onda.....	28
2.2.1 Princípio de funcionamento dos guias de onda ópticos.....	28
2.2.2 Perdas nos guias de onda	32
2.3 Fotodiodo de junção p-n	33
2.3.1 Princípio de funcionamento.....	33
2.3.2 Fotodiodo de Si de junção p-n.....	34
2.3.2.1 Caraterística I-V do fotodiodo.....	35
3. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA.....	36
3.1 Fonte óptica incandescente	36
3.2 Acoplamento guia de onda-fotodiodo.....	40
4. DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO ÓPTICO	42
4.1 Componentes do dispositivo óptico	42
4.1.1 Tecnologia CMOS de 0,35 μm da AMS	42
4.1.2 Microlâmpada.....	43
4.1.3 Guia de onda.....	46
4.1.4 Fotodiodo.....	47
4.2 Fabricação do dispositivo óptico	48
5. ETAPA DE PÓS-PROCESSAMENTO.....	50
5.1 Materiais e métodos	51
5.1.1 Corrosão de SiO_2 por RIE	51
5.1.2 Corrosão de SiO_2 por <i>Silox Vapox III</i>	52
5.1.3 Corrosão de Al.....	52
5.1.4 Cálculo das taxas de corrosão por RIE e <i>Silox Vapox</i>	53
5.1.4.1 Corrosão por RIE	53

5.1.4.2	Corrosão por <i>Silox vapox</i>	55
5.1.5	Secagem do dispositivo óptico após a corrosão por RIE ou <i>Silox Vapox</i>	56
5.2	Isolamento da microlâmpada e formação dos <i>claddings</i> do guia de onda.....	58
5.2.1	Método 1-Corrosão por RIE da camada de SiO ₂ sacrificial	58
5.2.1.1	Corrosão da camada de Al sacrificial.....	59
5.2.2	Método 2- Corrosão por <i>Silox Vapox</i> da camada de SiO ₂ sacrificial	60
5.2.2.1	Corrosão da camada de Al sacrificial.....	62
5.2.2.2	Corrosão da camada de Al sacrificial.....	63
6.	CARATERIZAÇÃO DO DISPOSITIVO ÓPTICO	64
6.1	Materiais e métodos	64
6.1.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	64
6.1.2	Feixe de Íon Focalizado (FIB).....	64
6.1.3	Caraterização termoeétrica	65
6.1.4	Caraterização elétrica	66
6.2	Resultados da caraterização MEV do dispositivo.....	67
6.3	Caracterizações elétricas no dispositivo óptico	69
6.3.1	Caraterização termoeétrica	69
6.3.2	Caraterização elétrica	70
6.3.2.1	Microlâmpada.....	70
6.3.2.2	Fotodiodo	75
6.3.3	Provas integradas	76
7.	CONCLUSÕES.....	79
7.1	TRABALHOS FUTUROS	81
	REFERÊNCIAS	82
	APÊNDICE A.....	87
A.1	Deposição de filmes de SiO ₂ , Si ₃ N ₄ e Al.....	87
A.1.1	Amostras de SiO ₂	87
A.1.2	Amostras de Si ₃ N ₄	87
A.1.3	Amostras de Al	88
	ANEXO A- PUBLICAÇÕES.....	90

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Os dispositivos ópticos tornaram-se relevantes há três décadas (SOREF, 1993) pela proximidade do limite da lei de Moore (XIE; XU; TAUR, 2012) e pelas limitações físicas do meio de transmissão elétrico (HWANG; TURLIK, 1992). O meio óptico, em contraste, apresenta-se favorável na transmissão de sinais pela largura de banda muito maior do que o meio elétrico, ausência do efeito Joule e por ser livre de interferências eletromagnéticas (MILLER, DAVID AB, 1996).

A fabricação de dispositivos ópticos com processos microeletrônicos é feita com substrato heterogêneo (BOWERS, 2018) ou monolítico (WANG et al., 2011). Esse último tem um processo de fabricação menos complexo que o heterogêneo e pode atingir uma maior densidade de empacotamento e menores custos.

O silício (Si) como substrato monolítico nos dispositivos ópticos tomou relevância pelo seu sucesso na microeletrônica que atingiu uma alta integração usando tecnologias de fabricação como CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*).

Embora o Si tem algumas limitações na fabricação de dispositivos ópticos, como seu *gap* indireto (ZHOU; YIN; MICHEL, 2015) e a ausência do efeito Pockels (REED; PNG, 2005). Seu uso como substrato é muito vantajoso já que as técnicas e os processos de fabricação desenvolvidos na indústria microeletrônica, como a tecnologia CMOS, podem ser utilizados para fabricar dispositivos ópticos, visados para múltiplas aplicações, como telecomunicações e sensoriamento (LÜTZOW; PERGANDE; HEIDRICH, 2011), (LI, JIAWEN et al., 2018).

A tecnologia CMOS pode ser um processo comercial ou customizado. A primeira, é rígida com regras estabelecidas pelas *foundries* que não podem ser mudadas, e é principalmente utilizada para a fabricação em alta escala com alto grau de empacotamento para atingir baixos custos.

A fabricação de dispositivos ópticos com tecnologia CMOS comercial é um tema atual de pesquisa em diferentes laboratórios, como o MIT (*Massachusetts Institute of Technology*)

baixo o nome de *zero-change* CMOS cuja visão é ter dispositivos com boa performance, menor custo e reproduzíveis para diferentes aplicações.

Entre as tecnologias CMOS comerciais, temos a SOI (*Silicon-on-Insulator*) – CMOS e Bulk-CMOS. A tecnologia SOI-CMOS possui uma camada de Si monocristalino isolada do substrato-*bulk* por uma camada fina de óxido de silício (SiO₂). O alto contraste entre os índices de refração do Si e do SiO₂ favorece à integração de dispositivos ópticos (ORCUTT, JASON S. *et al.*, 2012). No entanto, a tecnologia SOI-CMOS é focada em aplicações específicas por ter um custo alto, mesmo sendo uma tecnologia comercial.

A tecnologia *Bulk*-CMOS é tradicionalmente usada em múltiplas aplicações. Porém, a fabricação de dispositivos ópticos com *Bulk*-CMOS, em contraste com SOI-CMOS precisa de uma etapa de pós-processamento muito mais complexa (RAM, 2015), (ORCUTT, J. ; RAM, 2010), (ZHANG, ZAN *et al.*, 2015). Mesmo assim poderia ser uma opção atrativa e viável, especialmente para a fabricação de dispositivos de sensoriamento, por exemplo os dispositivos de consumo (automóvel, casa, oficina) que procuram, bom rendimento, pequeno tamanho e baixo custo.

Um dispositivo óptico integrado para aplicações de sensoriamento pode estar constituído basicamente por uma fonte óptica, um guia de onda e um fotodiodo, como ilustrado no diagrama de blocos da Figura 1.

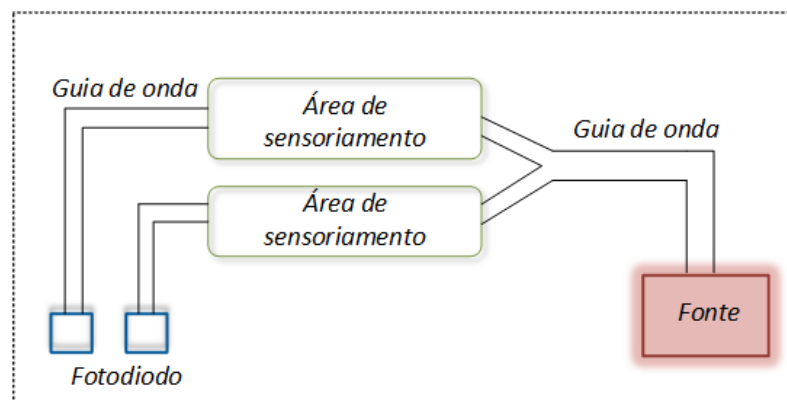


Figura 1-Componentes de um dispositivo óptico integrado para sensoriamento.

Fonte: Autor.

Utilizando a tecnologia CMOS na fabricação do sensor óptico, a fonte óptica poderia ser tipo LED (*Light Emitting Diode*), *laser* (*light amplification by stimulated radiation*) ou incandescente. A fonte LED (SNYMAN; DU PLESSIS; AHARONI, 2007), (XU -set al., 2013) se baseia na polarização reversa de uma junção *p-n*. A sua principal vantagem é a facilidade de fabricação com CMOS. Entretanto, a potência óptica pode resultar baixa para algumas aplicações. A fonte tipo *laser* (BILLAH *et al.*, 2018) possui alta seletividade e potência óptica. Porém, a sua fabricação com CMOS é complexa e nas aplicações que precisam de múltiplos sensores não é viável pelo alto custo. Uma outra alternativa é a fonte incandescente usada principalmente nas aplicações de sensoriamento. O espectro da fonte incandescente é amplo e está situado principalmente no infravermelho de 1-20 μm de comprimento de onda (KONZ *et al.*, 2005), (HODGKINSON; TATAM, 2012).

O guia de onda do sensor óptico poderia ser fabricado na região do visível, com núcleo de nitreto de silício (Si_3N_4) (GORIN *et al.*, 2008) devido a sua baixa absorção óptica e para os *claddings* poderiam ser usados filmes de SiO_2 e/ou polímeros (BAETS *et al.*, 2016). No infravermelho, o guia de onda poderia ter o Si como núcleo (SMITH *et al.*, 2013) e o SiO_2 nos *claddings*.

O fotodiodo do dispositivo óptico fabricado na região do visível é feito geralmente de Si por sua boa absorção óptica (GORIN *et al.*, 2008) até 1100 nm de comprimento de onda (infravermelho próximo). Não obstante para maiores comprimentos de onda de detecção poderia ser depositado usando tecnologias CMOS dedicadas (COLACE; ASSANTO, 2009), (MASINI *et al.*, 2007) camadas de Germânio (Ge) para estender seu funcionamento até 1550 nm de comprimento de onda (KASPER, 2010).

No Grupo de Novos Materiais e Dispositivos (GNMD) do Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos da Escola Politécnica (EPUSP), onde foi desenvolvido essa dissertação de mestrado, tem sido realizado desde o ano 2000 pesquisas em óptica integrada. Nesse contexto um dispositivo óptico foi desenvolvido com tecnologia CMOS, visando futuras aplicações em sensoriamento.

O dispositivo óptico integra uma fonte óptica, um guia de onda e um fotodiodo para a etapa de detecção. Sua fabricação foi feita com tecnologia CMOS de 0,35 μm da *foundry Austria Micro Systems (AMS)*.

A seção transversal da tecnologia CMOS de 0,35 μm da AMS é dividida pela seção FEOL (*Front End Of Line*) onde são projetados os componentes ativos como transistores (CHAO, 2001) e pela seção BEOL (*Back End Of Line*) onde são interconectados todos os componentes da seção FEOL. A seção FEOL vá desde o substrato de Si passando por camadas isolantes até chegar à primeira camada metálica (Metal 1) da tecnologia que inicia a seção BEOL a qual tem quatro camadas metálicas que podem ser interconectadas entre si por vias de tungstênio e são isoladas por camadas de óxido dielétrico. Acima da última camada metálica tem uma camada de passivação conformada por uma interface dielétrica.

Dando continuidade aos trabalhos de integração óptica monolítica desenvolveu-se um dispositivo óptico que integrava uma fonte óptica, um guia de onda e um fotodiodo para a etapa de detecção, fabricado com a tecnologia comercial CMOS de 0,35 μm da foundry *Austria Micro Systems* (AMS). Assim, o presente trabalho toma esse dispositivo com o objetivo de analisar suas propriedades elétricas e ópticas com a visão de usar uma versão posterior para aplicações de sensoriamento.

Assim, o presente trabalho toma como base o dispositivo fabricado no GNMD para dar continuidade à pesquisa iniciada com objetivo de avaliar suas propriedades elétricas e ópticas para ter uma versão melhorada do dispositivo que possa ser usada em aplicações de sensoriamento.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem dois objetivos principais baseados no dispositivo óptico já desenvolvido e fabricado com tecnologia CMOS de 0,35 μm da AMS:

- Estabelecer uma metodologia de pós-processamento para o dispositivo óptico.
- Caracterizar o dispositivo óptico para obter suas propriedades ópticas e elétricas.

1.3 Estrutura do trabalho

Essa dissertação é composta por seis capítulos. No capítulo 1 é explicado a motivação do tema de pesquisa e são definidos os objetivos do trabalho. No capítulo 2 é apresentado o fundamento

teórico para entender o funcionamento do dispositivo óptico desenvolvido. No capítulo 3 é feita a revisão da literatura baseada em dispositivos ópticos que integram algum dos componentes do dispositivo óptico desenvolvido, fabricado com tecnologia CMOS. No capítulo 4 é apresentado a descrição completa do dispositivo óptico fabricado com tecnologia CMOS de 0,35 μm da AMS. No capítulo 5 é apresentada a etapa de pós-processamento. Nesse capítulo são detalhados os materiais e equipamentos utilizados e apresentados os resultados obtidos nessa etapa. No capítulo 6 é apresentada a etapa de caracterização do dispositivo óptico. Aqui são detalhados os materiais e equipamentos utilizados e mostrados os resultados obtidos nessa etapa. Na seção final são apresentadas as conclusões do trabalho, assim como algumas propostas de trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Fonte óptica incandescente

2.1.1 Princípio de funcionamento

Uma fonte óptica incandescente funciona sob o mesmo princípio de uma lâmpada bulbo incandescente com um filamento em uma atmosfera isolada. Uma microlâmpada é fabricada com tecnologia planar, seus componentes são principalmente: um filme resistivo (com resistência R) como o filamento e uma membrana dielétrica como a atmosfera isolante. Na Figura 2 é ilustrada a microlâmpada e seus componentes.

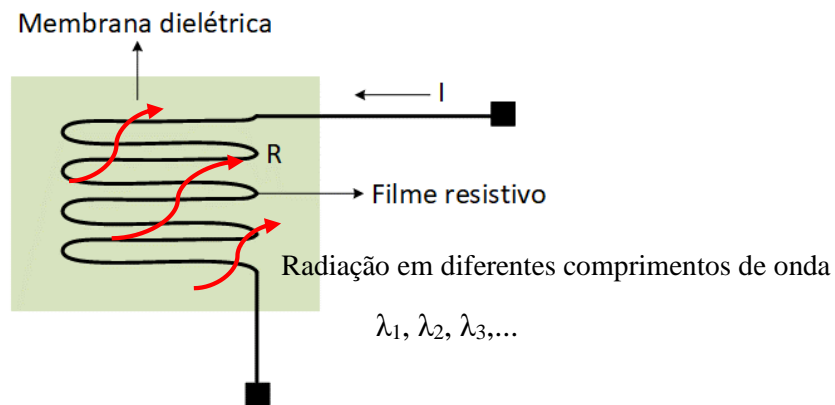


Figura 2-Componentes da microlâmpada, o filme resistivo e a membrana dielétrica.

Fonte: Autor.

Pelo filamento da microlâmpada é injetada uma corrente elétrica (I) o que gera a dissipação de energia térmica conhecida como radiação. Esta se propaga como ondas eletromagnéticas em diferentes comprimentos de onda, fazendo da microlâmpada uma fonte óptica.

A membrana dielétrica que envolve o filamento da microlâmpada age como um isolante do ar para evitar a oxidação dos filamentos (TU et al., 2003). Isso é feito para não afetar as propriedades ópticas da microlâmpada.

2.1.2 Modelo do corpo negro aplicado à microlâmpada

Segundo a lei de Kirchoff, em um sistema isotérmico em equilíbrio termodinâmico (SPAKOVSKY, [S.d.]) a emissividade (ϵ) de uma superfície à temperatura T é igual à absorvidade da radiação incidente na superfície do corpo à mesma temperatura. Logo, a emissividade de um material está correlacionada com a capacidade de absorção da superfície (NOVO et al., 2014).

Um corpo negro é um material que absorve toda a radiação incidente em qualquer comprimento de onda sem refletir, nem transmitir, parte dela. Logo, não existe outro corpo que emita mais energia do que um corpo negro.

A intensidade da energia irradiada (energia emitida por unidade de área superficial) por um corpo qualquer (INCROPERA F. et al, 2006) é dada pela equação:

$$I = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

Onde:

ϵ : emissividade;

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Js}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$);

T : temperatura absoluta (K).

Para um corpo negro a emissividade é máxima e igual a 1. Assim, a Equação (1) pode ser reescrita pela fórmula:

$$I = \sigma \cdot T^4 \quad (2)$$

A distribuição espectral da potência radiante de um corpo negro, segundo a lei de Planck é dada pela equação (MIT,2013):

$$I_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \right) \quad (3)$$

Onde:

λ : comprimento de onda (m);

h : constante de Planck ($h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$);

K : constante de Boltzmann ($K = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ (J/K)}$);

T : temperatura absoluta (K);

c : velocidade da luz no vácuo ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$).

O gráfico da potência radiante I_λ em função do comprimento de onda para diferentes temperaturas é mostrado na Figura 3.

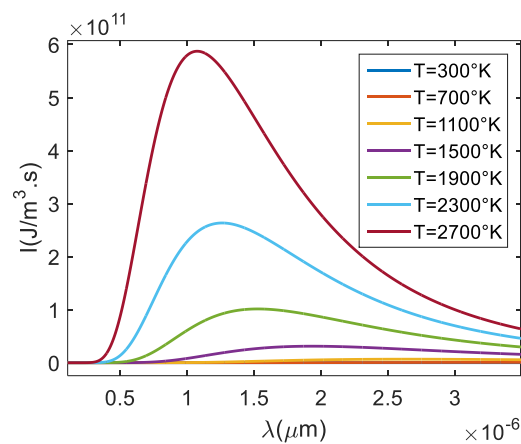


Figura 3-Espectro da energia irradiada por um corpo negro.

Fonte: Imagem gerada com código MATLAB de <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/37600-planck-s-law>. Acessado em: 09 dez. 2019.

Observa-se que o valor pico da emissão em λ_{max} se torna menor conforme aumenta a temperatura, isso pela maior agitação dos constituintes do corpo que quanto maior a temperatura gera maiores frequências e amplitudes de suas oscilações, resultando em menores comprimentos de onda.

A lei de Wien mostra a relação de λ_{max} com a temperatura na seguinte equação (INCROPERA F. et al, 2006):

$$\lambda_{max} = \frac{0,0028976}{T} \quad (4)$$

Onde:

T : temperatura absoluta (K).

2.1.3 Projeto da microlâmpada com CMOS

O filme resistivo da microlâmpada pode ser feito do mesmo material condutor usado as camadas metálicas da tecnologia CMOS para fabricar uma resistência, cujo valor pode ser calculado como ilustrado na Figura 4.

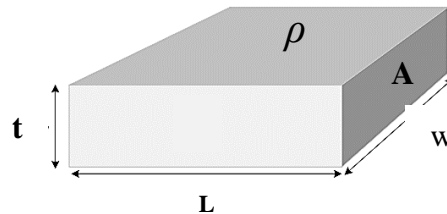


Figura 4-Conductor elétrico com seção transversal A e comprimento L.

Fonte: Autor.

Onde:

ρ : resistividade ($\Omega \cdot m$);

L : comprimento (m);

w : largura (m);

t : espessura (m);

A : área da seção transversal do condutor ($A=w \cdot t$, m^2).

Segundo a lei de Ohm, a resistência do filme condutor é dada pela equação:

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{w \cdot t} \quad (5)$$

A espessura do condutor (t) é fixada pela tecnologia CMOS, assim se $l=w$ teríamos uma seção transversal quadrada. Logo a equação anterior pode ser redefinida como:

$$R = R_{\square} \cdot (L/W) \quad (6)$$

Onde

$R_{\square} = \frac{\rho}{t}$: resistividade por quadrado

Então a partir do valor de resistividade por quadrado, especificado por cada fabricante podem ser construídos valores maiores de resistência.

A corrente (I) que passa pela seção transversal do filme (A) transforma a potência elétrica em energia térmica. Segundo a lei de Joule a potência dissipada é dada pela equação:

$$P_s = I^2 \cdot R \quad (7)$$

Onde:

I: corrente (A);

R: resistência do filme (Ω).

A resistência quando aquecida pelo percorrer da corrente incrementa seu valor. Isso devido à dependência da resistividade do material do filme com a temperatura que é refletida na variação do valor de resistência. O novo valor pode ser calculado usando os coeficientes TCR (*Temperature Coefficient Resistance*) na seguinte equação:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha_1\Delta T + \alpha_2\Delta T^2 + \alpha_3\Delta T^3 + \alpha_4\Delta T^4 + \dots) \quad (8)$$

Onde:

R_0 : resistência à temperatura T_0 (K);

ΔT : variação da temperatura (T- T_0);

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \dots$: coeficientes TCR (1/K).

A precisão do cálculo é maior usando mais coeficientes TCR, mas uma boa aproximação pode ser feita com o primeiro coeficiente (α_1) definido como:

$$\alpha_1 = \frac{1}{R_0} \left(\frac{\Delta R}{\Delta T} \right) \quad (9)$$

Onde:

R_0 : resistência à temperatura T_0 ;

ΔR : variação da resistência (R- R_0);

ΔT : variação da temperatura (T- T_0);

α_1 : Coeficiente linear de resistência de temperatura.

2.1.4 Perdas de calor na microlâmpada

As perdas de calor na microlâmpada acontecem principalmente por condução e convecção, como ilustrado na Figura 5.

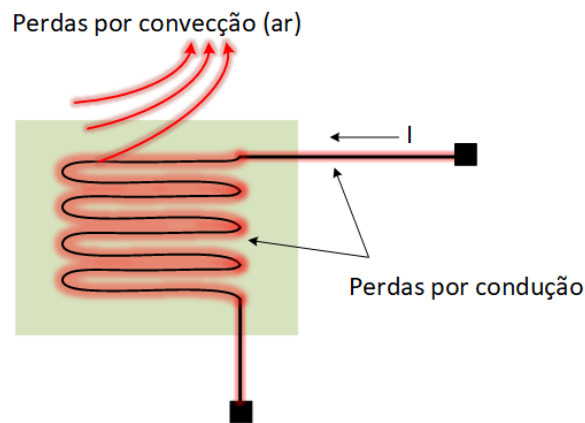


Figura 5-Perdas de calor na microlâmpada

Fonte: Autor.

