

THIAGO COSTA DE PAIVA

ESTUDO DA VIABILIDADE DE CONFECÇÃO
DE MICROLÂMPADAS INCANDESCENTES
EMBUTIDAS EM GUIAS DE ONDA

São Paulo
2011

THIAGO COSTA DE PAIVA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE CONFECÇÃO
DE MICROLÂMPADAS INCANDESCENTES
EMBUTIDAS EM GUIAS DE ONDA**

**Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Graduação em
Engenharia**

Área de Concentração: Engenharia Elétrica
com ênfase em Sistemas Eletrônicos

Orientador: Prof Dr. Marco Isaías Alayo
Chávez

São Paulo
2011

*Aos meus queridos pais, Beatriz e Feliciano,
e irmãos, Aline e Matheus.*

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Marco Isaías Alayo Chávez pela valiosa orientação e apoio.

Ao Dr. Gustavo Rehder pela motivação e pelas proveitosa discussões sobre o trabalho.

Aos colegas do Grupo de Novos Materiais e Dispositivos (GNMD) pelo companheirismo.

Aos técnicos da Sala Limpa do Laboratório de Microeletrônica (LME).

Ao Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) pelas fotografias realizadas no microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo.

A todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

Neste documento encontra-se o registro detalhado de um trabalho com grande ênfase em pesquisa sobre a viabilidade da confecção de microlâmpadas incandescentes embutidas em guias de onda. Tem-se por objetivo a contribuição para o avanço da óptica integrada monoliticamente fazendo uso de tecnologias bem estabelecidos em processos em microeletrônica. Este projeto atua no sentido de minimizar a necessidade de alinhamento entre componentes discretos, uma das etapas mais custosas da tecnologia atual, uma vez que o acoplamento já é estabelecido por construção. Além disso, explora a dificuldade reconhecida de se produzir luz em direções paralelas a superfície. Aproveita-se também o fato de que o processo de incandescência emite radiação em um amplo espectro, a despeito de seu baixo rendimento. Apesar de ao final desse estudo ainda não ser possível comprovar a viabilidade da confecção dessas microlâmpadas, existem muitos indícios que levam acreditar nisso e, principalmente, muitas melhorias foram sugeridas ao processo.

Palavras-chave: Microlâmpada. Incandescência. Óptica Integrada. Microfabricação. Guias de Onda.

Abstract

This document is a detailed registry of working with a great emphasis in research into the viability of making incandescent microlâmpadas embedded in waveguides. It has been aimed at contributing to the advancement of monolithically integrated optical technologies using well-established processes in microelectronics. This project seeks to minimize the need for alignment between discrete components, one of the most costly steps of current technology, since the coupling is already established by construction. In addition, explores the recognized difficulty of producing light in directions parallel to the surface. It takes advantage also the fact that the process of filament emits radiation in a broad spectrum, despite its low yield. Although the end of this study is not yet possible to prove the viability of making these microlâmpadas, there are many indications pointing to believe it and, especially, many improvements have been suggested to the process.

Keywords: Microlamp. Waveguides. Incandescence. Integrated Optics. Microfabrication.

Lista de Figuras

1.1	Espectro de emissão do corpo negro para algumas temperaturas.	3
1.2	Raios de luz incidindo em vários ângulos na parede interna da guia de onda	4
2.1	Diagrama do equipamento de PECVD	7
2.2	Diagrama do equipamento de Sputtering	8
2.3	Fotos do processo de revelação da máscara de cobre. À esquerda tem-se o início do processo e à direita o fim, passando pela imagem central.	12
2.4	Vista superior e em perspectiva do substrato	15
2.5	Vista superior e em perspectiva da amostra com revestimento inferior	15
2.6	Vista superior e em perspectiva da amostra metalizada com cromo	16
2.7	Vista superior e em perspectiva da barreira de proteção	16
2.8	Detalhe dos formatos das cavidade e barreiras de proteção	16
2.9	Vista superior e em perspectiva da camada de nitreto de silício	17
2.10	Vistas panorâmica e aproximada da camada de Si_3N_4	18
2.11	Vista superior e em perspectiva da amostra metalizada	18
2.12	Vista superior e em perspectiva da amostra escrita com o padrão de M1	18
2.13	Fotos do mascaramento da amostra para definição do núcleo das guias de onda	19
2.14	Vista superior e em perspectiva da amostra após definição do núcleo	20
2.15	Vista superior e em perspectiva da amostra sem a máscara M1	21
2.16	Vista superior e em perspectiva da amostra metalizada com cromo	21
2.17	Vista superior e em perspectiva da amostra após transferência do padrão de M2	22
2.18	Vista superior e em perspectiva da amostra após corrosão por RIE da cavidade do filamento.	22
2.19	Abertura de cavidade para filamento sem tratamento em ácido nítrico à esquerda e com, à direita.	23
2.20	Vista superior e em perspectiva da amostra com cavidade do filamento pronta.	24
2.21	Vista superior e em perspectiva da amostra após metalização para parte elétrica.	24
2.22	Vista superior e em perspectiva da amostra com contatos e filamento definidos.	25

Lista de Figuras

2.23 Algumas fotos dos circuitos elétricos dos dispositivos	25
2.24 Vista superior e em perspectiva do modelo com revestimento superior	26
2.25 Vista superior e em perspectiva do modelo metalizado com cobre	27
2.26 Vista superior e em perspectiva do modelo com as áreas a serem atacadas na corrosão já desprotegidas	27
2.27 Vista superior e em perspectiva do modelo já com sustrato e contatos expostos.	27
2.28 Corrosão por RIE. Ambas as amostras foram submetidas, sendo que as duas imagens da esquerda são de amostras que foram tratadas com ácido nítrico. Já as duas da direita, não.	29
2.29 Vista superior da etapa de isolamento térmico dos filamentos do dispositivo. A imagem da direita é a mesma que a da esquerda porém sem as camadas superiores para evidenciar as marcas da corrosão no substrato.	30
2.30 Imagens do filme de cobre se descolando ao ser colocado na solução de KOH	30
2.31 Fotos da evolução da corrosão por KOH para isolamento térmico dos filamentos	31
2.32 Fotos do aspecto final da corrosão por KOH para isolamento térmico dos filamentos. À esquerda, tem-se uma estrutura que não foi totalmente liberada. À direita, uma estrutura que foi totalmente liberada e sofre distorções por causa das tensões dos filmes, que podem ser inferidas por causa dos pontos escuros na fotografia.	31
2.33 Fotos do aspecto final da corrosão por KOH para isolamento térmico por liberação das estruturas apenas nas áreas dos filamentos. À esquerda, tem-se o fílamento perpendicular ao lado do triângulo condutor da corrosão e, à direita, o fílamento foi projetado paralelo ao referido lado.	32
2.34 Imagens de pedaços de filmes transparentes que se soltaram da amostra durante a corrosão em KOH	32
2.35 Numeração para referência dos dispositivos à esquerda e microlâmpadas ativas ao final dos processos com fílamento de 0,5 μm (centro) e 0,8 μm (direita) de espessura.	33
2.36 Aparato com micropontas-de-prova para caracterização das microlâmpadas	34
2.37 Pedaço de revestimento superior ainda sobre a amostra	37
2.38 Filmes curvos por causa de tensão.	38
2.39 Ênfase na espessura insuficiente do fílamento	39
3.1 Fílamentos invalidados ao fornecerem caminhos para a corrente elétrica sem alternância de planos, seja por erro de alinhamento nos casos da esquerda e centro, seja por projeto, caso da direita.	41

Lista de Figuras

A.1 Máscara para definição de barreiras de proteção a abertura da cavidade de filamento.	47
A.2 Máscara para definição dos núcleos das guias de onda.	48
A.3 Máscara para abertura da cavidade onde serão inseridos os filamentos.	49
A.4 Máscara para definição dos circuitos elétricos	50
A.5 Máscara para abertura dos contatos e exposição do substrato para corrosão por KOH	51

Lista de Tabelas

2.1	Configurações para oxidação térmica do substrato de silício	7
2.2	Deposição de Si ₃ N ₄ por PECVD	8
2.3	Deposição de SiO ₂ por PECVD	8
2.4	Deposição de Cromo e Cobre por Sputtering	9
2.5	Configurações utilizadas na corrosão iônica reativa	10
2.6	Configurações utilizadas na corrosão por KOH	11
2.7	Configurações ótimas obtidas para tratamento em HNO ₃	11
2.8	Etapas	14
2.9	Acompanhamento da corrosão para definição do núcleo sem imersão em solução de HNO ₃	20
2.10	Acompanhamento da corrosão para definição do núcleo com imersão em solução de HNO ₃	20
2.11	Acompanhamento da corrosão para da cavidade onde será inserido o filamento. Profundidade da corrosão por RIE após 90 minutos.	23
2.12	Acompanhamento da corrosão para exposição de contatos e do substrato com tratamento de imersão em solução de HNO ₃	28
2.13	Resistência dos filamentos das microlâmpadas ativas ao final do processo com filamentos de 0,5 μm de espessura	35
2.14	Resistência dos filamentos das microlâmpadas ativas ao final do processo com filamentos de 0,8 μm de espessura	36
B.1	Etapas	53

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	2
1.2	Embasamento teórico	2
	Emissão do corpo negro	2
	Guias de onda	3
2	Desenvolvimento	5
2.1	Materiais e Métodos	5
	Oxidação Térmica	6
	Deposição química em fase vapor assistida por plasma	7
	Deposição por pulverização catódica	7
	Fotolitografia	9
	Corrosões	9
	Corrosão iônica reativa	10
	Corrosão por Hidróxido de Potássio	10
	Procedimentos complementares	11
	Rápida imersão em ácido nítrico	11
	Máscaras de cobre	11
	Microscopia com amostras submersas em água destilada para evitar tempo de secagem	12
2.2	Confecção dos Dispositivos	12
	Detalhamento das etapas	13
	Preparação do Substrato	13
	Revestimento inferior	14
	Barreira de proteção	15
	Núcleos das guias de onda	17
	Confecção de contatos elétricos e filamento da microlâmpada	21

SUMÁRIO

Revestimento superior	25
Exposição de contatos e substrato	26
Isolamento térmico dos filamentos	28
2.3 Caracterização dos dispositivos	33
Polarização dos dispositivos	33
Processo com filamentos com 0,5 μm de espessura	34
Processo com filamentos com 0,8 μm de espessura	35
Microscopia Eletrônica de Varredura	35
3 Conclusão	40
Referências Bibliográficas	44
A Máscaras utilizadas no processo	46
B Etapas sugeridas por Alexandre Gollub	52

Capítulo 1

Introdução

A revolução da microeletrônica aconteceu quando da integração entre seus componentes possibilitadas pelo silício. Este elemento possui características apropriadas e é de grande abundância no mundo, o que tornou seu processamento viável em grande escala.

Supunha-se que outros materiais, com melhores características elétricas, fossem substituí-lo. Mas a verdade é que o alcance dos processamentos em microeletrônica está cada vez maior, adentrando inclusive na área óptica. Atualmente, muitos desses componentes vem sendo fabricados com esta tecnologia, levando a revolução também ao mundo da óptica, embora ela ainda esteja restrita a miniaturização dos elementos, que ainda precisam ser acoplados de forma híbrida, processo esse restritivo por seu alto custo.

Além disso, as fontes de luz atuais são baseadas em elementos diferentes do silício devido ao *gap* indireto de sua banda de valência que impossibilita a produção de radiação no espectro visível. Isso também prejudica a integração monolítica entre eletrônica e fotônica uma vez que não poderiam ter o mesmo substrato. Assim, neste trabalho, a proposta é a utilização da incandescência para a produção de luz que, embora tenha baixo rendimento, tem amplo espectro eletromagnético.

Microlâmpadas baseadas nestas ideias tem sido produzidas ao redor do mundo, mas ainda não são aproveitáveis para sistemas ópticos pois não se possui controle sobre a direção da radiação emitida. E isto remete diretamente ao objetivo deste projeto que é o estudo da confecção desses dispositivos já acoplados a guias de onda por construção. Vale esclarecer que guias de onda são uma versão planar das fibras-ópticas, isto é, fabricadas por processos de microeletrônica, e permitem que a luz seja conduzida.

Em 2008, o Laboratório de Microeletrônica (LME) foi pioneiro em produzir microlâmpadas dentro de guias de onda, mas a emissão ainda era perpendicular ao substrato e, apesar de o microdispositivo poder ser atuado termicamente, ainda não era suficiente para

inserção da luz em um ângulo que favorecesse a condução pelo guia de onda. Em 2010, novos dispositivos foram fabricados baseados em micropontas, porém em termos de acoplamento ainda não foi suficiente. Então, a motivação deste trabalho é a aplicação do conhecimento até aqui acumulado na direção de tornar viável o desenvolvimento de um novo dispositivo óptico para emissão de luz com foco na integração monolítica.

1.1 Objetivo

Este trabalho visa estudar a viabilidade da confecção de microlâmpadas incandescentes embutidas em guias de onda a partir de uma estrutura vertical, isto é, superando a limitação imposta pelas tecnologias planares dos processos em microeletrônica e permitindo assim a emissão de luz paralelamente a superfície do substrato.

Assim, foi colocada em prática uma proposta de fabricação anteriormente pensada mas que não chegou a ser realizada. Pôde-se então identificar passagens críticas no processo, propor possíveis soluções e melhorias a fim de se chegar mais próximo de um dispositivo que tenha funcionamento pleno dentro dessas expectativas.

1.2 Embasamento teórico

Aqui fundamenta-se teoricamente os dois conceitos que fazem possível o funcionamento de cada uma das partes do dispositivo. Primeiro tem-se o princípio da radiação que se pode explicar pela emissão do corpo negro. Depois precisa-se explicar um pouco sobre como a luz é conduzida nos guias de onda.

Emissão do corpo negro

A emissão do corpo negro também é conhecida como radiação térmica, ou seja, um processo espontâneo de distribuição da entropia em que a energia térmica de um corpo é transformada em energia eletromagnética. Esta teoria é assim chamada pois assume que toda a energia, em qualquer comprimento de onda, é absorvida. Mais que isso, essa teoria também diz que a emissão e a absorção da energia em um certo comprimento de onda é igual.

Na verdade, um corpo negro é uma idealização, não existe de fato, mas existem materiais que se aproximam em 95% deste comportamento como o grafite. Esses materiais são chamados de corpos cinzas e se relacionam com o corpo negro pelo coeficiente de

emissividade. Assim, toda matéria emite radiação eletromagnética quando acima do zero absoluto (0 K). Na figura 1.1, tem-se como exemplo a distribuição do espectro da emissão do corpo negro em relação aos comprimentos de onda para algumas temperaturas. Pode-se perceber que:

- o espectro é contínuo
- quanto maior a temperatura, maior é a emissão
- a banda de emissão é larga, ou seja, frequências outras são emitidas além da de pico.

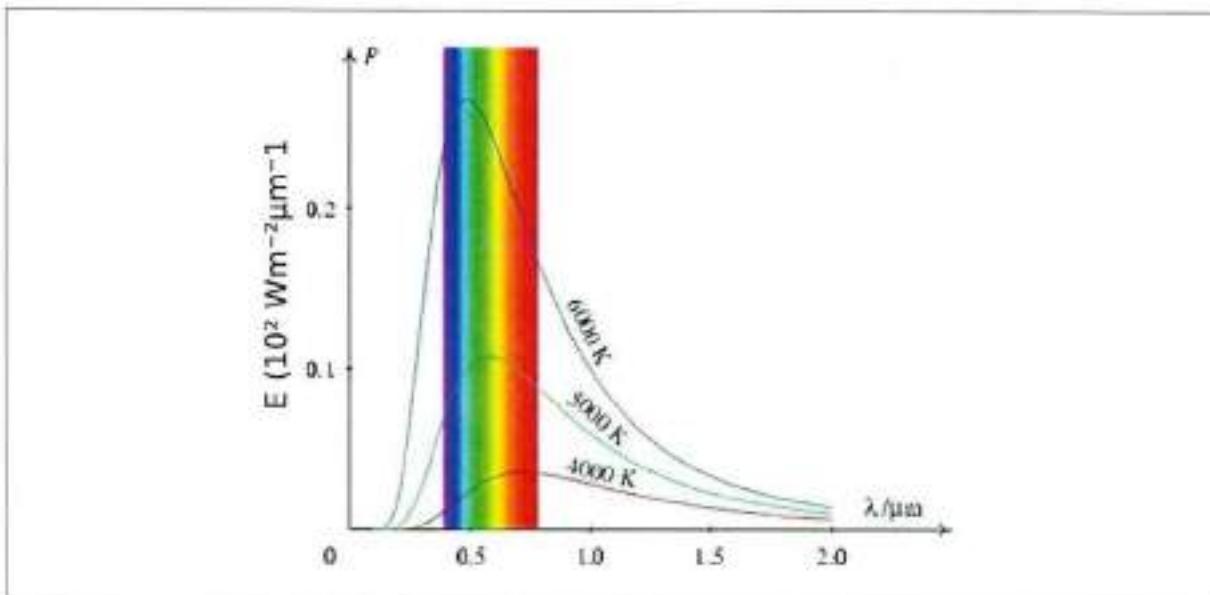


Figura 1.1: Espectro de emissão do corpo negro para algumas temperaturas.

Guias de onda

As guias de onda são estruturas que têm a capacidade de conduzir ondas eletromagnéticas, assim como a luz. Neste trabalho, elas são implementadas por meio de processos em microeletrônica e usam o princípio da reflexão total, ou seja, podem ainda ser explicadas pelo princípio da óptica geométrica.

