

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

Kaique Figueiredo Sanches

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE MICROSENSOR DE
PRESSÃO COM TECNOLOGIA MEMS PARA FINS
DIDÁTICOS**

São Paulo

2017

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE MICROSENSOR DE PRESSÃO COM TECNOLOGIA MEMS PARA FINS DIDÁTICOS

Kaique Figueiredo Sanches

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, como requisito de obtenção do Título de Graduação em Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos.

Orientador: Prof. Marcelo Bariatto Andrade Fontes.

Coorientador: Prof. Luis da Silva Zambom

São Paulo

2017

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE MICROSENSOR DE PRESSÃO COM TECNOLOGIA MEMS PARA FINS DIDÁTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, como requisito de obtenção do Título de Graduação em Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: ____/____/____.

Banca examinadora:

Prof. (titulação). (Nome do Orientador)

Orientador

(sigla da instituição)

Prof. (titulação). (Nome do membro da banca)

(sigla da instituição)

Prof. (titulação). (Nome do membro da banca)

(sigla da instituição)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por sempre me dar amparo nos momentos mais difíceis, ao meu pai Gilberto, minha mãe Elizete, meus irmãos e aos meus sobrinhos que são a nova geração de mentes pensantes da família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi pelo apoio e por fornecer um ótimo ambiente de estudo para execução deste projeto. Agradeço ao Prof. Dr. Roberto Katsuhiro Yamamoto pela revisão e atualização deste modelo, seguindo as normas vigentes da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Agradeço também aos auxiliares docentes Kleberson Cartolari e Felipe Ribeiro Toloskcz do laboratório de usinagem, pelo auxílio no desenvolvimento de equipamentos. Agradeço ao LSI por disponibilizar os equipamentos para o desenvolvimento do microssensor de pressão. Agradeço também os professores Luis da Silva Zambom e Ricardo Cardoso Rangel, pelo acompanhamento e auxílio nas etapas e processos de fabricação.

RESUMO

O microsensor de pressão é um tipo de medidor de pressão, em comparação com outros sensores ele apresenta uma dimensão reduzida, tempo de resposta mais rápido, mais precisão e baixo custo. Esse dispositivo faz uso da tecnologia MEMS do inglês, *microelectromechanical systems*. Utilizando a tecnologia da microeletrônica montamos um arranjo de resistores difundidos na lâmina de silício no formato da ponte de Wheatstone e com a tecnologia MEMS fizemos a corrosão anisotrópica com KOH no silício para estabelecer uma fina membrana. O princípio de funcionamento parte da deflexão da membrana de silício em função de aplicação de pressão causando assim a variação dimensional nos resistores, de modo que, quando alimentamos o circuito podemos medir essa variação de tensão. Para tornar o processo de fabricação didático foram desenvolvidos alguns materiais. As máscaras para os processos de fotolitografia foram desenvolvidas e testes de impressões foram feitas, a máscara que apresentou melhor qualidade foi a impressa em um fotolito. O *spinner* é utilizado na aplicação de filmes finos na microeletrônica, ele foi desenvolvido e montado com materiais de baixo custo visando também a facilidade de operação. A expositora serve para sensibilizar o resiste da lâmina de silício, ela foi montada com 68 LEDs de UV. O suporte de PTFE serve para proteger uma das faces da lâmina de silício, para que ela não sofra com os processos de corrosão. Através das etapas e processos foram estabelecidos 12 sensores de pressão em uma lâmina de 3 polegadas, com a corrosão anisotrópica obteve-se uma membrana de 214,9 μm . Um arranjo foi montado para a análise elétrica do microsensor, fazendo uso de pesos metálicos, foi aplicada uma força na membrana de silício e medida a variação de tensão. Dos 12 sensores estabelecidos 8 se mostraram funcionais, isso se dá pela limitação de alinhamento no processo de fabricação. Todo processo de fabricação se mostrou funcional e viável para fins didáticos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sensor de pressão aplicado para medir a pressão de pneus.....	19
Figura 2 - Diagrama de blocos do sensor de pressão.	20
Figura 3 - Ponte de Wheatstone, posicionamento dos resistores e membrana corroída.	21
Figura 4 - Consumo do silício na oxidação térmica.	27
Figura 5 - Espessura do óxido em função do tempo e regimes de na oxidação.	28
Figura 6 - Esquema de um forno de oxidação seca.	29
Figura 7 - Esquema de um forno de oxidação úmida.	30
Figura 8 - Fluxograma do processo de fotolitografia.....	31
Figura 9 - Comparação entre fotorresiste positivo e negativo.	32
Figura 10 - Ilustração da difusão de dopantes.....	33
Figura 11 - Plano cristalográfico do silício.	37
Figura 12 - Configuração de cores.	40
Figura 13 - Layout das fotomáscaras unitária.....	41
Figura 14 - Layout definitivo da fotomáscara.....	41
Figura 15 - Transparência obtida por impressão a laser.	42
Figura 16 - Transparência obtida por impressão com jato de tinta.....	43
Figura 17 – Fotolito obtido por impressão em gráfica especialista.	43
Figura 18 - Circulador e arranjo para manter a solução aquecida.....	44
Figura 19 - Suporte de PTFE usinado.	45
Figura 20 - Posicionamento do anel na base do suporte.....	45
Figura 21 - Posicionamento da lâmina no suporte.	46
Figura 22 - Posicionamento da parte superior do suporte.....	46
Figura 23 - Fixação com os parafusos.....	47
Figura 24 - Suporte de acrílico, 3 parafusos, 3 porcas e 6 arruelas.	48
Figura 25 - Suporte montado.....	48
Figura 26 - Pesos de 50 g.	49
Figura 27 - Arranjo para medição dos sensores.....	49
Figura 28 - Pontas de prova para medição.....	50
Figura 29 - Máscaras de proteção para simulação dos processos litográficos.....	51
Figura 30 - Lista da sequência de processos para simulação.....	52
Figura 31 - Etapas e processos simulados pelo SimMems.	53

Figura 32 - Cortes na simulação do microsensor de pressão.....	53
Figura 33 - Sistema de aquecimento para solução de KOH.....	66
Figura 34 – Lâmina corroída.....	67
Figura 35 - Definição dos micros sensores e piezoresistores.	68
Figura 36 - Tensão em função da massa do sensor 4.....	71
Figura 37 - Tensão em função da pressão.	73
Figura 38 - Tensão em função da pressão.	73
Figura 39 - Motor de HD.	78
Figura 40 - ESC (Eletronic speed control)	79
Figura 41 - Arduino UNO.	80
Figura 42 - Programa para controlar o motor de HD.	80
Figura 43 - Arranjo experimental para medir a velocidade do motor de HD.	81
Figura 44 - - Velocidade em função da resistência.....	82
Figura 45 - Tentativa de furação do eixo do motor com torno.	83
Figura 46 - Processo de eletroerosão para a furação do eixo do motor de HD	84
Figura 47 - Motor desmontado e eixo central perfurado.	84
Figura 48 - Base de polipropileno para fixação do motor no sistema de vácuo.....	85
Figura 49 - Válvula para controle de pressão.	86
Figura 50 - Chuck para fixação da lâmina de silício.	86
Figura 51 - Spinner montado.	87
Figura 52 - Arranjo com 68 LEDs de U.V.	88
Figura 53 - Parte interna da alinhadora com os LEDs.	89
Figura 54 - Medição da intensidade dos raios U.V. em 5 pontos da lâmina.	89
Figura 55 - Resultado da exposição e revelação do resiste na lâmina de silício.	90
Figura 56 - Ilustração da corrosão anisotrópica.....	91
Figura 57 - Definições das aberturas, profundidade de corrosão e angulo formado na corrosão anisotrópica.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Unidade de pressão e fator de conversão para Pa.	23
Tabela 2 - Taxa de corrosão do silício.....	38
Tabela 3 - Taxa de corrosão do óxido de silício.	38
Tabela 4 - Espessura medida por interferometria.....	65
Tabela 5 – Espessura medida por perfilometria.	65
Tabela 6 - Valor ôhmico dos resistores de cada microssensor de pressão.....	69
Tabela 7 - Variação de tensão em função da massa dos sensores 1,2 e 3.	70
Tabela 8 - Variação de tensão em função da massa dos sensores 4,5 e 7.	70
Tabela 9 - Variação de tensão em função da massa dos sensores 1,2 e 3.	70
Tabela 10 - Calculo da força e pressão.	72
Tabela 11 - Velocidade em função da resistência.	82

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Microestruturas no dia a dia?	15
1.1.1	Reflexão sobre o conto	15
1.2	O que são MEMS ou MST?	16
1.3	Por que utilizar o Si?	17
1.4	O que é sensor de pressão com tecnologia MEMS?	18
1.5	Tipos de sensores de pressão	19
1.5.1	Sensores piezorresistivos	19
1.5.2	Sensores piezoelétricos	19
1.5.3	Sensores capacitivos	20
1.6	Como o microsensor de pressão com tecnologia MEMS funciona?	20
1.7	Objetivos	21
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	22
2.1	Medida e medidores de pressão	22
2.1.1	Histórico	22
2.1.2	Definição de pressão	22
2.2	Etapas e processos de fabricação	23
2.2.1	Limpeza da lâmina de silício	24
2.2.1.1	Água DI	24
2.2.1.2	Solução Piranha	24
2.2.1.3	Solução de HF	24
2.2.1.4	RCA-1 ou SC-1 (Standard Clean 1)	25
2.2.1.5	RCA-2 ou SC-2 (Standard Clean 2)	25
2.2.2	Oxidação da lâmina de silício	26
2.2.3	Litografia:	30
2.2.4	Dopagem:	33
2.2.5	Deposição de alumínio:	34
2.2.6	Remoção do alumínio:	35
2.2.7	Corrosão da face rugosa:	36
3	METODOLOGIA.....	39

3.1 Materiais e métodos.....	39
3.1.1 Desenvolvimento e fabricação da máscara/fotolito.....	39
3.1.2 Desenvolvimento e montagem “banho maria”	44
3.1.3 Desenvolvimento e fabricação do suporte PTFE	44
3.1.4 Arranjo para obtenção de medidas do microsensor de pressão	47
3.2 Simulação das etapas e processos.....	50
3.2.1 Introdução ao simulador	50
3.2.2 Simulação.....	51
3.2.3 Resultados obtidos na simulação:	52
3.3 Procedimentos Experimentais	54
3.3.1 Limpeza da lâmina.....	54
3.3.2 Oxidação da lâmina	55
3.3.3 Fotolitografia	56
3.3.4 Dopagem	58
3.3.5 Deposição de alumínio	59
3.3.6 Fotolitografia e corrosão do alumínio.....	60
3.3.7 Fotolitografia e corrosão da face rugosa da lâmina	62
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1 Resultados das etapas e processos	65
4.2 Medições elétricas no microsensor de pressão	68
5 CONCLUSÕES.....	74
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	74
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
7 ANEXOS.....	78
7.1 Desenvolvimento e fabricação do spinner	78
7.2 Desenvolvimento e montagem da alinhadora/Expositora	88
7.3 Definição da abertura dimensional final da membrana de silício	91

1 INTRODUÇÃO

1.1 Microestruturas no dia a dia?

João é um senhor aposentado. O sonho dele e de sua amada esposa, Maria, é viajar pelo mundo de carro, mas para isso eles querem comprar um carro mais novo e confortável para essa viagem.