A perda de calor por condução na microlâmpada ocorre pelo gradiente de temperatura existente entre ela e uma outra superfície de contato. Assim, tem transferência de calor da microlâmpada à membrana dielétrica e às trilhas. Esta perda poderá ser menor se as trilhas que são feitas do metal usado pela tecnologia tivessem o menor comprimento possível.

A perda de calor por convecção na microlâmpada ocorre devido à transferência de calor entra ela e um meio gasoso ou líquido, como o fluxo de ar que existe na superfície dela.

2.2 Guias de onda

2.2.1 Princípio de funcionamento dos guias de onda ópticos

Um guia de onda óptico é um dispositivo usado para o confinamento de luz de forma controlada, constituído por um núcleo onde é confinada a luz, uma camada de cobertura e de isolamento, as quais são conhecidas também como *claddings*. A estrutura do guia de onda é apresentada na Figura 6.

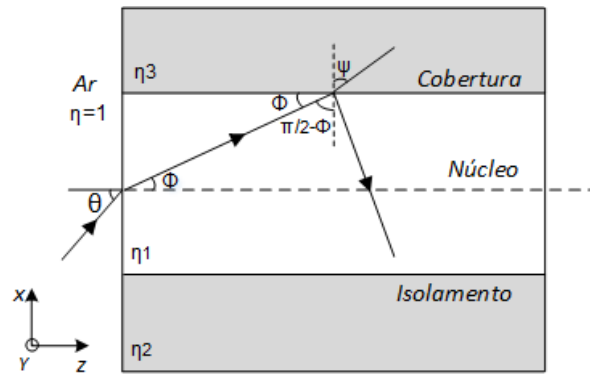


Figura 6-Seção transversal de um guia de onda.

Fonte: Adaptado de (OKAMOTO, 2006).

Onde:

η_1 : índice de refração do núcleo;

η_2, η_3 : índices de refração da camada de isolamento e cobertura;

θ : ângulo de injeção da luz no núcleo;

Φ : ângulo de incidência da luz na parede superior do núcleo;

Ψ : ângulo da luz transmitido com a normal.

O funcionamento do guia de onda se baseia na Reflexão Interna Total (RIT) onde os feixes de luz se propagam refletindo-se pelas paredes do núcleo. Para isso acontecer, os índices de refração dos *claddings* e do núcleo devem cumprir a seguinte condição:

$$\eta_1 > \eta_2 \geq \eta_3 \quad (10)$$

Segundo a Figura 6, a luz injetada no núcleo com ângulo θ viaja se refletindo nas paredes do guia de onda com ângulo Φ . Se considerarmos os *claddings* do guia de onda simétricos ($\eta_2 = \eta_3 = \eta_0$) pela lei de Snell, na interface ar-núcleo tem se a seguinte relação:

$$\eta_{ar} \cdot \sin \theta = \eta_1 \cdot \sin \Phi \quad (11)$$

Se considerarmos que a luz pode ser transmitida fora do núcleo com ângulo Ψ , pela lei de Snell na interface núcleo-cobertura ter-se-á a seguinte relação:

$$\eta_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \Phi\right) = \eta_0 \cdot \sin \Psi \quad (12)$$

O confinamento da luz no núcleo acontece quando $\Psi > 90^\circ$, tem-se a equação (12) como:

$$\eta_1 \cdot \cos(\Phi) > \eta_0 \quad (13)$$

Das Equações (11) e (13), obtém-se os valores do ângulo θ para a injeção de luz no núcleo:

$$\theta \leq \sin^{-1} \sqrt{\eta_1^2 - \eta_0^2} \quad (14)$$

Assim, os valores do ângulo Φ para o confinamento de luz no núcleo é dado pela equação:

$$\Phi \leq \sin^{-1} \sqrt{\frac{\eta_1^2 - \eta_0^2}{\eta_1^2}} \quad (15)$$

A propagação dos feixes de luz no núcleo do guia de onda é explicada, com o feixe I e II, na Figura 7.

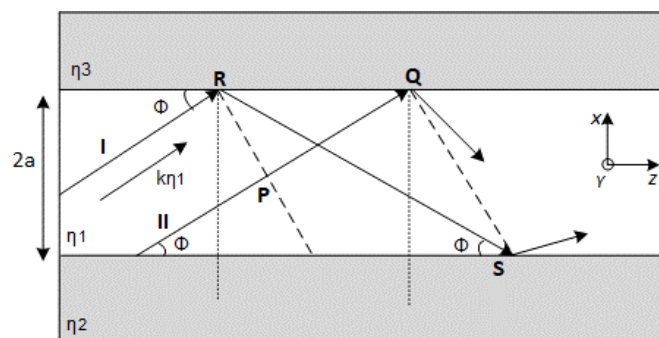


Figura 7-Feixes de luz percorrendo o núcleo de um guia de onda de espessura $2a$.

Fonte: Adaptado de (OKAMOTO, 2006).

O feixe I incide na parede superior do guia de onda no ponto R enquanto o feixe II ainda está a uma distância PQ de atingi-la. Quando o feixe II atingir o ponto Q o feixe I já terá feito uma reflexão e atingido o ponto S. Se considerarmos que os feixes I e II propagam-se no eixo z e tem a mesma frente de fase (linhas pontilhadas) em PR e QS. O casamento de fase dos caminhos ópticos PQ e RS (OKAMOTO, 2006) é dado por:

$$k \cdot \eta_1 \cdot RS + 2\Phi - k \cdot \eta_1 \cdot PQ = 2m\pi \quad (16)$$

Lembrando que no núcleo, os feixes são caracterizados por:

$$\lambda = \lambda_0 / \eta_1 \quad (17)$$

$$k = k_0 \cdot \eta_1 \quad (k_0 = 2\pi / \lambda_0) \quad (18)$$

$$\beta = k_0 \cdot \eta_1 \cdot \cos \Phi \quad (19)$$

$$k = k_0 \cdot \eta_1 \cdot \sin \Phi \quad (20)$$

Onde:

λ_0, k_0 : comprimento de onda e o número de onda no vácuo, respectivamente;

λ, k :comprimento de onda e o número de onda no núcleo, respectivamente;

k, β :constantes de propagação nos eixos x e z, respectivamente.

Assim, segundo a equação (20) os feixes de luz propagam-se apenas em ângulos discretos de Φ , sendo a condição de propagação a seguinte:

$$\tan\left(k \cdot \eta_1 \cdot a \cdot \sin \Phi - \frac{m\pi}{2}\right) = \sqrt{\frac{2\Delta}{\sin^2 \Phi} - 1} \quad (21)$$

2.2.2 Perdas nos guias de onda

Existem diferentes tipos de perdas durante a propagação de luz no guia de onda (HUNSPERGER, 2009) associadas às características intrínsecas e as imperfeições do material do guia de onda.

- **Perdas por espalhamento**

As perdas por espalhamento acontecem pelas rugosidades no núcleo que alteram o ângulo de incidência dos feixes com as interfaces núcleo-cobertura. A luz pode ser desviada antes de atravessar o guia de onda como ilustrado na Figura 8.

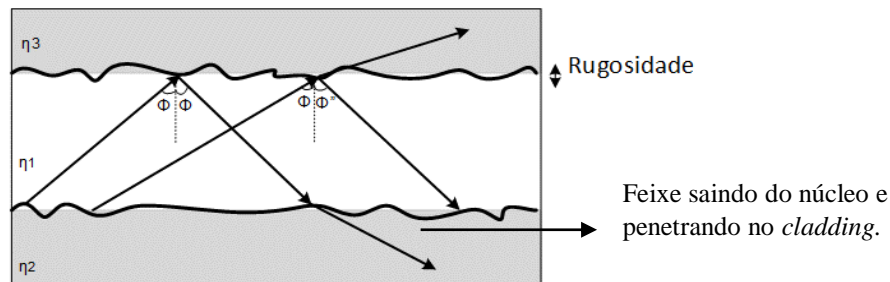


Figura 8-Perdas por espalhamento devido à rugosidade das paredes do núcleo.

Fonte: Autor.

- **Perdas por absorção**

As perdas por absorção acontecem pela conversão da potência óptica no núcleo em uma outra forma de energia. Isso é causado pelas imperfeições na estrutura atômica do material que induzem à absorção pela ausência de moléculas nas ligações. As perdas por absorção devido às propriedades intrínsecas estão ligadas às transições eletrônicas e vibracionais, esta última expressada em forma de aquecimento. As perdas por absorção devido às propriedades extrínsecas são causadas por impurezas metálicas (íons) introduzidos no material durante a fabricação.

- **Perdas por radiação**

A energia óptica é atenuada pela radiação dos fótons que escapam da interface núcleo-cobertura. Nos guias de onda com baixo confinamento, a perda por radiação torna-se relevante devido a que parte da energia se propaga pelas coberturas originando campos evanescentes e as curvaturas em um guia de ondas (MARCATILI, 1969) também produzem perdas por radiação.

2.3 Fotodiodo de junção p-n

2.3.1 Princípio de funcionamento

Um fotodiodo é um dispositivo semiconductor que transforma energia óptica em corrente elétrica. Seu funcionamento baseia-se na absorção de fótons que podem gerar a excitação de um elétron da banda de valência à banda de condução, criando um par elétron-lacuna, como ilustrado na Figura 9.

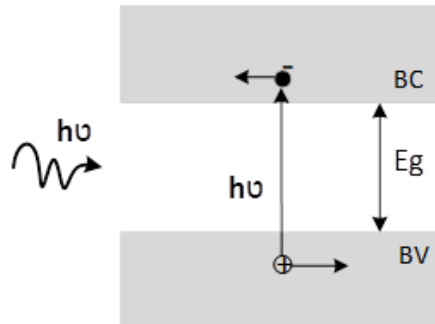


Figura 9-Geração de um par elétron-lacuna pela incidência de um fóton.

Fonte: Autor.

Um fotodiodo de junção *p-n* é feito de semicondutores tipo *p* (rico em lacunas) e tipo *n* (rico em elétrons) e contatos metálicos. Quando eles estão em contato, acontece a difusão de elétrons da região *n* à região *p* e a difusão de lacunas da região *p* à região *n*, o que estabelece uma corrente chamada de difusão. No equilíbrio, os portadores móveis são depletados em ambos lados da junção formando-se na junção uma região chamada região de depleção, na qual se estabelece um campo elétrico (*E*) que se opõe à difusão dos portadores móveis. Na Figura 10 é ilustrada a região de depleção na junção *p-n*.

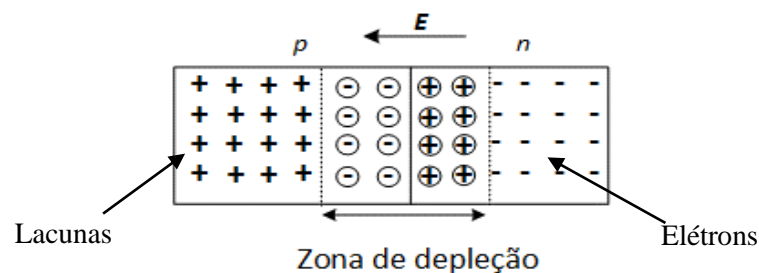


Figura 10-Formação da região de depleção no fotodiodo de junção p-n.

Fonte: Autor.

Sem uma tensão externa aplicada na junção p-n, a corrente de difusão e a corrente de deriva (fluxo de portadores móveis gerado pelo campo elétrico) se anulam entre si na região de depleção. Se aplicarmos uma tensão direta na junção ($p (+)$, $n (-)$), a barreira de potencial da região de depleção diminuirá e facilitará o fluxo de portadores sendo a corrente total proporcional à tensão aplicada. Se aplicarmos uma tensão reversa na junção ($p (-)$, $n(+)$) a barreira de potencial da região de depleção aumentará e o campo elétrico evitará a difusão de portadores, a corrente existente é gerada por efeitos térmicos ou por incidência óptica.

2.3.2 Fotodiodo de Si de junção p-n

Um fotodiodo de Si de junção $p-n$ em substrato N é mostrado na Figura 11. A região P+ foi criada por dopagem P no substrato tipo N e a região de depleção é estabelecida entre a região P+ e o substrato. A largura da região de depleção depende do nível de dopagem, da resistividade do substrato e da tensão externa aplicada (OPTOELECTRONICS, [S.d.]).

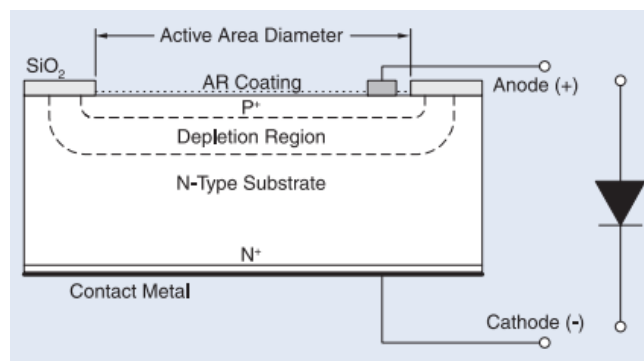


Figura 11-Seção transversal de um fotodiodo de Si p-n.

Fonte: Adaptado de (OPTOELECTRONICS, [S.d.]).

A capacidade de absorção óptica do fotodiodo é dada pelo coeficiente de absorção (α) a inversa desse coeficiente (α^{-1}) proporcional à distância média que um fóton percorre antes de ser absorvido no substrato.

No caso do Si a energia absorvida é maior à do seu *bandgap* (E_g). A 300°K $E_g=1,12$ eV. A energia que absorve tem comprimentos de onda menores a 1100 nm, limitada aproximadamente em 190 nm pelo alto valor do coeficiente de absorção que aumenta conforme o comprimento

de onda diminui fazendo que os pares elétrons-lacunas sejam absorvidos próximo à superfície sem atingir a região de depleção.

2.3.2.1 Caraterística I-V do fotodiodo

A relação da corrente (I) e a tensão (V) do fotodiodo é dada pela seguinte equação:

$$I = I_s \left(e^{\left(\frac{V}{kT/e}\right)} - 1 \right) - I_p \quad (22)$$

Onde:

I_s : corrente de escuro;

I_p : corrente gerada pelos fótons;

(kT/e) : tensão térmica;

K constante de Boltzman ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K);

T: temperatura absoluta (K).

Observa-se que mesmo sem uma fonte óptica flui uma corrente pelo fotodiodo, isso devido à geração espontânea de portadores livres por efeitos térmicos, conhecido como corrente de escuro (I_s). Na Figura 12 é ilustrado o gráfico de corrente (I) e tensão (V) do fotodiodo.

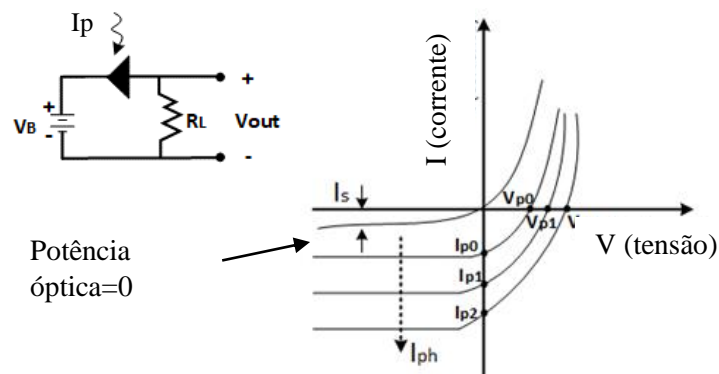


Figura 12-Curva corrente (I)-Tensão (V) do fotodiodo.

Fonte: Autor.

3. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

A revisão da literatura está focada no estudo e na avaliação de diferentes dispositivos fabricados com tecnologia CMOS que façam a integração de um dos componentes do dispositivo óptico desenvolvido (fonte óptica incandescente, guia de onda e fotodiodo).

3.1 Fonte óptica incandescente

Uma fonte óptica incandescente é usada principalmente em aplicações de sensoriamento, fabricada com tecnologia CMOS pode apresentar rápida uma resposta térmica (GUHA et al., 2007); consumo de energia eficiente (BARRITAUULT et al., 2011); e compatibilidade com os processos de fabricação comerciais (ALI et al., 2015).

Em um sensor de gás fabricado a partir da tecnologia SOI-CMOS de 1 μm em (ALI et al., 2015) foi utilizada uma fonte óptica incandescente. Seu filamento foi feito de múltiplas vias de tungstênio, envolvido em uma membrana dielétrica constituída pela interface de óxidos $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$, com uma espessura total 5 μm (4,5 μm $\text{SiO}_2/0,5$ μm Si_3N_4). A estrutura do filamento e da membrana dielétrica de anéis é de anéis concêntricos como ilustrada na Figura 13.

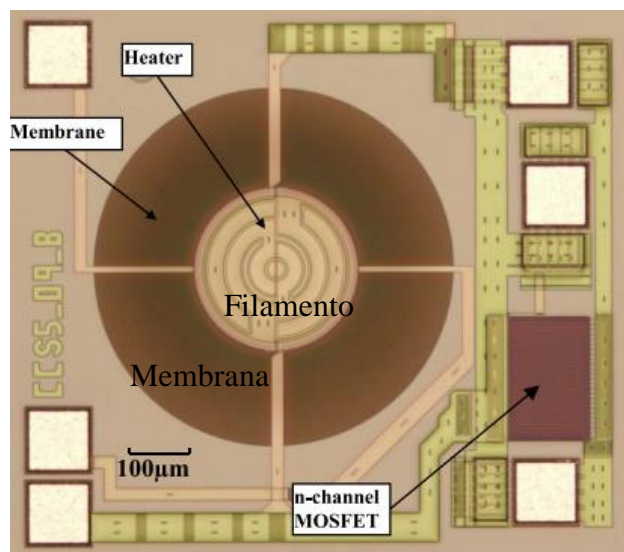


Figura 13-Filamento e membrana dielétrica da fonte óptica incandescente.

Fonte: Adaptado de (ALI et al., 2015).

Para maior uniformidade da temperatura na superfície da fonte incandescente uma camada de tungstênio de 300 nm de espessura foi colocada acima do filamento (BRIAND et al., 2002). A temperatura foi monitorada com um diodo *p-n* projetado e um transistor n-FET foi utilizado para o controle *on-off* da fonte óptica. Após a fabricação do sensor, a fonte óptica foi isolada do substrato-bulk para evitar perdas de calor por condução. Isso foi feito fazendo uma corrosão de Si pela face posterior do dispositivo com a técnica DRIE (*Deep Reactive Ion Etching*) como ilustrado na Figura 14.

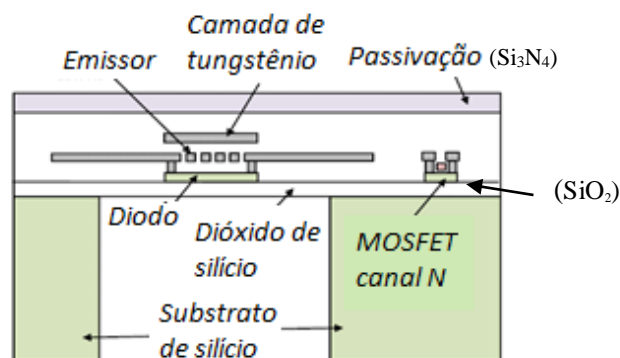


Figura 14-Vista da seção transversal do dispositivo sensor de gás.

Fonte: Adaptado de (ALI et al., 2015).

A temperatura da fonte óptica incandescente medida diretamente pelo diodo, resultou instável acima dos 500 °C. Por outro lado, a medida indireta de temperatura com os coeficientes lineal e quadrático de resistência de temperatura do tungstênio TCR (*Thermal Coefficient Resistance*) encontrou que a fonte óptica atingia 600°C com 70 mW de potência elétrica. Essa foi a menor potência gasta comparado com outras fontes ópticas incandescentes referenciadas no mesmo trabalho.

A potência radiante da fonte óptica incandescente foi encontrada utilizando os coeficientes de refletividade e emissividade encontrados com um equipamento micro FTIR (*Fourier Transform Infrared*) na faixa de comprimentos de onda de 2,5 – 15 μm, resultando e 0,8 mW a 600°C. Por último, fizeram-se duas propostas para otimizar a potência óptica da fonte incandescente: incrementar a resistência do filamento projetando-o com um diâmetro maior (600 e 1800 μm)

e melhorar o parâmetro de emissividade, depositando camadas de nanotubos de carbono acima da superfície da membrana dielétrica (DE LUCA et al., 2013).

Outro trabalho revisado é um dispositivo para sensoriamento de gases (ZHENGXI; TOSHIYOSHI, 2016) fabricado com tecnologia CMOS de 0,5 μm com fonte óptica tipo incandescente. Esta baseia-se em uma matriz de filamentos, cada um deles projetado entre duas camadas metálicas conectadas por vias de tungstênio e envolvido por uma membrana dielétrica de SiO_2 . Na Figura 15 é ilustrado os três tipos de estruturas avaliadas para o filamento.

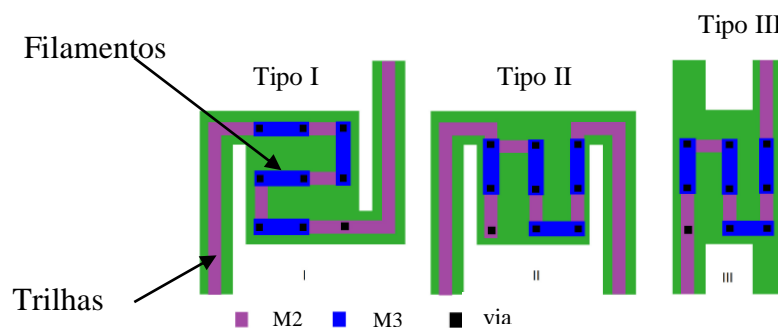


Figura 15- Emissor IR, modelo I, II e III.

Fonte: Adaptado de (ZHENGXI; TOSHIYOSHI, 2016).

O modelo I tem a menor área, mas a estrutura dos filamentos é propensa a se torcer pelo estresse térmico podendo fazer contato com o substrato. No modelo II, a disposição das trilhas evita o problema de torção, mas a estrutura dos filamentos pode se curvar por flexão. No modelo III, a disposição das trilhas é mais estável sob estresse térmico. No entanto, a altas temperaturas seus pontos de ancoragem são propensos à quebra.