De acordo com a Lei de Snell, representada pela equação (1.1), pode-se relacionar os ângulos em que o raio de luz atinge a superfície e os índices de refração de cada

meio. Como o meio em que a luz deve se propagar tem $\eta_1 \approx 1.9$ e as camadas de revestimento tem $\eta_2 \approx 1.5$, para fazer com que haja a reflexão total, o ângulo de refração tem de ser máximo, ou seja, 90° , o que afirma que qualquer raio com inclinação maior que 52° permanecerá dentro do guia de onda. Na figura 1.2 podem ser vistas as três situações. À esquerda tem-se um raio que incide na superfície e a atravessa; no meio o raio sai tangente a superfície, caso crítico estudado, e por último, à direita, a luz sendo integralmente refletida.

$$\eta_1 \sin \theta_1 = \eta_2 \sin \theta_2 \Rightarrow \theta_1 = \frac{1.5 \sin(90)}{1.9} = 52 \quad (1.1)$$

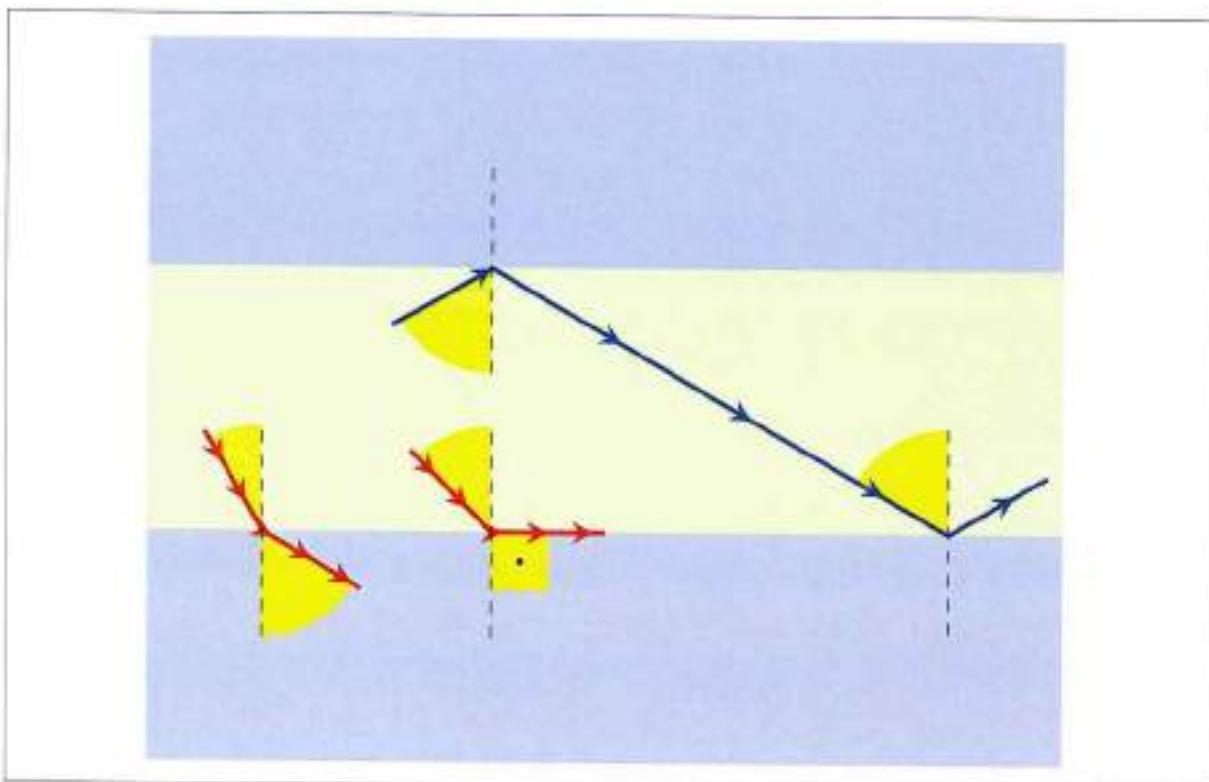


Figura 1.2: Raios de luz incidindo em vários ângulos na parede interna da guia de onda

Capítulo 2

Desenvolvimento

Neste capítulo é onde acontece a passagem da teoria a prática e nele são descritos e discutidos os procedimentos utilizados em cada um dos passos necessários para se caminhar em direção ao dispositivo finalizado.

Na seção 2.1 são descritos, dos processos em microeletrônica, aqueles utilizados neste trabalho, incluindo aí os equipamentos, materiais e configurações necessários.

Já na seção 2.2, a ênfase é dada na ordem em que os procedimentos são realizados, fator este de maior importância. E de acordo com o detalhamento das etapas, também são apresentados os resultados obtidos, problemas e soluções encontradas. É uma parte do texto que contém muitas imagens, tentando trazer uma representação fiel da realidade ao leitor.

E por fim, a seção 2.3 mostra os artifícios utilizados pelo autor na busca de informações que fornecessem respostas, justificativas e confirmações quanto às suposições e análises realizadas.

2.1 Materiais e Métodos

Filme Fino é uma tecnologia que se utiliza da sobreposição de camadas muito finas, com espessuras menores que 5 μm e tem capacidade de trabalhar com dimensões geométricas extremamente reduzidas, que podem chegar até mesmo a poucos nanômetros. Suas possibilidades são tão grandes que seu alcance ultrapassou a eletrônica e atualmente é possível aproveitar a sinergia entre os diversos mundos tecnológicos como a fabricação de microdispositivos que em um mesmo substrato apresentam características mecânicas, elétricas e ópticas.

É fato que quanto maior a precisão exigida em um processo, maior é a infraestrutura e mais específicos são os materiais e equipamentos necessários. Esta análise começa antes mesmo dos processos de fabricação de um microdispositivo em si, pois o substrato utilizado precisa ser extremamente livre de imperfeições, pois qualquer defeito pode interferir tanto no comportamento do microdispositivo quanto nos processos utilizados. Materiais comumente utilizados com este fim são silício e vidro.

Basicamente, a confecção de cada um dos níveis passa pelas seguintes etapas: deposição de material estrutural sobre todo a superfície do substrato, deposição de um material protetor, definição do material de proteção deixando-o apenas nas áreas de interesse, remoção de material estrutural desprotegido, remoção do material de proteção e remoção de eventuais resíduos. Este processo é realizado repetidamente, nível a nível, até que a camada mais superficial seja implementada.

Para a confecção de cada um dos níveis, pode-se recorrer a algumas técnicas, todas requerentes de seus próprios equipamentos. Neste trabalho é utilizada a oxidação térmica do silício, deposição assistida por plasma, deposição por pulverização catódica, fotolitografia, corrosões úmidas e corrosões assistidas por plasma.

É válido ressaltar que, devido a extrema miniaturização destes processos, todas as etapas precisam ser executadas em ambientes extremamente isentos de partículas, o que deu origem às salas limpas. Outra observação é que materiais de proteção são aqueles que apresentam seletividade em relação ao material de interesse quando expostos a determinadas condições. Logicamente, devem existir maneiras que possam remover o material de proteção após sua utilização.

Oxidação Térmica

A oxidação térmica do silício, também conhecida como crescimento térmico, é uma técnica para produção de camada amorfa de SiO_2 de alta qualidade sobre o substrato de silício a partir da aceleração do processo natural de oxidação que acontece ao entrar em contato com espécies oxidantes. Este processo é amplamente utilizado e tem seu comportamento modelado pela equação matemática (2.1), em que x representa a espessura do óxido, t representa o tempo de oxidação e A , B e τ são constantes que dependem de temperatura, fluxo de gases, pressão ambiente e orientação cristalográfica da superfície do substrato. Neste trabalho, as condições usadas estão enunciadas na tabela 2.1.

$$x^2 + Ax = B(t + \tau) \quad (2.1)$$

Tabela 2.1: Configurações para produção de filme a partir da oxidação térmica controlada do substrato de silício.

Característica	Valor
Espessura	2 μm
Temperatura	1150 °C
Período ambiente	8h
	fluxo de 2000 sccm de N ₂

Deposição química em fase vapor assistida por plasma

A deposição química em fase vapor assistida por plasma, mais conhecida por PECVD (do inglês *plasma-enhanced chemical vapor deposition*), é a reação química de componentes em estado gasoso e que resultam no produto sólido que formará o filme depositado. Este processo conta com a ajuda de um campo de rádio-frequência de alta intensidade que provoca a ionização dos gases e permite que a temperatura ambiente se mantenha relativamente baixa, entre 300°C e 350°C, o que é um diferencial já que possibilita a utilização de materiais mais sensíveis a essa grandeza. Outros pontos positivos são boa uniformidade de espessura, alta pureza e boa adesão ao substrato. Na figura 2.1 tem-se um diagrama que representa o funcionamento do equipamento utilizado durante a implementação deste projeto. Nas tabelas 2.2 e 2.3 encontram-se as configurações utilizadas para deposição de filmes de Si₃N₄ e SiO₂, respectivamente.

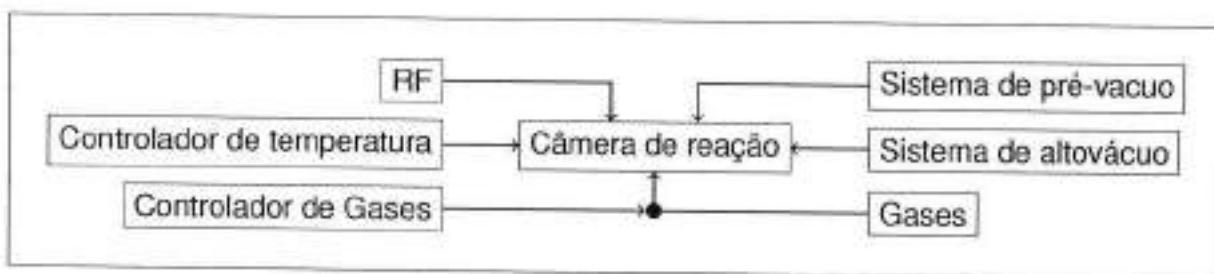


Figura 2.1: Diagrama do equipamento de PECVD

Deposição por pulverização catódica

A deposição por pulverização catódica, conhecida como *sputtering*, se dá pelo deposição de material de interesse após a ejeção, resultante do bombardeamento de um alvo por partículas de alta energia, em uma amostra posicionada no lado oposto. No caso deste trabalho, essas partículas são íons de Argônio obtidos novamente após choques com elétrons

Tabela 2.2: Deposição de Si_3N_4 por PECVD

Característica	Valor
Espessura	2 μm
Temperatura	320 °C
Período	200 min
Ambiente	30 sccm de SiH_4 75 sccm de N_2
Pressão	32 mTorr
Potência	500 mw/cm ²

Tabela 2.3: Deposição de SiO_2 por PECVD

Característica	Valor
Espessura	2 μm
Temperatura	320 °C
Período	150 min
Ambiente	30 sccm de SiH_4 75 sccm de N_2O
Pressão	32 mTorr
Potência	500 mw/cm ²

provenientes da aplicação de campo elétrico em rádio-freqüência. Esta técnica permite a deposição de uma grande variedade de materiais além do Cromo e do Cobre utilizados nesse trabalho, incluindo Alumínio, Platina, Ouro, Titânio, Tungstênio, entre outros. Na figura 2.2 tem-se um diagrama representativo do equipamento disponível no GNMD e na tabela 2.4 encontram-se as configurações utilizadas para deposição de Cromo e Cobre, que doravante serão chamadas de metalizações.

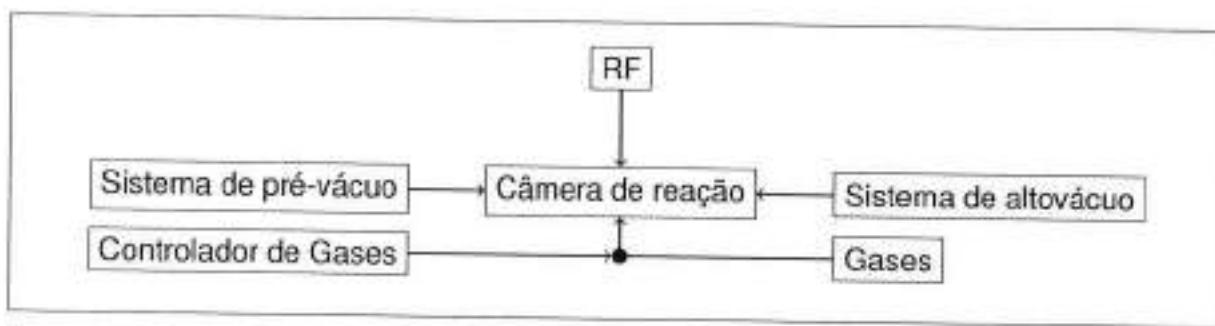


Figura 2.2: Diagrama do equipamento de Sputtering

Tabela 2.4: Deposição de Cromo e Cobre por Sputtering

Característica	Valor
Espessura	0.3 μm
Período	15 min
Ambiente	10 sccm de Ar
Pressão	2 mTorr
Potência	70 mw/cm ²

Fotolitografia

Fotolitografia é o mecanismo de transferência de um molde de referência, chamado de máscara, para uma superfície. Essa técnica é essencial quando se trata de processos em microeletrônica pois possibilita a modelagem dos filmes de acordo com as necessidades do projeto, uma vez que as dimensões em questão são estremamente reduzidas. Obviamente isso envolve também procedimentos críticos de alinhamento.

Para continuar esta descrição é necessário antes explicar a resina fotorresistiva também conhecida como fotorresiste. Esse material é constituído por monômeros que são polimerizados ao serem expostos a uma certa temperatura e despolimerizados quando expostos a radiação ultravioleta. Aqui é necessário ainda acrescentar a existência de outra substância chamada de revelador, capaz de dissolver o fotorresiste enquanto ele não estiver polimerizado.

Assim, retomando o processo fotolitográfico, o fotorresiste é aplicado sobre a amostra e levado a uma estufa provocando a polimerização dele. Depois, o padrão a ser transferido é colocado em um anteparo entre a fonte ultravioleta e a superfície da amostra, de modo que a radiação só atinge a amostra onde foi possível atravessar a máscara.

Nessa situação, a amostra é colocada em contato com o revelador e apenas as regiões despolimerizadas são removidas. O próximo passo então é utilizar alguma solução que possa atacar as áreas desprotegidas da camada sob o fotorresiste, transferindo enfim o padrão.

As máscaras utilizadas nesse trabalho foram desenvolvidas por Alexandre Gollub e podem ser visualizadas no anexo A.

Corrosões

Corrosões são procedimentos utilizados para transferir os padrões escritos na camada de fotorresiste aos filmes. Para que sejam aplicadas, uma série de parâmetros precisam ser

avaliados como angulação das paredes laterais produzidas, seletividade entre os materiais, distância entre as estruturas, tolerância à corrosão lateral, entre outros. Vale esclarecer que seletividade é a diferença entre as taxas de corrosão dos materiais envolvidos.

Corrosão iônica reativa

A corrosão iônica reativa, conhecida como RIE do Inglês *reactive ionic etch*, vem da utilização de uma descarga elétrica em um gás relativamente inerte para produzir espécies reativas que ao reagirem quimicamente com o material a ser removido resultarão em um produto volátil. Dessa forma, por usar o bombardeio de íons perpendiculares à superfície do filme, essa técnica produz escavações praticamente verticais e alinhadas com a máscara de fotoresistente. Isto é, tem-se uma corrosão altamente anisotrópica e a taxa de corrosão lateral neste caso é efetivamente zero. As configurações utilizadas neste procedimento podem ser conferidas na tabela 2.5.

Tabela 2.5: Configurações utilizadas na corrosão iônica reativa

Característica	Valor
Ambiente	40 sccm de CHF_3 40 sccm de O_2
Pressão	100 mTorr
Potência	100 w

Corrosão por Hidróxido de Potássio

Quando se tratam de microestruturas, muitas vezes a verticalidade das paredes pode não ser uma restrição, o que possibilita que as corrosões úmidas também possam ser utilizadas, que é o caso da corrosão por Hidróxido de Potássio ou, simplesmente, KOH. Na realidade, a corrosão lateral provocada por esta técnica é desejada neste trabalho para que se possa fazer com que regiões das estruturas fiquem suspensas, isto é, não estejam em contato com o substrato. Em condições ideais de processamento, a corrosão do silício monocristalino por KOH resulta em superfícies com alta uniformidade e de dimensões precisas, isso porque tem forte influência da orientação cristalográfica do reticulado. Os parâmetros desse procedimento se encontram na tabela 2.6.

Tabela 2.6: Configurações utilizadas na corrosão por KOH

Característica	Valor
Temperatura	80°C
Concentração	28,7%
Taxa de corrosão	430 nm/h

Procedimentos complementares

Durante análise da proposta de projeto feita por Alexandre Gollub, percebeu-se que algumas etapas ofereceriam algum tipo de dificuldade e procurou-se desde o início encontrar maneiras de se poder contornar estes obstáculos. Além disso, observando-se o trabalho de Gustavo Rehder com cobre percebeu-se a possibilidade de se desenvolver um tratamento em ácido nítrico para eliminar resíduos da etapa de corrosão por plasma.

Rápida imersão em ácido nítrico

Percebeu-se que a imersão em ácido nítrico eliminava resíduos indesejáveis advindos da etapa de corrosão por RIE, aumentando a confiabilidade do processo e melhorando o aspecto do filme atacado.

Máscaras de cobre

A utilização de máscaras de cobre nos processos de corrosão por RIE não eram possíveis pois gerava muito resíduo, o que interferia no processo. Porém, com a descoberta do tratamento por ácido nítrico existia a possibilidade de se utilizar este processo. Primeiramente foram feitos testes que comprovaram que a máscara de cobre resistia a corrosão por RIE. Depois, estudou-se a relação entre o tratamento em ácido nítrico e a taxa de corrosão da camada de cobre. O resultado otimizado pode ser conferido na tabela 2.7. Além disso, como a máscara de cobre seria a última e teria de ser removida com uma substância que não retirasse o cromo também, fez-se o teste de Cromo com FeCl_3 e o resultado foi negativo.

Tabela 2.7: Configurações ótimas obtidas para tratamento em HNO_3

Descrição	Valor
Solução	$\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
concentração	1:10
taxa de corrosão	5 nm/s

Outras informações necessárias neste procedimento. A revelação da máscara de cobre pode ser feita com a mesma substância utilizada quando a máscara é de Cromo, porém de forma diluída (1:3); sendo que uma máscara de cobre com aproximadamente $0,7 \mu\text{m}$ de espessura é revelada em aproximadamente 1 minuto. Fotos dessa etapa do processo podem ser conferidas na figura 2.3.

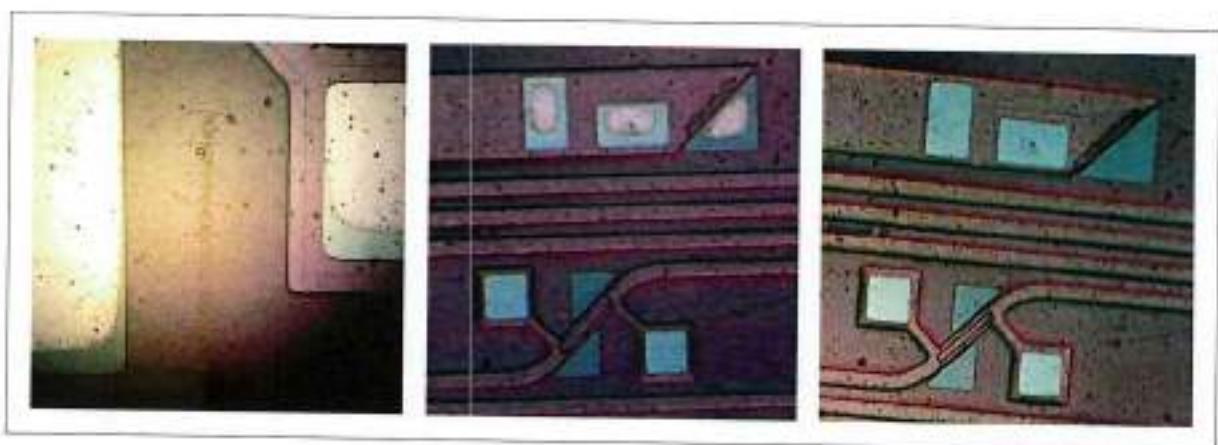


Figura 2.3: Fotos do processo de revelação da máscara de cobre. À esquerda tem-se o início do processo e à direita o fim, passando pela imagem central.

Microscopia com amostras submersas em água destilada para evitar tempo de secagem

Por último, seria necessário acompanhar o processo de corrosão do substrato por KOH na última etapa, mas o procedimento de retirar a amostra da corrosão, limpá-la para anular a corrosão, esperar secar e só depois fazer as medidas, era extenso e agressivo. Dessa forma um novo método para que as fotos fossem feitas foi desenvolvido e consiste na observação das amostras por microscópio ainda imersas em água, isto é, colocou-se água destilada dentro de onde se guardava a amostra e entre uma corrosão e outra as amostras ficavam dentro da água, isso inclusive eliminou a interferência causada pela água por estar sobre o substrato enquanto que o restante já estava seco.

2.2 Confecção dos Dispositivos

De posse das informações anteriores, que detalharam cada um dos elementos de um processo, é hora de usá-las na confecção de um dispositivo. A ordem em que as etapas

acontecem é extremamente relevante e, dessa forma, a tabela 2.8 dá um panorama geral de todo o processo. Esta sequência foi fortemente baseada no processo desenvolvido por Alexandre Gollub que pode ser visto no anexo B. As diferenças são:

- confecção da proteção para finalização da corrosão de abertura das cavidades de inserção dos filamentos passa a ser obrigatória para aproveitar ao máximo a extensão vertical do degrau e, consequentemente, a geração de luz dentro da guia de onda.
- etapas de corrosão por RIE para abertura de contatos e exposição do substrato passa a ser realizada com máscara de cobre, que permite uma proteção perene, ao invés de diretamente com fotoresiste. Vale dizer que a máscara de cobre é um resultado deste trabalho.