Já na concessionária eles olham diversos modelos, e acabam optando por um carro completo, o mais moderno do ano.

Ambos estavam muito satisfeitos com a sua nova aquisição e otimistas com o início da jornada. Na estrada eles desfrutavam de toda tecnologia que o carro possuía, porém enquanto dirigia, João sentiu uma forte dor no peito, tal dor que o fez perder o controle do carro e bater na traseira de um caminhão. O impacto foi forte, porém os *air bags* foram acionados protegendo-os de danos maiores.

Em pouco tempo a ambulância estava fazendo o resgate. Maria não havia sofrido nenhum arranhão, porém João ainda estava com dor no peito.

Dentro da ambulância o enfermeiro prendia os equipamentos no Sr. João, ele percebeu que a pressão e batimentos cardíacos estavam desregulados, ministrando assim uma dose precisa e controlada de um medicamento.

Chegando no hospital o Sr. João foi encaminhado diretamente para uma sala de cirurgia, onde passou por diversos procedimentos para salvar a sua vida. Quando ele acordou estava já no quarto com a sua esposa, feliz com a sua melhora a Sra. Maria revelou ao João que o médico havia implantado alguns equipamentos que controlariam seus batimentos cardíacos e que dosam automaticamente a quantidade de medicamento que ele deveria tomar, desse modo João poderia ter uma vida comum livre de preocupações.

1.1.1 Reflexão sobre o conto

Esta breve história serve para refletirmos sobre a quantidade de tecnologia que nos rodeia e o modo que ela nos toca. O papel dos dispositivos e sistemas miniaturizados não é muito aparente no decorrer da história, porém eles exercem um

papel fundamental. As circunstâncias da história exigem esses dispositivos em muitas e distintas ocasiões. Por exemplo:

- Hoje em dia, os automóveis vêm com diversos sensores: sensor de pressão (para indicar a pressão dos pneus), giroscópio e bússola (para auxiliar na navegação com GPS), entre outros. No caso do Sr. João, o sensor de aceleração fez com que os *air bags* fossem acionados no momento preciso evitando, assim, maiores danos aos passageiros [1].

- Dentro da ambulância vemos diversos equipamentos que são miniaturizados. O sensor de pressão que mede a pressão arterial, outro sensor de pressão similar que mede a pressão do motor, otimizando, desta forma, a quantidade de ar e combustível. O giroscópio e a bússola auxiliam, através do GPS, para pegar a rota mais curta e rápida e ajudam também a ambulância manter a sua estabilidade durante o trajeto. Enquanto a válvula miniaturizada controla a quantidade de medicamento com uma dosagem exata [1,2].

- No hospital temos uma grande quantidade de equipamentos em miniatura. As microcâmeras ajudam na visualização de espaços muito confinados exercendo o mínimo de danos nos organismos das pessoas e com a ajuda de micropinças e bisturis, procedimentos que antes eram considerados impossíveis podem ser feitos. Com a ajuda dos equipamentos proporcionados pelo avanço da tecnologia, o Sr. João terá mais conforto e menos preocupações no seu dia-a-dia [1].

1.2 O que são MEMS ou MST?

Nos Estados Unidos a tecnologia é conhecida como *microelectromechanical systems* (MEMS) e na Europa é chamada de *microsystems technology* (MST). Indiferente da nomenclatura adotada, sabemos que a tecnologia MEMS é algo mais amplo do que a simples miniaturização de estruturas, podemos tratá-los simultaneamente como ferramenta, sendo que é um produto físico e uma metodologia, isso tudo integrado a uma coisa só. Para desenvolver um MEMS utilizamos de várias sequências de técnicas e processos, sendo que esses produtos muitas vezes são especializados e exclusivo, de tal modo que não se acha em qualquer loja de componentes eletrônicos [1,2,4].

Os dispositivos MEMS possuem várias características distintas, em geral, são sistemas em miniatura que envolvem um ou vários componentes ou estruturas micromecanizadas. Eles estão presentes em locais de grande importância, porém um MEMS, por si só, tem aplicação limitada. Geralmente eles são destinados a funções onde outros equipamentos maiores não conseguem atuar, sendo assim, há diversos tipos de encapsulamentos para determinadas funções. Os MEMS podem ser integrados com componentes eletrônicos, desse modo, ele apresenta um melhor desempenho e se torna um microssistema completo. [1]

A tecnologia das microestruturas vem se desenvolvendo muito nos últimos anos. Um exemplo notável da evolução é o sistema de acionamento de *air bags*. Os primeiros sensores eram apenas interruptores mecânicos, mas evoluíram para sensores micromecânicos que medem diretamente a aceleração, reduzindo assim o tamanho e o preço e melhorando a precisão e confiabilidade [2,4].

1.3 Por que utilizar o Si?

Micromáquinas são montadas em diversos materiais como cerâmicas, polímeros, metais entre outros. Então, por que o silício é tão fortemente associado aos MEMS?

Podemos ver os principais motivos dessa escolha:

- Há um amplo uso na indústria de microeletrônica;
- Suas propriedades elétricas são bem conhecidas e controladas;
- Existe um vasto conhecimento do material;
- Tem contabilidade com os processos de fabricação na microeletrônica;
- Possui propriedades mecânicas desejáveis.

Um ponto essencial são as qualidades mecânicas do silício. O silício monocristalino é elástico (até o ponto de fratura), chega a ser mais leve que o alumínio e tem a elasticidade comparada com a do aço inoxidável. Suas propriedades mecânicas são anisotrópicas, ou seja, depende mecanicamente da orientação de seu plano cristalográfico [1,4,10].

O silício existe em três formas: cristalino, amorfo e policristalino.

- O substrato de silício cristalino possui uma alta pureza e estão disponíveis como lâminas circulares de diversos diâmetros e espessuras.

- O silício amorfo não possui uma forma cristalina regular, ao contrário do substrato cristalino, o amorfo não apresenta nenhuma orientação, contendo assim muitos defeitos. Seu uso principal é em células solares, fotossensores e *displays* de cristal líquido.

- O silício policristalino apresenta diversos grãos e dentro de cada grão há uma orientação cristalográfica.

Tanto o silício amorfo quanto o policristalino podem ser depositados como filmes finos, geralmente com uma espessura menor que 5 μm .

1.4 O que é sensor de pressão com tecnologia MEMS?

Existem diversos tipos de medidores de pressão, cada qual possuindo sua tecnologia e aplicação. O microsensor vem para atuar em locais onde os medidores comuns não conseguem chegar. Por ser fabricado com a tecnologia MEMS, ele tem as dimensões reduzidas e uma boa precisão em suas medidas. Um exemplo de aplicação do microsensor é em pneus de carro, informando ao motorista se o seu pneu está com uma pressão adequada (Figura 1) [3,10].

Figura 1 - Sensor de pressão aplicado para medir a pressão de pneus.



Fonte: <https://multimidia.pirilamponet.com.br/br/acessorios-e-espelhamento/50-sensor-de-pressao-e-temperatura-dos-pneus-tpms-800.html> [5].

1.5 Tipos de sensores de pressão

Existem diversos sensores de pressão com diversos princípios de funcionamento. Nesse tópico veremos sucintamente alguns tipos de sensores de pressão e seu princípio de funcionamento.

1.5.1 Sensores piezorresistivos

A piezoresistividade é um efeito presente em vários materiais que apresentam uma variação de sua resistência quando submetidos a estresses mecânicos. Esse efeito foi descoberto por Lord Kelvin em 1856, porém a primeira aplicação desse efeito somente apareceu em 1930. Esse fenômeno é muito utilizado em *strain gauges*. Além dos *strain gauges* a piezoresistividade é utilizada em sensores que possuem o arranjo de resistores em forma de ponte de Wheatstone [11].

1.5.2 Sensores piezoelétricos

Esse efeito foi descoberto por Jacques e Pierre Curie em 1880 usando quartzo como material. O material piezoelétrico quando submetido a uma força mecânica gera

uma carga elétrica. Transdutores piezoeléticos podem atuar tanto como sensores quanto como atuadores [11].

1.5.3 Sensores capacitivos

Os sensores capacitivos são aqueles que possuem dois eletrodos em paralelo e pode possuir também um dielétrico entre os eletrodos. Através do deslocamento da distância entre os eletrodos ou do meio dielétrico é gerada uma variação de capacitância e essa variação pode ser medida. [11].

1.6 Como o microsensor de pressão com tecnologia MEMS funciona?

A medição de pressão com sensores mecânicos de silício micromecanizados fabricados com a tecnologia MEMS já é bem conhecida. Alguns exemplos de aplicação destes sensores são: monitoramento de pressão dos pneus, controle de processos industriais, monitoramento de sistemas hidráulicos e até medição de pressão sanguínea. O microsensor de pressão converte a deformação do diafragma de silício gerando pela pressão em um sinal elétrico [11].

Figura 2 - Diagrama de blocos expondo o funcionamento do sensor de pressão.

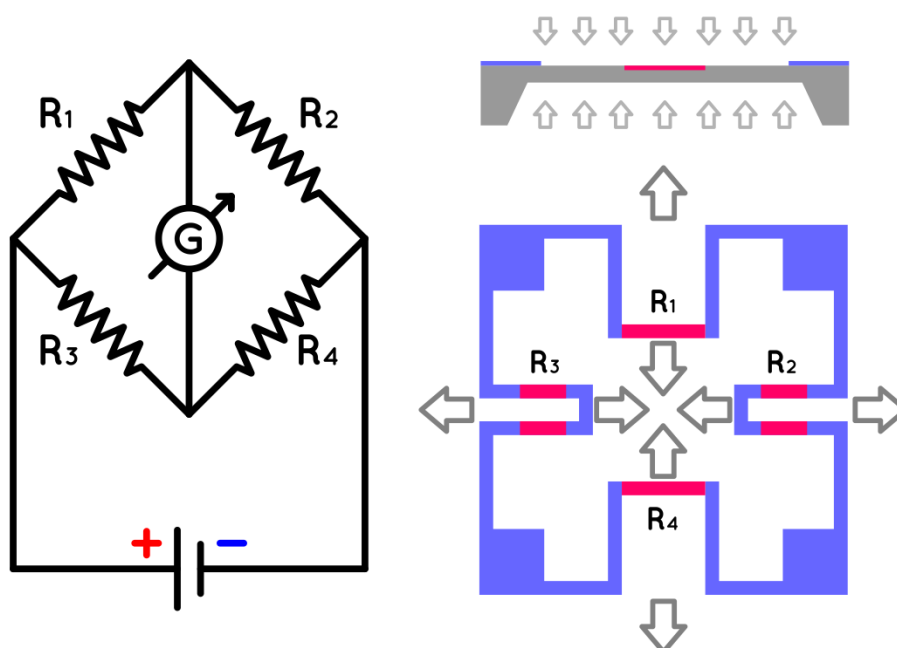


Fonte: O próprio autor.