Na Figura 16 é ilustrado o dispositivo para sensoriamento de gás após sua fabricação.

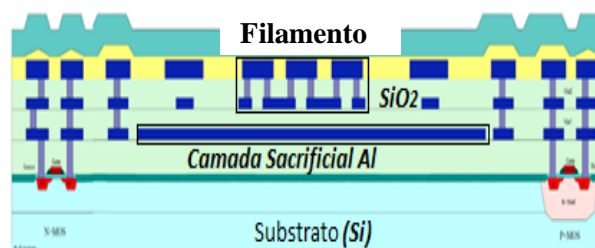


Figura 16-Dispositivo sensor de gás com a fonte óptica incandescente e as camadas sacrificiais de SiO_2 e de Al.

Fonte: Adaptado de (ZHENGXI; TOSHIYOSHI, 2016).

Após a fabricação do dispositivo foi feita uma etapa de pós-processamento baseada a corrosão das camadas sacrificiais de SiO₂ e de Al. Assim, uma máscara de alumínio foi depositada pela técnica *lift-off* para a corrosão do SiO₂ com RIE ilustrado na Figura 17(a). Após a corrosão do SiO₂ sacrificial embaixo da máscara, a camada sacrificial de Al ficou exposta como ilustrado na Figura 17(b). Essa camada foi corroída para conseguir o isolamento do filamento como ilustrado na Figura 17(c).

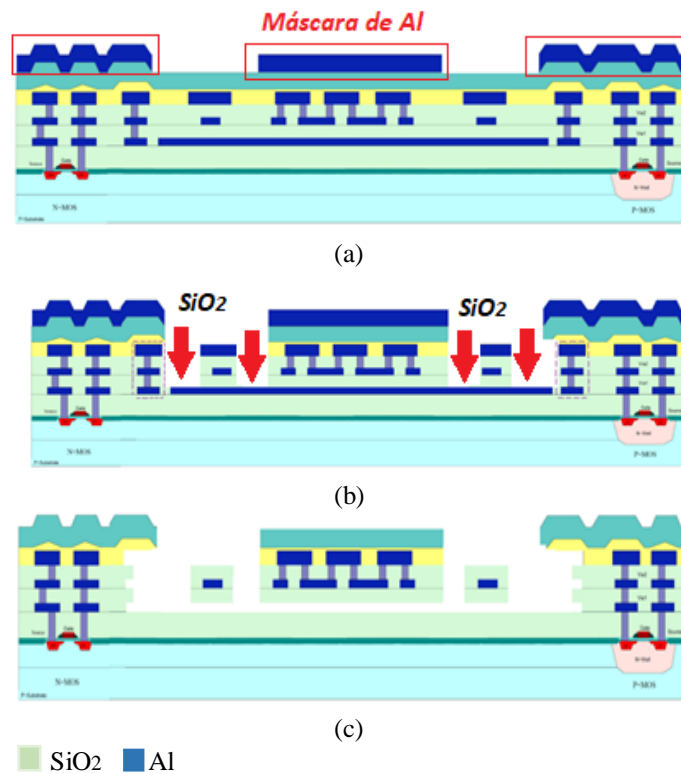


Figura 17-Etapas de pós-processamento do dispositivo. (a) Dispositivo após a fabricação sem pós-processamento. (b) Gravado da máscara metálica de Ti/Pt com a técnica *lift-off* para a corrosão de SiO₂. (c) Corrosão de SiO₂ pela técnica RIE. (d) Corrosão úmida de Al e suspensão do emissor.

Fonte: Adaptado de (ZHENGXI; TOSHIYOSHI,2016).

A caracterização elétrica do filamento foi feita mediante simulação pelo método dos elementos finitos (FEM) considerando um entorno de vácuo para suprimir as perdas de calor por condução e convecção e pondo a temperatura do substrato em 273 K. Os resultados da simulação mostraram que um incremento de temperatura de 400 K no modelo I e II do emissor precisava de 3 mW de potência elétrica e no modelo III, 8 mW.

Da revisão de literatura da fonte óptica incandescente, em ambos os trabalhos apresentados foi realizado seu isolamento utilizando uma etapa de pós-processamento por corrosão com RIE.

Não entanto no primeiro trabalho não foi detalhada a metodologia usada e em ambos não se detalharam os reativos usados.

3.2 Acoplamento guia de onda-fotodiodo

O acoplamento monolítico de um guia de onda e um fotodiodo, foi feito em (NATHAN *et al.*, 2003) usando o polímero SU8 no núcleo do guia de onda (espessura 12 μm e comprimento 20 μm) fabricado acima da camada de óxido LOCOS (*Local Oxidation Of Silicon*) de 1 μm de espessura. O fotodiodo de junção *p-n* de $40 \times 180 \mu\text{m}^2$ foi fabricado acima de uma camada de polissilício de 0,3 μm de espessura como mostrado na seção transversal do dispositivo na Figura 18 (a). O acoplamento guia de onda-fotodiodo foi feito usando o princípio de reflexão interna total (RIT) para injetar a luz no núcleo e depois o modo *leaky* para injetar a luz no fotodiodo como mostrado na Figura 18 (b). A superposição do guia de onda e fotodiodo foi feita em três comprimentos diferentes (A, B e C) como ilustrado na Figura 18(c).

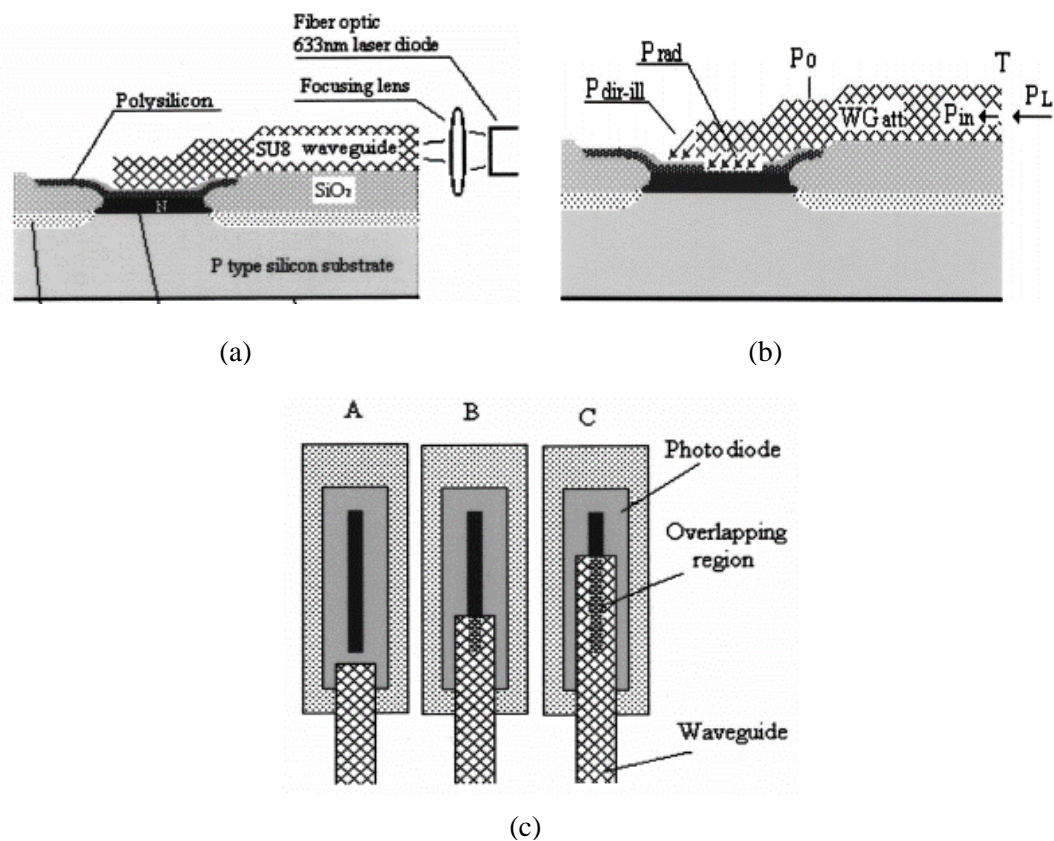


Figura 18-Acoplamento guia de onda e fotodiodo. (a) Vista transversal do acoplamento. (b) Percorrido da luz injetada no guia de onda até o fotodiodo. (c) Sobreposição guia de onda-fotodiodo. A: sem sobreposição, B: sobreposição parcial, C: sobreposição quase total.

A caracterização corrente-tensão (I-V) foi feita utilizando uma fibra óptica monomodo e com polarização reversa de 0,2 V. A fibra óptica foi alinhada em diferentes ângulos na entrada do guia de onda para conseguir a máxima leitura no fotodiodo. A eficiência do acoplamento foi medida pela atenuação da potência óptica na sobreposição do guia de onda-fotodiodo, considerando o fator de transmissão em 0,75. A atenuação do guia de onda foi calculada, medindo o *scattering* em vários pontos do guia de onda para as configurações B e C resultando em 1,9-2,9 dB/mm, obtendo-se valores um pouco elevados que poderiam ser pela rugosidade das paredes laterais do guia onda.

Outro trabalho revisado é o sistema óptico de distribuição do sinal de *clock* desenvolvido para microprocessadores de alto rendimento com tecnologia CMOS em (YUAN *et al.*, 2006). Os guias de onda foram feitos com núcleo de SiN_x (material usado no isolamento da interconexão de metais) e com óxido da camada PSG (*Phosphosilicate glass*) nos *claddings*. A camada de polissilício usado na porta dos transistores foi adaptada para agir como um fotodetector, como ilustrado na Figura 19.

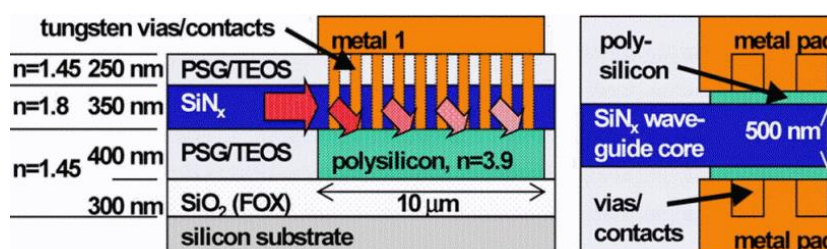


Figura 19-Acomplamento guia de onda e fotodiodo. (Direita) Seção transversal. (Esquerda) Vista superior.

Fonte: Adaptado de (YUAN *et al.*, 2006).

A luz é injetada pelo núcleo e propagou-se por reflexão interna total até atingir a camada de polissilício (fotodetector). Nessa região o comportamento muda para um guia de onda ARROW (*Anti-Resonant Reflecting Optical Waveguide*) refletindo a luz na camada de polissilício. A caracterização foi feita a 654 nm encontrando-se que o coeficiente de absorção do fotodiodo era 0,67 dB/ μm com responsividade de 0,35 A/W.

4. DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO ÓPTICO

4.1 Componentes do dispositivo óptico

O dispositivo óptico tem três componentes: fonte óptica, guia de onda e fotodiodo conectados entre si como esquematizado no diagrama de blocos da Figura 20.

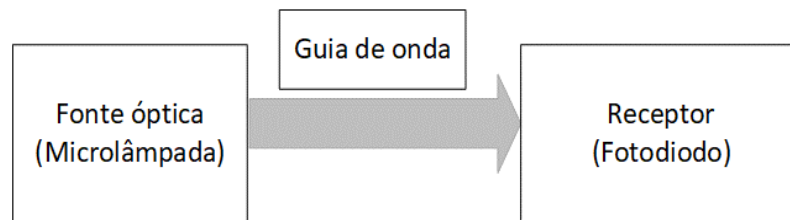


Figura 20-Diagrama de blocos do dispositivo óptico

Fonte: Autor.

4.1.1 Tecnologia CMOS de 0,35 μm da AMS

A seção transversal da tecnologia CMOS de 0,35 μm tem duas seções, como ilustrado na Figura 21. A seção FEOL, onde são projetados os componentes ativos e a seção BEOL, onde são interconectados todos os componentes da seção FEOL.

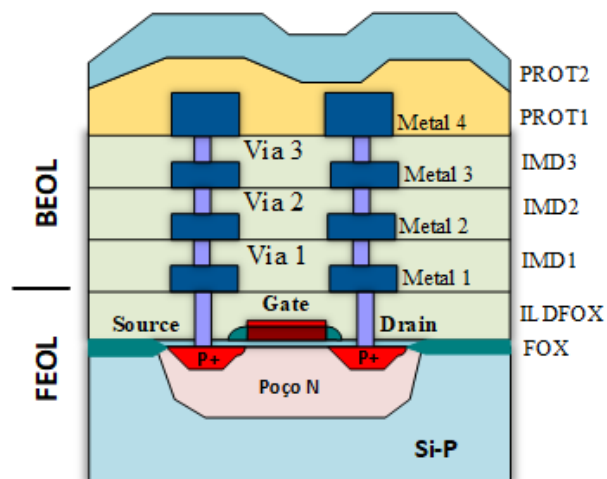


Figura 21-Seção transversal da tecnologia CMOS 0.35 μm da AMS.

Fonte: Adaptado de (AMS, 2014)

A seção FEOL é constituída pelo substrato e pelas camadas isolantes de óxido ILDFOX e, FOX. A seção BEOL tem quatro camadas metálicas (Metal 1, Metal 2, Metal 3 e Metal 4) isoladas entre si por camadas de óxido dielétrico (IMD1, IMD2 e IMD3), mas podem ser interconectadas por vias de tungstênio (Via1, Via2 e Via3). A espessura da camada metálica superior (Metal 4) é muito mais grossa do que as outras camadas metálicas, podendo por isso ser utilizada como uma máscara de corrosão na etapa de pós-processamento.

Acima da última camada metálica tem uma camada de passivação conformada pela interface dielétrica PROT1(SiO₂) /PROT2(Si₃N₄) para a proteção da superfície. Na Tabela 1 são apresentadas as espessuras das camadas da tecnologia já mencionadas.

Tabela 1-Espessuras das camadas metálicas e isolantes da tecnologia da tecnologia CMOS 0.35 μm da AMS.

	Mínimo	Típico	Máximo	Unidade
MET1	565	665	765	nm
MET2	540	640	740	nm
MET3	540	640	740	nm
MET4	2500	2800	3100	nm
Dielétrico ILDFOX	395	645	895	nm
Dielétrico FOX	260	290	320	nm
Dielétrico IMD1 (MET1-MET2)	620	1000	1380	nm
Dielétrico IMD2 (MET2-MET3)	620	1000	1380	nm
Dielétrico IMD3 (MET3-MET4)	600	1000	1200	nm
PROT1 (SiO ₂)	930	1030	1130	nm
PROT2 (Si ₃ N ₄)	800	1000	1200	nm

Fonte: Adaptado de (AMS, 2014).

4.1.2 Microlâmpada

A microlâmpada foi projetada na seção BEOL. As vias de tungstênio entre as camadas Metal 2 (MET2) e Metal 3 (MET3) foram utilizadas como filamentos da microlâmpada. O dielétrico de isolamento entre as camadas metálicas MET2 e MET3 (IMD2, IMD3) foi utilizado como membrana dielétrica da microlâmpada, cuja seção transversal é ilustrada na Figura 22.

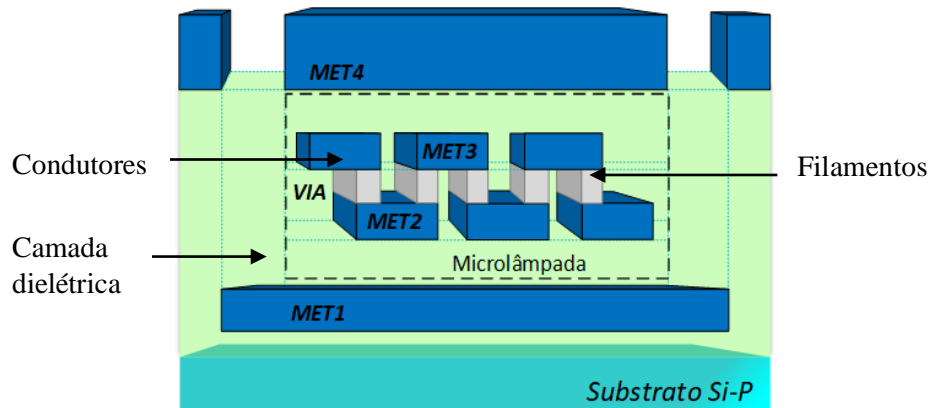


Figura 22- Seção transversal do dispositivo óptico, mostrando os filamentos e a membrana dielétrica da microlâmpada.

Fonte: Autor.

As camadas em Metal 1 (MET1) e Metal 4 (MET4) projetadas abaixo e acima da microlâmpada são camadas sacrificiais que serão corroídas na etapa de pós-processamento, para evitar perdas de calor por condução na microlâmpada que fazem ela precisar de correntes maiores para aquecer. Isso devido à alta condutividade térmica das camadas de Al e do substrato próximas a ela como ilustrado na Figura 23.

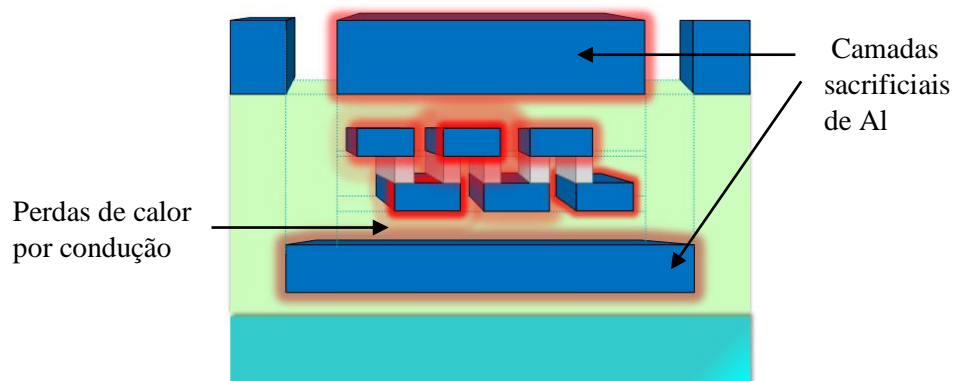


Figura 23-Perdas de calor na microlâmpada por condução devido ao contato com outras camadas metálicas.

Fonte: Autor.

O modelo elétrico da microlâmpada ligado a terminais elétricos (*pads*) baseado é ilustrado na Figura 24.

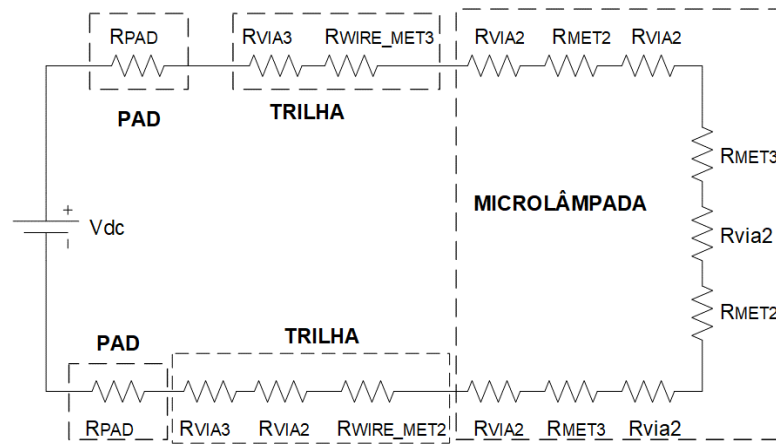


Figura 24-Modelo elétrico da microlâmpada.

Fonte: Autor.

Onde:

R_{MET2} , R_{MET3} : resistências dos trechos metálicos da microlâmpada em MET2 e MET3;

R_{VIA2} , R_{VIA3} : resistências das vias de tungstênio em MET2-MET3 (Via2) e MET3-MET4 (Via3);

R_{WIRE_MET2} , R_{WIRE_MET3} : resistências das trilhas metálicas que unem os terminais da microlâmpada com os *pads* em MET2 e MET3;

R_{pad} : resistência de *pad*.

Segundo o modelo elétrico da microlâmpada sua equação de resistência elétrica está dada por:

$$R_{microlâmpada} = N_{vias} \cdot R_{VIA2} + 2 \cdot R_{MET2} + 2 \cdot R_{MET3} \quad (27)$$

Onde:

N_{vias} é o número de vias.

O valor típico de resistividade por quadrado para MET2 e MET3 é $R_{\square} = 0,07 \Omega/\text{quadrado}$ e o valor de resistência de via é $R_{VIA} = 1,2 \Omega$. A resistência dos condutores em MET2 e MET3 é desprezível ($< 0.1 \Omega$) por causa da relação L/W (segundo a Equação 6). Assim, a resistência da microlâmpada é dada principalmente pela resistência dos filamentos de tungstênio:

$$R_{microlâmpada} = N_{vias} \cdot R_{VIA2} \approx 5vias \cdot 1,2 \Omega/via = 6 \Omega \quad (28)$$

A resistência das trilhas que conectam a microlâmpada com os *pads*, deve ser muito menor do que a resistência da microlâmpada para ter a máxima queda de tensão nela. Assim elas foram projetadas com o menor comprimento possível (200 μm) e largura de 20 μm resultando 7 Ω . Para reduzir esse valor projetaram-se múltiplas vias entre as camadas que formam as trilhas para obter um arranjo resistivo de vias em paralelo (cada uma com 1,2 Ω) com a finalidade de tornar a resistência total desprezível como mostrado ilustrado na Figura 25.

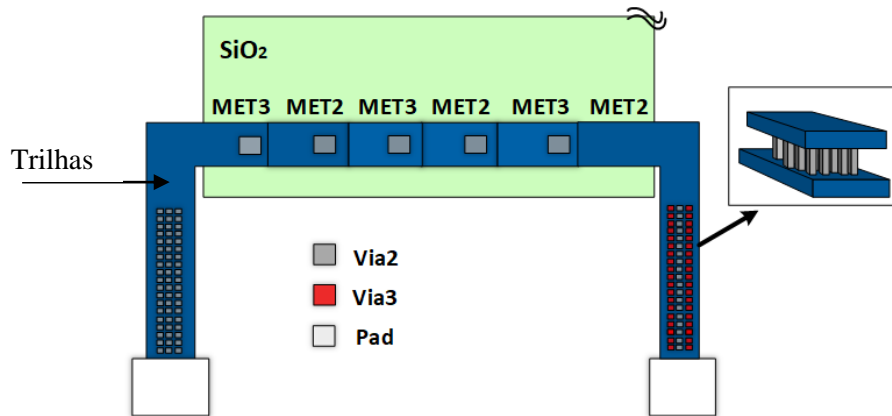


Figura 25-Vista superior da microlâmpada, mostrando o conjunto emissor, trilhas e *pads*.