Primeiro se prepara o substrato, então obtém-se o revestimento inferior por crescimento de óxido térmico. Em seguida deposita-se uma camada de Si_3N_4 e a molda para confecção do núcleo da guia de onda. Depois confecciona-se os contatos e filamentos, que são cobertos por mais uma camada de SiO_2 depositado por PECVD, tanto para proteção do filamento quanto para condução da luz no guia de onda. Por fim, são expostos os contatos e feito o isolamento térmico das microlâmpadas.

Detalhamento das etapas

Agora que o processo completo está claro, é hora de estudar as etapas em conjuntos que terão funções específicas, conforme já foi indicado na tabela 2.8. Todas estas etapas serão aplicadas em uma mesma lâmina, que contém 50 dispositivos, isto é, a sequência de passos é a mesma para todos os 50 dispositivos existentes em cada lâmina. Claro está que a diferença entre eles se dá na geometria planar.

Preparação do Substrato

Num primeiro momento, precisa-se obter lâminas de silício em um tamanho específico, previamente decidido e que esteja de acordo com as etapas subsequentes do processo, principalmente as que utilizam as máscaras. Neste caso, a etapa 1 resultou em lâminas quadradas com lados de 1 polegada. E como as amostras precisam estar livres de quaisquer contaminantes, aproveitou-se para realizar uma limpeza mais pesada, chamada de inicial, em que não se precisa preocupar com outros tipos de materiais ali presentes, apenas silício monocristalino deve restar. Assim, chega-se a figura 2.4, que será a base para as próximas etapas.

Tabela 2.8: Todas as etapas de fabricação do dispositivo

Etapa	Descrição	Função
1	corte em quadrados de 1 polegada de lado	preparação do substrato
2	limpeza do tipo RCA	
3	oxidação térmica	revestimento inferior
4	deposição de Cr	barreira de proteção
5	fotolitografia com máscara M0	
6	remoção do fotorresiste	
7	deposição de Si_3N_4	núcleo da guia de onda
8	deposição de Cr	
9	fotolitografia com máscara M1	
10	corrosão por plasma	
11	remoção do fotorresiste e do cromo	
12	deposição de Cr	inserção do filamento
13	fotolitografia com máscara M2	
14	corrosão por plasma	
15	remoção do fotorresiste e do cromo	
16	deposição de Cr	
17	fotolitografia com máscara M3	
18	remoção do fotorresiste	
19	deposição de SiO_2	revestimento superior
20	deposição de Cu	exposição de contatos e de substrato
21	fotolitografia com máscara M4	
22	corrosão por plasma	
23	remoção de Cu	isolamento térmico do filamento
24	corrosão por KOH	
25	limpeza	

Revestimento inferior

O revestimento inferior da guia de onda é obtido a partir da oxidação térmica do substrato, conforme tabela 2.1, gerando assim um filme de SiO_2 com ótima qualidade. A representação desta etapa pode ser encontrada na figura 2.5.

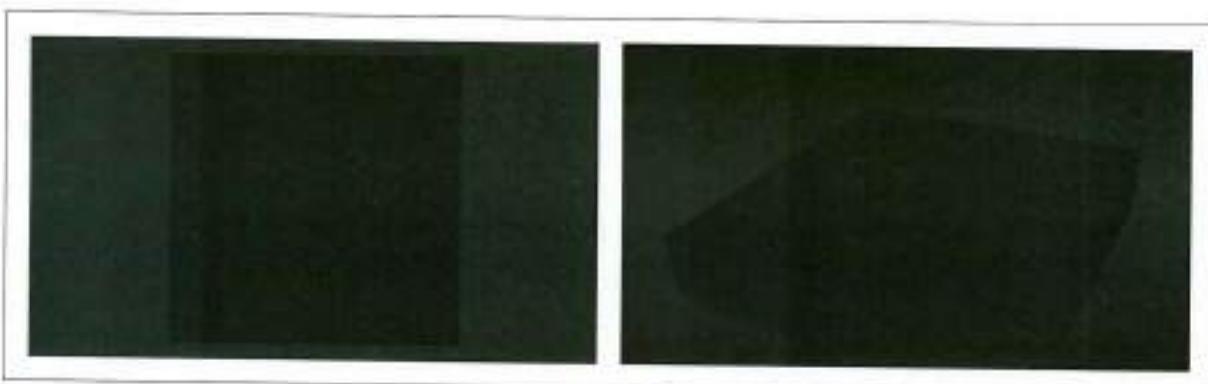


Figura 2.4: Vista superior e em perspectiva do substrato

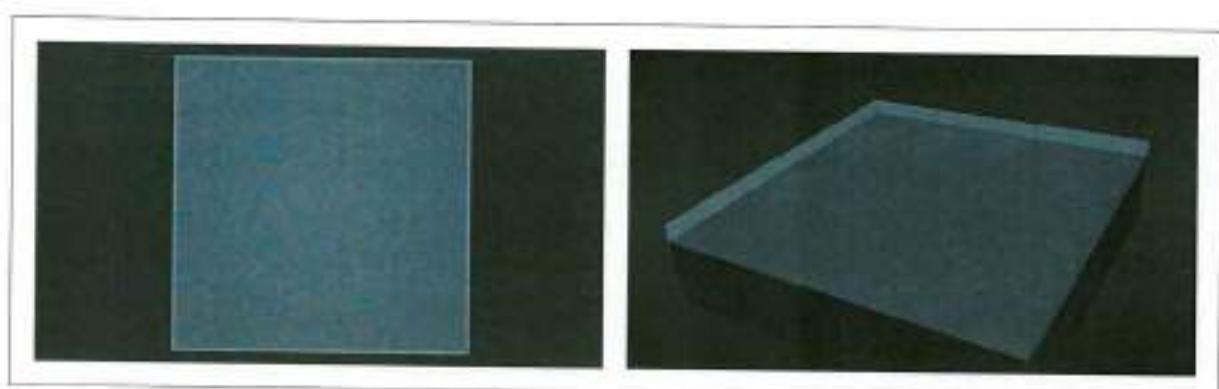


Figura 2.5: Vista superior e em perspectiva da amostra com revestimento inferior

Barreira de proteção

Sobre o revestimento inferior, é confeccionada uma barreira de proteção que limitará uma corrosão posterior. Para tanto, primeiramente, faz-se a metalização da amostra com cromo, conforme a figura 2.6. Comparando-as com a imagem da etapa anterior, pode-se perceber que o filme de SiO_2 que era translúcido passa a estar opaco porque coberto.

A seguir, faz-se a litografia da máscara M0 dando forma à barreira de proteção, o que terá como resultado a figura 2.7. Vale ressaltar que novamente é possível enxergar a translucidez do filme de SiO_2 onde a camada de cromo foi removida.

Modelo: barreira de proteção

Analizando mais detalhadamente a máscara M0, podemos perceber que são várias os formatos da barreira de proteção, conforme mostrado na figura 2.8, variando entre grandes e pequenos, retos e curvos, simétricos ou não. Vale enfatizar que essas formas são as

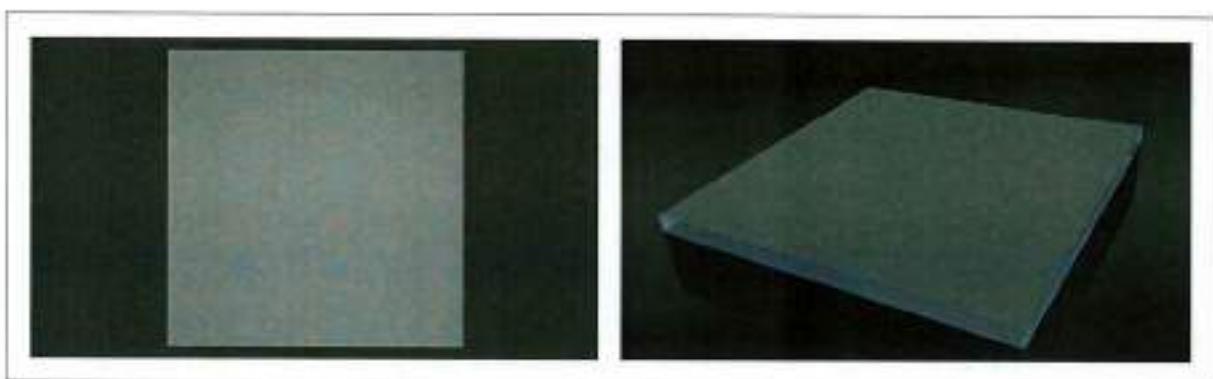


Figura 2.6: Vista superior e em perspectiva da amostra metalizada com cromo

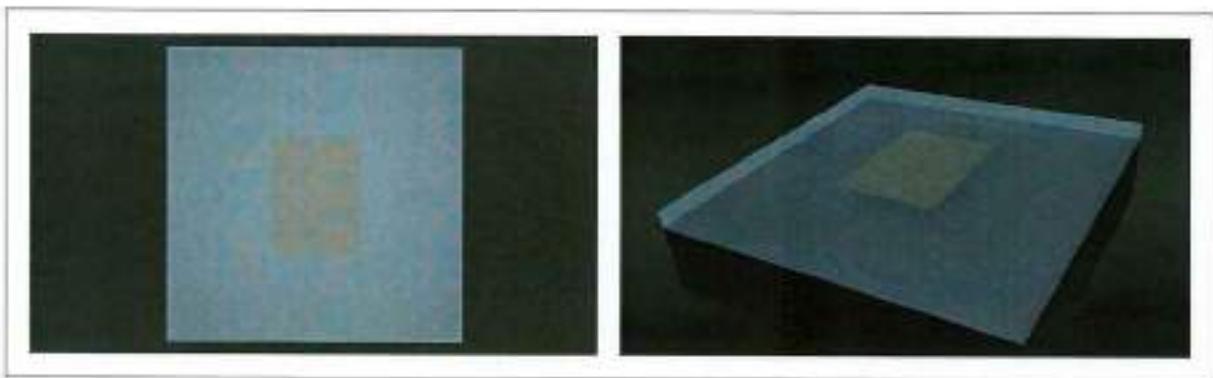


Figura 2.7: Vista superior e em perspectiva da barreira de proteção

mesmas usadas para as cavidades onde serão inseridos os filamentos das microlâmpadas. Isso será tratado mais adiante.

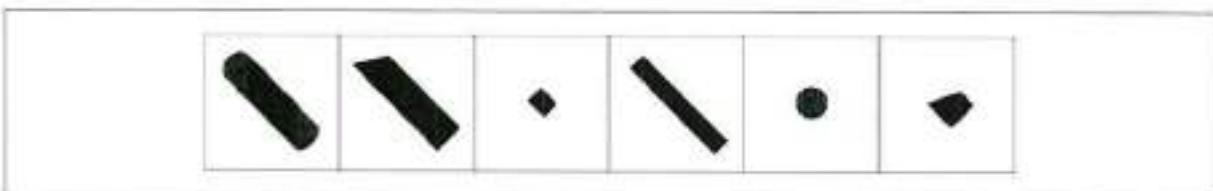


Figura 2.8: Detalhe dos formatos das cavidade e barreiras de proteção

Núcleos das guias de onda

Para preparar os núcleos das guias de onda são necessários alguns passos. Primeiramente, fez-se a deposição de Si_3N_4 por PECVD seguindo a configuração chamada de 75:0 já discutida no capítulo de Materiais e Métodos. Um modelo para o resultado dessa etapa pode ser observado na figura 2.9.

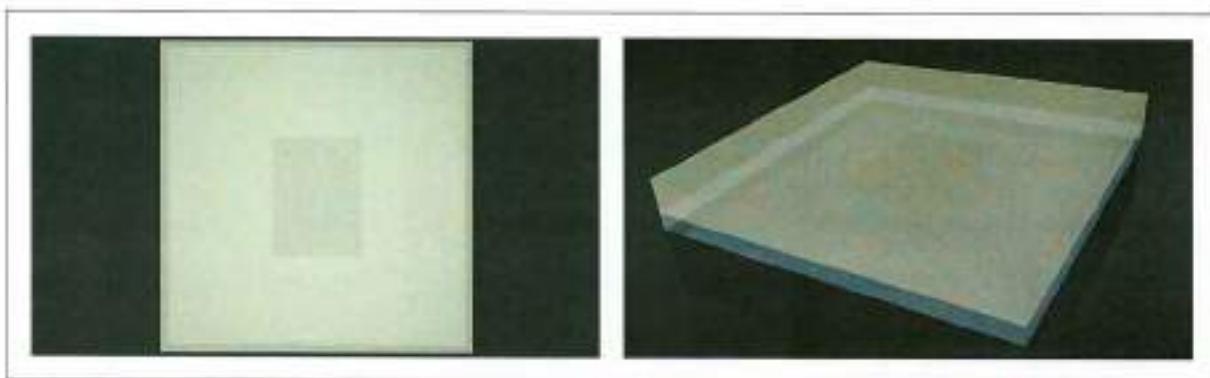


Figura 2.9: Vista superior e em perspectiva da camada de nitreto de silício

Na figura 2.10, podem ser vistas fotografias feitas para se ter uma ideia da qualidade do processo até o momento. Deparou-se então com muitos pontos escuros espalhados pelo filme, o que indicavam uma provável formação de pó durante a deposição e que foi comprovado posteriormente pois, ao se medir a espessura do filme de Si_3N_4 , a expectativa era de se obter uma camada com aproximadamente $2 \mu\text{m}$ de espessura, porém o valor obtido foi de $3,2 \mu\text{m}$, isto é, o filme resultante era altamente poroso. Apesar disso, como o foco do projeto era o estudo das microlâmpadas e não as guias de onda em si, continuou-se o processo sem maiores preocupações.

Depois disso, depositou-se uma camada de cromo sobre a camada de nitreto de silício a fim de se poder transferir o padrão da máscara M1 por fotolitografia para a definição dos núcleos das guias de onda. Ou seja, na figura 2.11 encontra-se a amostra metalizada e na figura 2.12, a representação dos padrões já transferidos.

Na figura 2.13 pode-se ver fotos da amostra já com a máscara M1. Nelas, encontram-se imagens mais afastadas de modo a possibilitar a visão das disposições relativas entre

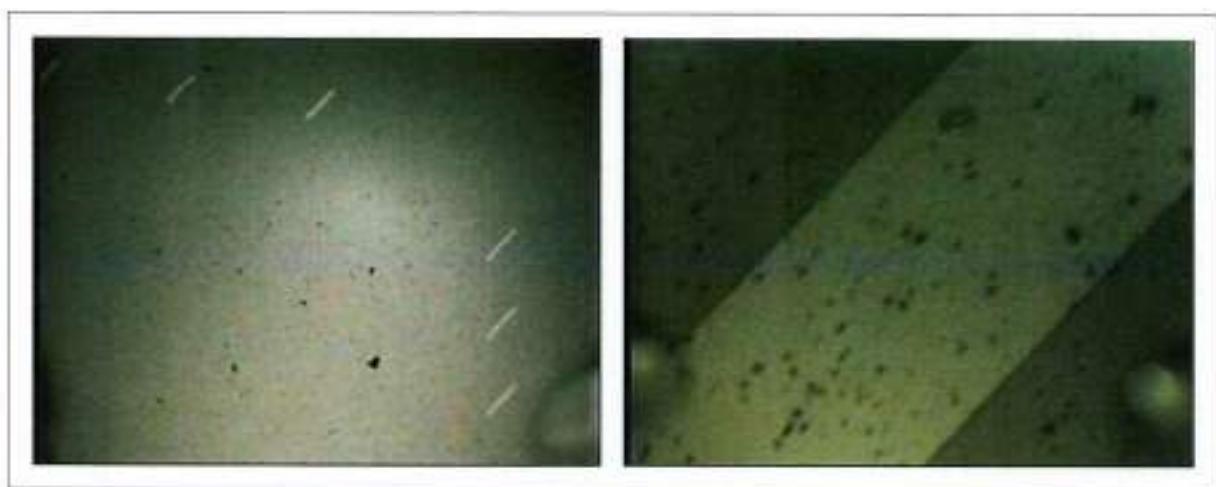


Figura 2.10: Vistas panorâmica e aproximada da camada de Si_3N_4

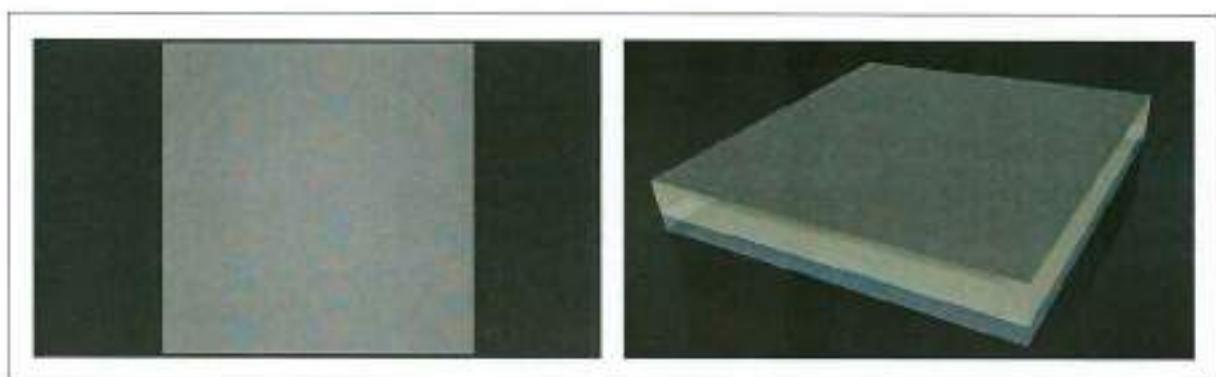


Figura 2.11: Vista superior e em perspectiva da amostra metalizada

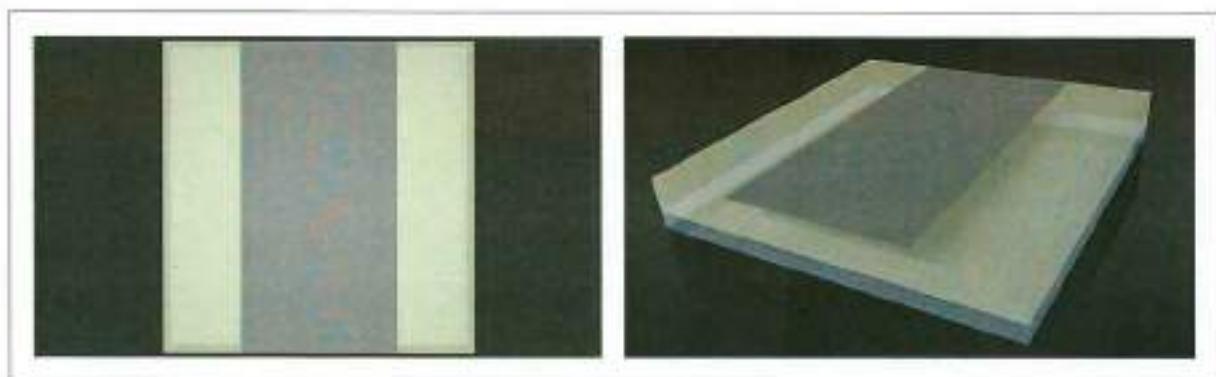


Figura 2.12: Vista superior e em perspectiva da amostra escrita com o padrão de M1

as guias de onda e suas curvas. Encontram-se também imagens aproximadas e que evidencia as diferenças estruturais entre cada um dos dispositivos. Ademais, pode-se perceber de forma tenua a camada de proteção definida pela máscara M0, na quinta etapa, abaixo do mascaramento atual.