Este projeto se baseia nas propriedades de alguns materiais, que apresentam variação da resistência quando submetida a algum tipo de estímulo, como por exemplo a pressão. Podemos obter uma relação entre essa variação e calcular ou obter através de *softwares* o valor da pressão aplicada. Os resistores que apresentam

a variação de resistência (piezoresistores), geralmente são de silício policristalino dopado. Podemos também utilizar o próprio silício monocristalino do substrato para estabelecer os resistores, que é o caso deste trabalho. Para obter uma melhor relação entre pressão e resistência montou-se um arranjo de resistores na forma de ponte de Wheatstone (Figura 3). Também é necessário que tenhamos uma fina membrana de silício, que deve chegar aproximadamente a 30 μm , a qual é estabelecida por meio da corrosão anisotrópica do silício com KOH (hidróxido de potássio).

Figura 3 - Ponte de Wheatstone, posicionamento dos resistores e membrana corroída.



Fonte: O próprio autor.

1.7 Objetivos

Este projeto visa o desenvolvimento de microsensores de pressão utilizando a tecnologia MEMS. Tendo como o objetivo abordar a maioria dos conceitos utilizados no curso de Microeletrônica ou Materiais Processos e Componentes Eletrônicos (MPCE). Os equipamentos e dispositivos desenvolvidos ao decorrer deste trabalho serviram de modo acadêmico para o aprofundamento dos conceitos aprendidos no curso e também como auxílio para a disciplina de Processos Eletrônicos Avançados 1 (PEA1), quem tem como foco no desenvolvimento de técnicas e dispositivos com tecnologia MEMS.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Medida e medidores de pressão

Nesse capítulo apresentaremos um breve histórico contendo a definição sobre o estímulo físico relacionado com a pressão e sua definição.

2.1.1 Histórico

O primeiro experimento que foi utilizado para medir pressão foi feito por Evangelista Torricelli em 1643. Através de um tubo de vidro contendo mercúrio, Torricelli percebeu que a atmosfera exercia uma pressão na terra e que a pressão variava com a altitude. Porém foi Blaise Pascal em 1647 que quantificou a influência da pressão de acordo com a altitude. Com a ajuda de seu cunhado, Puy de Dôme, eles mediram a altura de uma coluna de mercúrio invertida na base e no alto de uma montanha. E concluíram que havia a variação de 1 polegada para cada 1000 pés de altitude. O instrumento foi nomeado barômetro e serviu como base para entendimento de pressão que temos hoje.

2.1.2 Definição de pressão

Pressão é definida como sendo a força por unidade de área aplicada a uma superfície.

Equação:

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Pressão é uma grandeza escalar e a sua unidade no sistema internacional (Si) é o Pascal (Pa). Pascal é definido como sendo newton por metro quadrado (N/m²). Outra unidade bastante utilizada em nosso dia a dia é o psi definida como sendo libra-força por polegada quadrada (lbf/pol²). Na (Tabela 1) temos as unidades de pressão e os fatores de conversão para pascal.

Tabela 1 - Unidade de pressão e fator de conversão para Pa.

Unidade	Símbolo	Fator de conversão para Pa
Bar	bar	$1 \cdot 10^5$
Atmosfera	atm	$1,01325 \cdot 10^5$
Milibar	mbar	100
Milímetros de Mercúrio	mmHg	133,32
Polegada de Mercúrio	polHg	3386,39
Libra-força por polegada quadrada	lbf/pol ² (psi)	6894,76
Polegada de água	polH ₂ O	284,8

Fonte: CORAUCCI, G. O. SENSOR DE PRESSÃO MICROELETRÔNICO BASEADO NO EFEITO PIEZORESISTIVO TRANSVERSAL EM SILÍCIO. 2008. 245 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008 [11].

2.2 Etapas e processos de fabricação

Na microeletrônica há diversas etapas e processos de fabricação para obtenção de dispositivos, cada etapa carrega sua particularidade. Neste tópico será abordada toda a teoria envolvida em cada etapa, visando os processos pertinentes para fabricação do microssensor de pressão.

Para tornar as etapas e processos mais didáticos, estas seguiram a ordem cronológica de fabricação do microssensor de pressão, as etapas foram montadas na seguinte ordem (ordem obtida por simulação):

- 1°- Limpeza da lâmina de silício.
- 2°- Oxidação da lâmina de silício.
- 3°- Litografia.
- 4°- Dopagem.
- 5°- Deposição de alumínio.
- 6°- Litografia e remoção do alumínio.
- 7°- Corrosão da face rugosa da lâmina.

Essa ordem foi adotada para facilitar a produção e garantir mais segurança na fabricação do microssensor de pressão. Essa ordem pode ser alterada, porém se a corrosão da face rugosa (7° etapa) for feita antes, isso tornaria a lâmina mais frágil, comprometendo assim a sua resistência para os processos subsequentes.

2.2.1 Limpeza da lâmina de silício

Antes de se iniciar qualquer outro processo de fabricação, a lâmina de silício deve ser limpa. A limpeza serve para remover contaminantes e impurezas que podem estar presentes na lâmina ocasionando defeitos ou dificuldades nas etapas futuras. Utiliza-se quatro soluções químicas de ácidos e bases, altamente concentradas e com pureza elevada (grau eletrônico) [3,7].

2.2.1.1 Água DI

Antes de iniciar a limpeza com as soluções, é feita a limpeza da lâmina com água deionizada (DI), a água mais pura que existe. O processo leva 5 minutos com um fluxo contínuo, assim a solução é diluída parando assim a sua reação. A água DI possui resistividade de 18,2 MΩ.cm a 20°C e deve ficar em fluxo contínuo durante a limpeza. Entre cada processo nas soluções, deve ser feita a limpeza com água DI [7].

2.2.1.2 Solução Piranha

Para remover contaminantes orgânicos da lâmina de silício, utiliza-se a solução chamada de “Piranha”. A lâmina deve ficar submersa por 10 minutos na solução. A solução produz uma reação exotérmica, cuja temperatura ultrapassa 100°C, portanto ela não necessita de aquecimento. O peróxido de hidrogênio oxida a lâmina e este óxido deve ser retirado com a solução de HF [7].

- Composição: $4 \text{H}_2\text{SO}_4 + 1 \text{H}_2\text{O}_2$.

onde: H_2SO_4 = ácido sulfúrico; H_2O_2 = peróxido de hidrogênio (água oxigenada).

- A concentração é dada em mililitros (ml).

2.2.1.3 Solução de HF

A solução de ácido fluorídrico (HF) é utilizada para remover o óxido de silício (SiO_2). Com essa solução removem-se os óxidos gerados pela presença de H_2O_2 nas soluções de limpeza. A lâmina deve ser submersa e levantada até que saia seca (menos de um minuto), pois o silício é hidrofóbico, enquanto o óxido é hidrofílico. Não há necessidade de aquecimento no caso de HF [7].

- Composição: 1 HF + 100 H_2O .

onde: HF = ácido fluorídrico; H_2O = água deionizada (DI).

- A concentração é dada em mililitros (ml).

2.2.1.4 RCA-1 ou SC-1 (Standard Clean 1)

Utiliza-se a solução “Standard Clean 1” (SC-1) para remover contaminantes orgânicos, metálicos e particulados. A lâmina deve ficar submersa por 10 minutos na solução. A solução é aquecida entre 60 e 70°C com hot plate. O hidróxido de amônio remove metais como Cu, Au, Ag, Ni, Cd, Zn, Co e Cr, por meio de formação de um íon complexo solúvel em água. O peróxido de hidrogênio oxida a lâmina de silício e os metais e este óxido deve ser retirado com a solução de HF [7].

- Composição: 4 NH_4OH + 1 H_2O_2 + 1 H_2O .

onde: NH_4OH = hidróxido de amônio; H_2O_2 = peróxido de hidrogênio (água oxigenada); H_2O = água deionizada (DI).

- A concentração é dada em mililitros (ml).

2.2.1.5 RCA-2 ou SC-2 (Standard Clean 2)

Para remover contaminantes metálicos não removidos na etapa anterior (SC-1) utiliza-se a solução “Standard Clean 2” (SC-2). A lâmina fica submersa por 10 minutos na solução. A solução deve ser aquecida entre 65 e 70°C com *hot plate*. O ácido clorídrico remove metais como Fe, Al e Mg, por meio de formação de um íon complexo solúvel em água. O peróxido de hidrogênio oxida a lâmina de silício e os metais e este óxido deve ser retirado com a solução de HF [7].

- Composição: $4 \text{ HCl} + 1 \text{ H}_2\text{O}_2 + 1 \text{ H}_2\text{O}$.

Onde: HCl = ácido clorídrico; H_2O_2 = peróxido de hidrogênio (água oxigenada); H_2O = água deionizada (DI).

No final de cada processo de limpeza deve-se secar a lâmina de silício, para isso se utiliza o jato de nitrogênio, a pressão do nitrogênio deve ser controlada, pois se for aplicada uma pressão muito alta há o risco de quebrar a lâmina.

2.2.2 Oxidação da lâmina de silício

A oxidação é uma parte muito importante na fabricação de dispositivos semicondutores e de dispositivos MEMS. O óxido pode servir como proteção para os processos de fabricação subsequentes. Existem quatro técnicas principais para a obtenção do dióxido de silício:

- Oxidação térmica;
- Deposição química a vapor (CVD);
- Sputtering;
- Spin on glass.

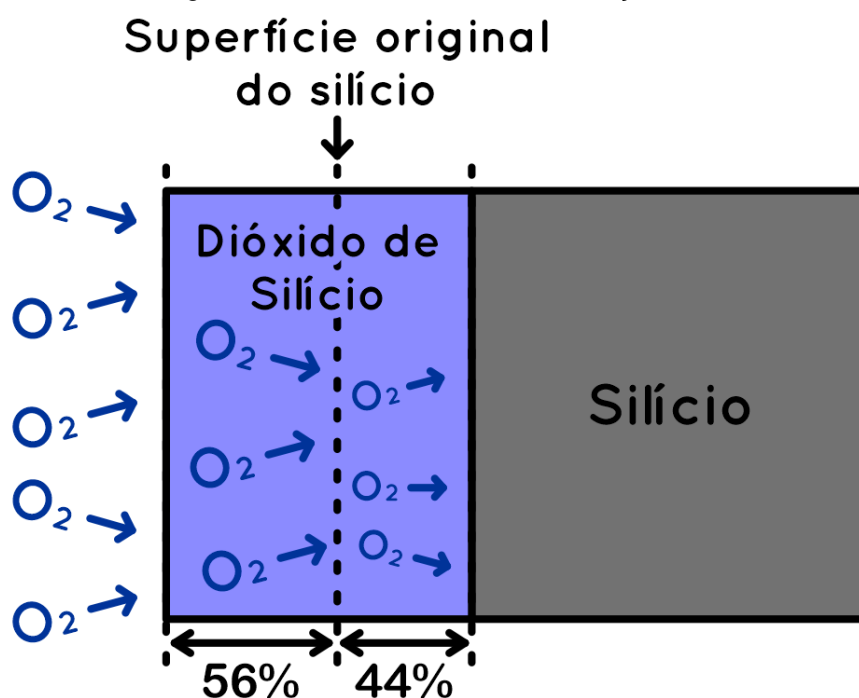
Cada método possui sua particularidade. Há diversas aplicações para o óxido de silício, por exemplo:

- Máscara para difusão e implantação iônica de dopantes;
- Camada de passivação da superfície;
- Isolação de dispositivos;
- Óxido de porta em transistores MOS;
- Isolação elétrica em metalização multinível;
- Óxido enterrado em dispositivos SOI.