Fonte: Autor.

4.1.3 Guia de onda

O guia de onda foi fabricado na seção BEOL da tecnologia CMOS acoplado à microlâmpada pelo núcleo. Devido que a microlâmpada é coberta por SiO_2 , o núcleo do guia de onda foi feito também desse material para permitir a máxima transferência de potência óptica entre a microlâmpada e o guia de onda. Uma condição necessária para o guia de onda cumprir a condição RIT é que o índice de refração do núcleo ($\eta=1,46$) seja maior do que os *claddings*. Assim, uma opção simples e econômica foi utilizar ar como *claddings* ($\eta=1$). Para isso as camadas sacrificiais em MET1 e MET4 serão corroídas na etapa de pós-processamento para formar os *claddings* de ar. Os guias de ondas foram fabricados em três comprimentos diferentes: 20 μm , 50 μm e 100 μm . Na Figura 26 apresenta-se a vista lateral do dispositivo óptico com o guia de onda destacado em linhas pontilhadas acoplando-se com o fotodiodo por um trecho vertical. As setas vermelhas representam a luz gerada pela microlâmpada viajando pelo núcleo até atingir o fotodiodo.

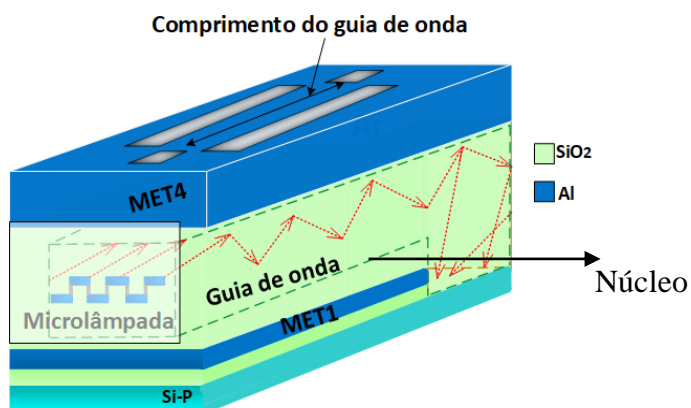


Figura 26-Vista lateral do dispositivo óptico com o guia de onda é destacado em linhas pontilhadas.

Fonte: Autor.

4.1.4 Fotodiodo

O fotodiodo foi fabricado na seção FEOL da tecnologia CMOS usando o modelo pronto do *design kit* da AMS, modelo PHDNWA850 com poço N e substrato P como ilustrado na Figura 27.

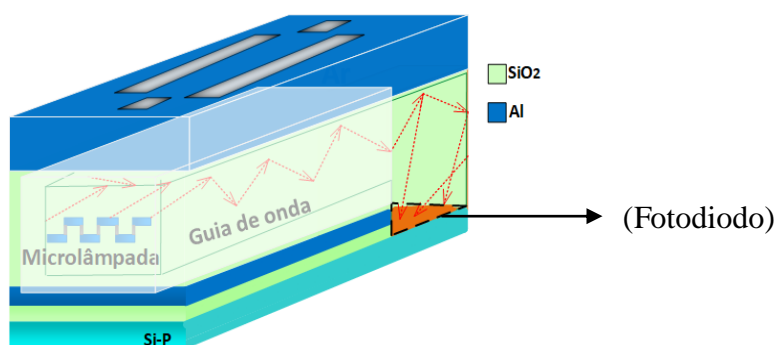


Figura 27-Vista lateral do dispositivo óptico, o fotodiodo é destacado em linhas pontilhadas.

Fonte: Autor.

A responsividade do fotodiodo PHDNWA850 em função do comprimento de onda é mostrado na Figura 28. Apresentam-se duas curvas, ambas do processo C35B401 da AMS (especial para dispositivos ópticos). A curva $0,35 \mu\text{m}$ STD pertence a um fotodiodo padrão e a curva $0,35 \mu\text{m}$ EPI é do fotodiodo fabricado com um processo otimizado (PELLION *et al.*, 2015).

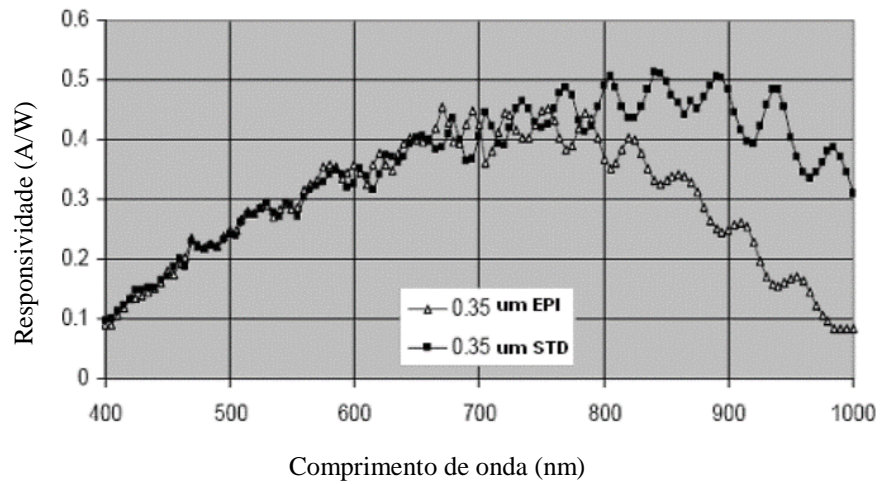


Figura 28-Resposta do fotodiodo PHDNWA850.

Fonte: Adaptado de (CHMIELEWSKI, [S.d.]).

4.2 Fabricação do dispositivo óptico

Cada chip fabricado tem doze dispositivos ópticos, seus componentes são os apresentados na Figura 29.

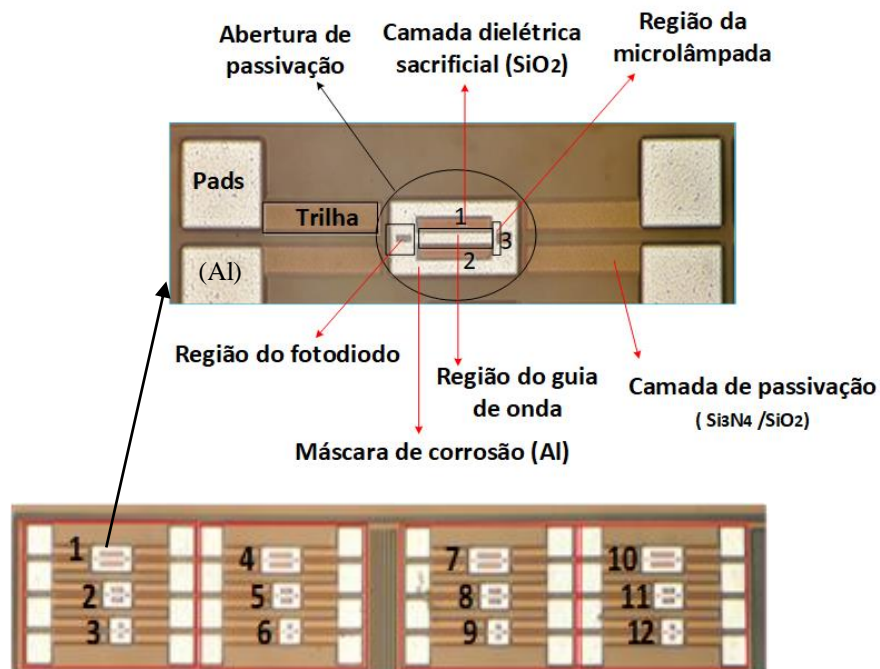


Figura 29-Dispositivo óptico em um chip apresentado seus componentes.

Fonte: Autor

A máscara de corrosão foi feita do alumínio de MET4 com $2,8 \mu\text{m}$ de espessura para fazer a corrosão do SiO_2 sacrificial em (3) para isolar a microlâmpada e a corrosão do SiO_2 sacrificial em (1) e (2) para formar os *claddings* do guia de onda. As trilhas do dispositivo têm acima a camada de passivação conformada (interface $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$) e a poliamida (polímero) colocados sempre como últimas camadas da tecnologia CMOS para proteção das superfícies. Na Figura 30 são apresentadas as dimensões do dispositivo óptico.

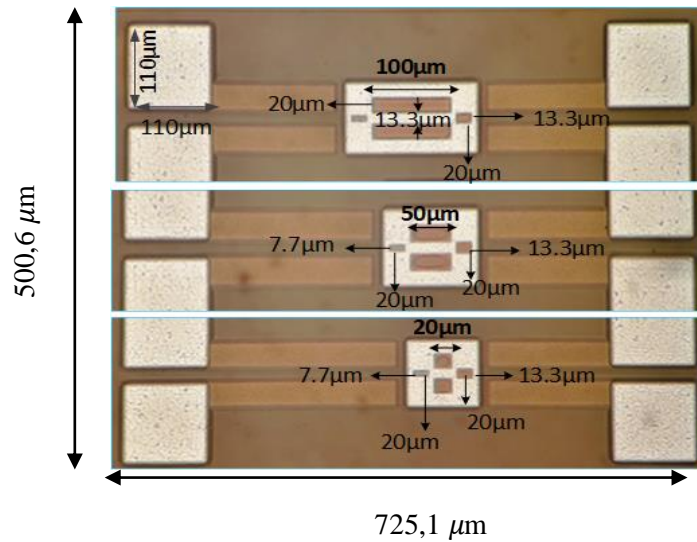


Figura 30-Dimensões do dispositivo óptico.

Fonte: Autor.

5. ETAPA DE PÓS-PROCESSAMENTO

O estabelecimento de um procedimento de pós-processamento para o dispositivo óptico baseou-se no isolamento da microlâmpada e na formação dos *claddings* do guia de onda. Para cumprir com ambos requerimentos foi necessário primeiro, fazer a corrosão da camada sacrificial de SiO_2 de $4,28 \mu\text{m}$ de espessura que fica nas laterais da microlâmpada e do guia de onda, sem a cobertura da máscara metálica. Segundo, fazer a corrosão da camada sacrificial de Al de $0,67 \mu\text{m}$ de espessura e da máscara de corrosão de $2,8 \mu\text{m}$ de espessura. As camadas sacrificiais de SiO_2 e Al são ilustradas na seção transversal do dispositivo óptico na Figura 31(a) e na vista lateral do dispositivo óptico na Figura 31(b).

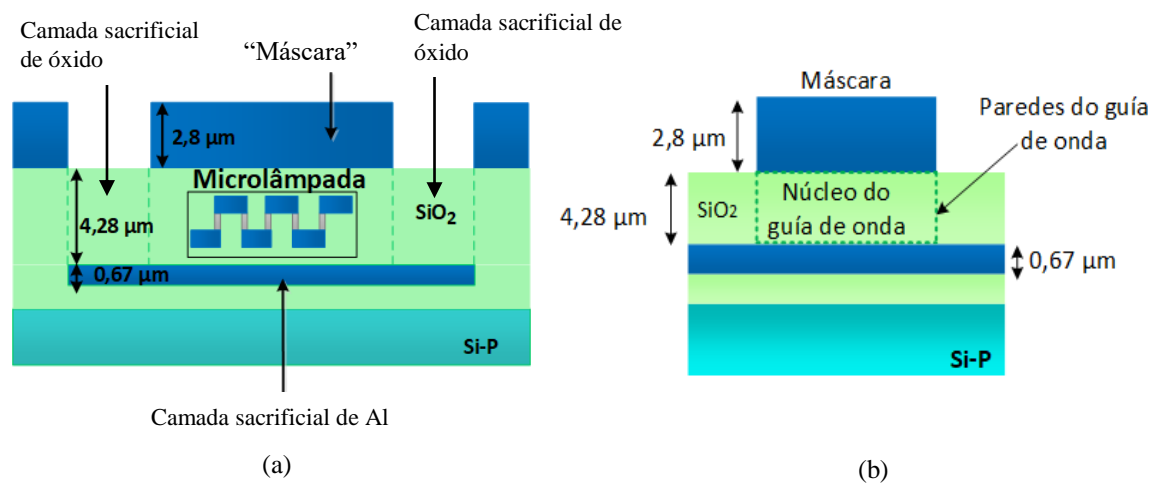


Figura 31-Camada de SiO_2 e camada de Al do dispositivo óptico. (a) Seção transversal. (b) Vista lateral.

Fonte: Autor.

Devido à espessura grossa da camada sacrificial de SiO_2 , decidiu-se realizar sua corrosão, separadamente, com dois métodos. O Método-1 utilizando a corrosão seca por RIE e o Método-2 utilizando a corrosão úmida por *Silox Vapox* detalhadas posteriormente.

5.1 Materiais e métodos

5.1.1 Corrosão de SiO₂ por RIE

A corrosão por RIE (FRANSSILA; SAINIEMI, 2013) é anisotrópica e baseia-se no bombardeamento direcional de um filme com espécies reativas e íons de plasma, gerados pela excitação de um gás ou mistura de gases por um campo elétrico RF em condições de alto vácuo. No Laboratório de Microeletrônica (LME) da Faculdade de Engenharia Elétrica da EPUSP é usada uma mistura gasosa de tetrafluoreto de carbono e argônio (CF₄/Ar) como reagentes para a corrosão por RIE de SiO₂. O equipamento RIE ilustrado na Figura 32, tem eletrodos dentro de uma câmara fechada, acoplados capacitivamente e um porta-substrato preso a um deles para a amostra tenha contato com o plasma.

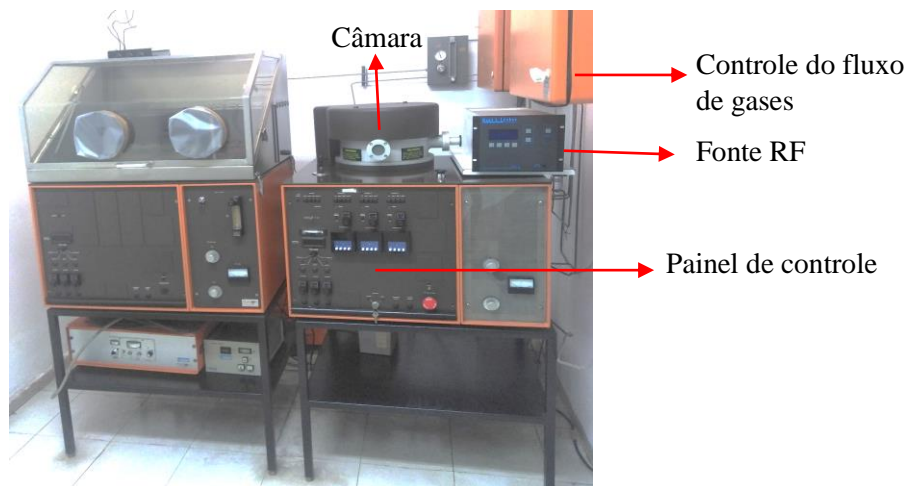


Figura 32-Equipamento RIE do LME.

Fonte: Autor

Assim, o resultado esperado após a corrosão por RIE da camada sacrificial de SiO₂ no dispositivo óptico é ilustrado na Figura 43.

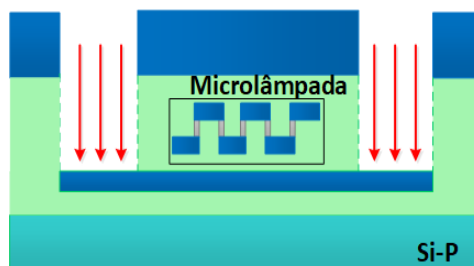


Figura 33-Perfil de corrosão isotrópica por RIE.

Fonte: Autor.

5.1.2 Corrosão de SiO₂ por *Silox Vapox III*

O *Silox Vapox III* é uma solução comercial do fabricante *Transene* que otimiza a corrosão de SiO₂ sobre Al com alta seletividade. A solução tem uma porcentagem de HF saturada com Al para minimizar o ataque dele mesmo. A corrosão por *Silox Vapox* é isotrópica com uma taxa de corrosão quase uniforme em todas as direções que segundo o fabricante é 400 nm/min a 22°C.

O resultado esperado após a corrosão da camada sacrificial de SiO₂ no dispositivo óptico é ilustrado na Figura 34. Observa-se que o tempo de corrosão com *Silox Vapox* não deve ser ultrapassado para evitar expor ao meio ambiente os filamentos da microlâmpada, já que isso não só alteraria sua resposta elétrica mas poderia inviabilizar o seu funcionamento.

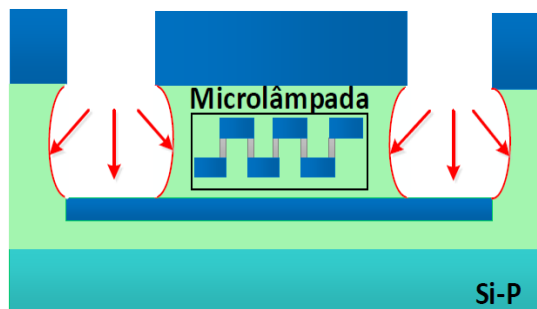


Figura 34-Corrosão isotrópica por *Silox Vapox*.

Fonte: Autor.

5.1.3 Corrosão de Al

A corrosão da camada sacrificial de Al se realizou com a solução mista de H₂O: H₃PO₄: HNO₃ (5:12:1) a 40°C, segundo o laboratório do LME a taxa de corrosão da solução é 0,2 µm/min.

Na Figura 35 ilustra-se como foi observado as mudanças de cor da camada sacrificial de Al com o microscópio óptico.

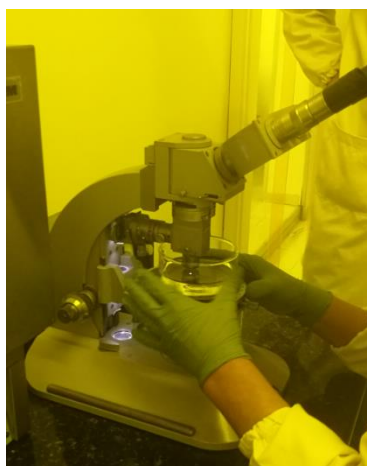


Figura 35- Inspeção do dispositivo óptico após a corrosão da camada de Al sacrificial.

Fonte: Autor.

5.1.4 Cálculo das taxas de corrosão por RIE e *Silox Vapox*

Dado a que a camada de passivação ($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$) e os *pads* (Al) são expostos durante a corrosão de SiO_2 tanto por RIE quanto por *Silox Vapox*, resolveu-se encontrar primeiro as taxas de corrosão experimentalmente em amostras com SiO_2 , Si_3N_4 e Al cujo processo de deposição e os equipamentos usados são detalhados no Apêndice A. Isso foi feito antes de fazer a corrosão no dispositivo óptico para conhecer se era necessário colocar uma máscara. Além disso na data que foi desenvolvido este trabalho não se tinha ainda um registro das taxas de corrosão de SiO_2 , Si_3N_4 e Al por RIE com CF_4/Ar e por *Silox Vapox*.

5.1.4.1 Corrosão por RIE

O procedimento para o cálculo das taxas de corrosão por RIE nas amostras de SiO_2 , Si_3N_4 e Al é ilustrado na Figura 36.

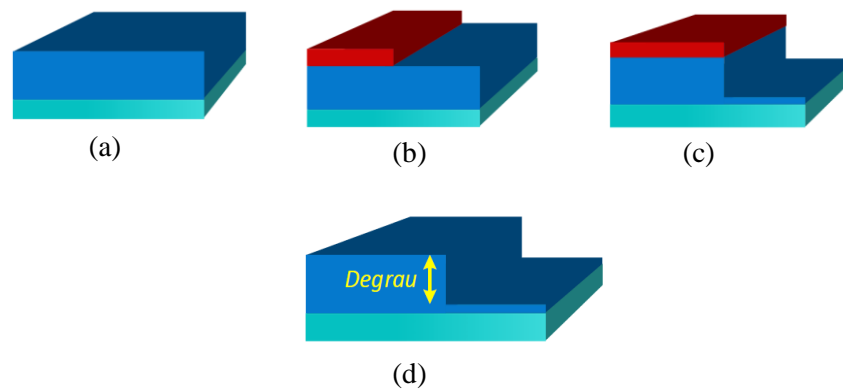


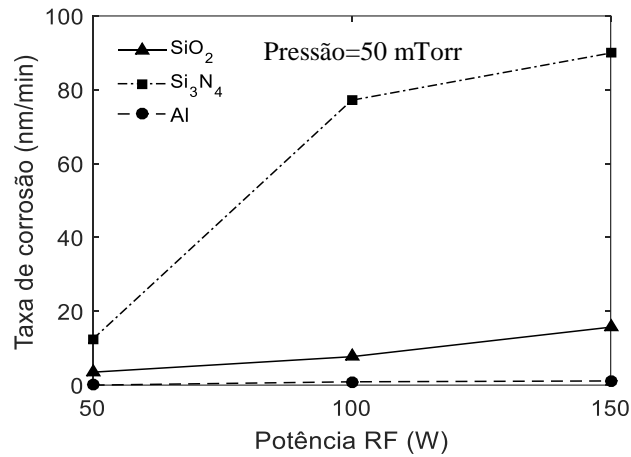
Figura 36-Aplicação do material fotorresiste nos pads e trilhas do dispositivo óptico (a) Amostra inicial com a superfície limpa. (b) Aplicação de fotorresiste em apenas uma região da amostra. (c) Amostra após a corrosão em tempos de 5, 10, 20 e 25 min. (d) Retiro do fotorresiste para medir o degrau da amostra com o perfilômetro Tencor Alpha Step 500.

Fonte: Autor.