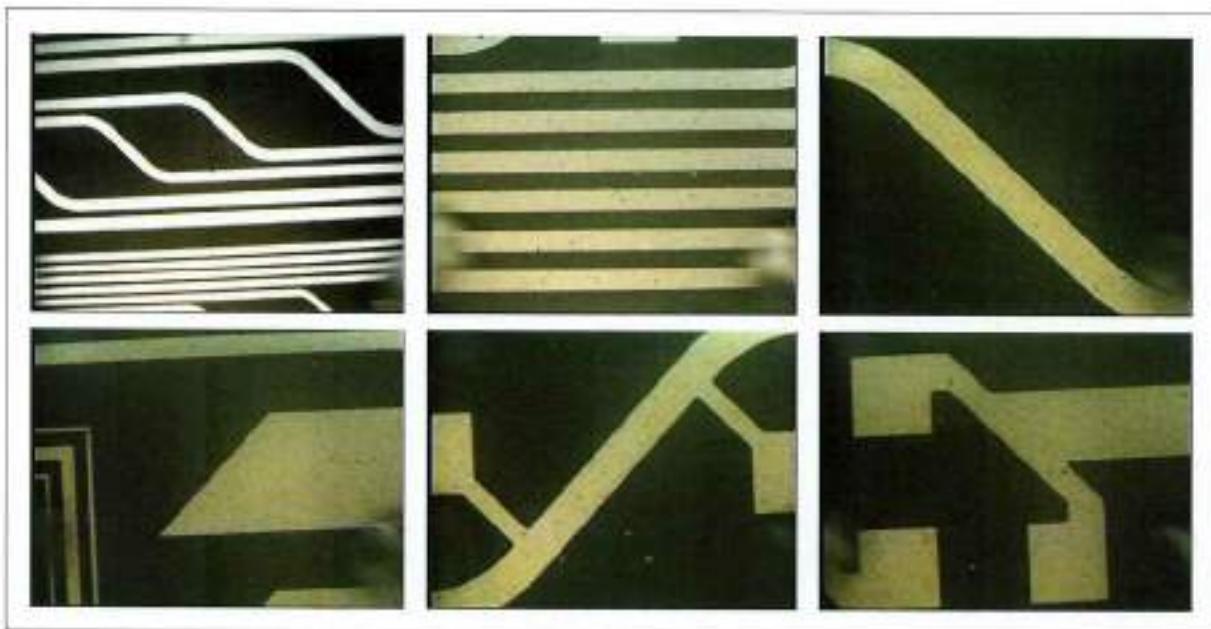


Figura 2.13: Fotos do mascaramento da amostra para definição do núcleo das guias de onda

Em seguida, fez-se a corrosão por RIE da amostra para que o núcleo ganhasse sua forma definitiva, representada na figura 2.14. Para controle do fim da corrosão, que deveria chegar até o revestimento inferior, isto é, aproximadamente $3,5 \mu\text{m}$ de profundidade incluindo a espessura da máscara M1, cerca de $0,3 \mu\text{m}$, medições foram realizadas aproveitando as paradas que eram feitas a cada 30 minutos para o procedimento de breve imersão das amostras em solução de ácido nítrico. Aqui, novamente, ficou evidenciada a porosidade do filme de Si_3N_4 uma vez que a corrosão aconteceu mais rápido que o esperado.

Nas tabelas 2.9 e 2.10, pode-se verificar o andamento do procedimento. É importante observar que, como a validade do procedimento com ácido nítrico ainda estava sendo verificada, optou-se por aplicá-lo apenas em metade das amostras.

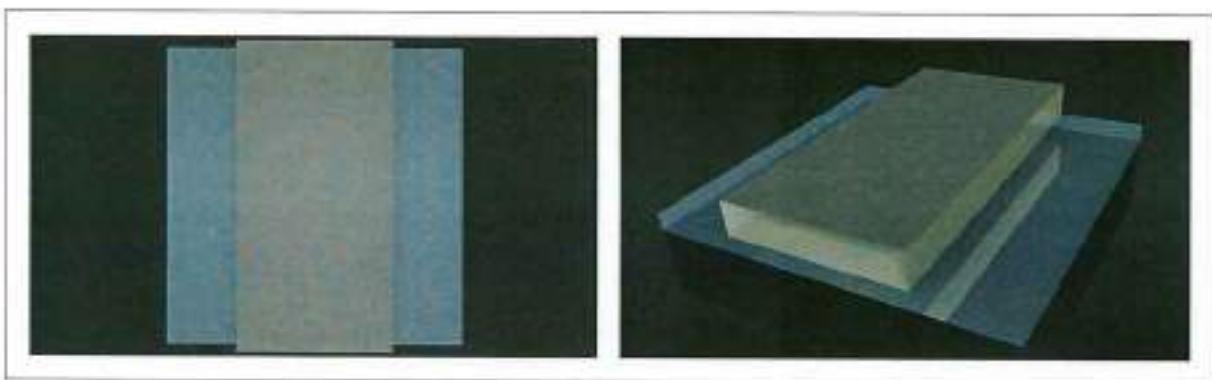


Figura 2.14: Vista superior e em perspectiva da amostra após definição do núcleo

Tabela 2.9: Acompanhamento da corrosão para definição do núcleo sem imersão em solução de HNO_3

Tempo (min)	60	90	120	135
Profundidade da corrosão (μm)	1,9	2,5	3,4	3,6
Taxa de corrosão média (nm/min)	26,67			

Tabela 2.10: Acompanhamento da corrosão para definição do núcleo com imersão em solução de HNO_3

Tempo (min)	60	90	105	
Profundidade da corrosão (μm)	2,3	3,3	4,0	
Taxa de corrosão média (nm/min)	38,09			

Nesta etapa, o tratamento em ácido nítrico teve pouca influência, mas já se mostrava promissor. Nas amostras que foram submetidas a ele foi possível até mesmo ter ideia do andamento do processo por inspeção visual pois a tonalidade ia mudando conforme o filme de Si_3N_4 ia se desgastando, das bordas para o centro da amostra. Este fato é relevante pois não é possível fazer este tipo de acompanhamento com a metodologia normalmente usada no GNMD.

Por fim, removeu-se a proteção de cromo, que não poderia mais ser aproveitada, e chegamos às representações mostradas na figura 2.15, já com os núcleos das guias de onda prontos.

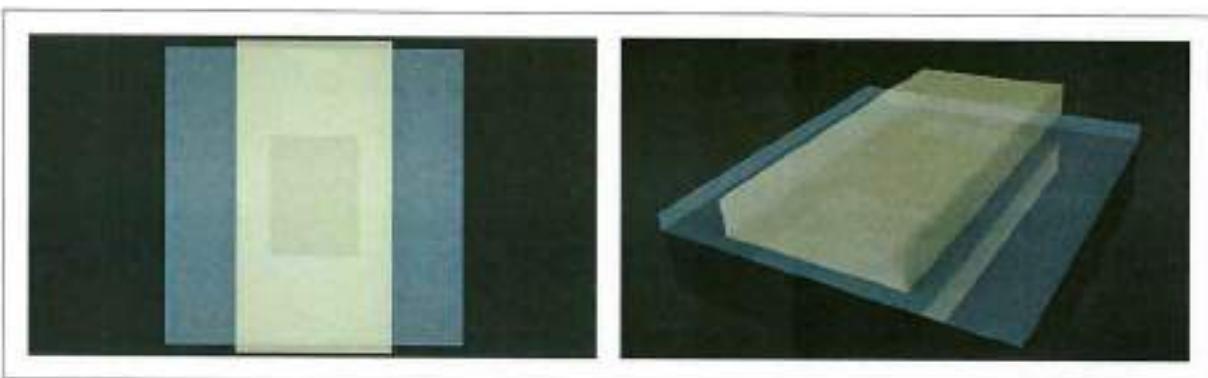


Figura 2.15: Vista superior e em perspectiva da amostra sem a máscara M1

Confecção de contatos elétricos e filamento da microlâmpada

O próximo passo deste projeto é a implementação da parte elétrica. Para que a microlâmpada exista, é necessário um filamento, pelo qual a corrente elétrica passará aquecendo-o e culminando em seu acendimento por efeito Joule, e contatos elétricos para que a potência possa chegar até o filamento. Porém, isso envolve várias etapas.

A primeira medida a ser tomada é a abertura da cavidade em que o filamento será inserido. Como a cavidade será escavada por RIE, é de se esperar que a superfície seja metalizada e um novo padrão seja transferido, conforme figuras 2.16 e 2.17.

Vale dizer que uma possível melhoria é a unificação das máscaras M1 e M2, possibilitando a definição da guia e a abertura de cavidade para inserção dos filamentos em um mesmo processamento. A abordagem realizada aqui só é necessária caso não se esteja utilizando a máscara M0, o que claramente não é o caso deste trabalho.

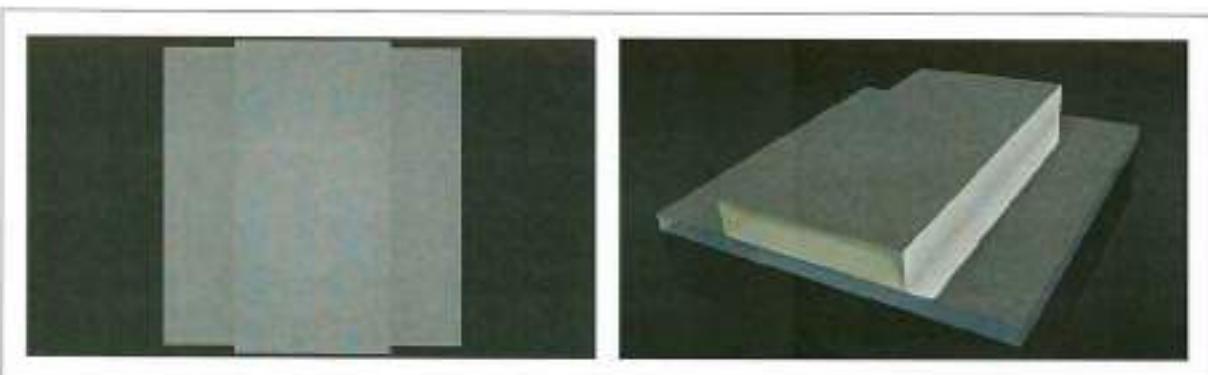


Figura 2.16: Vista superior e em perspectiva da amostra metalizada com cromo

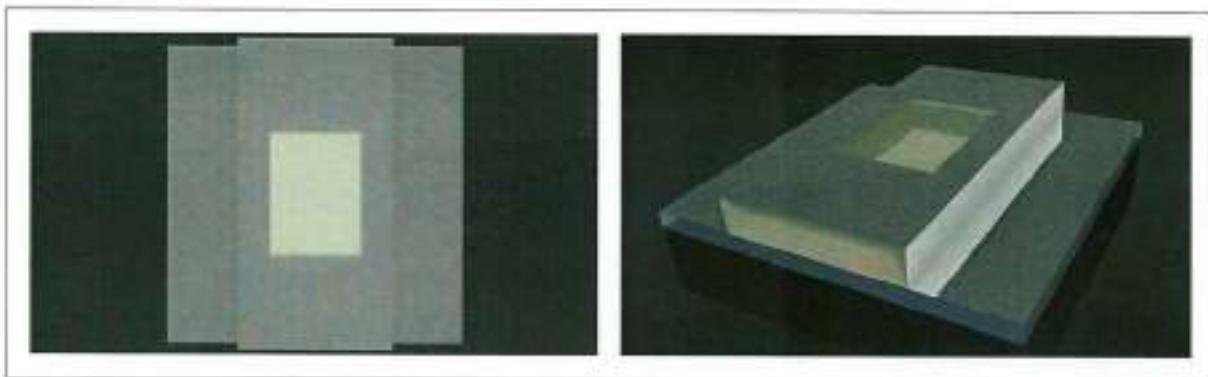


Figura 2.17: Vista superior e em perspectiva da amostra após transferência do padrão de M2

Pois bem, após a exposição dos núcleos nas áreas em que serão inseridos os filamentos, fez-se então a corrosão em RIE que escavou o filme de Si_3N_4 até encontrar a barreira de proteção implementada na quinta etapa, o que fica claro na figura 2.18 por não haver mais diferença de cor entre a região mascarada e a região corroída, isto é, a barreira de proteção ficou exposta.

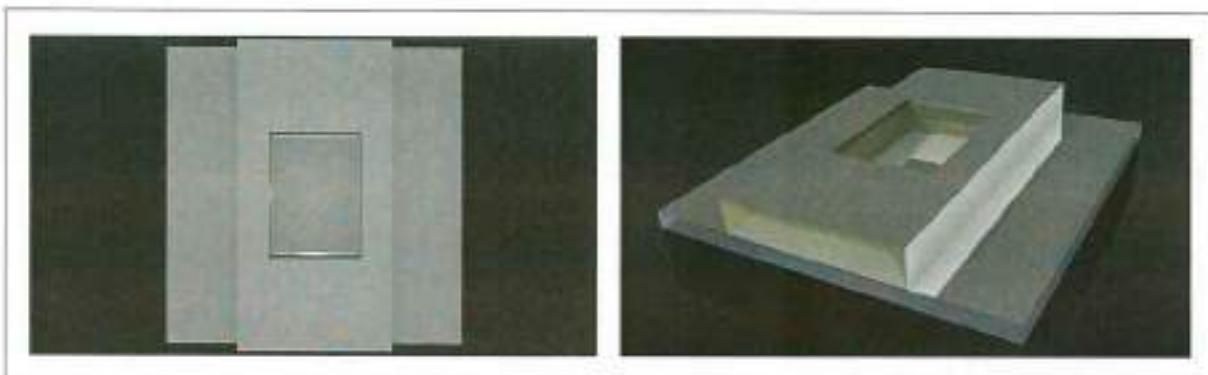


Figura 2.18: Vista superior e em perspectiva da amostra após corrosão por RIE da cavidade do filamento.

Da mesma forma que na 10^a etapa, acompanhou-se também esta corrosão por RIE como pode ser visto tabela 2.11, e diferentemente daquela etapa o tratamento realizado começou a influenciar o processo de forma relevante. Embora ao final do tempo de 90 minutos a corrosão sem tratamento em ácido nítrico não tenha atingido a barreira de proteção implementada na 5^a etapa, o processo foi parado por não ser um fator crítico. A

maior influência que isto poderia ter era as microlâmpadas estarem semi-inseridas, o que não prejudicaria o funcionamento delas.

Tabela 2.11: Acompanhamento da corrosão para da cavidade onde será inserido o filamento. Profundidade da corrosão por RIE após 90 minutos.

	Profundidade (μm)	Taxa de corrosão média (nm/min)
Corrosão sem tratamento de imersão em HNO_3	2,7	30
Corrosão com tratamento de imersão em HNO_3	3,8	42

As fotos da figura 2.19 foram feitas em uma etapa posterior, após a 21^a etapa por isso a coloração avermelhada do cobre, mas ilustram bem o que aconteceu nesta etapa. Na imagem da esquerda, tem-se o resultado da corrosão sem imersão na solução de ácido nítrico e podem ser vistos regiões escusas dentro da cavidade do filamento, o que não é visto na imagem da amostra que passou pelo tratamento em nítrico à direita.

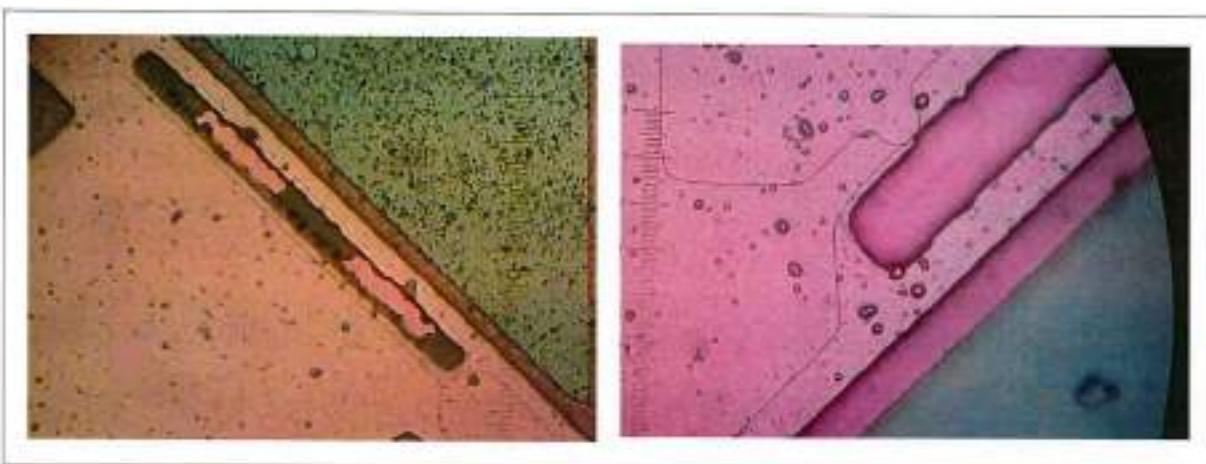


Figura 2.19: Abertura de cavidade para filamento sem tratamento em ácido nítrico à esquerda e com, à direita.

Em seguida, remove-se a máscara de cromo e junto dela a barreira de proteção feita na 5^a etapa também é removida, como pode ser visto na figura 2.20.

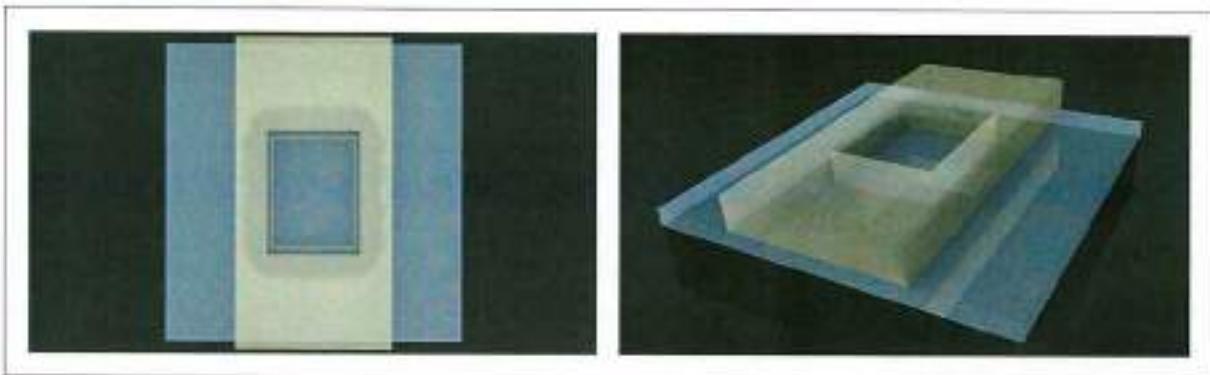


Figura 2.20: Vista superior e em perspectiva da amostra com cavidade do filamento pronta.

A partir deste ponto as amostras estavam preparadas para receber contatos elétricos e filamentos. Assim, aplicou-se o mesmo processo de metalização utilizado na confecção dos mascaramentos, porém durante um período maior para que a camada ficasse mais espessa e resultasse em um filme que suportasse maior intensidade de corrente elétrica. Na figura 2.21 pode-se ter uma ideia do resultado esperado. Optou-se também por separar as amostras que estavam sendo preparadas em dois grupos, um com espessura de aproximadamente $0,5 \mu\text{m}$ e o outro com $0,8 \mu\text{m}$.