No projeto o óxido de silício é utilizado como máscara de proteção. Esta máscara tem o papel fundamental no processo de corrosão da face rugosa da lâmina e na difusão de dopantes. A técnica optada foi a oxidação térmica, pois com essa técnica pode se obter um óxido de qualidade, resistente aos processos e há disponibilidade de equipamento.

A oxidação térmica tem a característica de consumir 44% da espessura da superfície do silício, crescendo assim 56% para fora da linha original do silício.

Figura 4 - Consumo do silício na oxidação térmica.



Fonte: O próprio autor.

O tempo de oxidação e a espessura de crescimento de óxido de silício são regidos por duas equações:

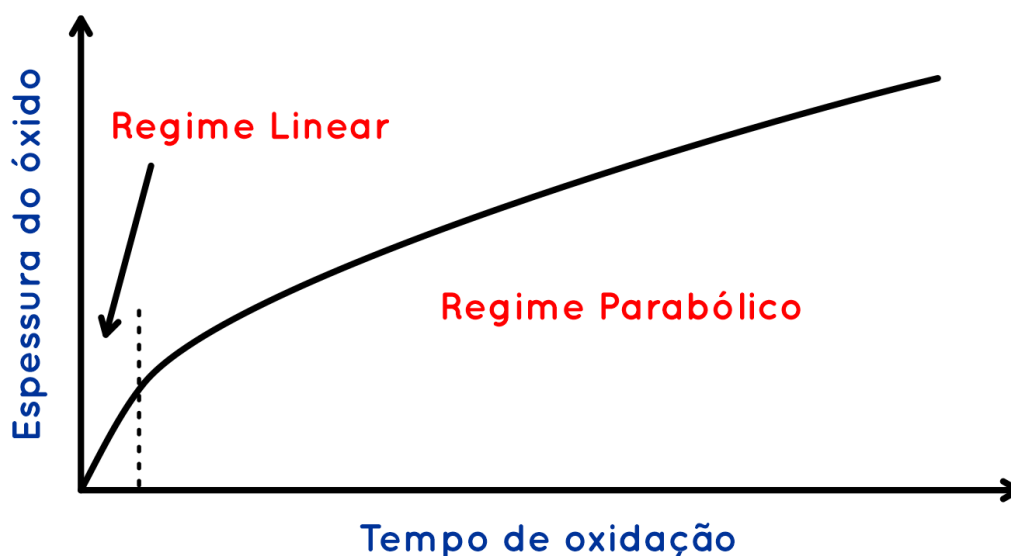
- Para tempos curtos de oxidação o processo é limitado pela reação química que segue a característica de regime linear (Figura 5). A equação que rege o regime linear é a (Equação 2.2) [7]:

Equação:
$$X = \frac{B}{A}t \quad (2.2)$$

- Para tempos longos de oxidação, o processo é limitado por difusão que segue a característica de regime parabólico (Figura 5). A equação que rege o regime parabólico é a (Equação 2.3) [7]:

Equação:
$$X = \sqrt{Bt} \quad (2.3)$$

Figura 5 - Espessura do óxido em função do tempo e regimes de na oxidação.



Fonte: O próprio autor.

Na oxidação térmica há duas subdivisões de técnicas:

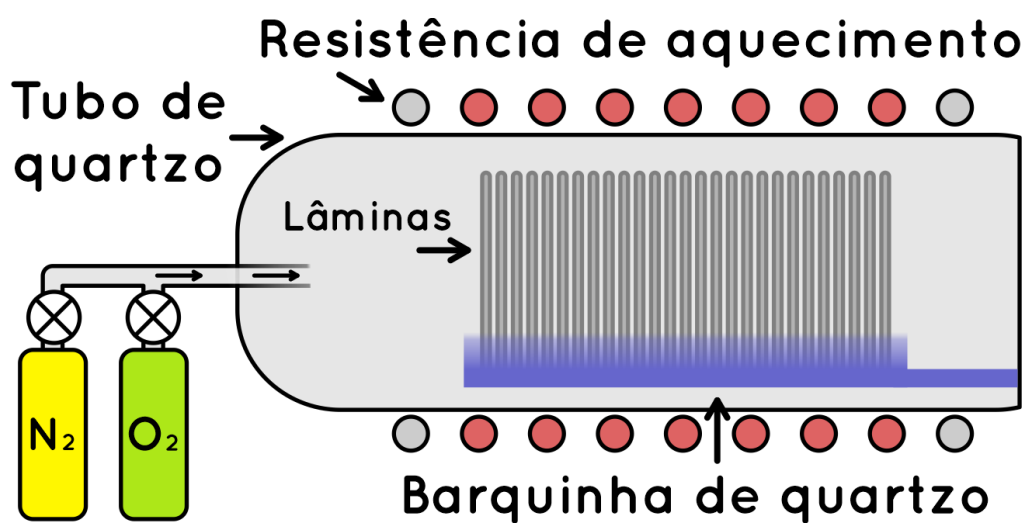
- Oxidação seca → Utiliza oxigênio (O_2).
- Oxidação úmida ou a vapor → Utiliza oxigênio (O_2) e hidrogênio (H_2), que reagem a alta temperatura formando vapor de água (H_2O).

Tanto na oxidação seca quanto na úmida é utilizado o mesmo forno, porém alterando os gases e vapores para obter assim o resultado desejado. Neste forno pode-se processar várias lâminas de uma vez. Como a transferência de calor é por condução, pode ocorrer choque térmico na lâmina ocasionando trincas ou quebra, por

isso a barquinha de quartzo que contém as lâminas de silício deve ser introduzida vagarosamente e em velocidade constante.

Para fazer a oxidação seca utiliza-se oxigênio (O_2) e como gás de arraste é utilizado o fluxo constante de nitrogênio (N_2), o nitrogênio também ajuda a evitar a entrada de contaminantes no forno de oxidação. A (Figura 6) ilustra esquematicamente o forno de oxidação seca [7].

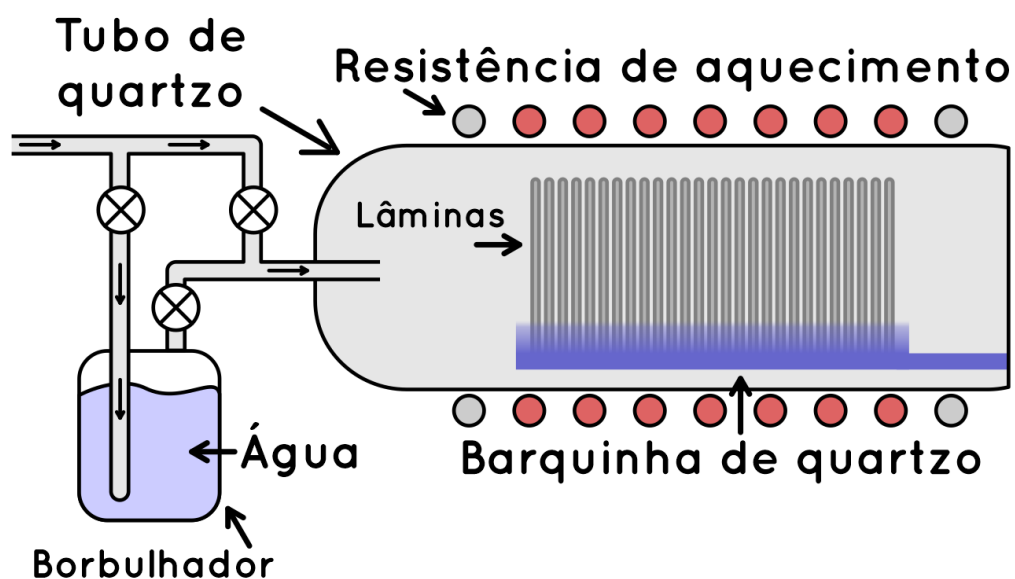
Figura 6 - Esquema de um forno de oxidação seca.



Fonte: O próprio autor.

No forno de oxidação úmida a água é aquecida a $90^{\circ}C$ e o seu vapor é arrastado pelo gás de arraste tipicamente o nitrogênio (N_2). A (Figura 7) ilustra esquematicamente o forno de oxidação úmida [7].

Figura 7 - Esquema de um forno de oxidação úmida.



Fonte: O próprio autor.

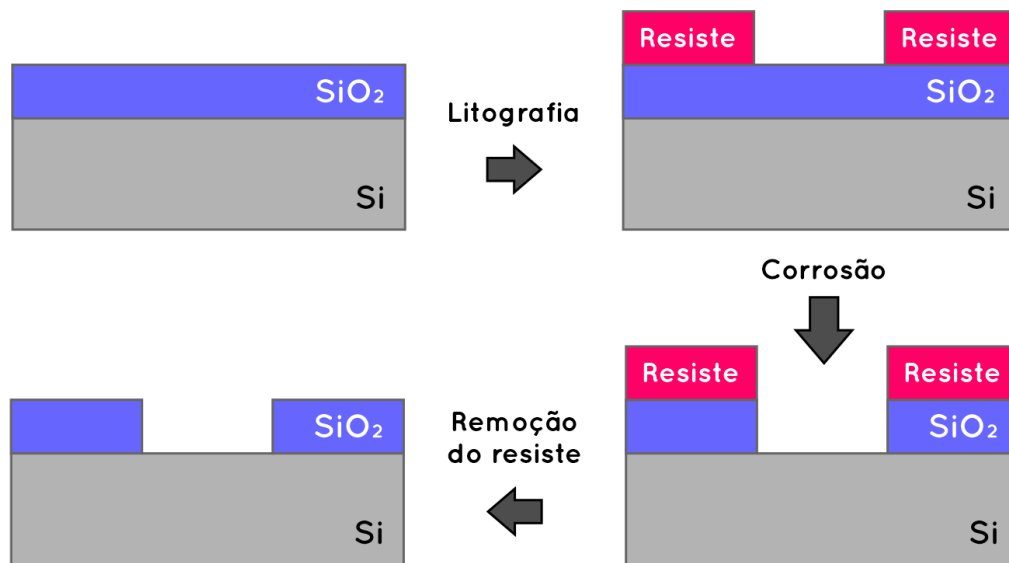
2.2.3 Litografia:

A litografia é a etapa que consiste na obtenção de uma máscara de resiste sobre a camada de óxido de silício (SiO_2), essa máscara contém os padrões geométricos que determinarão a área que vai ser corroída.

O objetivo da máscara de resiste é proteger regiões do óxido contra a corrosão, que é a etapa de processo subsequente à litografia para remover as regiões não protegidas pela máscara.

O resiste é aplicado por um equipamento chamado spinner, através da alta rotação do spinner, por um determinado tempo é gerado um filme fino de resiste.

Figura 8 - Fluxograma do processo de fotolitografia.