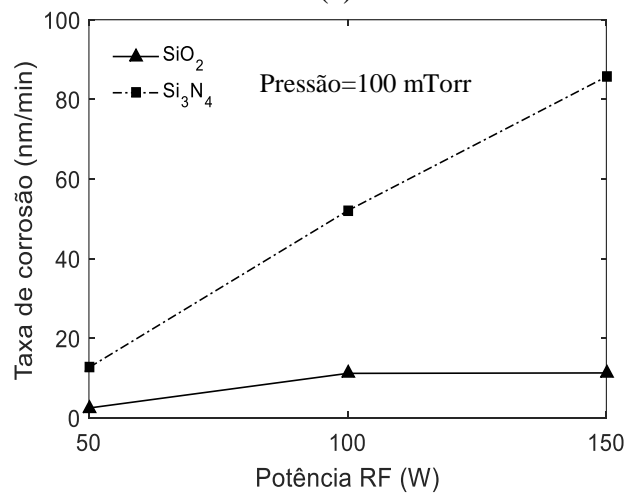
A pressão foi 50 e 100 mTorr e a potência RF 50, 100 e 150 W. Os resultados são ilustrados na Figura 37.

Observa-se que as taxas de corrosão nas amostras de SiO_2 a 50 mTorr (50, 100 e 150 W) não são muito diferenciadas das taxas de corrosão obtidas a 100 mTorr (50, 100 e 150 W). Nas amostras de Si_3N_4 , as taxas de corrosão a 50 mTorr (50, 150 W) e 100 mTorr (50 e 150 W) não são muito diferenciadas, mas a 50 mTorr e 100 W (~ 75 nm/min) apresenta uma diferença considerável com 100 mTorr e 100 W (~ 50 nm/min). Podendo ser devido a uma medida imprecisa do perfilômetro. Comparando as taxas de corrosão nas amostras de SiO_2 e Si_3N_4 , esta última é sempre de 5 até 7 vezes maior.

Nas amostras de Al, a taxa de corrosão à 50 mTorr e 50,100 e 150W é muito baixa (< 3 nm/min) e a 100 mTorr e 50,100 e 150W não foi possível obtê-las devido a limitações do perfilômetro que não possibilita medir degraus muito finos.



(a)



(b)

Figura 37-Relação das taxas de corrosão por RIE com CF₄/Ar em amostras de SiO₂, Si₃N₄ e Al com potências RF de 50, 100, 150 W. (a) Pressão de 50 mTorr. (b) Pressão de 100 mTorr.

Fonte: Autor

5.1.4.2 Corrosão por *Silox vapox*

As taxas de corrosão por *Silox Vapox* foram obtidas experimentalmente em amostras de SiO₂, Si₃N₄ e Al, seguindo o mesmo procedimento detalhado na corrosão por RIE. Os resultados são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2-Taxas de corrosão por *Silox Vapox*.

Taxa de corrosão de SiO ₂	49,71 nm/min
Taxa de corrosão de Si ₃ N ₄	17,11 nm/min
Taxa de corrosão de Al	0,84 nm/min

Fonte: Autor

5.1.5 Secagem do dispositivo óptico após a corrosão por RIE ou *Silox Vapox*

Após a remoção das camadas sacrificiais, o dispositivo óptico terá estruturas suspensas na microlâmpada e no guia de onda. Para evitar que as forças de tensão superficial que aparecem no processo de evaporação (JAFRI; BUSTA; WALSH, 1999) colapsem as estruturas suspensas à base será feita uma secagem supercrítica como ilustrado na Figura 38.

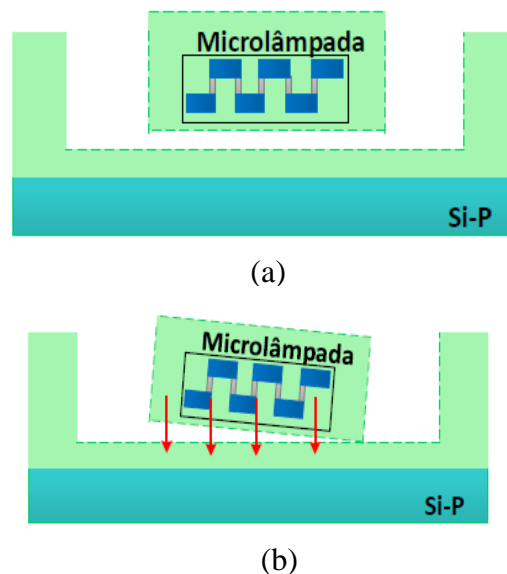


Figura 38- Suspensão da microlâmpada e do guia de onda após a corrosão da camada sacrificial de Al. (a) Suspensão sucedida. (b) Suspensão com problemas de adesão na base.

Fonte: Autor.

Na secagem por evaporação, a mudança de fase líquido-gás gera uma tensão superficial que puxa as superfícies sólidas contra o líquido que está em contato. Porém, em uma secagem supercrítica o fluido é removido de forma controlada sem atravessar a fronteira de fases para não gerar tensão superficial.

O dióxido de carbono (CO_2) é muito utilizado na secagem supercrítica de dispositivos por atingir sua região supercrítica a uma baixa temperatura ($31,04\text{ }^\circ\text{C}$ e $1071,83\text{ psi}$). Na Figura 39 é ilustrado n diagrama de fases do CO_2 .

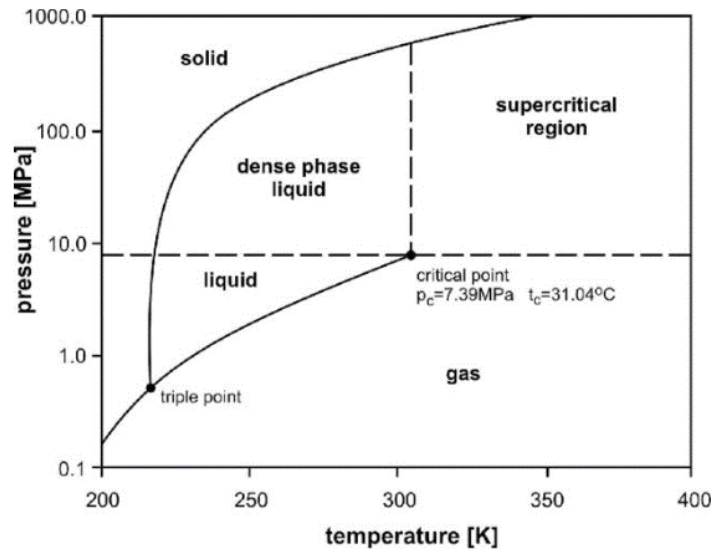


Figura 39 -Diagrama de fases do CO₂.

Autor: Adaptado de (WITKOWSKI; MAJKUT; RULIK, 2014).

A secagem supercrítica do dispositivo óptico será realizada usando o equipamento K850WM de *Quorum Technologies* apresentado na Figura 40.

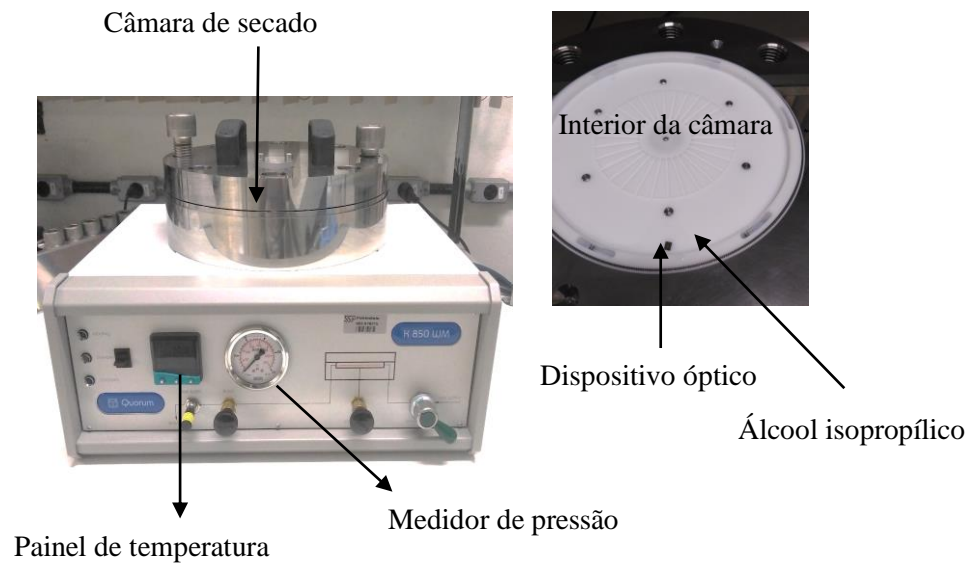


Figura 40- Equipamento para secagem supercrítica.

Fonte: Autor.

5.2 Isolamento da microlâmpada e formação dos *claddings* do guia de onda

5.2.1 Método 1-Corrosão por RIE da camada de SiO₂ sacrificial

A corrosão do SiO₂ sacrificial de 4,28 μm de espessura realizou-se sob as condições apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3- Parâmetros para a corrosão de SiO₂ por RIE.

Fluxo de Ar (sccm)	12,5
Fluxo de CF ₄ (sccm)	42
Pressão (mTorr)	50
Potência (W)	150

Fonte: Autor

A taxa de corrosão encontrada nas amostras de SiO₂ nas condições dadas acima foi a máxima (15 nm/min). Assim, o tempo de corrosão para a camada de SiO₂ 4,28 μm de espessura foi calculado em 4,7 h aproximadamente.

A camada de passivação e os *pads* foram cobertos com fotorresiste manualmente devido a que a taxa de corrosão encontrada nas amostras de Si₃N₄ era 90 nm/min, e, portanto, toda a espessura da camada de passivação (2,03 μm) seria corroída se não tivesse uma máscara de proteção.

A evolução da corrosão da camada de SiO₂ é ilustrada na Figura 41. A cor do SiO₂ no interior das aberturas da máscara mudou-se com o decorrer do tempo. Inicialmente, a cor é laranja como mostrado na Figura 41(a). Após 2 h de corrosão, observa-se uma leve mudança da cor e também que parte do fotorresiste colocado na camada de passivação foi atacado como mostrado na Figura 41(b). Por isso, foi reaplicado antes de cada nova corrosão. Após 3,5 h é notória a mudança da cor do SiO₂ como mostrado na Figura 41(c) e após 7 h de corrosão é observada uma cor branca que mostra que atingiu-se a camada sacrificial de Al como ilustrado na Figura 41(d). Observa-se também que a superfície da camada de passivação foi atacada, apresentando cores diferenciadas na região das trilhas.

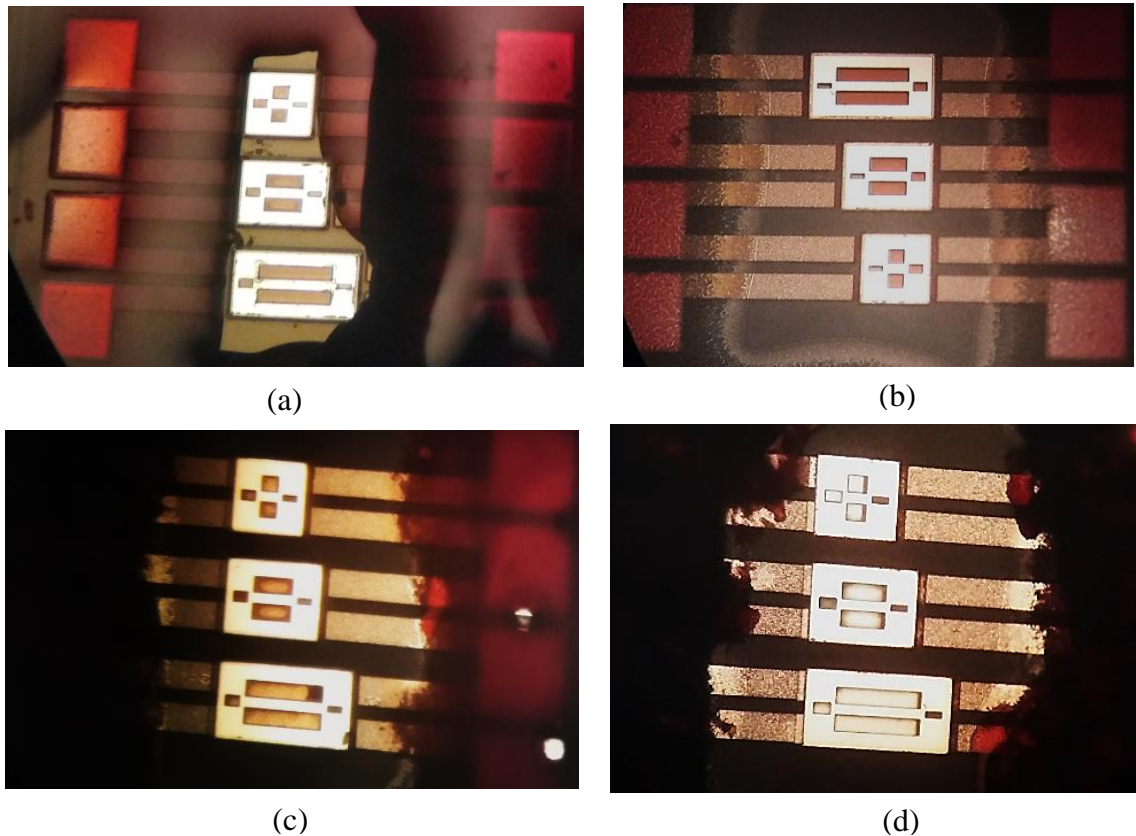


Figura 41-Evolução da corrosão por RIE da camada sacrificial de SiO₂. (a) Antes da corrosão. (b) Após 2 h de corrosão. (c) Após 5 h de corrosão. (d) Após 7 h de corrosão.

Fonte: Autor.

A corrosão da camada do SiO₂ sacrificial se realizou em 7 h. Isso excedeu em 2,3 h o tempo estimado (~4,7 h). Essa diferença poderia ser devido às dimensões pequenas do SiO₂ exposto (microlâmpada: 20 μm x 13,3 μm ; guia de onda: 20 μm x 100 μm , 20 μm x 50 μm e 20 μm x 20 μm), que dificultaram a entrada dos reagentes de corrosão dentro dessas áreas.

5.2.1.1 Corrosão da camada de Al sacrificial

Após a corrosão da camada sacrificial de SiO₂ foi feita a corrosão da camada sacrificial de Al (0,665 μm) e da máscara (2,8 μm de espessura) em 15 min. Depois da etapa de corrosão foi feita a secagem supercrítica. O estado final do dispositivo óptico após a secagem é mostrado na Figura 42.

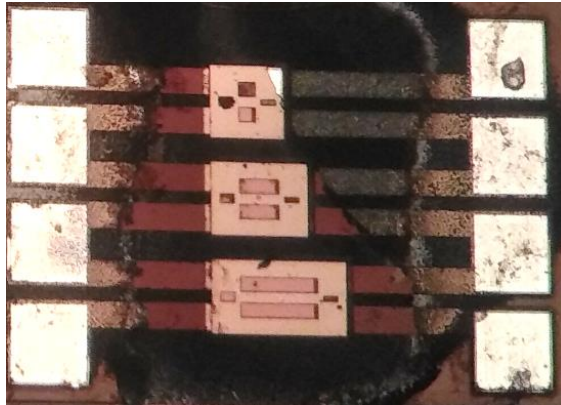


Figura 42- Dispositivo óptico depois da secagem supercrítica com prévia corrosão da camada sacrificial de SiO_2 por RIE por 7 h e da corrosão da camada sacrificial de Al por 20 min.

Fonte: Autor.

Observa-se que a camada de passivação acima das trilhas foi atacada embora tenha-se reaplicado fotorresiste constantemente para protegê-la. As cores diferenciadas nas trilhas mostram que o ataque em certas regiões foi maior. Na região próxima dos *pads* ainda é conservada a cor inicial, já que foi mais fácil reaplicar aí o fotorresiste. Por outro lado, na região próxima da máscara, as trilhas apresentam uma cor mais escura que indica que foram mais atacadas.

5.2.2 Método 2- Corrosão por *Silox Vapox* da camada de SiO_2 sacrificial

A corrosão da camada sacrificial de SiO_2 de $4,28 \mu\text{m}$ de espessura por *Silox Vapox* realizou-se considerando a taxa de corrosão experimental nas amostras de SiO_2 ($49,71 \text{ nm/min}$), segundo a qual o tempo estimado de corrosão era de 57 min. Dado que a taxa de corrosão experimental nas amostras de Si_3N_4 era $17,11 \text{ nm/min}$ e do Al $0,84 \text{ nm/min}$. Nos 57 min seriam corroídos $975,27 \text{ nm}$ da camada de passivação e $47,88 \text{ nm}$ de Al dos *pads*. Para evitar isso foi colocado manualmente fotorresiste na superfície antes de iniciar a corrosão, como apresentado na evolução da corrosão da camada sacrificial de SiO_2 por *Silox Vapox* é ilustrada na Figura 43.

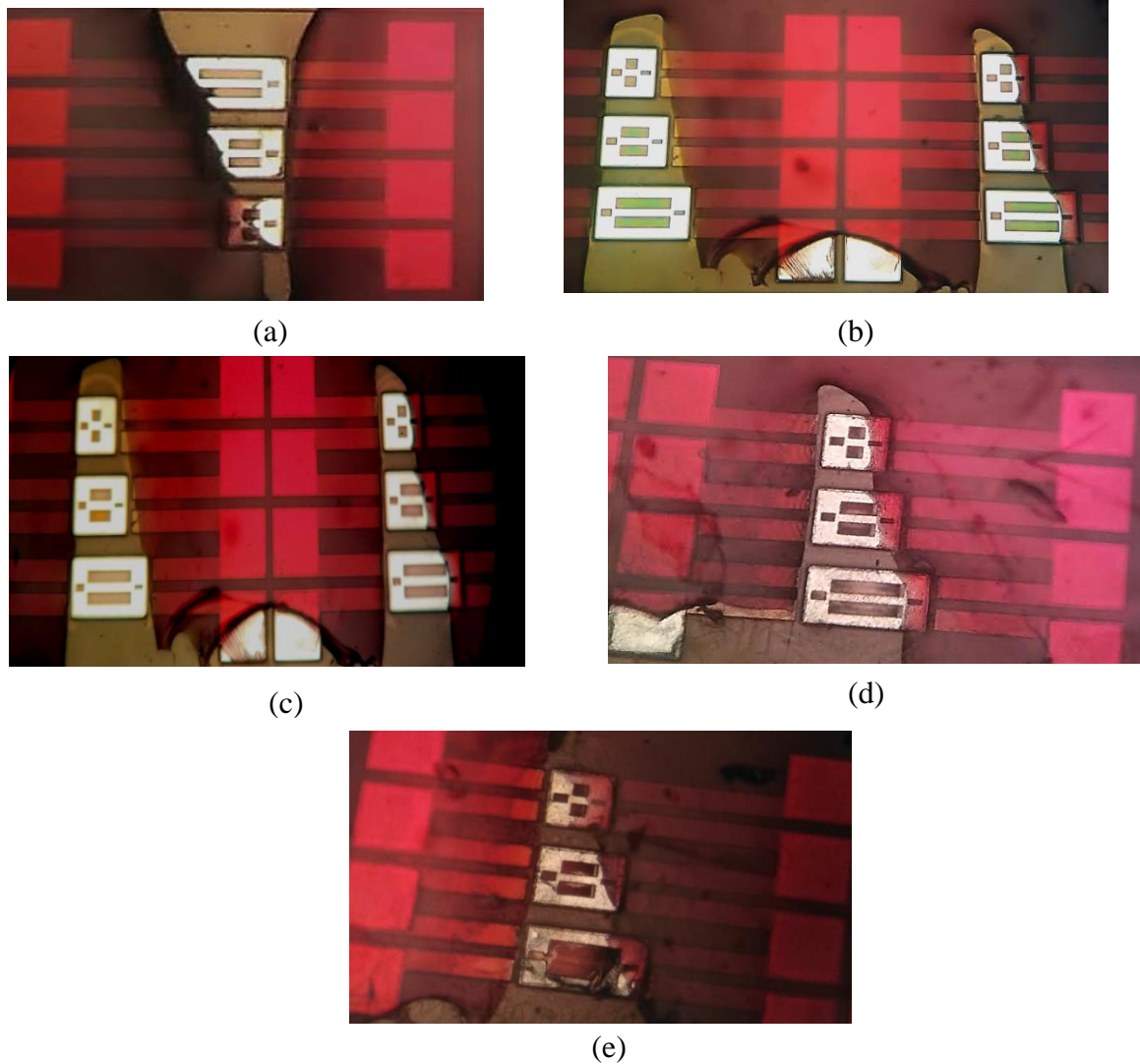


Figura 43-Evolução da corrosão por *Silox Vapox* da camada sacrificial de SiO₂. (a) Antes da corrosão. (b) Após 20 min de corrosão. (c) Após 25 min de corrosão. (d) Após 30 min de corrosão. (e) Após 40 min de corrosão.

Fonte: Autor.

Inicialmente a cor do SiO₂ observada pelas aberturas da máscara era laranja como apresentado na Figura 43(a). Após 20 min foi observada uma mudança de cor da camada de SiO₂ de laranja a verde claro como apresentado na Figura 43(b). Após 25 min de corrosão a cor da camada de SiO₂ foi rosa como apresentado na Figura 43(c). Após 30 min de corrosão a cor da camada de SiO₂ era rosa como apresentado na Figura 43(d). Após 40 min de corrosão a cor era ainda rosa e o Al da máscara mesmo tendo uma espessura grossa, começou a ser danificado em alguns dispositivos como apresentado na Figura 43(e).

Tempos maiores de corrosão com *Silox Vapox* foram feitos esperando corroer todo o óxido para expor a camada sacrificial de Al, como aconteceu na corrosão por RIE. Porém, não foi possível. No documento do fabricante AMS não está detalhado a existência de uma camada diferente do SiO₂ entre as camadas metálicas. No entanto, consultando outros trabalhos relacionados (DOS SANTOS,2017) encontrou-se que as camadas de Al são cercadas por uma camada de TiN (nitreto de titânio) de aproximadamente 50 nm de para evitar sua eletromigração a outras camadas. Assim para atingir a camada de Al sacrificial precisou-se também da corrosão da camada de TiN que não pude ser feita com a solução de *Silox Vapox*, mas foi possível com a corrosão por RIE.