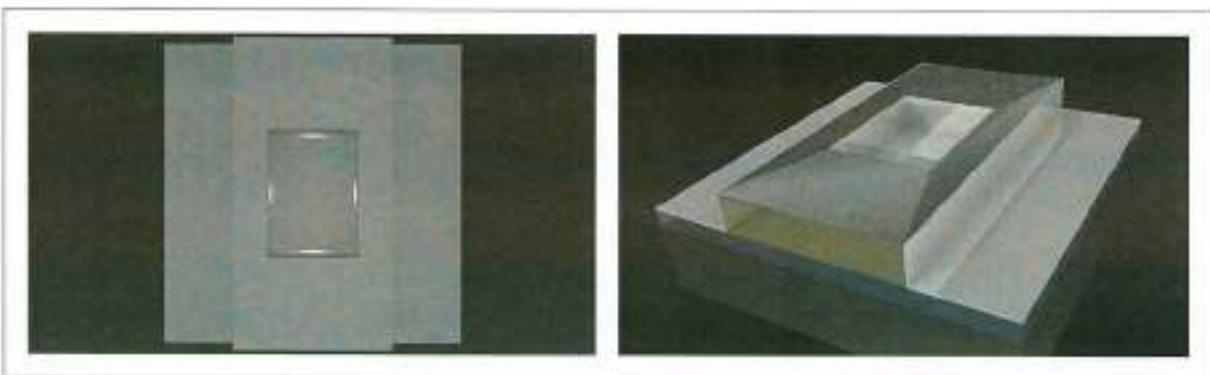


Figura 2.21: Vista superior e em perspectiva da amostra após metalização para parte elétrica.

Novamente, após a metalização, foi necessário dar forma aos contatos e filamentos, o que foi feito utilizando a máscara M3. O modelo deste passo encontra-se na figura 2.22.

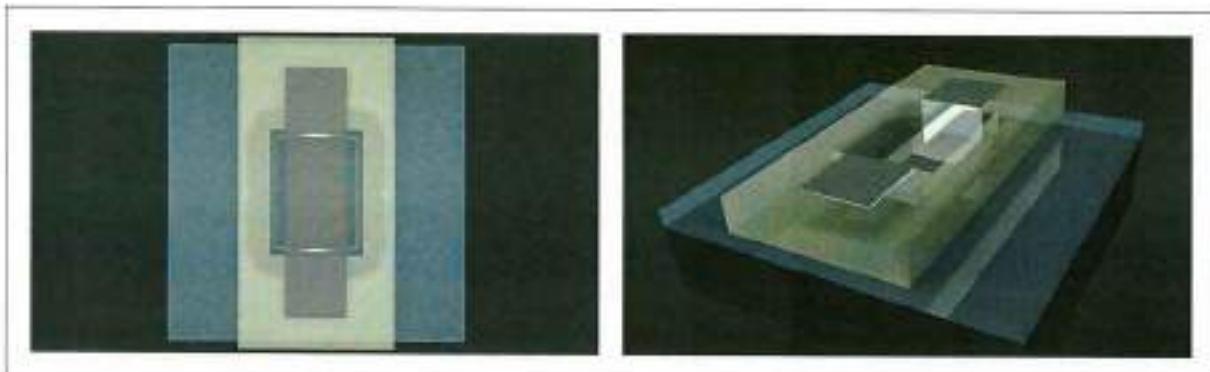


Figura 2.22: Vista superior e em perspectiva da amostra com contatos e filamento definidos.

Neste momento, aproveitou-se também para se medir a continuidade entre os contatos elétricos de cada microlâmpada, assim já se poderia ter alguma expectativa sobre o funcionamento dos dispositivos. Para aqueles com circuitos elétricos com espessura de $0.5 \mu\text{m}$ verificou-se que em média apenas 20% deles funcionavam. Já para os de $0.8 \mu\text{m}$, a porcentagem subiu para 70%. Apesar de ser um incremento significativo, este resultado ainda não poderia ser considerado conclusivo pois um problema inverso poderia ter sido gerado pois o caminho da corrente elétrica podia estar tão facilitado que os filamentos não esquentariam o suficiente. Na figura 2.23 podem ser observados uma série de fotos dos dispositivos.

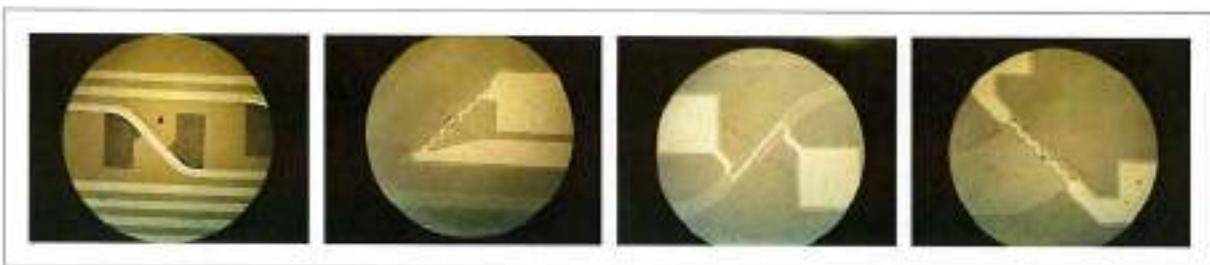


Figura 2.23: Algumas fotos dos circuitos elétricos dos dispositivos

Revestimento superior

O revestimento superior da guia de onda é obtido a partir da deposição de SiO_2 por PECVD seguindo a configuração chamada de 0:75 já discutida no capítulo de Materiais e Métodos.

A representação desta etapa pode ser encontrada na figura 2.24. Interessante observar que, por se estar trabalhando com filmes finos e como este filme é depositado em cima de uma série de outras camadas, seu relevo passa a acompanhar o comportamento das camadas inferiores.

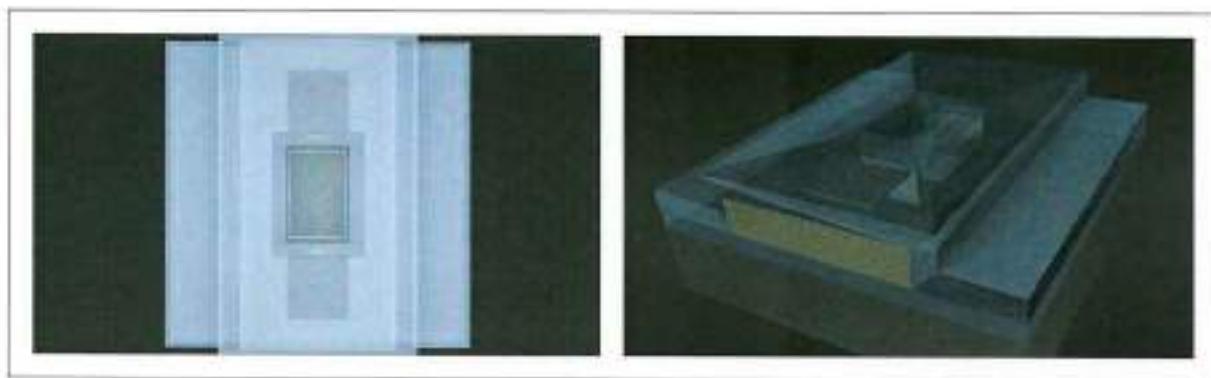


Figura 2.24: Vista superior e em perspectiva do modelo com revestimento superior

Exposição de contatos e substrato

Conforme a sequência programada de etapas, depois que o dispositivo chega nesse ponto é necessária a exposição de contatos e do substrato e isso será feito por meio de outra corrosão por RIE, que por sua vez implica mascaramento, que implica metalização. Dessa vez a máscara será feita com cobre, conforme discutido nos trabalhos complementares, por isso a modelagem apresenta uma coloração mais avermelhada, ou seja, mais próxima do cobre, como pode ser visto na figura 2.25. Após a metalização, faz-se a transferência do padrão da máscara M4 e as amostras estão preparadas para mais uma corrosão por RIE, conforme figura 2.26.

A espessura a ser corroída, da superfície ao substrato é equivalente a soma de cada uma das camadas sobrepostas, ou seja, a soma das espessuras do revestimento inferior, do núcleo e do revestimento superior, ou ainda, $2 + 3,2 + 2 = 7,2 \mu\text{m}$. Como a camada de cobre utilizada para mascaramento foi de aproximadamente $0,7 \mu\text{m}$, a medida de perfil final deveria ter pelo menos $7,9 \mu\text{m}$ para garantir que o substrato estivesse exposto. Ao final desta etapa, o modelo do dispositivo se encontra conforme a figura 2.27.

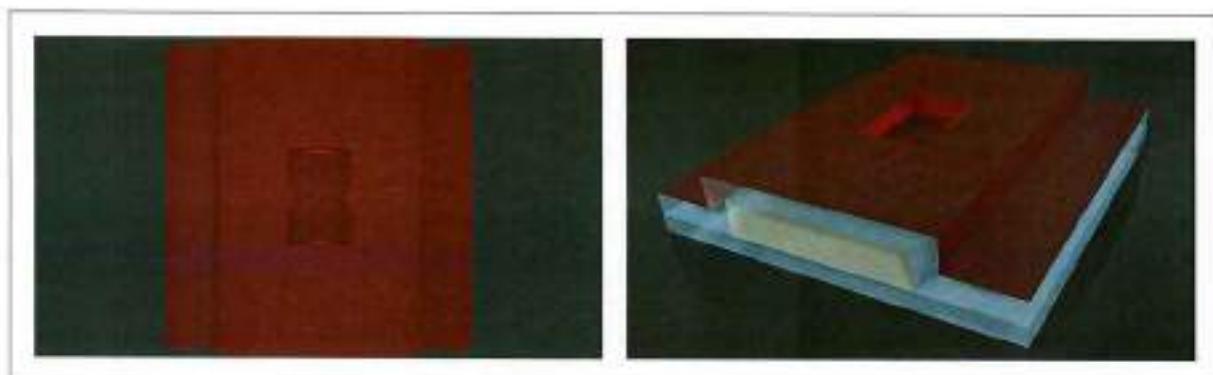


Figura 2.25: Vista superior e em perspectiva do modelo metalizado com cobre

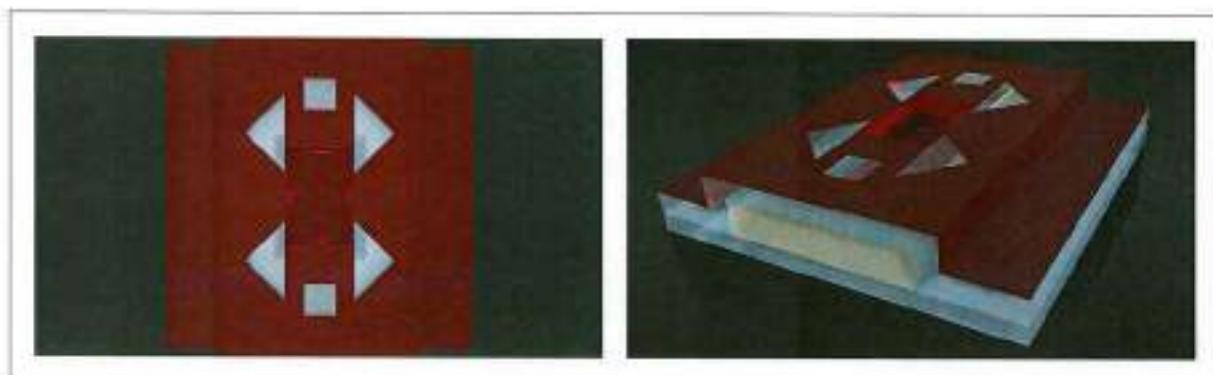


Figura 2.26: Vista superior e em perspectiva do modelo com as áreas a serem atacadas na corrosão já desprotegidas

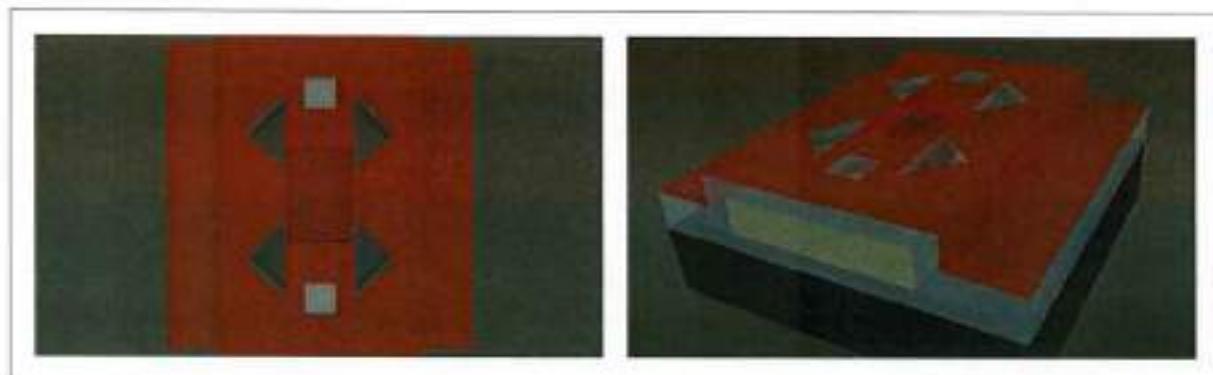


Figura 2.27: Vista superior e em perspectiva do modelo já com sustrato e contatos expostos.

E da mesma forma que as corrosões por RIE anteriores, esta também foi acompanhada, como pode ser visto na tabela 2.12. O tratamento de imersão em ácido nítrico foi realizado a cada 60 minutos e com isso aproveitou-se para realizar a perfilometria. Como a previsão era de cerca de 8 horas, isto é, 480 minutos de processo, a primeira medida foi realizada somente após 120 minutos do início.

Tabela 2.12: Acompanhamento da corrosão para exposição de contatos e do substrato com tratamento de imersão em solução de HNO_3

Tempo (min)	120	180	240	320	400	480	520
Profundidade da corrosão (μm)	1,9	3,0	3,9	4,9	6,3	7,3	8,0
Taxa de corrosão média (nm/min)	15,4						

Tentou-se inclusive manter um processo sem tratamento em ácido nítrico para poder fazer comparação dos resultados, mas o processo estancou em aproximadamente $3,5 \mu\text{m}$. Vale inclusive a comparação direta do aspecto das amostras que passaram por tratamento em ácido nítrico e daquelas que não, o que pode ser visto nas figuras 2.28.

Isolamento térmico dos filamentos

Para se ter uma ideia de o que acontece nesta etapa, basta observar a figura 2.29. Como as várias camadas do modelo dificultavam a observação, na figura apresentou-se também um modelo (à direita) em que tanto o revestimento superior quanto os contatos foram retirados. Por comparação, pode-se observar que as paredes verticais do filamento ficam posicionadas exatamente sobre a cavidade, fazendo com que a dissipação de potência nessa região fique dificultada.

O isolamento térmico dos filamentos foi pensado aproveitando as diferentes taxas de corrosão de cada plano cristalográfico do silício, o que culminou nas formas explicitadas na máscara M4. Porém, como haviam diferentes tipos de geometria, optou-se por verificar a corrosão em intervalos fixos. A primeira parada foi pensada para acontecer em poucos minutos somente para verificar se a corrosão do substrato estava acontecendo, uma vez que, apesar dos cuidados tomados, o substrato poderia não ter ficado exposto após a etapa anterior.

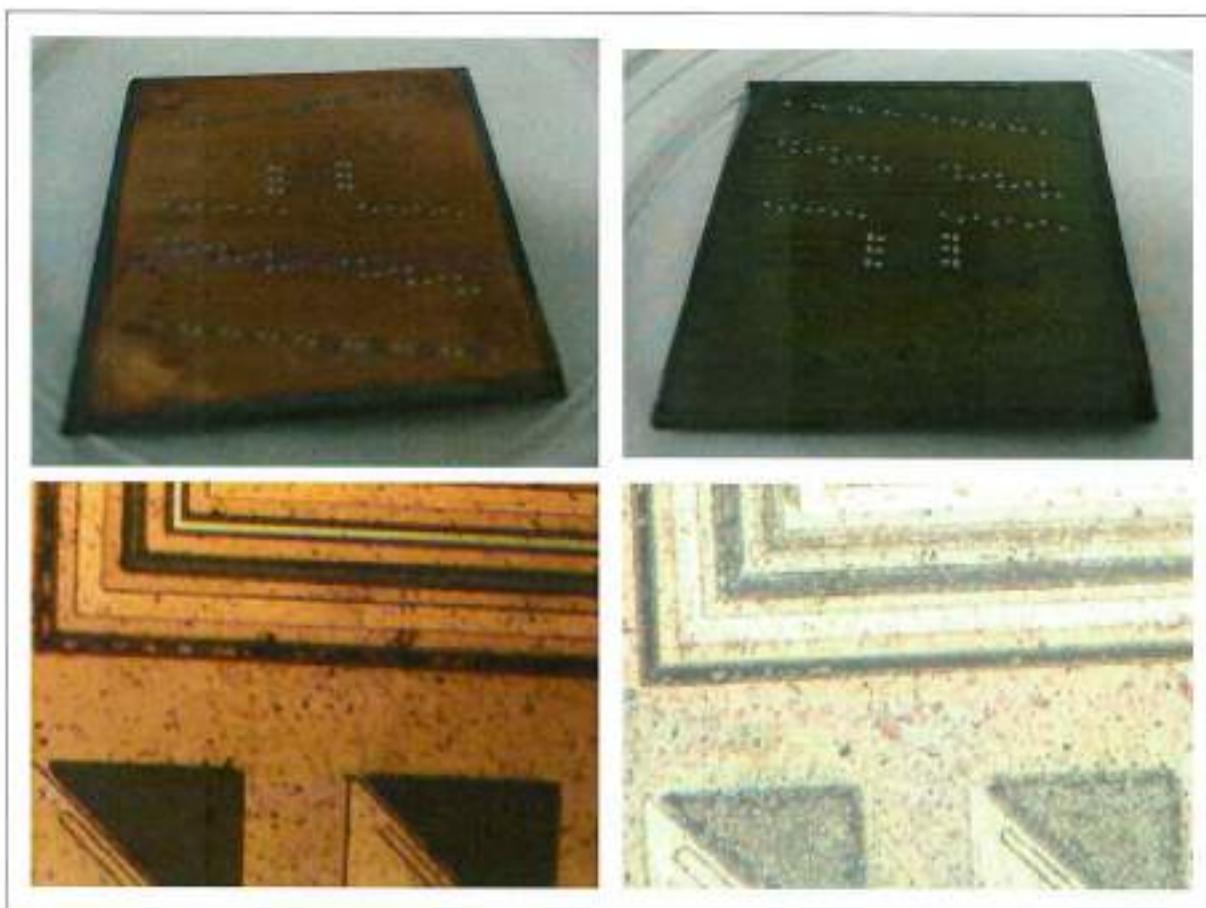


Figura 2.28: Corrosão por RIE. Ambas as amostras foram submetidas, sendo que as duas imagens da esquerda são de amostras que foram tratadas com ácido nítrico. Já as duas da direita, não.

Inclusive, foi pensando nessa possibilidade que optou-se por realizar a corrosão em KOH sem remover a máscara de cobre. Porém, quando a amostra foi imersa na solução de KOH a filme de cobre começou a descolar, como pode ser visto na figura 2.30. Uma justificativa para isso pode estar na diferença de temperatura. A solução de KOH é mantida a 80 °C e, quando a amostra aqueceu, os diferentes coeficientes de dilatação podem ter feito com que o filme de cobre descolasse.