Fonte: O próprio autor.

Existem basicamente três tipos de litografia:

- Litografia óptica:

→ Utiliza luz ultravioleta (UV) na exposição do resiste.

→ É a litografia mais utilizada na microeletrônica devido ao seu baixo custo.

- Litografia de feixe de elétrons.

→ Utiliza feixe de elétrons na exposição do resiste.

→ É utilizada na fabricação de fotomáscaras e protótipos de dispositivos para teste.

- Litografia de raios X.

→ Utiliza raios X na exposição do resiste.

→ Encontra aplicação na fabricação de micromáquinas (MEMS).

Neste projeto foi utilizada a litografia óptica. O resiste utilizado na litografia óptica recebe a denominação de fotorresiste, porque a luz ultravioleta usada na exposição do resiste é constituído por fótons.

Há dois tipos de fotorresiste:

- Fotorresiste positivo:

→ A região exposta ao UV se torna solúvel ao revelador.

→ A imagem formada é igual à da fotomáscara.

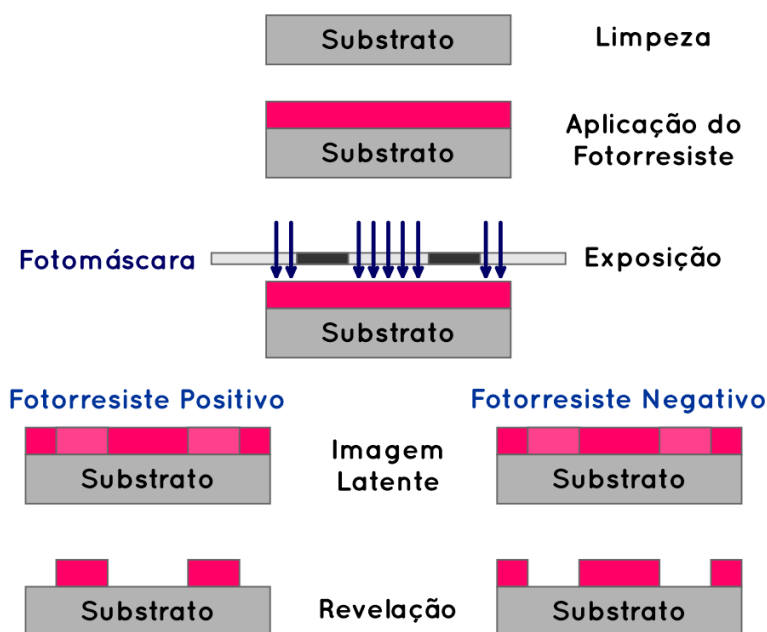
- Fotorresiste negativo:

→ A região exposta ao UV se torna insolúvel ao revelador.

→ A imagem formada é o negativo da fotomáscara.

Através do fluxograma pode-se comparar a relação entre o fotorresiste positivo com o fotorresiste negativo (Figura 9).

Figura 9 - Comparação entre fotorresiste positivo e negativo.



Fonte: O próprio autor.

Para remoção do fotorresiste é feito um banho de aceto aquecida e outro de álcool isopropílico [7].

2.2.4 Dopagem:

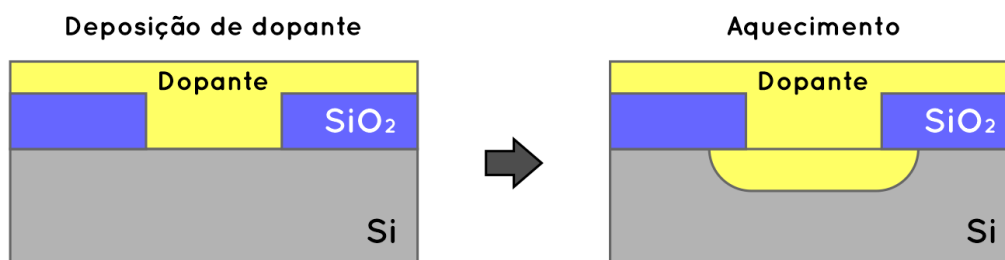
O processo de dopagem serve para modificar as propriedades elétricas do silício por meio da difusão de impurezas na lâmina. Esta etapa serve para se obter um caráter condutor no silício dando assim origem aos resistores difundidos.

Para se obter os resistores é necessário a dopagem do silício com impurezas doadoras, desse modo conseguimos o silício tipo n. As impurezas devem ser pentavalentes, ou seja, possui 5 elétrons na camada de valência, fósforo (P) e arsênio (As) apresentam essa característica.

A difusão térmica baseia-se no movimento espontâneo das partículas da região de alta concentração para a região de baixa concentração, quando a lâmina é submetida a altas temperaturas.

Para aplicação de dopante pode se utilizar o óxido dopado, que é depositado com o spinner (SOG) Spin-On Glass. Para a penetração do dopante a lâmina deve ser aquecida em alta temperatura, durante o aquecimento os átomos dopantes movem-se da superfície para o cristal de silício via mecanismo de difusão substitucional (Figura 10).

Figura 10 - Ilustração da difusão de dopantes.



Fonte: O próprio autor.

A distribuição de dopante no silício pode ser estimada pela Segunda Lei de Fick:

Equação:
$$\frac{dC}{dt} = D \left[\frac{d^2 C}{dx^2} \right] \quad (2.4)$$

Onde:

C = Concentração de dopante [cm⁻³]

D = Coeficiente de difusão [cm²/s]

X = Distância em relação a superfície da lâmina [m]

t = Tempo de difusão [s]

Há duas soluções para a Segunda Lei de Fick, considerando como concentração constante na superfície ou a dose de dopante constante [7].

2.2.5 Deposição de alumínio:

Para deposição de alumínio pode ser utilizada a evaporação térmica. Este processo consiste na aplicação de uma corrente elétrica que causa o aquecimento de um filamento ou de uma barquinha metálica de tungstênio, ocasionando assim a evaporação do material colocado em cima da barquinha ou filamento. Esse arranjo todo é submetido a uma baixa pressão [7].

A taxa de evaporação é determinada pela expressão:

Equação:
$$R = 5,83 \cdot 10^{-2} \left(\frac{M}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot P_e \quad \left[\frac{g}{cm^2 \cdot s} \right] \quad (2.5)$$

Onde:

M = Massa molecular;

T = Temperatura em Kelvin;

P_e = Pressão de vapor em Torr.

A massa de material necessária para ser depositada, pode ser estimada pela seguinte expressão:

$$\text{Equação:} \quad M = 4 \cdot \pi \cdot h^2 \cdot e \cdot \rho \quad (2.6)$$

Onde:

M = Massa do material;

h = Altura entre o filamento e a lâmina;

e = Espessura do filme fino a ser depositado;

ρ = Densidade do material.

2.2.6 Remoção do alumínio:

Para a remoção do alumínio indesejado da lâmina de silício pode ser utilizada a corrosão aquosa com ácido fosfórico. Esta corrosão possui alta seletividade com o fotorresiste, de modo que, o fotorresiste serve de máscara de proteção. A solução é composta por ácido fosfórico (H₃PO₄), ácido nítrico (HNO₃) e água (H₂O). A solução é aquecida a 40°C [7].

Proporção: 80 H₃PO₄ + 10 H₂O + 15HNO₃;

2.2.7 Corrosão da face rugosa:

A corrosão da face rugosa da lâmina serve para estabelecer a membrana de silício no microssensor. A corrosão mais utilizada para essa finalidade é a corrosão úmida, utilizando soluções químicas. A solução química utilizada é de KOH, essa apresenta um caráter anisotrópico, a anisotropia é um parâmetro que relaciona a taxa de corrosão horizontal com a taxa de corrosão vertical, para o silício com plano cristalino [100]. As paredes do silício, após a corrosão, apresentam uma inclinação de $54,74^\circ$ [3,4,7]. A equação (2.7) define a dimensão da abertura final da membrana de silício quando corroída com KOH. A definição da equação segue em anexo.

Equação:
$$W_o = W_b + 2l \cdot \cot g 54,74^\circ \quad (2.7)$$

Onde:

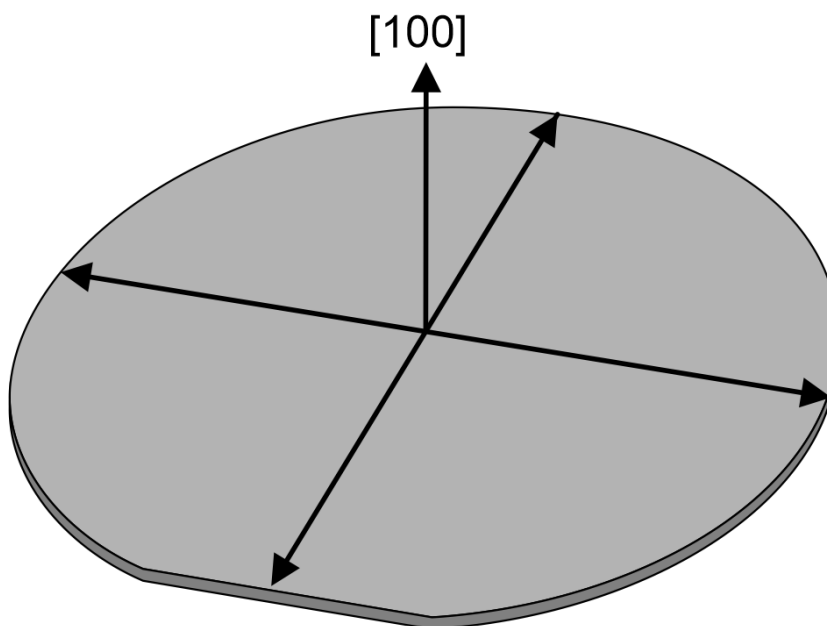
W_o = Abertura da máscara;

W_b = Abertura final na corrosão;

l = Profundidade da corrosão;

A corrosão da lâmina de silício depende da sua orientação cristalográfica. A lâmina utilizada no projeto possui plano cristalino [100] (Figura 11).

Figura 11 - Plano cristalográfico do silício.



Fonte: O próprio autor.

O filme de óxido de silício serve para isolar as áreas que não devem ser corroídas, para isso a lâmina de silício deve possuir uma camada suficientemente espessa, desse modo, ela resistirá ao processo. O cálculo da espessura é feito através da taxa de corrosão dos materiais.

Na corrosão anisotrópica há dois parâmetros principais, a concentração de KOH e a temperatura da corrosão. As mínimas variações nesses parâmetros podem acarretar em resultados não satisfatórios. Para relacionar a temperatura e a concentração utiliza-se duas tabelas que indicam a taxa de corrosão do silício (Tabela 2) e a taxa de corrosão do óxido de silício (Tabela 3) com a solução de KOH [3].

Tabela 2 - Taxa de corrosão do silício.