O novo procedimento foi realizado em outro chip. Após 30 min de corrosão com *Silox Vapox* foi observada a camada de TiN de cor rosa pelas aberturas da máscara, logo depois foi feito 6 min de corrosão por RIE a 100 mTorr e 150 W para expor a camada sacrificial de Al como ilustrado na Figura 44.

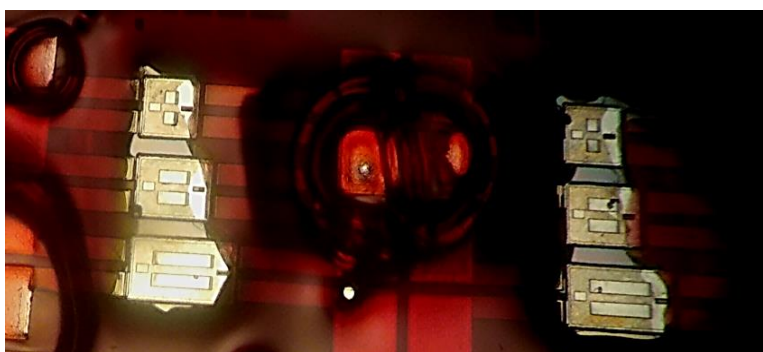


Figura 44- Camada sacrificial de Al, nas aberturas da máscara.

Fonte: Autor.

5.2.2.1 Corrosão da camada de Al sacrificial

Depois da corrosão da camada sacrificial de Al foi feita a secagem supercrítica, o estado final do dispositivo óptico é apresentado na Figura 45.

Observa-se que a camada de passivação acima das trilhas está conservada. No entanto, a região da microlâmpada teve uma sobre-corrosão lateral, por isso foi feita uma nova corrosão diluindo a solução de *Silox Vapox* (2 partes de Silox Vapox e 2,5 partes de água DI).

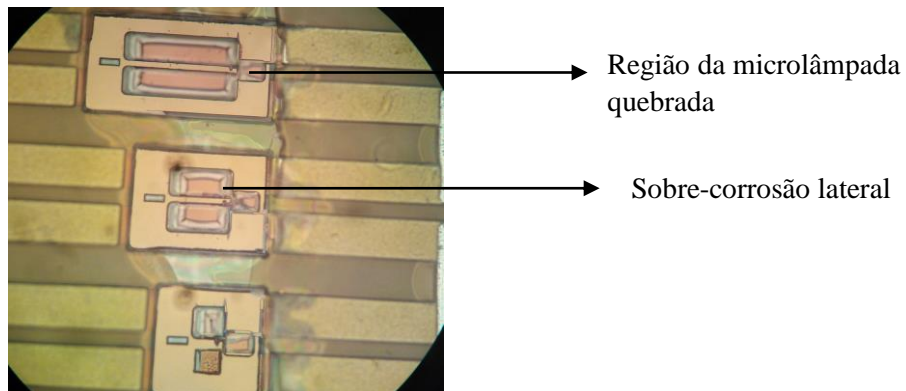


Figura 45-Estado do dispositivo óptico depois da secagem supercrítica.

Fonte: Autor.

5.2.2.2 Corrosão da camada de Al sacrificial

A nova corrosão por *Silox Vapox* foi feita por 20 min até observar uma cor verde na camada de SiO_2 sacrificial. Assim, a espessura restante da camada de SiO_2 e a camada de TiN poderiam ser corroídas fazendo 6 min de RIE.

Observou-se após a corrosão por RIE que alguns dispositivos ainda tinham restos de SiO_2 nas bordas pelo qual foi feito em total 11 min de corrosão RIE. Na Figura 46 é apresentado o estado final do dispositivo, após a corrosão da camada de SiO_2 sacrificial e da corrosão da camada de Al sacrificial.

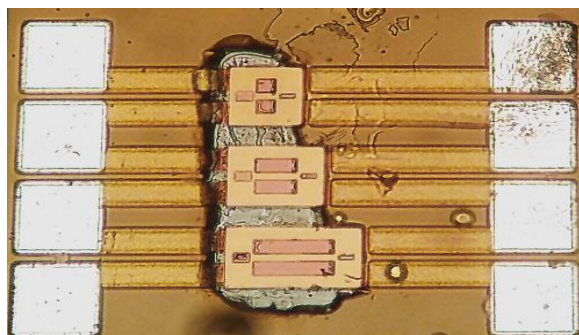


Figura 46-Estado do dispositivo óptico depois da secagem supercrítica.

Fonte: Autor.

Observa-se que o problema de sobre-corrosão nas laterais da microlâmpada foi evitado. A camada de passivação acima das trilhas estava em bom estado, mas as trilhas próximas da região da microlâmpada foram um pouco atacadas por causa da corrosão por RIE.

6. CARACTERIZAÇÃO DO DISPOSITIVO ÓPTICO

6.1 Materiais e métodos

6.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

No microscópio eletrônico de varredura (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007) utiliza-se múltiplos feixes de elétrons para explorar a superfície da amostra. A interação dos feixes com a superfície gera fótons e elétrons que são detectados por coletores que os transformam em sinais elétricos para construir a imagem da superfície. O MEV foi utilizado neste trabalho para confirmar a suspensão da microlâmpada e a formação dos *claddings* do guia de onda. Para fazer os testes MEV depositou-se na superfície do dispositivo óptico uma camada de Au de 100 nm de espessura por *Sputtering*.

O equipamento MEV usado foi o JCM 600 do Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais (LPCM) da FATEC-SP.

6.1.2 Feixe de Íon Focalizado (FIB)

O funcionamento do sistema FIB é semelhante ao MEV. Porém, ele usa um feixe localizado de íons ao invés de feixe de elétrons para a análise da superfície de uma amostra. Um sistema dual FIB, tem, ambos, feixe de íons e elétrons usados alternadamente. Uma das principais características do FIB é a possibilidade de realizar cortes de precisão nanométricas sobre a superfície da amostra controlando para isso a energia e intensidade do feixe de íon. É possível também fazer deposições de material diretamente em uma região da superfície da amostra, sem o uso de máscaras, injetando os gases precursores na região vizinha do feixe de íon. O FIB foi utilizado para confirmar o estado do dispositivo após a etapa de pós-processamento com maior detalhe, para fazer os cortes no dispositivo óptico se depositou platina apenas na superfície da região requerida.

O equipamento DUAL-FIB usado foi o Nova Nanolab 200 do fabricante FEI Company do Centro de Componentes Semicondutores e Nanotecnologias (CCSNano) da Universidade Estadual de Campinas.

6.1.3 Caracterização termoelétrica

Para caracterizar a microlâmpada realizou-se a medida da resistência de seus filamentos com relação à temperatura na faixa de 20-120°C para encontrar o coeficiente lineal TCR dos filamentos. Essa metodologia tem sido usada em outros trabalhos (SINGH, 2015), (ALI et al., 2015) colocando um dispositivo sem pós-processamento sobre uma plataforma aquecedora. Devido ao fato de que o dispositivo ainda não tem estruturas suspensas, elas ficaram quase à mesma temperatura que o substrato. Assim, o dispositivo óptico foi colocado em um mini-hotplate resistivo como mostrado na Figura 47.

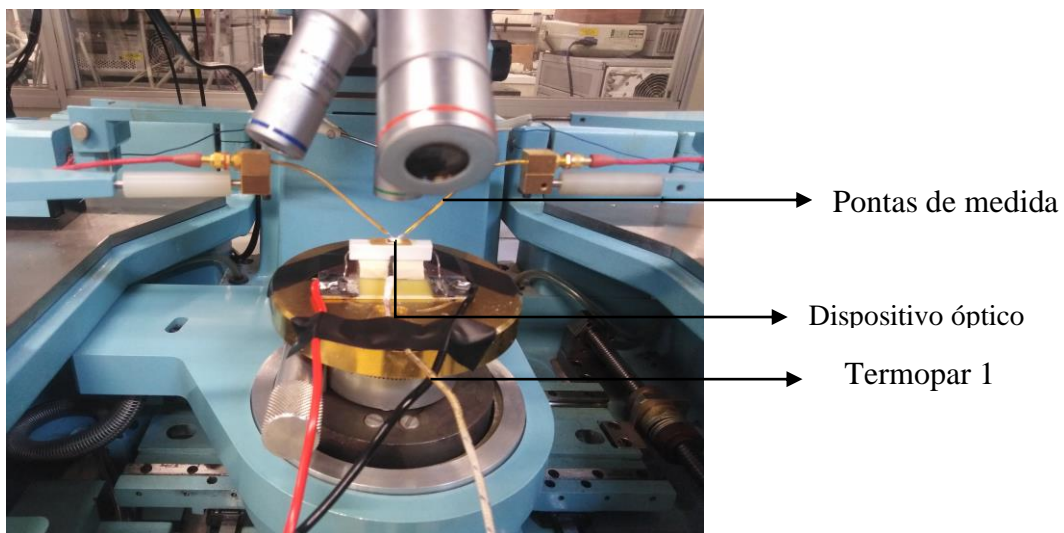


Figura 47-Plataforma de aquecimento mini-hotplate para testes de temperatura no dispositivo óptico.

Fonte: Autor.

A temperatura do mini-hotplate foi acrescentada gradualmente. Aguardou-se 10 min para que ficasse estável e, assim, fazer a leitura de temperatura com um termopar. Com o equipamento analisador de semicondutores HP 4145, realizou-se uma varredura de tensão (V) de +/- 0,15 V na microlâmpada limitando a corrente (I) a +/- 300 μ A para não aquecer os filamentos. A inclinação da curva I-V foi calculada para obter o valor de resistência, com a média de quatro medições para diminuir o ruído.

6.1.4 Caracterização elétrica

A caracterização elétrica do dispositivo foi feita com a estação de provas MPS150 *Cascade Microtech Newport* MPS150 do GNMD da EPUSP mostrada na Figura 48. A estação de provas tem uma plataforma anti-vibratória com um sistema de vácuo para prender o dispositivo nela, pontas tipo agulha para fazer contato com os *pads* do dispositivo, microposicionadores (movimento com resolução de micrômetros) para colocar as pontas na área dos *pads* e um microscópio óptico com resolução máxima de 5 μm .

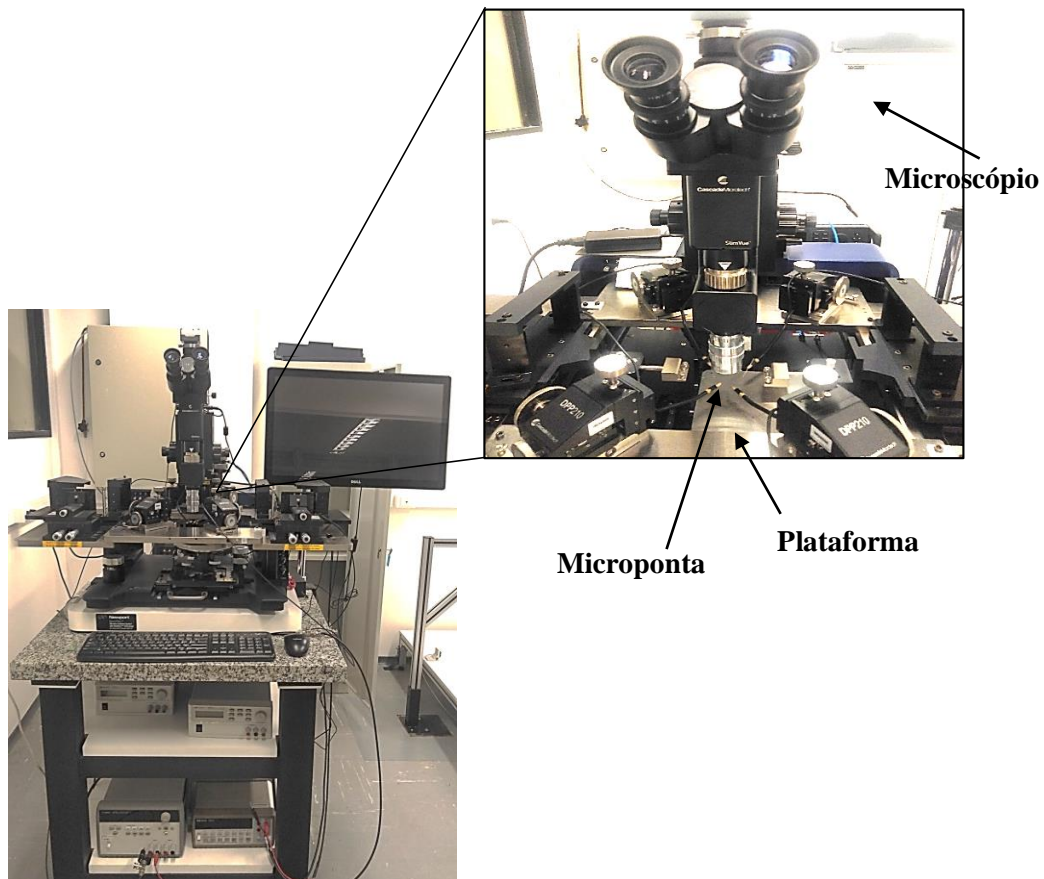


Figura 48-Estação de prova utilizada para a caracterização elétrica do dispositivo óptico.

Fonte: Autor.

A caracterização elétrica do dispositivo óptico foi realizada primeiro, individualmente, na microlâmpada e no fotodiodo para verificar seu funcionamento depois da etapa de pós-processamento e, depois, no conjunto microlâmpada, guia de onda e fotodiodo. Os equipamentos usados para realizar as medições foram: multímetro de bancada HP 34401 e a fonte de tensão Agilent E3649A, controladas por uma interface em LabView.

6.2 Resultados da caracterização MEV do dispositivo

Para observar a suspensão da microlâmpada e do guia de onda, o dispositivo óptico foi colocado em um porta-amostra com inclinação de 45°. A região da microlâmpada e uma ampliação dela em um dispositivo com corrosão RIE são mostradas na Figura 49.

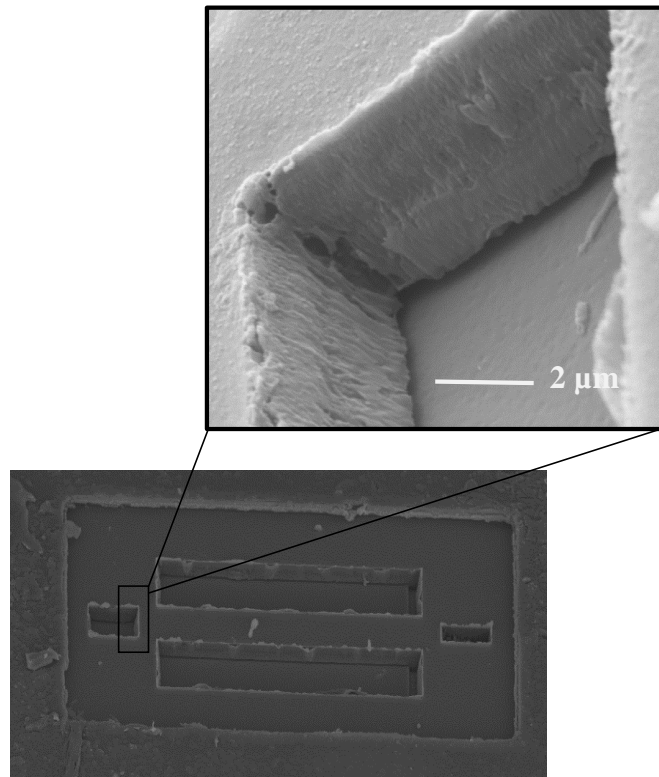


Figura 49-Imagem MEV da região do emissor em um dispositivo com corrosão RIE.

Fonte: Autor.

Observa-se que a região da microlâmpada ficou isolada por uma camada de ar. Uma possibilidade era a de que depois da secagem supercrítica a microlâmpada ficasse grudada na base como mostrado na Figura 50. Não entanto, em um chip com 12 dispositivos ópticos apresentaram esse problema apenas em 3 dispositivos.

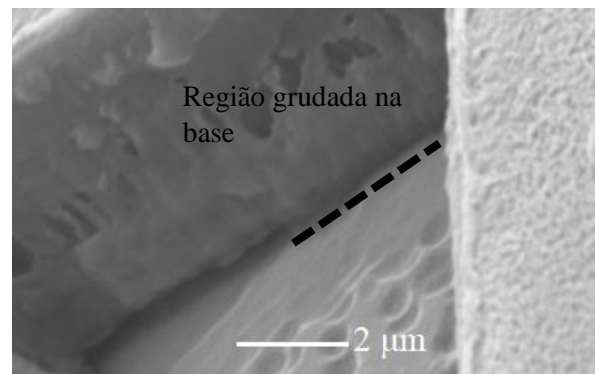


Figura 50-Região da microlâmpada, grudada na base.

Fonte: Autor.

A parede lateral de um guia de ondas de comprimento 100 μm e sua ampliação é mostrado na Figura 51. Observa-se que a espessura da camada de ar tem boa uniformidade e que a parede do guia de onda tem boa verticalidade mesmo depois de 7 h de corrosão podendo se deduzir que a sobre-corrosão com CF₄/Ar é muito baixa.

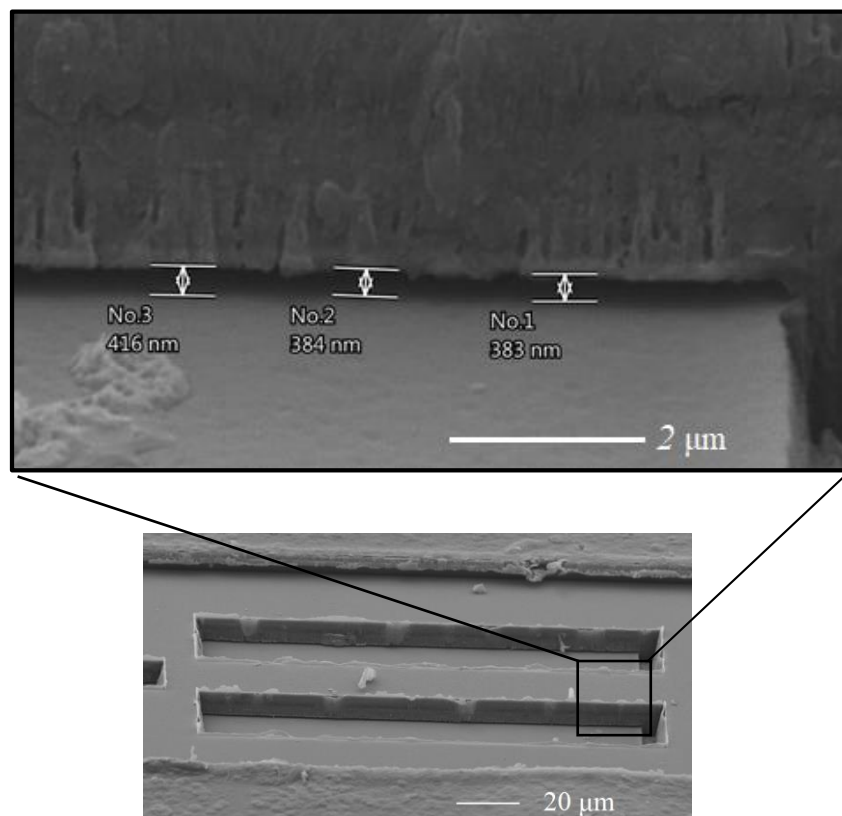


Figura 51-Imagem MEV da região de um guia de ondas do dispositivo óptico.

Fonte: Autor.

6.3 Caracterizações elétricas no dispositivo óptico

6.3.1 Caracterização termoelétrica

Os valores de resistência da microlâmpada com relação à temperatura na faixa de 20-120°C são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4-Resistência da microlâmpada em função da temperatura.

Temperatura (°C)	Resistência (Ω)
22	6.904
29	7.063
37	7.184
49	7.518
56	7.723
71	8.016
85	8.206
100	8.355
129	8.517

Fonte: autor.

Na Figura 52 é ilustrada a curva da resistência da microlâmpada com relação à temperatura.

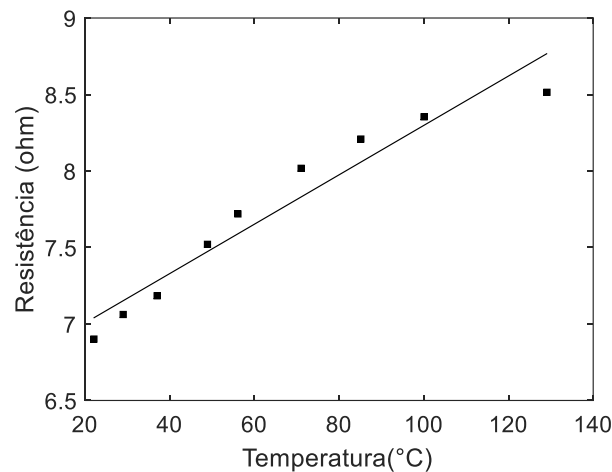


Figura 52-Resistência da microlâmpada em função da temperatura.

Fonte: Autor.

A inclinação da curva foi calculada no intuito de determinar o coeficiente linear de resistência de temperatura (TCR), segundo a Equação (9):

$$\alpha_1 = (1/6,904) \cdot (0,0162) = 2,346 \cdot 10^{-3} \Omega/^{\circ}\text{C}$$

Sendo $R_0 = 6,904 \Omega$

O valor de α_1 é próximo ao valor obtido em outros trabalhos, mas ele é um pouco maior, por exemplo em (ALI et al., 2015). Essa discrepância pode ser devido ao ruído do equipamento de medição.

6.3.2 Caracterização elétrica

6.3.2.1 Microlâmpada

A medida da resistência elétrica nas microlâmpadas foi feita inicialmente nos dispositivos ópticos sem pós-processamento resultando entre 6-10 Ω . Nos dispositivos ópticos com pós-processamento por RIE, a resistência das microlâmpadas ficou em torno de 33-40 Ω que é muito maior ao valor projetado. Assim, após a caracterização do dispositivo óptico realizou-se um teste FIB nos dispositivos com RIE tal como mostrado na Figura 53.