Assim, já na primeira parada fez-se a remoção do filme de cobre em solução de FeCl_3 . Por microscopia ótica foi verificado que a corrosão estava acontecendo normalmente e este processo foi repetido sistematicamente até que as estruturas em sua maioria estivessem suspenas. Na figura 2.31 podem ser vistos vários estágios dessa etapa. Ao final, a

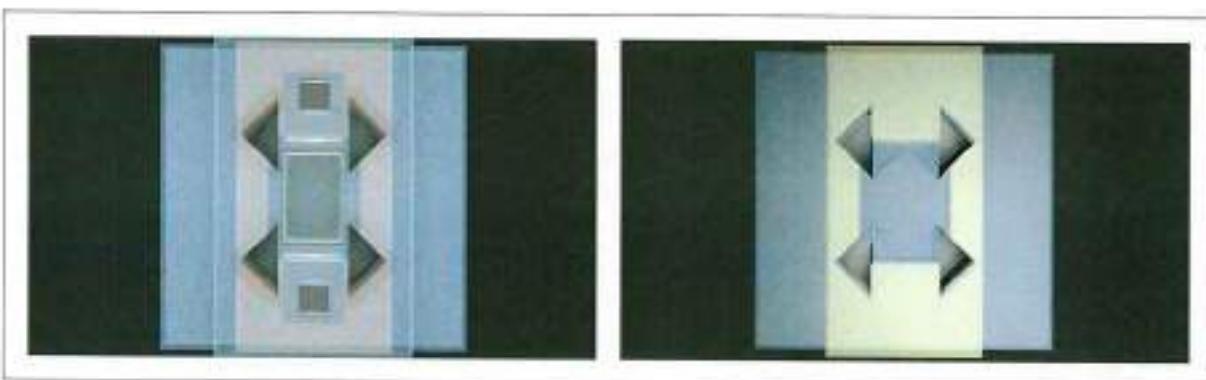


Figura 2.29: Vista superior da etapa de isolamento térmico dos filamentos do dispositivo. A imagem da direita é a mesma que a da esquerda porém sem as camadas superiores para evidenciar as marcas da corrosão no substrato.

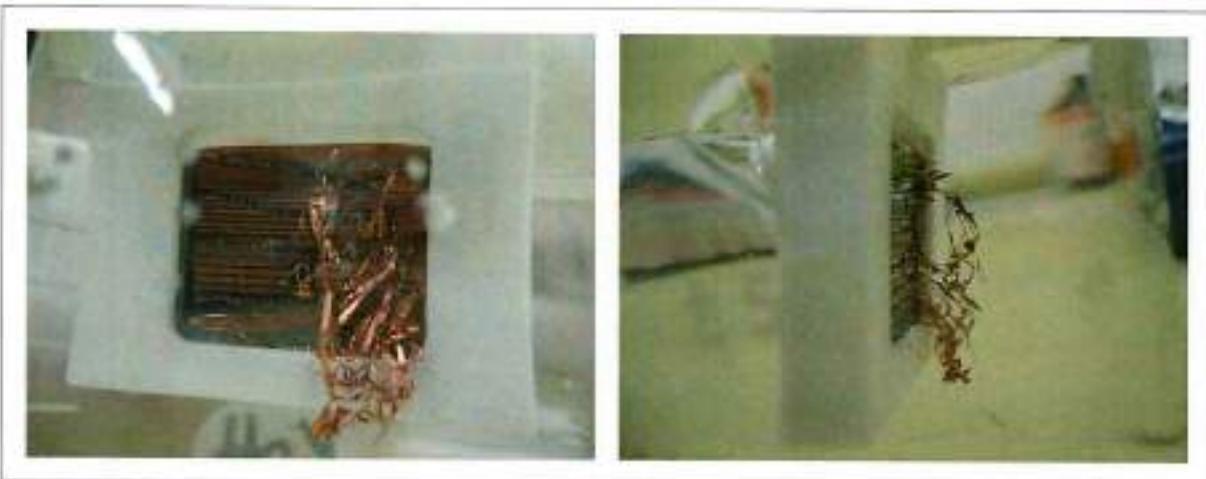


Figura 2.30: Imagens do filme de cobre se descolando ao ser colocado na solução de KOH corrosão levou aproximadamente 90 minutos.

Além disso, nesse ponto é possível a comparação entre as várias geometrias pensadas para esta etapa. Como pode ser observado na figura 2.32, a primeira constatação é quanto menor a região suspensa, mais robusto é o processo. Isso porque quando o filme está suspenso ele fica a mercê das tensões internas o que provoca deslocamentos para acomodação e isso pode danificar as estruturas. Além disso, quando a estrutura esquenta, novas acomodações das forças estruturais são feitas, aumentando a probabilidade de o filamento se partir.



Figura 2.31: Fotos da evolução da corrosão por KOH para isolamento térmico dos filamentos

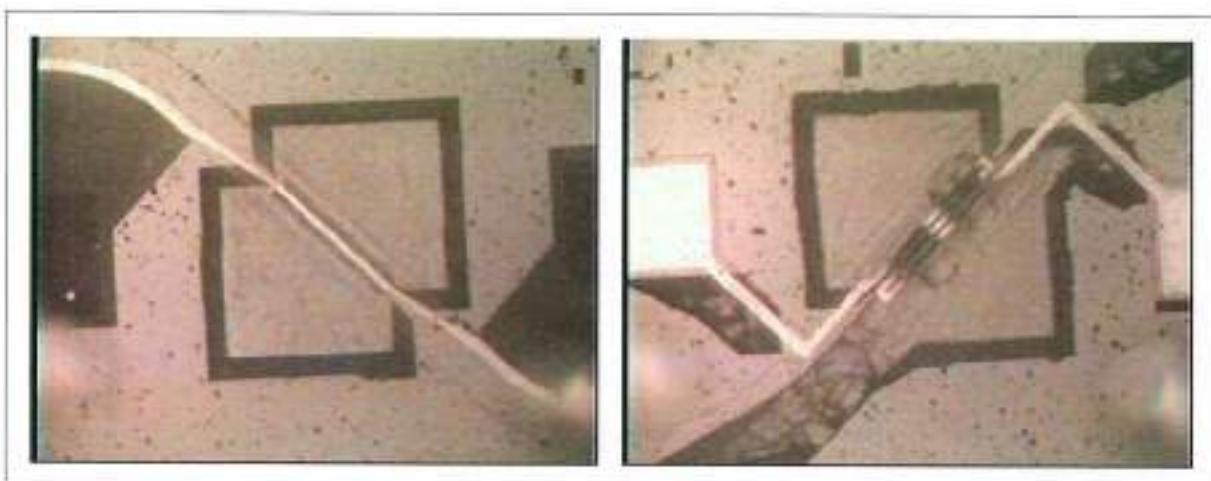


Figura 2.32: Fotos do aspecto final da corrosão por KOH para isolamento térmico dos filamentos. À esquerda, tem-se uma estrutura que não foi totalmente liberada. À direita, uma estrutura que foi totalmente liberada e sofre distorções por causa das tensões dos filmes, que podem ser inferidas por causa dos pontos escuros na fotografia.

Dos isolamentos em que se optou por fazer a corrosão apenas sob a região que devia acender, conforme figura 2.33, vale dizer que os processos se saíram melhor quando a microlâmpada estava posicionada em paralelo ao lado condutor da corrosão do triângulo. Isso porque a área necessária para a liberação da estrutura é menor, além de o processo ser mais controlável. Um porém dessa escolha é que as microlâmpadas precisariam estar posicionadas em uma extremidade da guia de onda, o que acaba por não ser muito diferente da outra opção.

É importante ressaltar que durante a corrosão em KOH, muitos pedaços de filmes transparentes, como na figura 2.34, foram encontrados. Isso deu indícios de que havia algo



Figura 2.33: Fotos do aspecto final da corrosão por KOH para isolamento térmico por liberação das estruturas apenas nas áreas dos filamentos. À esquerda, tem-se o filamento perpendicular ao lado do triângulo condutor da corrosão e, à direita, o filamento foi projetado paralelo ao referido lado.

errado na aderência dos filmes, o que trouxe muitos problemas posteriores, mas isso será discutido em alguma seção posterior.

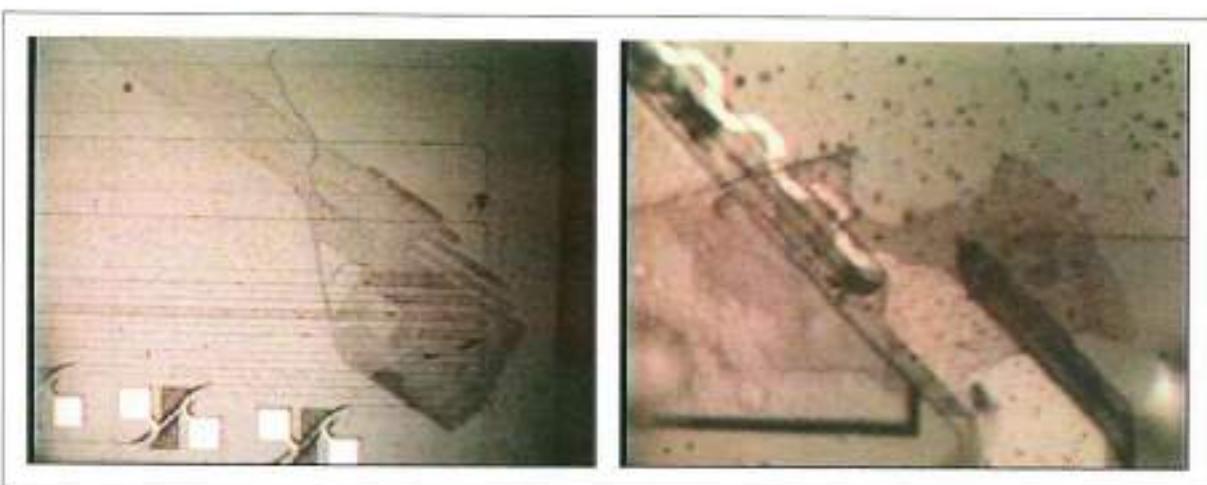


Figura 2.34: Imagens de pedaços de filmes transparentes que se soltaram da amostra durante a corrosão em KOH

2.3 Caracterização dos dispositivos

Para se poder avaliar o funcionamento dos dispositivos, foram feitas algumas análises. Para facilitar a análise, as microlâmpadas foram numeradas, conforme é mostrado na figura 2.35 baseada nas máscaras de filamentos e de abertura de cavidade para eles. Aproveitou-se aí também para mostrar a localização das microlâmpadas que resultaram ativas ao final de todo o processo e pode-se descartar a influência da localização dos dispositivos nas amostras uma vez que eles espalharam.

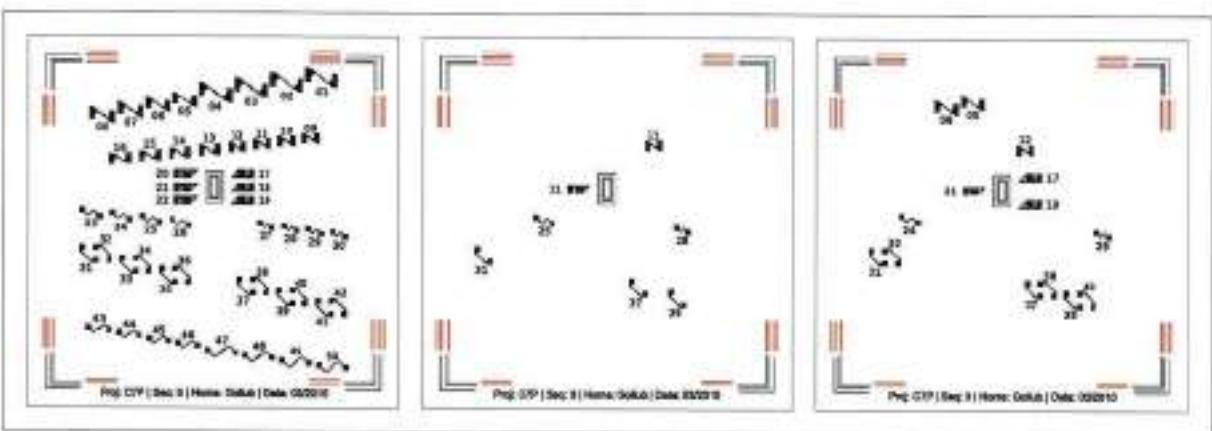


Figura 2.35: Numeração para referência dos dispositivos à esquerda e microlâmpadas ativas ao final dos processos com filamento de $0,5 \mu\text{m}$ (centro) e $0,8 \mu\text{m}$ (direita) de espessura.

Polarização dos dispositivos

Primeiramente, montou-se um aparato que se utiliza de um arranjo de lentes, porém não exatamente uma microscopia ótica convencional pois possibilitava a visualização de profundidade, conforme figura 2.36, com micropontas-de-prova de forma que a polarização das microlâmpadas fosse possível.

Dessa forma, pôde-se medir a resistência dos filamentos, verificando inclusive quais dos dispositivos ainda estavam ativos, permitindo comparações entre suas localizações nas amostras e também análises quanto as suas geometrias. Inclusive, concluiu-se que o aumento do tempo de deposição faz com que as paredes laterais também aumentem de

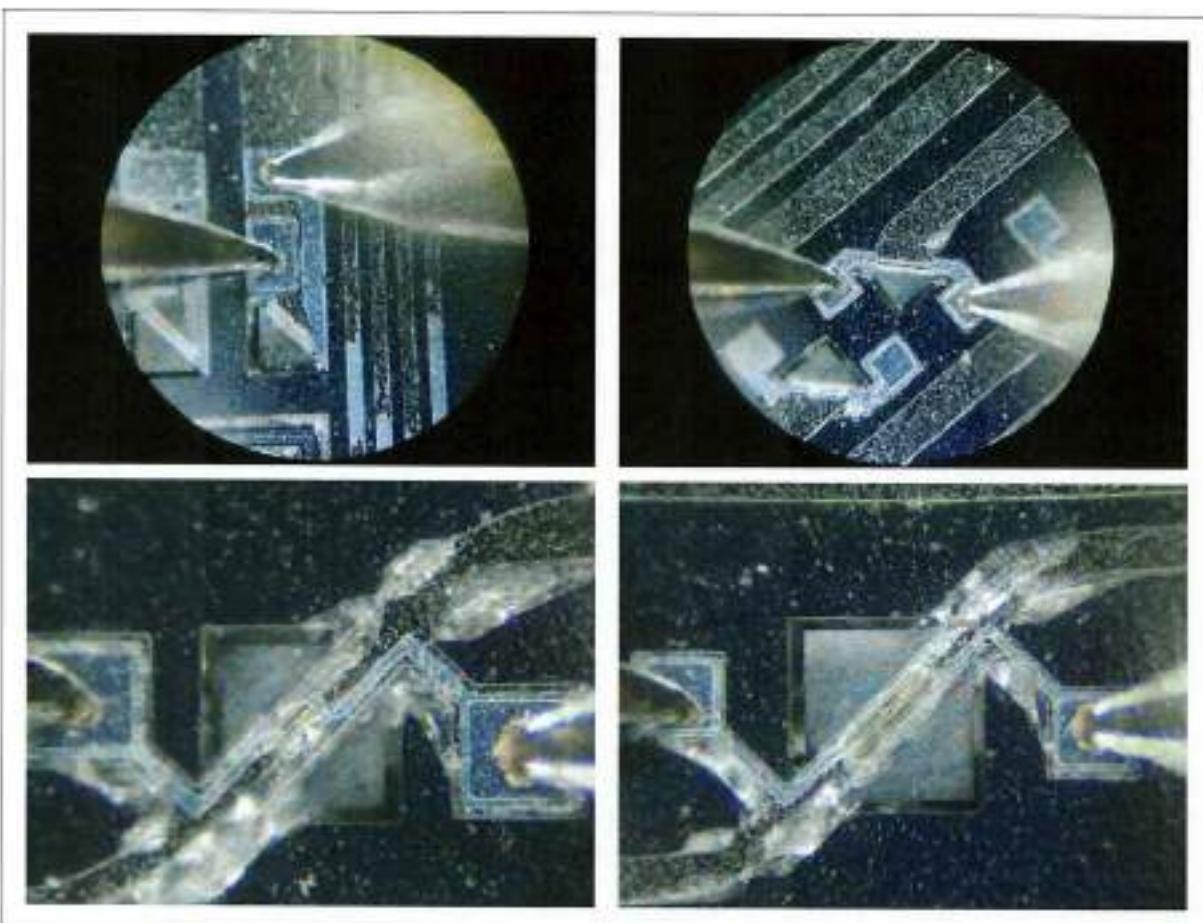


Figura 2.36: Aparato com micropontas-de-prova para caracterização das microlâmpadas

espessura, o que em testes futuros permite encontrar um ponto ótimo entre resistência e robustez do processo.

Vale observar ainda que as evidências coletadas durante o processamento das amostras sobre os maus resultados das deposições de PECVD ficam óbvias nesta etava uma vez que a superfície das amostras não se mostram uniformes, contendo variações de cor e de textura em locais não previstos.

Processo com filamentos com $0,5 \mu\text{m}$ de espessura

Primeiramente, na tabela 2.13 pode-se verificar a resistências das microlâmpadas que chegaram ao final de todos os processos sem o filamento interrompido. Donde-se pode concluir que não houve influência da localização dos dispositivos na amostra pois os que continuaram ativos estão espalhados. Apenas 14% dos dispositivos suportaram o pro-

cesso o que é uma taxa muito baixa de aproveitamento. Se forem descontados ainda aqueles que por construção foram eliminados da análise, este número baixa ainda mais.

Tabela 2.13: Resistência dos filamentos das microlâmpadas ativas ao final do processo com filamentos de $0,5\text{ }\mu\text{m}$ de espessura

Resistência (Ω)	Geometria	Resistência (Ω)	Geometria
7800		456	
92,41		87,87	
4900		260,37	
2080			

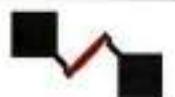
Processo com filamentos com $0,8\text{ }\mu\text{m}$ de espessura

Já na tabela 2.14 pode se verificar que as resistências das microlâmpadas que chegaram ao final quando se utilizou uma deposição de cerca de $0,8\text{ }\mu\text{m}$ de espessura. Basicamente, podem-ser feitas as mesmas observações em relação às amostras anteriores, mas com um adendo de que o aproveitamento para essa espessura do filamento foi muito maior, cerca de 30%, o que leva a crer que esta é uma etapa crítica do processo.

Microscopia Eletrônica de Varredura

Para uma análise mais aprofundada dos dispositivos e dos filmes obtidos, foram tiradas fotografias feitas por um microscópio eletrônico de varredura por campo que, por construção, possibilita visualizações tridimensionais e mais próximas que a microscopia óptica. A seguir, algumas fotos serão utilizadas para enfatizar pontos de interesse e, quando possível e necessário, elas serão comparadas a outros materiais produzidos para contextualização.

Tabela 2.14: Resistência dos filamentos das microlâmpadas ativas ao final do processo com filamentos de 0,8 μm de espessura

Resistência (Ω)	Geometria	Resistência (Ω)	Geometria
2199		3300	
10150		140	
1430		118,5	
291,5		334,4	
166		59	
65,3		54300	
541		64,8	

A primeira coisa a se apontar são as características dos filmes com que se está trabalhando.