Silício um/hr									
	Temperatura [°C]								
% KOH	20	30	40	50	60	70,0	80,0	90,0	100,0
10	1,49	3,2	6,7	13,3	25,2	46,0	82,0	140,0	233,0
15	1,56	3,4	7	14	26,5	49,0	86,0	147,0	245,0
20	1,57	3,4	7,1	14	26,7	49,0	86,0	148,0	246,0
25	1,53	3,3	6,9	13,6	25,9	47,0	84,0	144,0	239,0
30	1,44	3,1	6,5	12,8	24,4	45,0	79,0	135,0	225,0
35	1,32	2,9	5,9	11,8	22,3	41,0	72,0	124,0	206,0
40	1,17	2,5	5,3	10,5	19,9	36,0	64,0	110,0	184,0
45	1,01	2,2	4,6	9	17,1	31,0	55,0	95,0	158,0
50	0,84	1,8	3,8	7,5	14,2	26,0	46,0	79,0	131,0
55	0,66	1,4	3	5,9	11,2	21,0	36,0	62,0	104,0
60	0,5	1,1	2,2	4,4	8,4	15,0	27,0	47,0	78,0

Fonte: MADOU, M. Fundamentals of Microfabrication: 1. Ed. New York: CRC Press, 1997 [3].

Tabela 3 - Taxa de corrosão do óxido de silício.

Óxido de Silício um/hr									
	Temperatura [°C]								
% KOH	20	30	40	50	60	70,0	80,0	90,0	100,0
10	0,0004	0,00122	0,0035	0,0092	0,023	0,054	0,123	0,266	0,551
15	0,00063	0,00191	0,0054	0,0144	0,036	0,085	0,193	0,416	0,862
20	0,00088	0,00266	0,0075	0,02	0,05	0,118	0,268	0,578	1,200
25	0,00114	0,00346	0,0098	0,026	0,065	0,154	0,348	0,752	1,560
30	0,00142	0,00432	0,0122	0,0325	0,081	0,193	0,435	0,940	1,950
35	0,00144	0,00437	0,0124	0,0328	0,082	0,195	0,440	0,949	1,970
40	0,00133	0,00403	0,0114	0,0303	0,076	0,180	0,406	0,876	1,820
45	0,00121	0,00367	0,0104	0,0275	0,069	0,163	0,369	0,797	1,650
50	0,00108	0,00328	0,0093	0,0246	0,062	0,146	0,330	0,713	1,480
55	0,00095	0,00287	0,0081	0,0216	0,054	0,128	0,289	0,624	1,290
60	0,00081	0,00245	0,0069	0,0184	0,046	0,109	0,246	0,532	1,100

Fonte: MADOU, M. Fundamentals of Microfabrication: 1. Ed. New York: CRC Press, 1997 [3].

3 METODOLOGIA

3.1 Materiais e métodos

Visando o objetivo deste projeto, em anexo constam alguns equipamentos foram desenvolvidos, montados e testados para possibilitar a fabricação de dispositivos na Faculdade de Tecnologia de São Paulo, porém os equipamentos fabricados não foram usados para confecção do microssensor de pressão que consta neste trabalho. Nesta seção serão expostos os materiais usados, desenvolvidos e métodos adotados para a execução deste trabalho.

3.1.1 Desenvolvimento e fabricação da máscara/fotolito

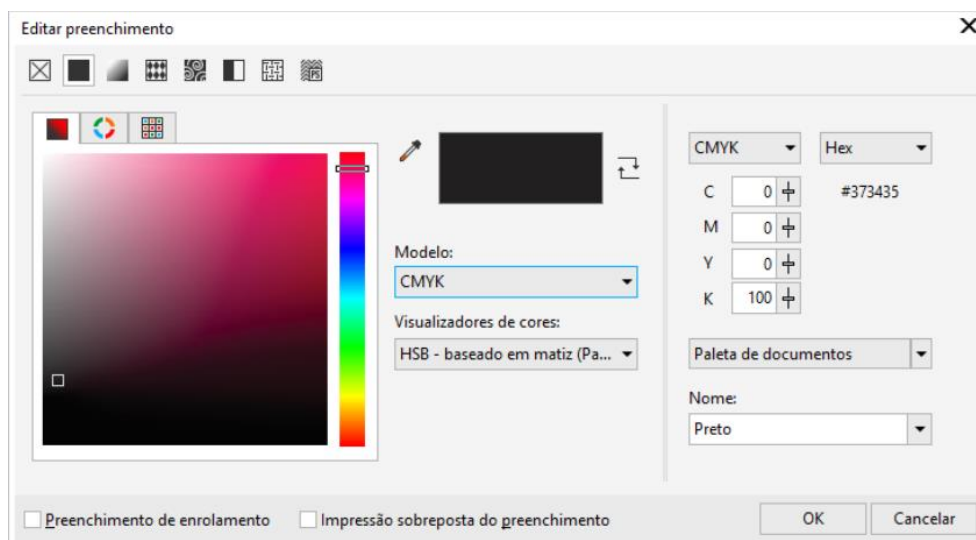
O fotolito tem como objetivo proteger uma área, determinada pelo layout, dos raios ultravioleta (UV).

Geralmente a fotomáscara é composta por uma placa de quartzo ou de vidro óptico e a região opaca é feita de cromo que pode ser obtida por litografia de feixe de elétrons ou por fotoploter. Neste caso foi utilizado um fotolito feito em uma gráfica, em virtude do preço e da facilidade de acesso.

Foi utilizado o programa CorelDraw para o desenvolver o layout do fotolito, pois com ele consegue-se ter um controle das dimensões do microssensor.

No desenvolvimento do layout é importante se atentar no tom de preto utilizado, pois a configuração de “Editar preenchimento” deve estar definida em (CMYK) somente com o (K = 100), conforme a (Figura 12), caso contrário o preto da impressão não conseguirá impedir a passagem da luz ultravioleta (UV).

Figura 12 - Configuração de cores.



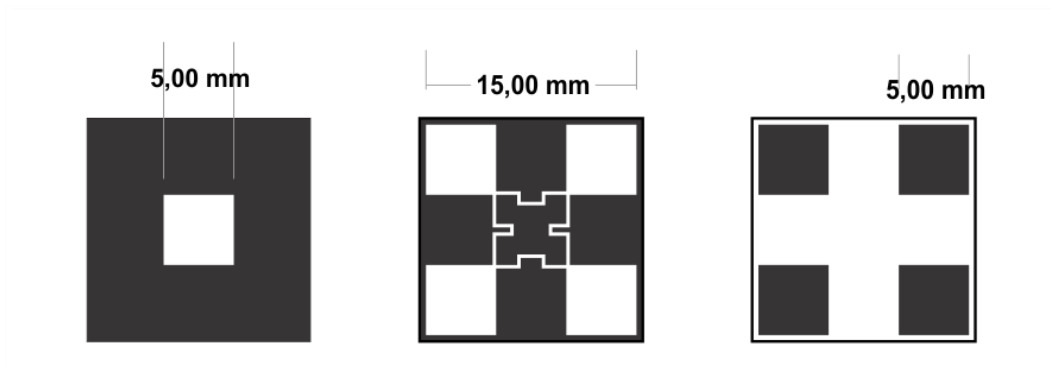
Fonte: O próprio autor.

O fotorresiste utilizado no processo de litografia no trabalho é positivo, ou seja, as áreas do layout que estiverem em 100% preto são as áreas que se deseja que fiquem gravadas na lâmina de silício, enquanto o restante será retirado. Em todo processo de fabricação do microssensor são utilizadas três fotomáscaras, sendo uma que será utilizada para definir a membrana, uma que servirá para definir os resistores e os contatos e a última que é utilizada para definir os locais de contato do microssensor.

O tamanho total do sensor é de 15 mm por 15 mm e sua menor dimensão em 250 μm , os contatos foram desenvolvidos para ter 5 mm, isso facilita a alimentação e a obtenção de medida do sensor.

Cada fotomáscara desempenha um papel diferente em cada etapa de processos de fabricação do microssensor. Para os processos de fabricação utilizam-se as fotomáscaras unitárias (Figura 13).

Figura 13 - Layout das fotomáscaras unitária.

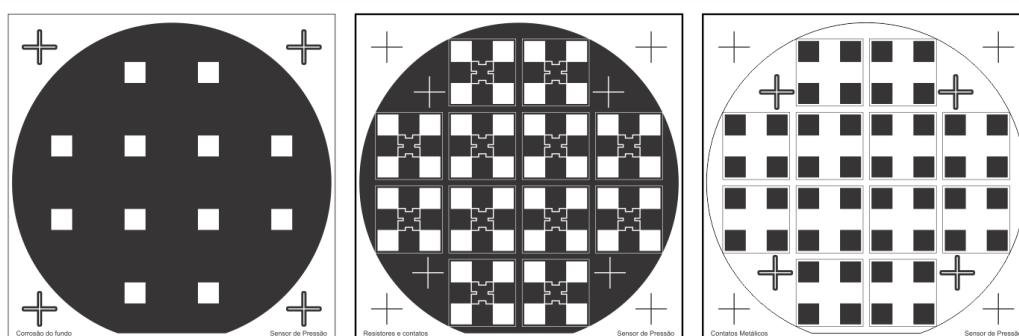


Fonte: O próprio autor.

As dimensões estabelecidas, visa a tecnologia que disponível tanto de fabricação do sensor e da fotomáscara, quanto de equipamento de medida. Porém essa escala pode ser reduzida para obtenção de um sensor ainda menor, isso depende dos equipamentos e da fotomáscara.

Com a dimensão unitária da fotomáscara projeta-se o layout definitivo, através do layout definitivo é feita a confecção da fotomascara, aqui levamos em consideração o tamanho da lâmina de silício de 3 polegadas e as marcas de alinhamento (Figura 14).

Figura 14 - Layout definitivo da fotomáscara.



Fonte: O próprio autor.

Foram comparados três métodos de confecção da fotomáscara:

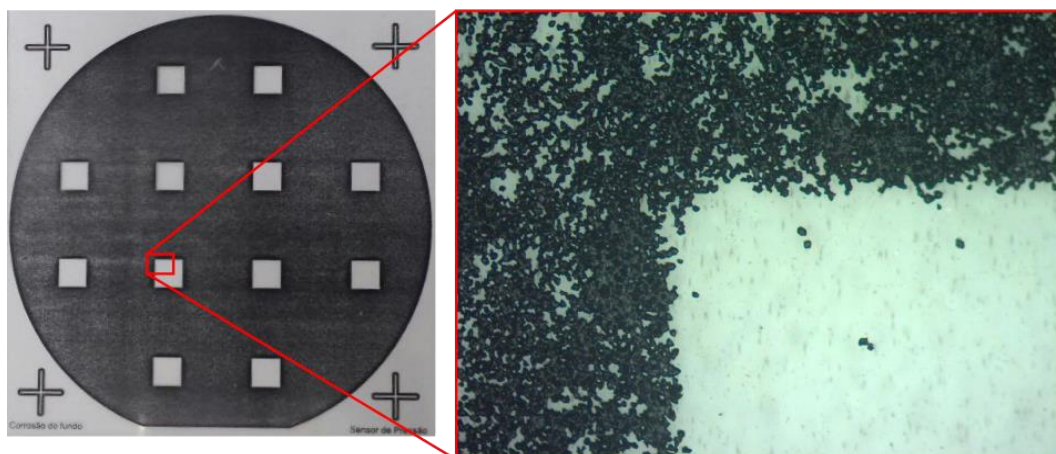
1. Impressão de transparência em uma impressora a laser;

2. Impressão de transparência em uma gráfica com impressora jato de tinta;
3. Impressão de um fotolito em uma gráfica especialista.