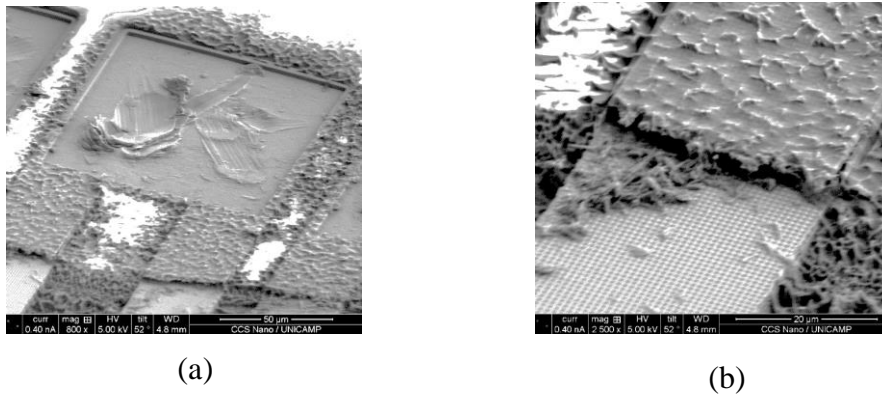


Figura 53-Estado dos *pads* e da camada de passivação das trilhas na medição de resistência da microlâmpada.

Fonte: Autor.

Observa-se na Figura 53(a) que parte do Al do *pad* foi retirado pelas micropontas de Ti o que dificulta o contato elétrico nas medições posteriores. Isso poderia explicar as diferenças entre as medições de resistência nos dispositivos ópticos com pós-processamento e sem pós-processamento. A camada de passivação acima das trilhas foi retirada totalmente em alguns trechos como mostrado na Figura 53(b), isso deixou o dielétrico exposto sendo assim atacado durante a corrosão de SiO₂. Depois, na corrosão do Al sacrificial a solução poderia ter se infiltrado no dielétrico atacado até atingir a camada metálica das trilhas aumentando assim a resistência medida nos *pads*.

Nos dispositivos ópticos com pós-processamento por RIE, a resposta corrente-tensão de 6 microlâmpadas é mostrada na Figura 54. Observa-se que a resposta é linear como esperado em uma resistência, além disso os valores obtidos são muito próximos nas 6 microlâmpadas mostrando reprodutibilidade.

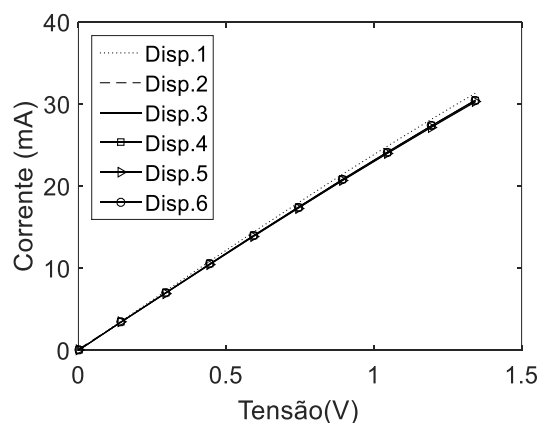


Figura 54- Resposta corrente I-V das microlâmpadas de 6 dispositivo ópticos com pós-processamento RIE.

Fonte: Autor.

Com o objetivo obter as correntes máximas que podem ser atingidas nas microlâmpadas realizou-se uma varredura de tensão de 0-3,5 V em 3 dispositivos ópticos cuja resposta é mostrada na Figura 55. Aqui observa-se que a corrente máxima atingida nas microlâmpadas é na faixa de 47– 48,19 mA e depois cai abaixo de 5 mA.

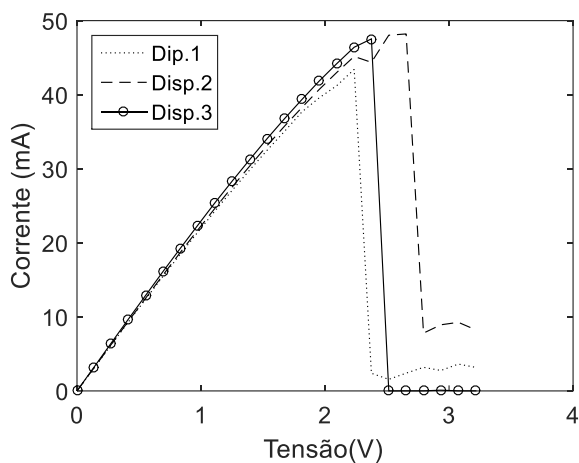


Figura 55-Varredura de tensão de 0-3,5 V nas microlâmpadas de 3 dispositivos ópticos com pós-processamento por RIE.

Fonte: Autor.

Com a finalidade de observar o estado da microlâmpada realizou-se um teste FIB que mostra sua seção transversal na Figura 56. Foi necessário depositar Pt apenas em uma parte da região da microlâmpada tal como ilustrado na Figura 56(a) Isto permitiu fazer o corte transversal ilustrado na Figura 56(b). Na Figura 56(c) é mostrada as espessuras das diferentes camadas da tecnologia CMOS que envolvem a microlâmpada. Observa-se que o filamento e os condutores estão bem conservados, não obstante, o corte mostra apenas a vista lateral da seção transversal podendo ser que o condutor de outro trecho esteja danificado ou quebrado, aumentando assim a resistência da microlâmpada.

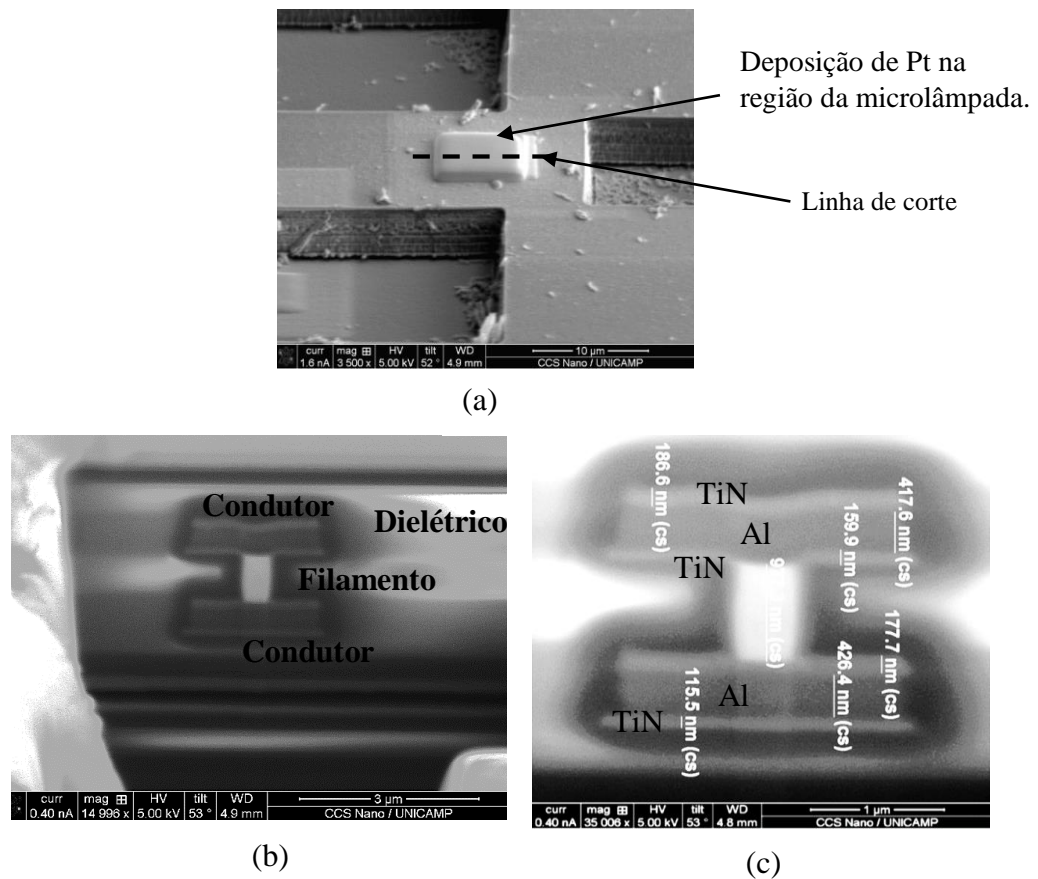


Figura 56-Seção transversal da microlâmpada com FIB.

Fonte: Autor.

A máxima temperatura atingida pelas microlâmpadas se encontrou indiretamente usando o coeficiente linear TCR α_1 ($2,346 \cdot 10^{-3} \Omega/^\circ\text{C}$) considerando $T_0=22^\circ\text{C}$, segundo a Equação (9):

- No dispositivo óptico, Disp. 1 obtivemos:

Resistência inicial (R_0) = $35,20 \Omega$

Resistência final (R_F) = $51,49 \Omega$ ($2,655 \text{ V} / 0,0481 \text{ A}$)

$$2,346 \cdot 10^{-3} = (1/35,20) * (51,49 - 35,20) / (T_{F1} - 22)$$

$$T_{F1} = 219,21^\circ\text{C}$$

- No dispositivo óptico, Disp. 2 obtivemos:

Resistência inicial (R_0) = 38,21 Ω

Resistência final (R_F) = 55,4 Ω (2,235 V / 0,0434 A)

$$2,346 \cdot 10^{-3} = (1/35,20) * (55,4 - 38,21) / (T_{F2} - 22)$$

$$T_{F2} = 230,11^\circ\text{C}$$

- No dispositivo óptico, Disp. 3 obtivemos:

Resistência inicial (R_0) = 36,79 Ω

Resistência final (R_F) = 49,97 Ω (2,374 V / 0,0475 A)

$$2,346 \cdot 10^{-3} = (1/35,20) * (49,97 - 36,79) / (T_{F3} - 22)$$

$$T_{F3} = 181,56^\circ\text{C}$$

A temperatura atingida pelas microlâmpadas encontradas com o coeficiente α_1 é na faixa de 181,56 - 230,11 $^\circ\text{C}$. Esse resultado poderia ser maior considerando-se que parte do calor é gasto nas trilhas da microlâmpada pelo incremento de resistência.

Nos dispositivos ópticos com pós-processamento por *Silox Vapox*, a medida de resistência nas microlâmpadas é na faixa de 100 Ω -110 Ω . Esse valor resultou maior do que nas microlâmpadas com pós-processamento RIE, mesmo mostrando as trilhas bem conservadas. Isso poderia ser devido à corrosão lateral que atacou parte dos condutores da microlâmpada incrementando a resistência.

Uma varredura de tensão de 0-2,8 V foi realizada em 3 dispositivos ópticos com pós-processamento por *Silox Vapox* para obter as correntes máximas atingidas nas microlâmpadas. O resultado é mostrado na Figura 57.

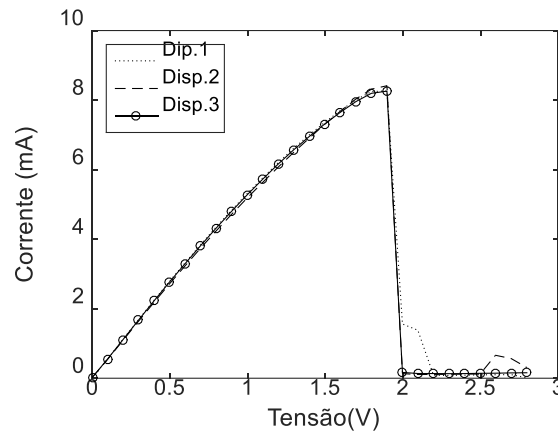


Figura 57- Varrimento de tensão de 0-2,8V nas microlâmpadas de 3 dispositivos ópticos com pós-processamento por Silox Vapox.

Fonte: Autor

Observa-se que a corrente máxima atingida nas 3 microlâmpadas antes de se quebrar é quase 8 mA, mesmo com as trilhas bem conservadas essa corrente é muito menor do que atingida nos dispositivos ópticos com pós-processamento RIE. Isto pode ser devido a que a corrosão lateral na microlâmpada atingiu os condutores incrementando a resistência.

6.3.2.2 Fotodiodo

A caracterização do fotodiodo foi feita usando uma fonte óptica externa, uma lâmpada dicróica de potência regulável de 25W, 50W e 75W posicionada a 4 cm de distância do fotodiodo. Na Figura 58 é ilustrada a resposta de corrente-tensão do fotodiodo excitado com a lâmpada dicróica.

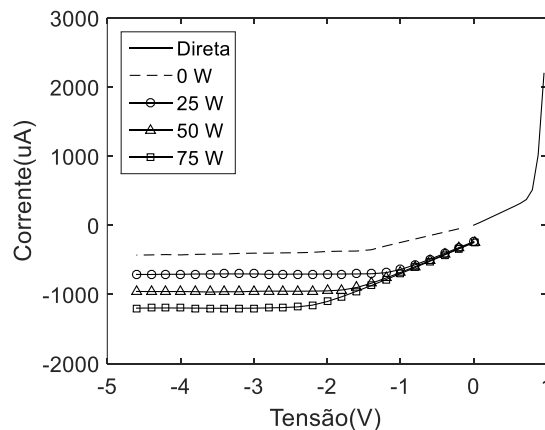


Figura 58-Curva I-V do fotodiodo.

Fonte: Autor

Observa-se que em polarização direta a tensão de limiar do fotodiodo é aproximadamente 0,89 V. Sem injeção de luz (0W) a corrente de escuro (I_S) é aproximadamente $400 \mu A$ e com as potências ópticas de 25, 50 e 100 W o fotodiodo apresenta o comportamento esperado, isto é, um aumento da corrente reversa.

6.3.3 Provas integradas

Considerando que a temperatura atingida nas microlâmpadas é na faixa de $181,56 - 230,11^\circ C$, segundo o modelo do corpo negro dado, a energia irradiada nessas temperatura é na região do meio infravermelho (2500-5000 nm) como mostrado na Figura 59.

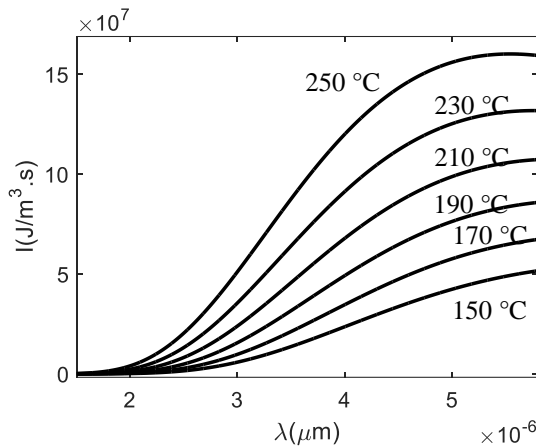


Figura 59- Energia irradiada por um corpo negro em 150-250 °C tem a faixa de comprimento de onda de 0-6 μm .

Fonte: Autor.

Observa-se que na região próxima a $1,1 \mu m$ a energia irradiada é próxima a zero como ilustrado na Figura 60.

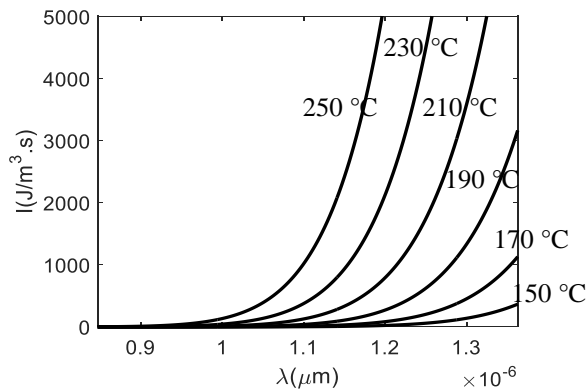


Figura 60- Corpo negro a 150-250 °C irradiando principalmente na faixa de 0,9-1,4 μm de comprimento de onda.

Fonte: Autor.

O guia de onda foi projetado segundo o princípio RIT, mas devido a que a tecnologia CMOS cerca as camadas de Al com camadas de TiN seu comportamento mudou.

Um teste FIB feito para observar a seção transversal do guia de onda é ilustrado na Figura 61. Dado que o núcleo do guia de onda foi feito de SiO_2 que é um isolante, dificultou a visualização com o feixe de íons, por isso, foi realizado o polimento de uma pequena região para melhorar as imagens como ilustrado na Figura 61(a). A seção transversal do guia de onda é ilustrada na Figura 61(b). Observa-se que a espessura da camada de TiN é entre de 400-450 nm que é muito maior que o valor referenciado em (DOS SANTOS, 2017).

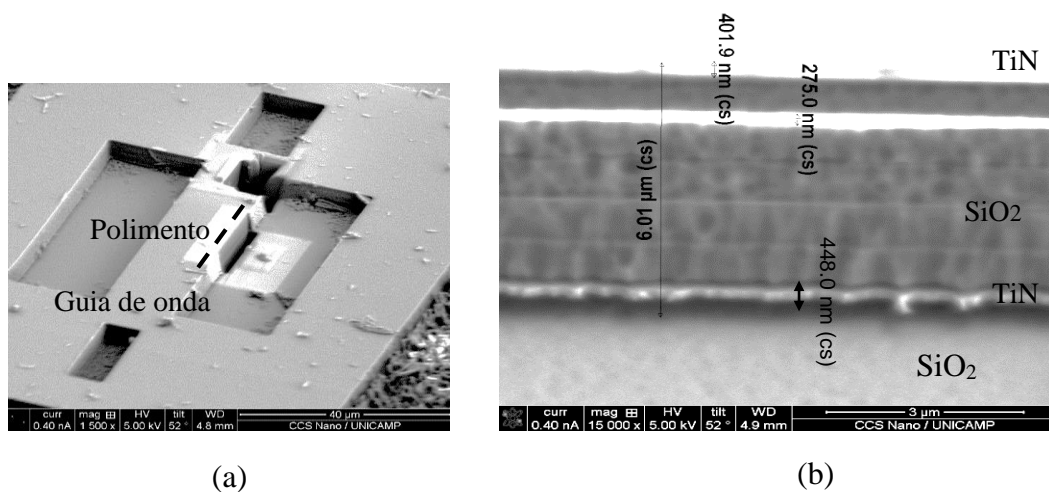


Figura 61-Seção transversal do guia de onda. (a) Região do polimento. (b) Seção transversal do guia de onda.

Fonte: Autor.

Assim, o modelo da microlâmpada-guia de onda incluindo as camadas de TiN é mostrado na Figura 62.

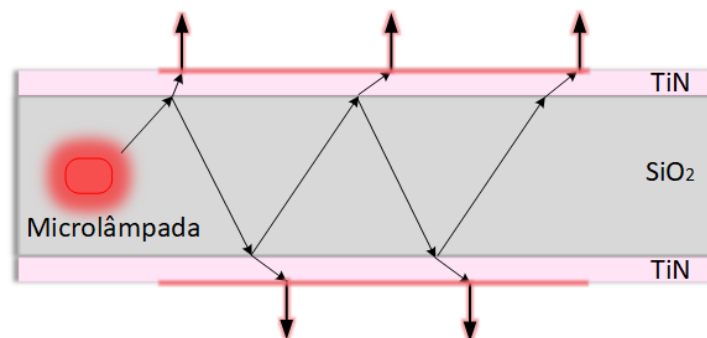


Figura 62-Modelo microlâmpada-guia de onda com as camadas de Ti inclusas.

Fonte: Autor.

Dado que a microlâmpada irradia principalmente na região de 2,5-5 μm , segundo o modelo do corpo negro, o núcleo de SiO_2 (um material transparente¹ no meio infravermelho) do guia de onda foi uma boa escolha. Não entanto, os *claddings* que inicialmente foram planejados em ar, estão compostos pelas camadas de TiN que têm um índice de refração² maior que o SiO_2 nos comprimentos de onda de 2,5-5 μm . Assim, parte da energia que atinge a interface TiN/ SiO_2 será confinada nas camadas de TiN (material absorvente no infravermelho (KAWASAKI et al, 2008)) que agirá principalmente como um emissor.

O fotodiodo de Si acoplado no final do guia de onda pode detectar até os 1100 nm de comprimento de onda. Portanto, não poderá obter medidas usando a microlâmpada como fonte óptica.

¹ <https://www.crystran.co.uk/optical-materials/silica-glass-sio2>. Acessado em: 15 dez. 2019.

² <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=TiN&page=Pflugger>. Acessado em: 15 dez. 2019.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo o estabelecimento de uma etapa de pós-processamento e caracterização de um dispositivo óptico, desenvolvido pelo grupo GNMD, fabricado com a tecnologia CMOS de $0,35 \mu\text{m}$ da *foundry* AMS que integra uma microlâmpada, um guia de onda e um fotodiodo.

- Com os testes MEV feitos nos dispositivos ópticos após a etapa de pós-processamento com o Método-1 (corrosão do SiO_2 sacrificial por RIE e corrosão do Al sacrificial), encontrou-se que a microlâmpada e o guia de onda ficaram isolados de outras estruturas por uma camada de ar de espessura uniforme. Assim, pode-se concluir que o Método-1 atingiu o objetivo de isolamento das estruturas da microlâmpada e do guia de onda na maior parte dos dispositivos, a saber, do total de 12 dispositivos que havia no chip, entre 1 ou 3 dispositivos ficaram colapsados.
- Com os testes FIB feitos nos dispositivos ópticos após a etapa pós-processamento utilizando o Método-1, encontrou-se que toda a camada de passivação acima das trilhas da microlâmpada e do fotodiodo foi danificada utilizando fotorresiste como máscara de corrosão. Portanto, pode se concluir que o Método-1 mesmo atingindo o isolamento das estruturas mencionadas precisa ser otimizado para conservar a camada de passivação, já que isso influenciou nas medidas de resistência da microlâmpada.
- Com os resultados obtidos no dispositivo óptico com o Método-2 de pós-processamento (corrosão do SiO_2 sacrificial por *Silox Vapox* e corrosão do Al sacrificial) encontrou-se que devido à existência das camadas de TiN usadas pela tecnologia CMOS não foi possível o isolamento das estruturas da microlâmpada e do guia de onda já que que deveu ser feita uma corrosão por RIE das camadas de TiN. Assim, pode se concluir que o Método 2 deve incluir sempre uma etapa de corrosão por RIE, além disso deverão ser feitos mais testes para a avaliação da corrosão lateral na microlâmpada.
- Na caracterização elétrica da microlâmpada encontrou-se que o dispositivo óptico após a etapa de pós-processamento suporta correntes de até 48,19 mA. A faixa de temperatura que atinge a microlâmpada calculada com o coeficiente TCR linear dos filamentos está em 180-220 °C. Essa faixa de temperatura segundo o modelo do corpo negro corresponde à região

de 2,5-5 μm do infravermelho. Portanto, pode-se concluir que a microlâmpada poderia ser usada como uma fonte óptica na região do infravermelho meio, para ser usada na região do infravermelho próximo precisará ser projetada com mais filamentos para ter uma resistência maior.