Presença do revestimento superior, sem ele, duas situações acontecem. Primeiro a luz teria sua condução prejudicada nos guias de onda, porém este não é um fator crucial para este trabalho já que essas estruturas só estão ali para servir como suporte para a microlâmpada. Segundo, o filamento fica exposto e quando aquecido, oxida, fazendo com que o circuito elétrico se interrompa.

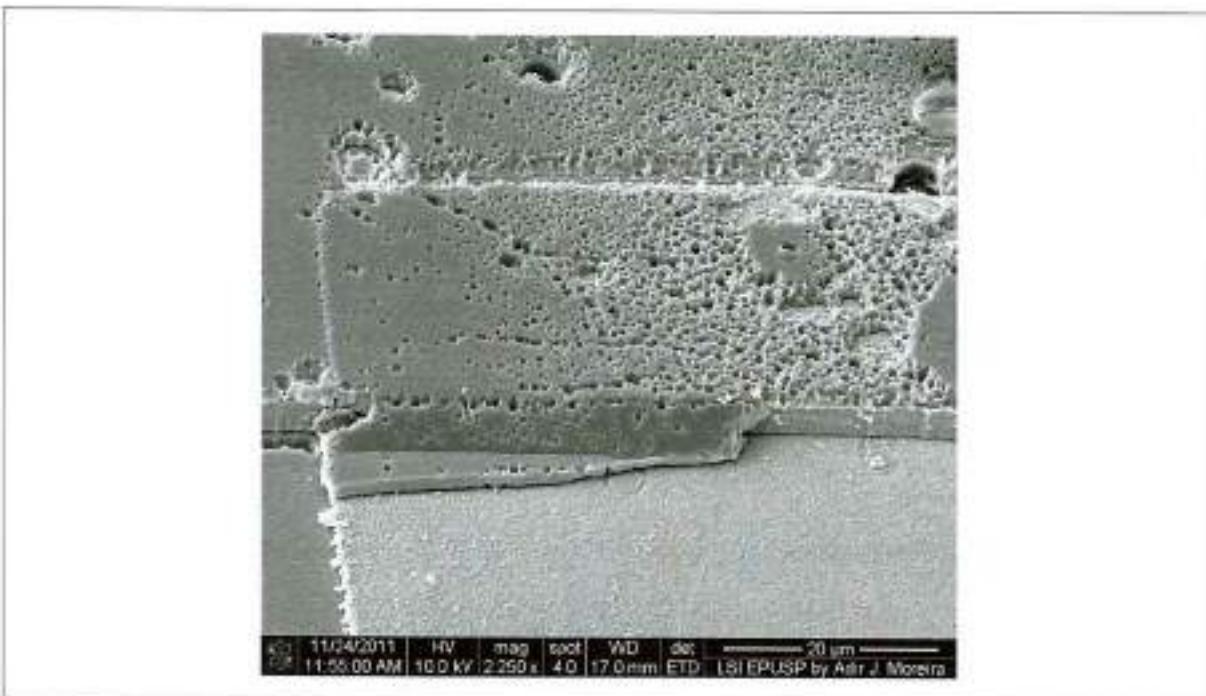


Figura 2.37: Pedaço de revestimento superior ainda sobre a amostra

Na figura 2.37 é mostrada uma imagem que evidencia a ausência do revestimento superior. Esta camada é justamente aquela que aparece trincada na parte inferior da imagem, que em seguida sobe um degrau e continua na parte superior. No degrau pode-se ver claramente como deveria ser a aparência do dispositivo e como ela se apresentou ao final do processo na quase totalidade da superfície. Além disso, na parte superior do degrau pode-se ver um filme altamente poroso, outro indício de que havia algo errado com a deposição.

Pois bem, outra característica básica do filme é a tensão. Apesar de as deposições terem seguido os resultados obtidos em trabalhos anteriores que afirmavam serem estas as melhores configurações para a minimizar as tensões nos filmes obtidos pela deposição em PECVD, na figura 2.38, podemos facilmente identificar regiões em que os filmes se curvam ao serem liberados devido ao esforço provocado pela tensão interna nos filmes. Muitas regiões não suportam esse tipo de força e descolam ou quebram. Essa é uma das causas de filamentos interrompidos.

Em um dos dispositivos pode-se fazer um retrato privilegiado da deposição de cromo por causa das falhas nos degraus do revestimento superior, como pode ser visto nas figuras

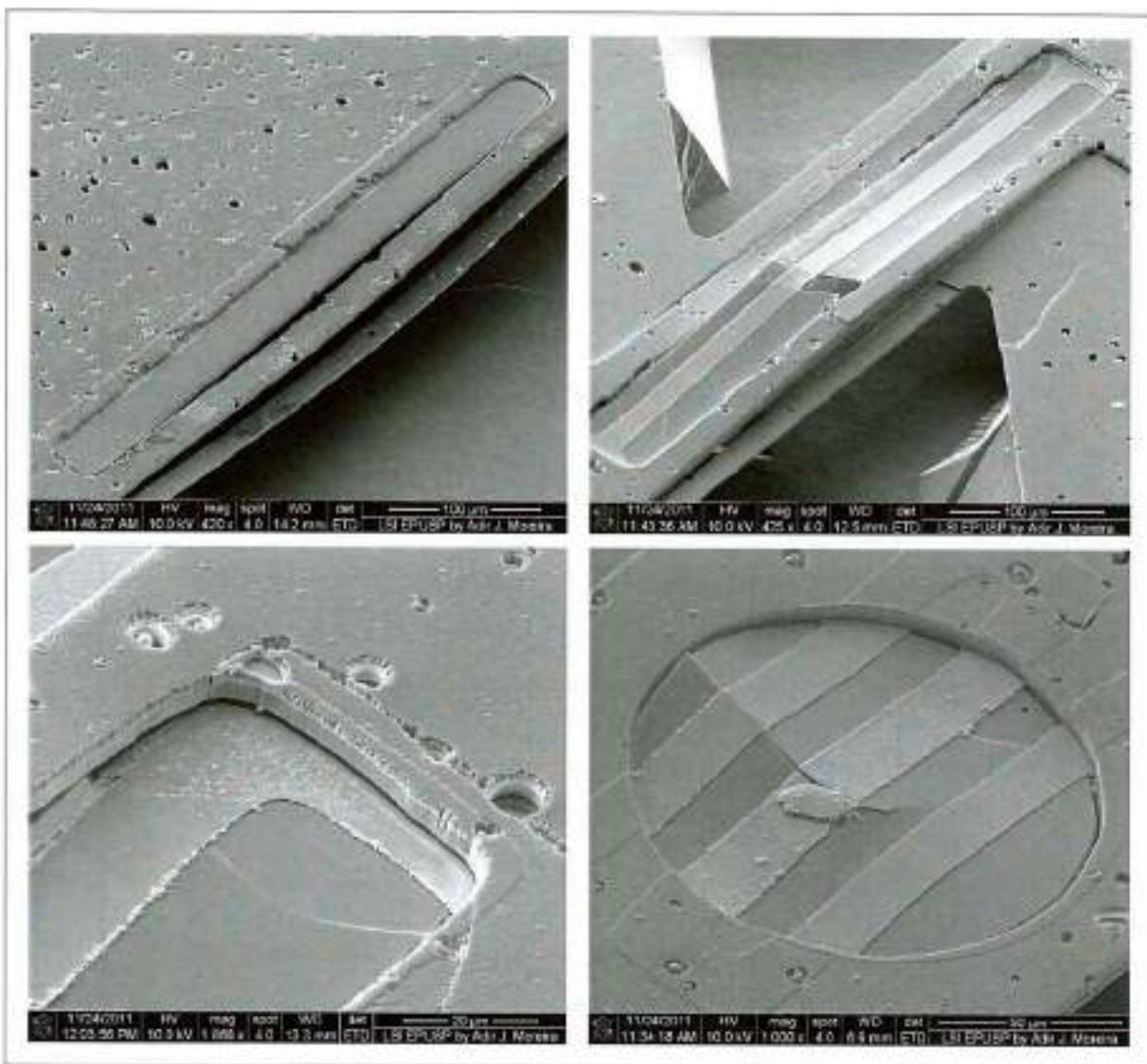


Figura 2.38: Filmes curvos por causa de tensão.

2.39. É evidente a insuficiência da espessura do filme depositado nos degraus por meio de comparação entre sua espessura e a espessura dos filmes próximos. Esse efeito era esperado e por isso especulou-se que esta área menos espessa poderia comportar como o filamento, porém não se podia prever o quanto fino a deposição resultaria.

Outro ponto importante é que este filme vertical acompanha as falhas do degrau, aumentando a probabilidade de falhas em sua própria estrutura. Para trabalhos posteriores avaliações seriam necessárias no sentido de saber qual a melhor relação entre espessura

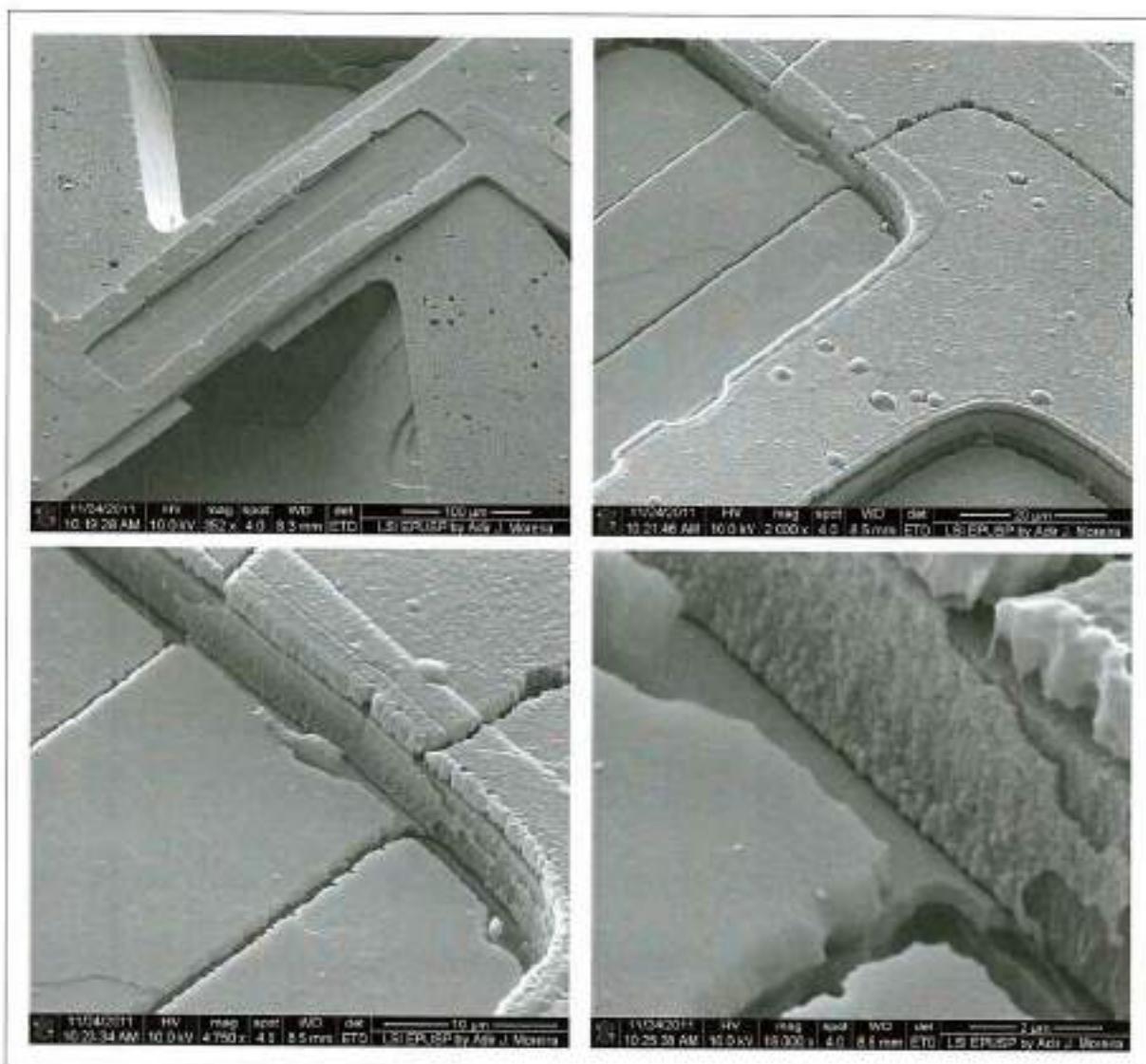


Figura 2.39: Ênfase na espessura insuficiente do filamento

e tensão provocada pelos filmes de cromo.

Capítulo 3

Conclusão

É fato que a obtenção dos dispositivos foi prejudicada pelo desempenho das deposições por PECVD, pois apesar de serem utilizadas configurações otimizadas por trabalhos anteriores do próprio GNMD, isto é, configurações já testadas nos mesmos reatores utilizados neste trabalho, os resultados obtidos não foram os esperados. Aparentemente, houve piora nas seguintes características dos filmes depositados:

estresse, alterando o comportamento dos filmes quando suspenso;

cobertura, que fez com que o filme depositado não se distribuisse uniformemente sobre a superfície em que estava sendo depositado, fato agravado nas descontinuidades onde justamente estavam localizados filamentos que sofreram oxidação ao aquecer por não estarem protegidos;

aderência, permitindo que os filmes se descolassem quando não deveria, por exemplo por influência das tensões internas;

porosidade, fator que interfere no índice de refração, mas que não determinante neste trabalho.

Não obstante, foi possível obter resultados importantes que elucidam e identificam pontos críticos do processo planejado. Novas técnicas e condições foram desenvolvidas de forma a diminuir ou mesmo minimizar os problemas encontrados. Além disso, foram tentadas algumas justificativas e análises da influência deles no processo como um todo.

Para começar, o ponto essencial do dispositivo, a confecção do filamento. Ficou claro durante o processo que a deposição do cromo em paredes verticais é muito menor que nas superfícies horizontais. Isso gera uma necessidade de estudo mais aprofundado nessas

deposições. Isso porque as máscaras foram pensadas de acordo com premissas anteriores, isto é, nas microlâmpadas convencionais a diminuição da resistência na região do filamento era feita a partir da redução da largura das trilhas. Porém, nas microlâmpadas verticais já há uma sensível restrição ao caminho da corrente que é criada naturalmente por causa das deposições nas superfícies verticais. Sendo assim, ao se deslocar os filamentos para as paredes verticais e ainda sim restringindo a largura das trilhas se mostrou excessivo. Um fator agravante é a possibilidade de falhas na conectividade dos filamentos aumentar nas paredes verticais. Dessa forma, ao se afinar o filamento, diminuem-se também as chances de existirem caminhos alternativos para a corrente elétrica.

Ainda tratando de posicionamento e geometria dos filamentos em si, outra escolha que não teve bons resultados é o fato de muitos deles serem na verdade a serialização de filamentos menores, ou seja, a cada vez que o filamento troca de nível na estrutura cria um possível caminho crítico, sendo que a corrente elétrica ficará restrita ao pior caso que interromperá o caminho quando for exigido. Isso faz com que mesmo as microlâmpadas mais largas tenham um aproveitamento muito reduzido.

Quaisquer das geometrias escolhidas para os filamentos ficaram invalidadas caso fossem necessários caminhos para a corrente elétrica sem mudança de plano, como pode ser visto na figura 3.1. Isso aconteceu tanto pelo projeto de filamentos que acompanhavam paralelamente o degrau, quanto pelo limite de alinhamento das máscaras dos filamentos sinuosos que tinham suas curvas próximas ao degrau.

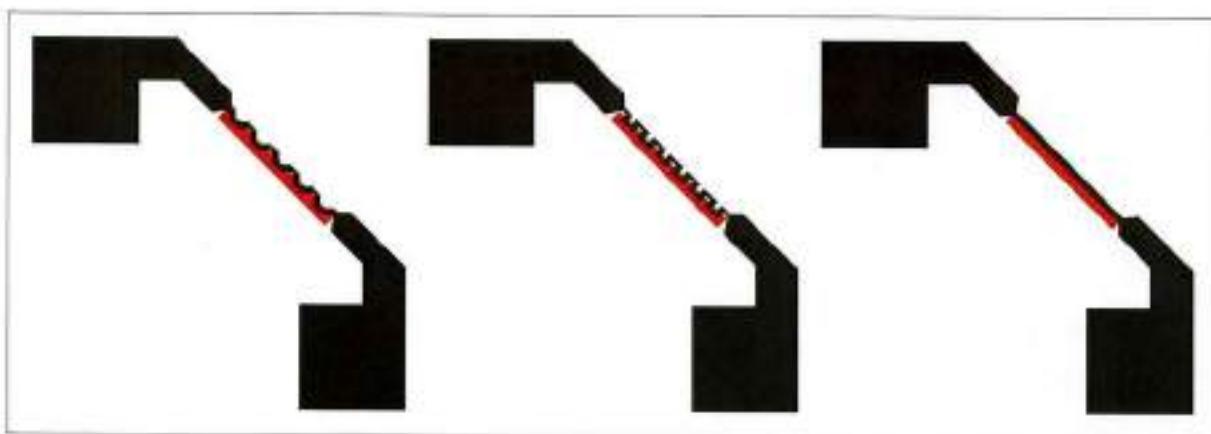


Figura 3.1: Filamentos invalidados ao fornecerem caminhos para a corrente elétrica sem alternância de planos, seja por erro de alinhamento nos casos da esquerda e centro, seja por projeto, caso da direita.

E já que a questão do alinhamento foi tocada, vale citar um possível erro que não pode ser verificado. A máscara usada como barreira de proteção na 5^a etapa e a utilizada na abertura da cavidade para inserção do filamento na 13^a são uma o negativo da outra. Dessa forma, caso aconteça algum pequeno desajuste no alinhamento a corrosão em RIE poderá abrir um vão entre o degrau projetado para suportar o filamento e a superfície do revestimento inferior, podendo causar a interrupção da camada de cromo depositada para confecção do filamento naquele ponto.

Por último, como o projeto dessas microlâmpadas foi feito para uma emissão paralela ao plano do silício e levando em consideração a baixa potência elétrica transferida ao filamento por conta de sua fragilidade, é válido ressaltar que a verificação e registro do funcionamento do dispositivo foram prejudicados.

Ênfase pode ser dada nos trabalhos complementares que vieram não somente ao encontro dessas expectativas, mas também para ampliar o leque de possibilidade nessa tecnologia. Com o tratamento de imersão rápida em ácido nítrico, eliminou-se o resíduo polimérico resultante das corrosões por RIE e obtiveram-se superfícies de filmes mais lisas, melhorando com isso também o contato entre as camadas. Foi ele também que possibilitou a utilização do mascaramento por cobre, uma vez que a formação de resíduos com esse material era ainda maior.

Em relação a trabalhos futuros, alguns caminhos podem ser sugeridos quanto a melhorias neste processo:

- Novas máscaras para a confecção dos filamentos de forma que estes sejam implementados de forma de caminhos paralelos e não seriais. Dessa forma, a trilha mais influente é sempre aquela que tem a menor resistência e, caso ela seja interrompida, haverá outro caminho que se tornará o principal. Além disso, como resistência do filamento aumenta com a temperatura, pode existir um valor ótimo que acenda mais de um caminho melhorando o desempenho da microlâmpada.
- Pode-se trocar a corrosão por RIE realizada na 14^a etapa por outras duas baseadas em DLV. Num primeiro momento seria feita a abertura da cavidade, mas que resultaria em alguma corrosão lateral uma vez que esta corrosão é úmida. Em seguida, já sem a máscara pode-se estudar algum processo de imersão rápida na mesma solução para eliminar as pontas resultantes do processo anterior, já que elas seriam preferencialmente atacadas.