Para fazer a comparação entre a qualidade das confecções usaremos a fotomáscara do fundo de corrosão.

Na impressão da transparência em uma impressora a laser a fotomáscara não apresentou o resultado esperado, pois a impressão apresentou irregularidades e não conseguiu reter a passagem dos raios ultravioleta UV. Na (Figura 15) observa-se a fotografia da máscara e a imagem obtida por microscopia óptica.

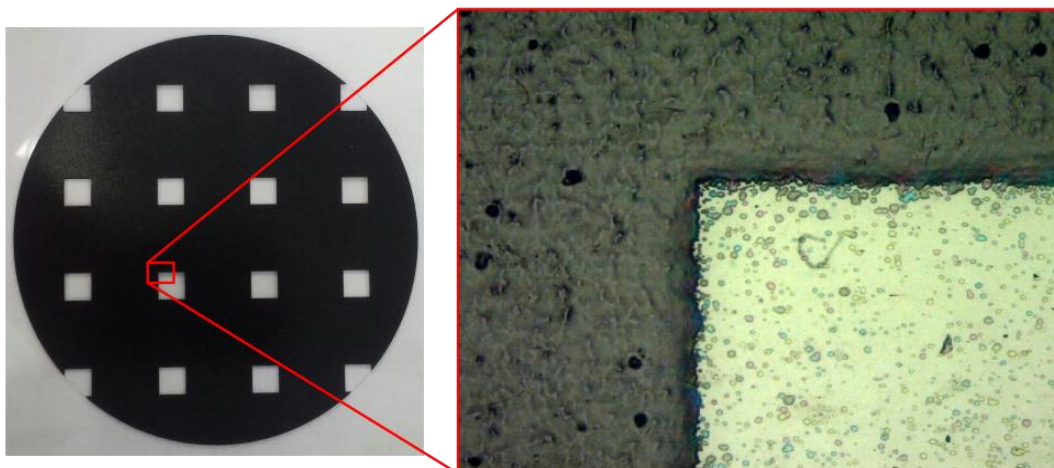
Figura 15 - Transparência obtida por impressão a laser.



Fonte: O próprio autor.

Na impressão da transparência em uma gráfica com impressora jato de tinta se obteve o resultado melhor que o anterior, o tom preto conseguiu reter os raios UV, porém essa apresentou irregularidades nas extremidades e um baixo controle de espessura. Na (Figura 16) observa-se a fotografia da máscara e a imagem obtida por microscopia óptica.

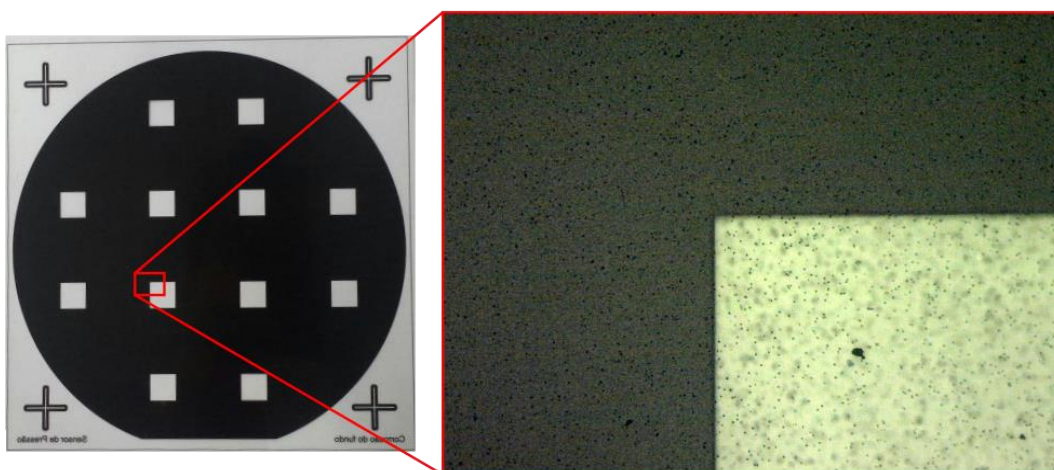
Figura 16 - Transparência obtida por impressão com jato de tinta.



Fonte: O próprio autor.

Na impressão de um fotolito em uma gráfica especialista, foi obtido melhor resultado que as anteriores. A fotomáscara apresentou um desempenho muito melhor que as anteriores em todos os quesitos. Esta conseguiu reter os raios U.V. e manteve um bom controle de espessura e definição de borda. Na (Figura 17) observa-se a fotografia da máscara e a imagem obtida por microscopia óptica.

Figura 17 – Fotolito obtido por impressão em gráfica especialista.



Fonte: O próprio autor.

3.1.2 Desenvolvimento e montagem “banho maria”

O banho maria serve para manter a temperatura constante da solução. Esse sistema é necessário, pois a temperatura deve manter o controle de variação de até 1 °C, para que não afete o processo de corrosão.

O sistema é alimentado com um circulador que mantém a água aquecida. Através de tubos de silicone, de 3/4 de polegada, a água aquecida é levada até uma helicoide feito de um tubo de cobre com 1/4 de polegada interno, os tubos são vedados com 4 abraçadeira. O arranjo é mantido dentro de um recipiente de vidro com água e o bquer é posicionado no meio da helicoide de cobre, todo arranjo é colocado em cima de um hot plate, para utilizar a função do agitador de solução. A (Figura 18) apresenta o sistema montado.

Figura 18 - Circulador e arranjo para manter a solução aquecida.



Fonte: O próprio autor.

3.1.3 Desenvolvimento e fabricação do suporte PTFE

O suporte de PTFE serve para proteger a face da lâmina de silício que desejasse proteger dos processos de corrosão. O suporte é fabricado a partir de um

tarugo de PTFE usinado com um torno manual. Um anel de borrachas faz a vedação da área que se deve ser protegida, 4 parafusos servem para fixar a lâmina no suporte, conforme a (Figura 19).

Figura 19 - Suporte de PTFE usinado.



Fonte: O próprio autor.

Para fixar a lâmina no suporte, primeiro é posicionado o anel de borrachas na parte inferior do suporte (Figura 20).

Figura 20 - Posicionamento do anel na base do suporte.



Fonte: O próprio autor.

A lâmina é posicionada em cima do anel de borracha, com a face que deseja-se proteger virada para baixo (Figura 21).

Figura 21 - Posicionamento da lâmina no suporte.



Fonte: O próprio autor.

O suporte superior é colocado por cima da lâmina de silício alinhado os furos da parte superior com a parte inferior (Figura 22).

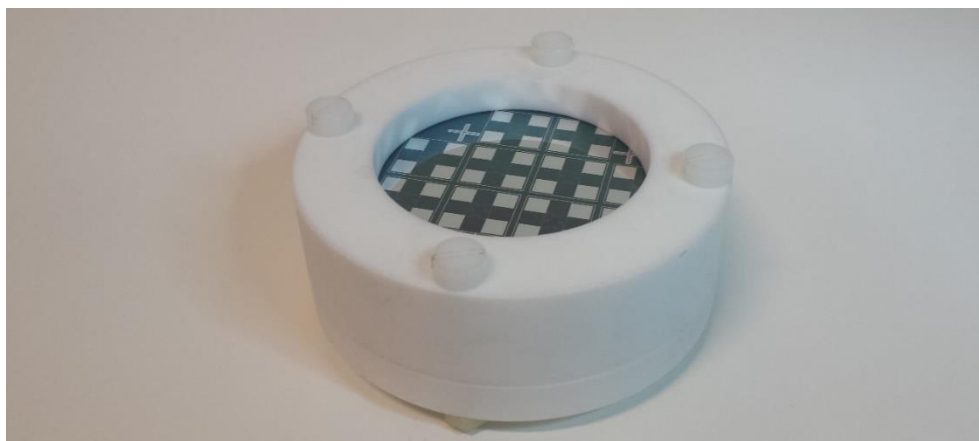
Figura 22 - Posicionamento da parte superior do suporte.



Fonte: O próprio autor.

Para garantir a vedação da lâmina são colocados 4 parafusos de fixação, os parafusos são presos com 4 porcas (Figura 23).

Figura 23 - Fixação com os parafusos.

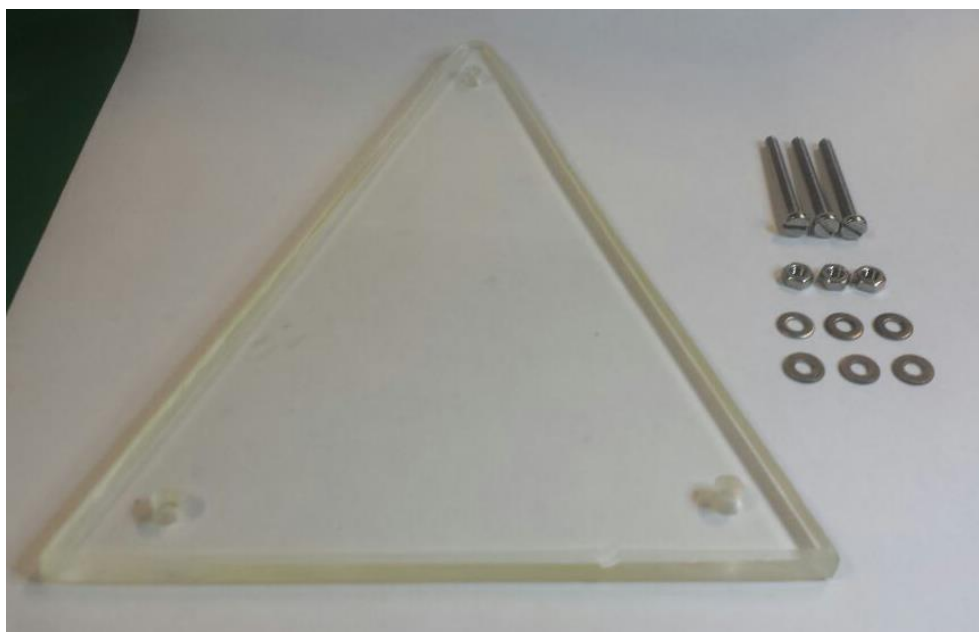


Fonte: O próprio autor.

3.1.4 Arranjo para obtenção de medidas do microsensor de pressão

Para constatar a variação da tensão quando a lamina é submetida a diferentes pressões, foi montado um suporte de acrílico composto por 3 parafusos, 3 porcas e 6 arruelas (Figura 24). O suporte de acrílico serve para sustentar os pesos metálicos (Figura 26), na parte superior da membrana do microsensor de pressão.