- O guia de onda do dispositivo óptico projetado para ter núcleo de SiO_2 e *claddings* em ar para cumprir o princípio RIT, após a etapa de pós-processamento, tem camadas de TiN acima e abaixo do núcleo. Devido a que o TiN tem um índice de refração maior do que o SiO_2 , não se cumpre com o princípio de RIT no guia de onda. Portanto, pode se concluir que a estrutura do guia de onda não atuará com um guia de onda senão como um emissor na região de 2,5-5 μm devido a que o TiN é um material com bastante absorção nessa faixa.
- O fotodiodo do dispositivo óptico por estar feito de Si, tem funcionamento limitado até os 1100nm de comprimento de onda. Dado que a microlâmpada irradiaria principalmente na faixa de 2,5-5 μm pode se concluir o fotodiodo não poderá ser usado na etapa de detecção do dispositivo óptico

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Uma primeira proposta é a fabricação de um novo dispositivo óptico, fazendo mudanças na microlâmpada e no guia de onda. A proposta para a microlâmpada é usar a camada MET4 como máscara de corrosão para as trilhas já que o Al apresenta baixa taxa de corrosão por RIE com CF_4/Ar ($< 3\text{nm}/\text{min}$).

Outra proposta é incrementar a resistência da microlâmpada para atingir maiores temperaturas e fazer a simulação do seu padrão de radiação, com as medidas de espessura dos materiais que foram conseguidas nos testes FIB.

Precisará ser estudada uma interface intermediária entre os *pads* da microlâmpada e as micropontas do equipamento de caracterização para não danificar o Al neles, como apresentado nos testes FIB.

Devido a que a estrutura do guia de onda não poderá ter essa funcionalidade como ilustrado na Figura 63. A proposta é fazer a simulação da radiação da microlâmpada ao substrato.

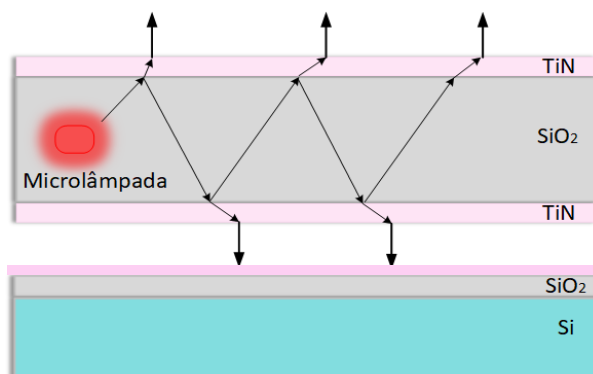


Figura 63-Comportamento do guia de onda.

Fonte: Autor.

Visando a aplicação do dispositivo óptico para aplicações de sensoriamento, outra proposta é realizar a simulação do comportamento da radiação quando uma camada de material para sensoriamento é depositada sobre o guia de onda

REFERÊNCIAS

ALI, S. Z. et al. A Low-Power, Low-Cost Infra-Red Emitter in CMOS Technology. **IEEE Sensors Journal**, Lausanne, v. 15, n. 12, p. 6775–6782, dez. 2015.

0.35 μm CMOS C35 Process Parameters. Austria Micro Systems (AMS). Disponível em <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779572216107/tips%40austriamicrosystems.com>>. Acesso em: 06 set. 2018.

BAETS, R. GF et al. Silicon Photonics: silicon nitride versus silicon-on-insulator. In: OPTICAL FIBER COMMUNICATION CONFERENCE, 2016, Anaheim. **Proceedings...** Anaheim: OSA Publisher, 2016, p.Th3J–1.

BARRITAU, P. et al. Mid-IR source based on a free-standing microhotplate for autonomous CO₂ sensing in indoor applications. **Sensors and Actuators A: Physical**, Iowa, v. 172, n. 2, p. 379–385, dez. 2011.

BILLAH, M. R. et al. Hybrid integration of silicon photonics circuits and InP lasers by photonic wire bonding. **Optica**, v. 5, n. 7, p. 876–883, 2018. Open access. Disponível em:<<https://osapublishing.org/optica/home.cfm>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

BOWERS, J. E. Heterogeneous photonic integration on silicon. In: IEEE PHOTONICS CONFERENCE (IPC), 2016, Waikoloa. **Proceedings...**[S.I.]: IEEE, 2018. p.1–3.

BRIAND, D. et al. Thermal optimization of micro-hotplates that have a silicon island. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v. 12, n. 6, p. 971-978, 2002.

CARMO, J. P. et al. A review of visible-range Fabry-Perot microspectrometers in silicon for the industry. **Optics and Laser Technology**, v. 44, n. 7, p. 2312–2320, 2012.

CHMIELEWSKI, A. M. M. **Análise e Projeto de um Sensor de Imagem 0.35 μm CMOS para compressão de dados no plano focal de câmeras digitais**. 2009. 103f. Dissertação (Mestrado em Ciências)-Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em< <http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2009-1/2009021901-2009021901/file> >. Acesso em: 20 dez. 2017.

COLACE, L.; ASSANTO, G. Germanium on silicon for near-infrared light sensing. **IEEE Photonics Journal**, v. 1, n. 2, p. 69–79, 2009.

DE LUCA, A. et al. In-Situ grown carbon nanotubes for enhanced CO₂ detection in non-dispersive-infra-red system. In: IEEE SENSORS, 2013, Baltimore. **Proceedings...** [S.I.]: IEEE, 2013. p.1–4.

DEDAVID, B.; GOMES, C.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**.

Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/edipucrs/online/microscopia.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2019.

DOERR, Christopher R. Highly integrated monolithic photonic integrated circuits. In: European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), 39., 2013. IET, 2013. p. 1-2.

DOS SANTOS, E. **Simulação, fabricação e caracterização de MEMS para extração de propriedades mecânicas de filmes finos**. 2017. Dissertação de mestrado- Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade de São Paulo.

FRANSSILA, S.; SAINIEMI, L. **Reactive Ion Etching (RIE)**. Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics. Boston: Springer, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-27758-0_1344-5>. Acesso em: 23 ago. 2019.

GIEWONT, Ken et al. 300-mm Monolithic Silicon Photonics Foundry Technology. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 25, n. 5, p. 1–11, 2019.

GORIN, A. et al. Fabrication of silicon nitride waveguides for visible-light using PECVD: a study of the effect of plasma frequency on optical properties. **Optics Express**, v. 16, n. 18, p. 13509–13516, 2008.

GUHA, P. K. et al. Novel design and characterization of SOI CMOS micro-hotplates for high temperature gas sensors. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 127, n. 1, p. 260–266, 2007.

HODGKINSON, J.; TATAM, R. P. Optical gas sensing: a review. **Measurement Science and Technology**, v. 24, n. 1, p. 012004, 2012.

Hong X. **Introduction to semiconductor manufacturing technology**. 2. ed. [S.l.]: SPIE PRESS, 2012.

HUNSPERGER, R. G. Losses in optical waveguides. In:_____. Integrated Optics: Theory and Technology. New York: Springer, 2009. cap. 6. p. 107-128.

INCROPERA F. et al. Radiation: Processes and Properties. In:_____. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 6.ed. New York: Wiley, 2006. cap. 12, p.752-759.

Introduction to Quantum Mechanical Way of Thinking-Material Science Engineering Course. Massachusetts Institute of Technology (MIT). Disponível em https://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-024-electronic-optical-and-magnetic-properties-of-materials-spring-2013/lecture-notes/MIT3_024S13_2012lec4.pdf. Acesso em: 09 dez. 2019.

JAFRI, I. H.; BUSTA, H.; WALSH, S. T. Critical point drying and cleaning for MEMS technology. In: SYMPOSIUM ON MICROMACHINING AND MICROFABRICATION, 1999. **Proceedings...**Santa Clara: SPIE, 1999. p. 51–59.

KASPER, E. Prospects and challenges of silicon/germanium on-chip optoelectronics. **Frontiers of Optoelectronics in China**, v. 3, n. 2, p. 143–152, 2010.

Kawasaki, H. et al. TiO₂/TiN/TiO₂ heat mirrors by laser ablation of single TiN target. **Journal of Physics**, v. 100, n. 1, p. 012038, 2008. Open Access: Disponível em <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/100/1/012038/pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2019.

KONZ, W. et al. Micromachined IR-source with excellent blackbody like behaviour. In: **Microtechnologies for the New Millennium**, 2005. **Proceedings...**Sevilla:SPIE, 2005. p. 540–548.

LI, J. et al. Perspective: Biomedical sensing and imaging with optical fibers—Innovation through convergence of science disciplines. **APL Photonics**, v. 3, n. 10, p. 100902, 2018. Open Access: Disponível em:< <https://aip.scitation.org/browse/> >. Acesso em: 20 abr. 2019.

LIU, A. Y.; BOWERS, J. Photonic Integration With Epitaxial III–V on Silicon. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 24, n. 6, p. 1–12, 2018.

LOCHBAUM, Alexander et al. On-Chip Narrowband Thermal Emitter for Mid-IR Optical Gas Sensing. **ACS Photonics** v. 4, n. 6, p. 1371–1380, 2017.

LÜTZOW, P.; PERGANDE, Daniel; HEIDRICH, Helmut. Integrated optical sensor platform for multiparameter bio-chemical analysis. **Optics express**, v. 19, n. 14, p. 13277-13284, 2011.

MARCATILI, E. A. J. Bends in optical dielectric guides. **Bell System Technical Journal** v. 48, n. 7, p. 2103–2132, 1969.

MASINI, G. et al. High-speed, monolithic CMOS receivers at 1550nm with Ge on Si waveguide photodetectors, 2007. In: **LASER AND ELECTRO-OPTICS SOCIETY ANNUAL MEETING CONFERENCE. Proceedings...** Lake Buena Vista: IEEE, 2007. p. 848-849.

NATHAN, M. et al. Monolithic coupling of a SU8 waveguide to a silicon photodiode. **Journal of Applied Physics** v. 94, n. 12, p. 7932–7934, 2003.

NOVO, M. et al. Fundamentos básicos de emissividade e sua correlação com os materiais refratários, conservação de energia e sustentabilidade. **Cerâmica**, v. 60, n.353, p. 22-33, 2014.

OKAMOTO, K. Wave theory of optical waveguides. In: _____. **Fundamentals of optical waveguides**. 2. ed. [S.I]: Academic press, 2006. cap. 1, p. 1-12.

OSI OPTOELECTRONICS, **Photodiode characteristics and applications**. Disponível em:< <http://www.osioptoelectronics.com/application-notes/AN-Photodiode-Parameters-and-Characteristics.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2019.

ORCUTT, J. S.; RAM, R. J. Photonic Device Layout Within the Foundry CMOS Design Environment. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 22, n. 8, p. 544–546, abr. 2010.

ORCUTT, Jason S. et al. Low loss waveguide integration within a thin-SOI CMOS foundry, 2012. In: **OPTICAL INTERCONNECTS CONFERENCE. Proceedings...**Santa Fé:IEEE, 2012. p. 25-26.

PELLION, D. et al. Single-Photon Avalanche Diodes (SPAD) in CMOS 0.35 μm technology. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 787, p. 380–385, 2015.

RAM, R. J. Photonic-electronic integration with polysilicon photonics in bulk CMOS. In: SILICON PHOTONICS X, 2015, San Francisco. **Proceedings...**[S.I]: SPIE, 2015. p. 93670N.

REHDER, G.; CARRENO, M. N. P.; ALAYO, M. I. Integration of optical waveguides with micro-incandescent light. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 354, n. 19-25, p. 2538-2543, 2008.

SAKUDO, Akikazu et al. Near-infrared spectroscopy: promising diagnostic tool for viral infections. **Biochemical and Biophysical Research Communications** v. 341, n. 2, p. 279–284, 2006.

SINGH, A. **Fabrication of a Micro-hotplate for Application as an Infrared Emitter**. 2015. Tese de Doutorado, Carleton University. Disponível em: < <https://curve.carleton.ca/9047c6e5-6f27-43bb-8736-bc2e5284a6d7>>. Acesso em: 25 jun. 2019.

SMITH, D. Y. et al. Defect and analysis effects in the infrared optical properties of silicon. **Physica Status Solidi (b)**, v. 250, n. 2, p. 271-277, 2013.

SNYMAN, L. W.; DU PLESSIS, M.; AHARONI, H. Injection-avalanche based n+ pn Si CMOS LED's (450 nm-750 nm) with two order increase in light emission intensity- Applications for next generation silicon-based optoelectronics. **Applied Physics**, v. 46, n. 4B, p. 2474-2480, 2007.

SPAKOVSKY, Z.S. Thermodynamics. Disponível em: <<http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/>>. Acesso em: 24 jun. 2019.

STOJANOVIĆ, Vladimir et al. Monolithic silicon-photonics platforms in state-of-the-art CMOS SOI processes. **Optics express** v. 26, n. 10, p. 13106–13121, 2018.

TU, Juliana et al. Micromachined, silicon filament light source for spectrophotometric microsystems. **Applied Optics**, v. 42, n. 13, p. 2388–2397, 2003.

WADE, M. T. et al. Scaling zero-change photonics: An active photonics platform in a 32 nm microelectronics SOI CMOS process. In: CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS (CLEO), 2015, San Jose. **Proceedings...**[S.I]: Optical Society of America, 2015. p.SW4N–1.

WANG, Zhechao et al. A monolithic integration platform for silicon photonics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION PHOTONICS, 2011, Ottawa. **Proceedings...** [S.I]: IEEE, 2011. p. 1-2.

WITKOWSKI, A.; MAJKUT, M.; RULIK, S. Analysis of pipeline transportation systems for carbon dioxide sequestration. **Archives of Thermodynamics**, v. 35, n. 1, p. 117-140, 2014.

XU, K. et al. A Light-emitting-device (LED) with Monolithic Integration on Bulk Silicon in a Standard CMOS technology. In: NANOPHOTONICS, NANO-ELECTRONICS AND NANOSENSOR, 2013, Wuhan. **Proceedings...**[S.I]: Optical Society of America, 2013. p.NSa4B.4.

YUAN, Guangwei et al. Characterization of CMOS compatible waveguide-coupled leaky-mode photodetectors. **IEEE Photonics Technology Letters** v. 18, n. 15, p. 1657–1659, 2006.

ZHANG, Zan et al. Monolithic Integration of Si_3N_4 Microring Filters With Bulk CMOS IC Through Post-Backend Process. **IEEE Photonics Technology Letters** v. 27, n. 14, p. 1543–1546, 2015.

ZHENGXI, Cheng; TOSHIYOSHI, Hiroshi. A design of integrated CMOS-MEMS infrared emitter arrays. **IEICE Electronics Express** v. 13, n. 7, p. 20160009–20160009, 2016.

APÊNDICE A

A.1 Deposição de filmes de SiO₂, Si₃N₄ e Al

A.1.1 Amostras de SiO₂

As amostras de SiO₂ térmico de 1 μm de espessura foram fornecidas pelo Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) da EPUSP. Elas foram crescidas sobre substrato de Si (100) tipo P em um forno de oxidação térmica durante 6 h sob as condições dadas na Tabela 5. A espessura foi medida usando o perfilômetro Tencor Alpha Step 500 do LME.

Tabela 5- Condições de deposição dos filmes de SiO₂.

Gás de arraste	O ₂
Fluxo de arraste	2 l/min
Temperatura da água	96 °C
Temperatura do forno	1150 °C

Fonte: Autor.

A.1.2 Amostras de Si₃N₄

As amostras de Si₃N₄ de 2,1 μm de espessura se obtiveram por deposição em substrato de Si (100) tipo P pela técnica PECVD (*Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition*). Esta usa o plasma gerado pela excitação de um gás ou mistura de gases por um campo elétrico alternado de radiofrequência (RF) que quebra suas moléculas gerando uma nuvem de íons dentro de uma câmara, a qual é preparada antes de fazer a deposição usando bombas de alto vácuo para remover as partículas indesejadas para depois preenche-la de forma controlada com os gases reagentes. No LME, o equipamento RIE tem eletrodos internos acoplados capacitivamente e o porta-substrato é colocado acima deles para evitar a contaminação do filme por partículas desprendidas da câmara ou dos próprios eletrodos. Parte do produto dessas reações é depositado sobre o substrato aquecido ou sobre outras espécies já depositadas no substrato que conformam o filme crescido como ilustrado na Figura 64.

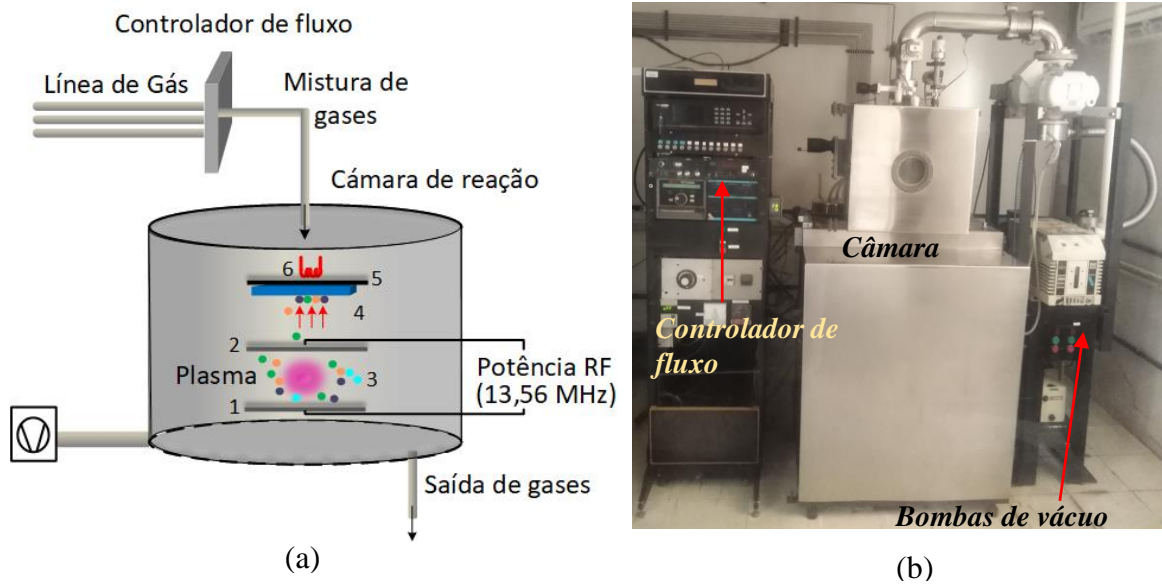


Figura 64-Deposição por PECVD. (a) Esquema de funcionamento. (b) Equipamento PECVD.

Fonte: Autor.

A deposição de Si_3N_4 no substrato de Si se realizou com a mistura gasosa de Nitrogênio (N_2) e Silana (SiH_4) sob as condições apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6-Condições de deposição dos filmes de Si_3N_4 por PECVD.

	N_2	SiH_4
Fluxo (sccm)	75	30
Pressão (mTorr)	29	32
Pressão da câmara (mTorr) ³	$7,8 \times 10^{-5}$	
Potência RF (W)	200	
Temperatura de deposição (°C)	320	

Fonte: Autor.

A.1.3 Amostras de Al

As amostras de Al se obtiveram por deposição sobre substrato de Si (100) tipo P pela técnica PVD (*Physical Vapor Deposition*) no interior de uma câmara de alto vácuo (Pressão = 10^{-4} Torr).

³ Pressão base da câmara antes de ser injetada a mistura de gases

Fitas de Al em estado sólido são colocadas em um cadinho, utilizando um filamento de tungstênio para aquecer o Al utilizando correntes acima de 300 A até ele passar à fase vapor transportando-se até o substrato e condensando-se para formar um filme fino. O equipamento usado para o processo PVD pertence ao LME e é mostrado na Figura 65.

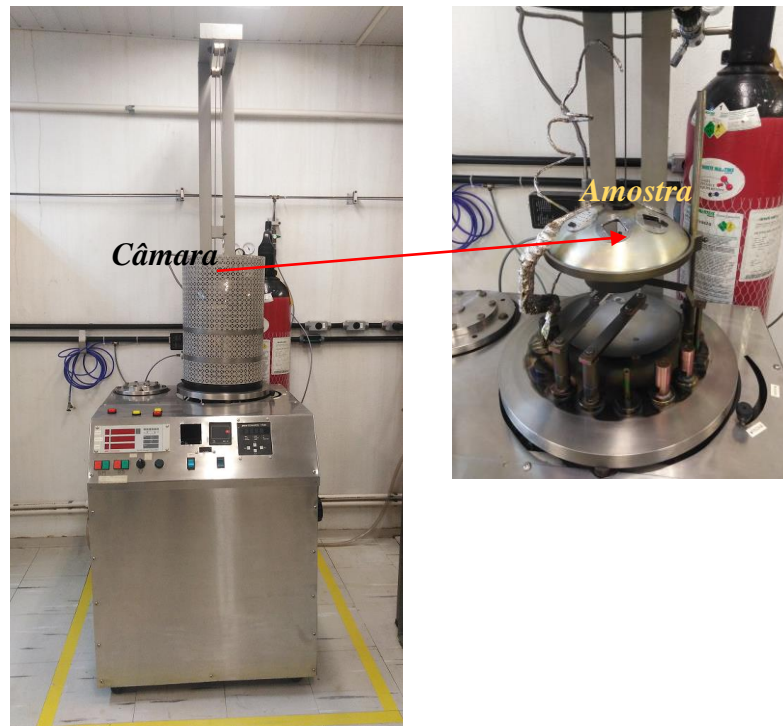


Figura 65-Deposição por PVD com o equipamento de evaporação.

Fonte: Autor.

ANEXO A- PUBLICAÇÕES

- GAMERO, Vanessa J. et al. Design and post-process of an integrated CMOS-MEMS IR emitter with an embedded detector. 2018, [S.l.]: IEEE, 2018. p.1–5.