Já quando o foco passa a ser um trabalho novo, um passo óbvio é pensar no extremo oposto com a confecção de um ambiente em que as guias de onda estariam integradas

com sensores de luz, diminuindo novamente a necessidade de todos os aparelhos tecnológicos exigidos para alinhamento de sistemas híbridos. E, com estas duas etapas concluídas, isto é, integração entre emissão e condução de luz e entre condução e sensoriamento de luz, passa a ser possível a realização da construção de um dispositivo completo, com fonte, condução e sensoriamento de luz integrados.

Assim, como um trabalho voltado à pesquisa, pode-se chegar a algumas conclusões em relação ao projeto que foi realizado no sentido de se propor melhorias ou formas de se contornar os obstáculos encontrados. Ainda não é possível dizer se as microlâmpadas incandescentes verticais são viáveis, porém o caminho indica que sim, essas estruturas são possíveis, e pode-se agora rumar para um novo patamar na busca de um processo robusto.

Referências Bibliográficas

- [Betanzo 2003] BETANZO, C. R. *Corrosão por plasma para tecnologias CMOS e microssistemas*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2003.
- [Carvalho 2008] CARVALHO, D. O. de. *Estudo e desenvolvimento de guias de onda AR-ROW, com camadas anti-resonantes de a-SiC:H e TiO_x, para aplicação em dispositivos de óptica integrada*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.
- [Chávez 1996] CHÁVEZ, M. I. A. *Deposição e caracterização de filmes de SiO₂ crescidos pela técnica de PECVD a baixa temperatura*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1996.
- [Chávez 2000] CHÁVEZ, M. I. A. *Estudo e otimização das propriedades estruturais, ópticas e elétricas de películas de SiO_xNy depositadas por PECVD para aplicações em dispositivos MOS, microestruturas e guias de onda*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
- [Gollub 2010] GOLLUB, A. *Desenvolvimento de microlâmpadas incandescentes em substrato de silício*. [S.I.], 2010.
- [Gollub 2010] GOLLUB, A. *Desenvolvimento de uma fonte de luz em substrato de silício monocristalino*. [S.I.], 2010.
- [Medina 2011] MEDINA, H. B. *Estudo de viabilidade de integração de micro-lâmpadas incandescentes com filtro interferenciais*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.
- [Rehder 2005] REHDER, G. P. *Fabricação e caracterização de MEMS de carbeto de silício (a-SiC:H) obtido por PECVD*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

- [Rehder 2008] REHDER, G. P. *Propriedades termo-mecânicas de filmes finos de A-SiC:C e SiOxNy e Desenvolvimento de MEMS*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.
- [Silva 2008] SILVA, F. J. F. S. da. *Estudos da corrosão anisotrópica do silício frente soluções de KOH e sais metálicos*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

Apêndice A

Máscaras utilizadas no processo

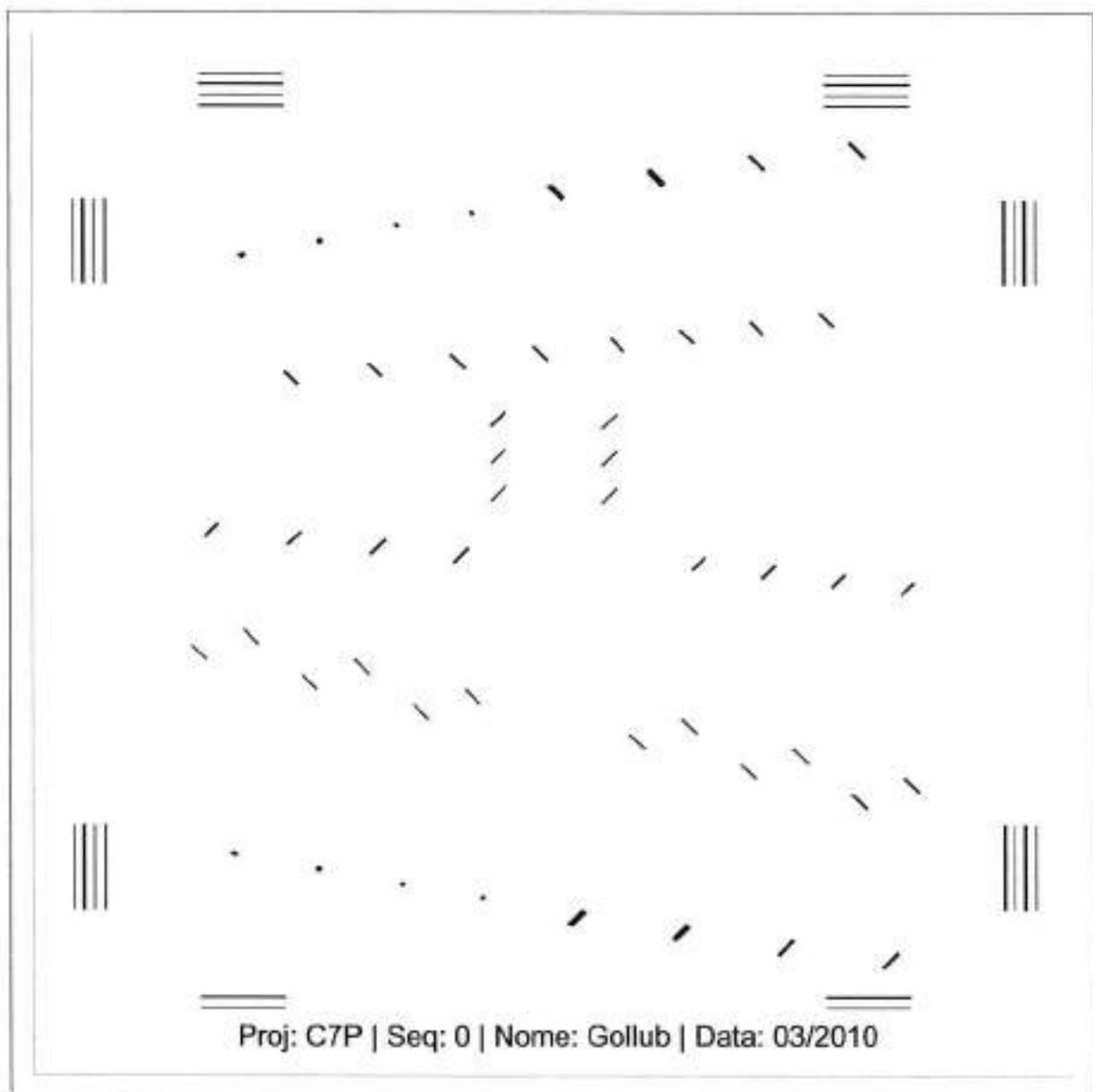


Figura A.1: Máscara para definição de barreiras de proteção a abertura da cavidade de filamento.

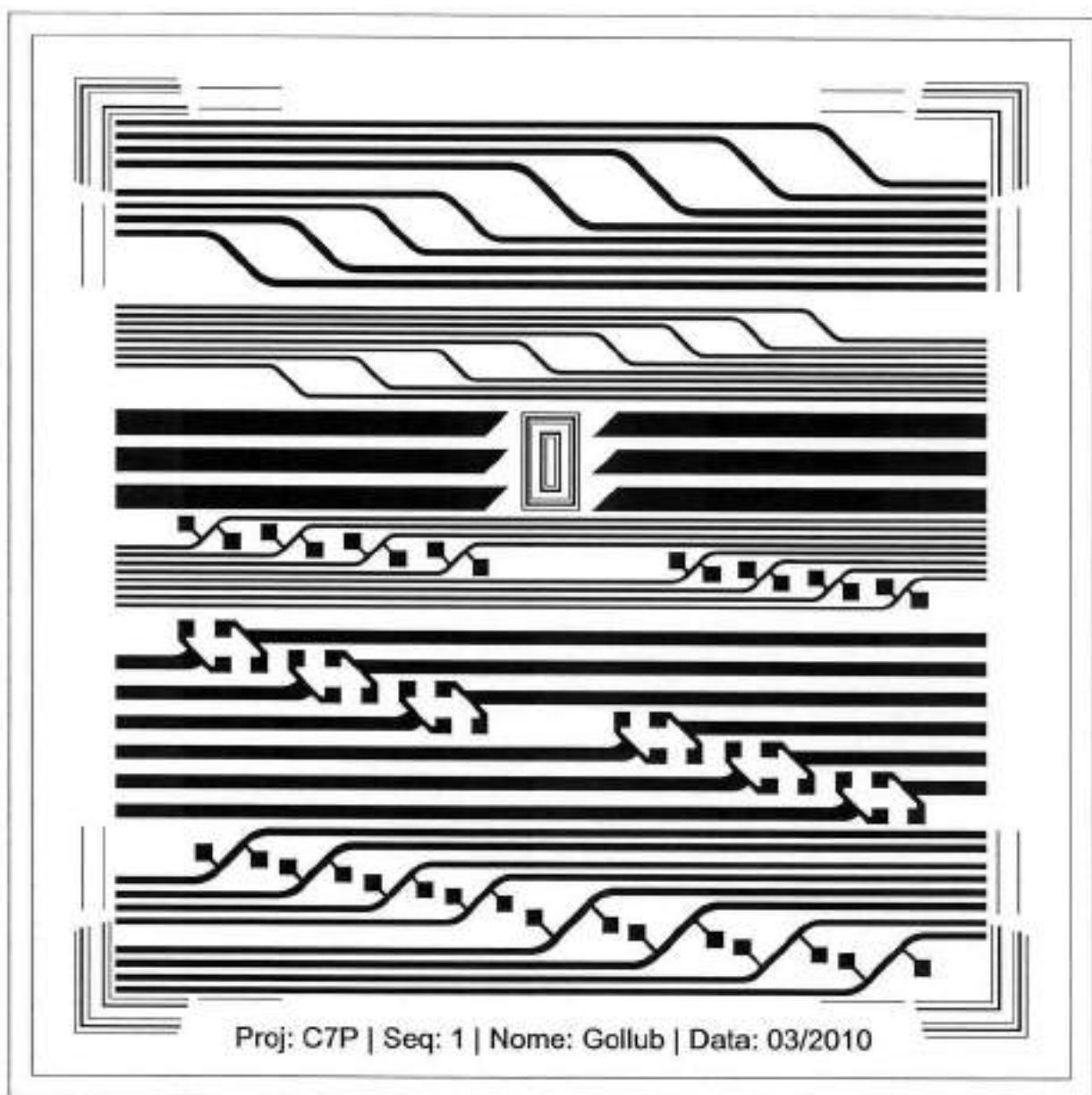


Figura A.2: Máscara para definição dos núcleos das guias de onda.

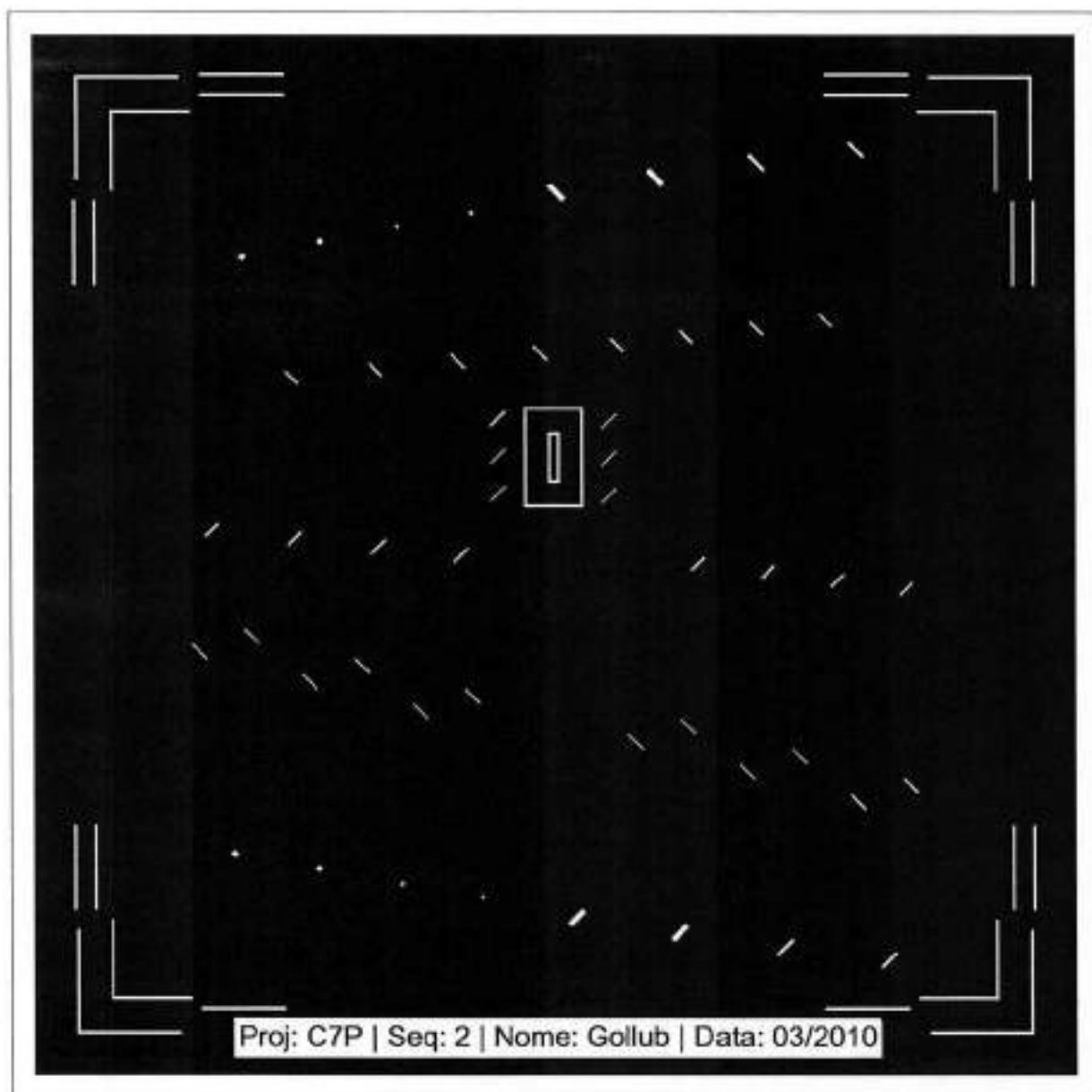


Figura A.3: Máscara para abertura da cavidade onde serão inseridos os filamentos.



Figura A.4: Máscara para definição dos circuitos elétricos

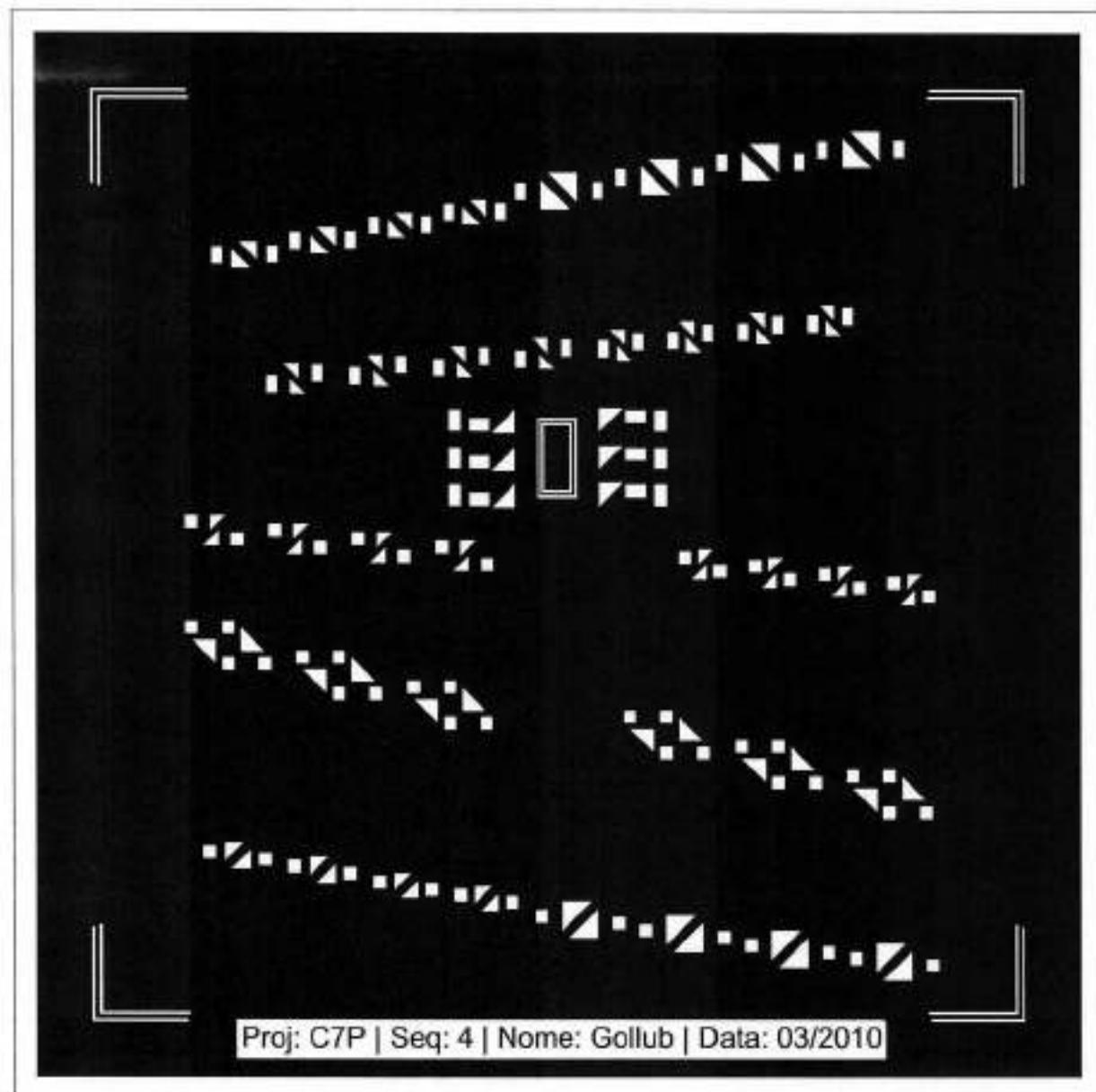


Figura A.5: Máscara para abertura dos contatos e exposição do substrato para corrosão por KOH

Apêndice B

Etapas sugeridas por Alexandre Gollub

Tabela B.1: Etapas de fabricação do dispositivo sugeridas por Alexandre Gollub

Etapa	Descrição	Função
1	corte em quadrados de 1 polegada de lado	preparação do substrato
2	limpeza inicial	
3	oxidação térmica	revestimento inferior
4	deposição de Cr	barreira de proteção (opcional)
5	fotolitografia com máscara M0	
6	remoção do fotorresiste e limpeza	
7	deposição de Si ₃ N ₄	núcleo da guia de onda
8	deposição de Cr	
9	fotolitografia com máscara M1	
10	corrosão por plasma	
11	remoção de fotorresiste, Cr e limpeza	
12	deposição de SiO ₂	revestimento superior
13	deposição de Cr	inserção do filamento
14	fotolitografia com máscara M2	
15	corrosão por plasma	
16	remoção do fotorresiste e do cromo	
17	deposição de Cr	
18	fotolitografia com máscara M3	
19	remoção do fotorresiste	
20	deposição de SiO ₂	proteção do filamento contra oxidação
21	fotolitografia com máscara M4	exposição de contatos e de substrato
22	corrosão por plasma	
23	remoção do fotorresiste e limpeza	
*	repetição das etapas 21 a 23	
24	corrosão por KOH	isolamento térmico do filamento
25	limpeza	