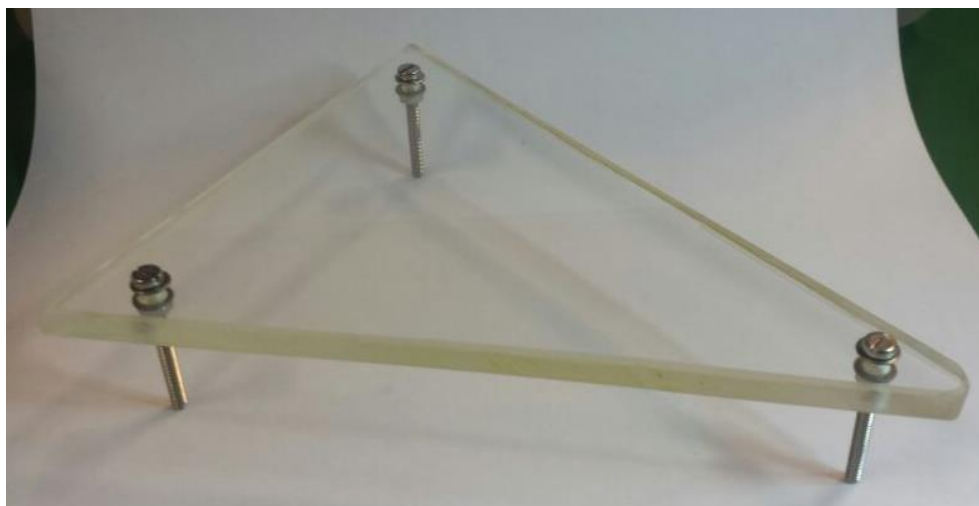
Figura 24 - Suporte de acrílico, 3 parafusos, 3 porcas e 6 arruelas.



Fonte: O próprio autor.

Na (Figura 25) pode-se observar o suporte montado.

Figura 25 - Suporte montado.



Fonte: O próprio autor.

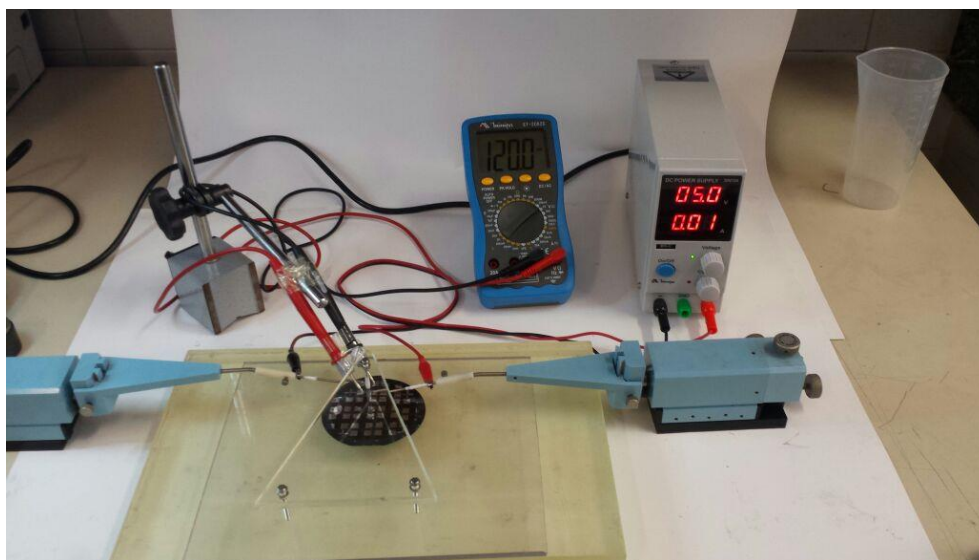
Figura 26 - Pesos de 50 g.



Fonte: O próprio autor.

O arranjo foi montado com duas pontas de provas que servem para aplicar tensão no sensor de pressão e outras duas pontas que são ligadas a um multímetro que capta a variação de tensão no microsensor, o suporte de acrílico é posicionado com o parafuso central no meio da membrana (Figura 27).

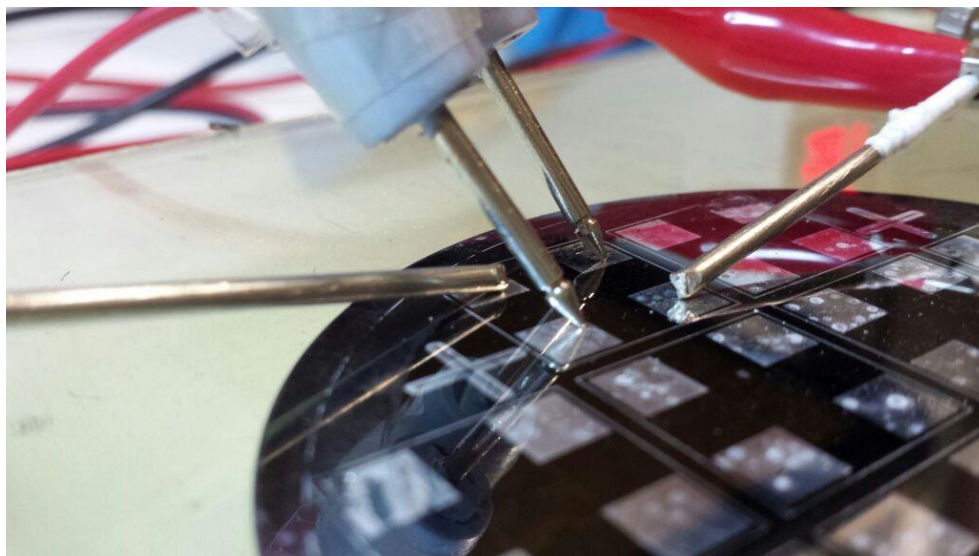
Figura 27 - Arranjo para medição dos sensores.



Fonte: O próprio autor.

A (Figura 28) expõem as pontas de prova fazendo o contato elétrico com o microsensor de pressão.

Figura 28 - Pontas de prova para medição.



Fonte: O próprio autor.

3.2 Simulação das etapas e processos

3.2.1 Introdução ao simulador

Na microeletrônica temos diversas etapas e processos para o desenvolvimento de dispositivos, desse modo há a necessidade de simulações para evitar erros nas etapas e processos de fabricação. Para efetuar a simulação dos processos utiliza-se o simulador de processos SimMEMS. Este programa foi desenvolvido por alunos de iniciação científica, alunos de mestrado e professores da Poli-USP.

Este simulador foi desenvolvido em linguagem C, possui funções gráficas para a edição e visualização de geometrias 2D e 3D. Ele funciona com 3 módulos:

Módulo de Entrada: Esse modulo recebe desenhos e geometrias em 2D, geralmente as máscaras para as etapas de fotolitografia.

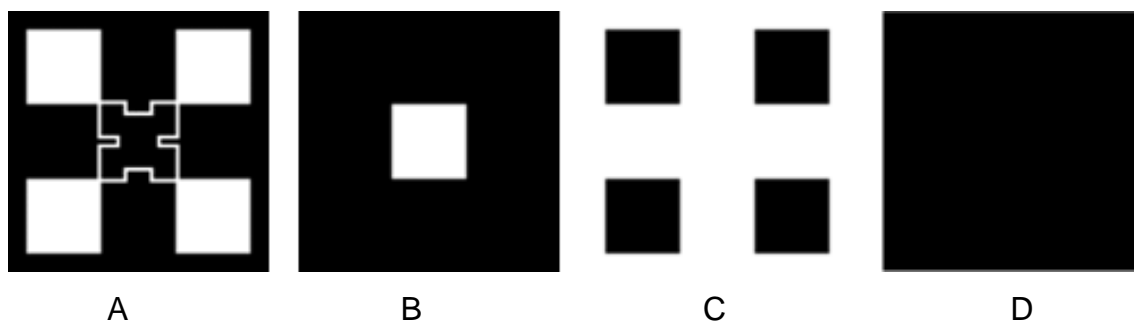
Módulo de Simulação: Este modulo recebe os desenhos e formas geométricas do módulo de entrada e processa os dados seguindo o método de fabricação.

Módulo de saída: Este módulo recebe as informações do modulo de simulação e implementa uma sequência de funções gráficas para transformar as imagens em 3D [9].

3.2.2 Simulação

Antes de iniciar a simulação são definidas as máscaras geométricas de entrada. Através do programa de vetorização CorelDraw foram desenvolvidas quatro máscaras de proteção (Figura 29) para os processos de litografia.

Figura 29 - Máscaras de proteção para simulação dos processos litográficos.



Fonte: O próprio autor.

Cada máscara exerce uma função distinta dentro da simulação das etapas e processos. Temos que:

A - Serve para definir a abertura da área do microsensor de pressão, ou seja, resistores e contatos.

B - Serve para definir a abertura da área para corrosão da membrana na parte rugosa da lâmina.

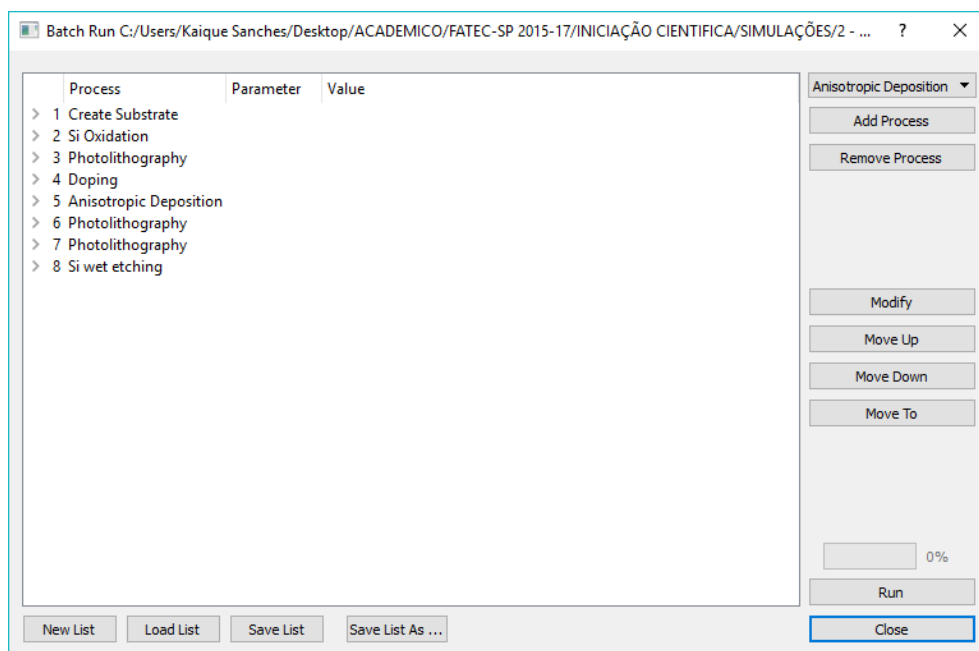
C - Serve para definir a área dos contatos de alumínio na face lisa da lâmina.

D - Serve para proteger a face que não se deseja fazer nenhum processo, essa máscara faz o papel do suporte de PTFE.

Através da lista de etapas e processos que é definida no módulo de entrada de simulação, pode se visualizar todas as sequências de processos para obtenção do microsensor de pressão. O programa não informa dimensões nem parâmetros para os reagentes ou processos utilizados, porém ele apresenta em tempo real o resultado

em uma interface 3D o resultado obtido através dos parâmetros pré-estabelecidos pelo usuário [9].

Figura 30 - Lista da sequência de processos para simulação.

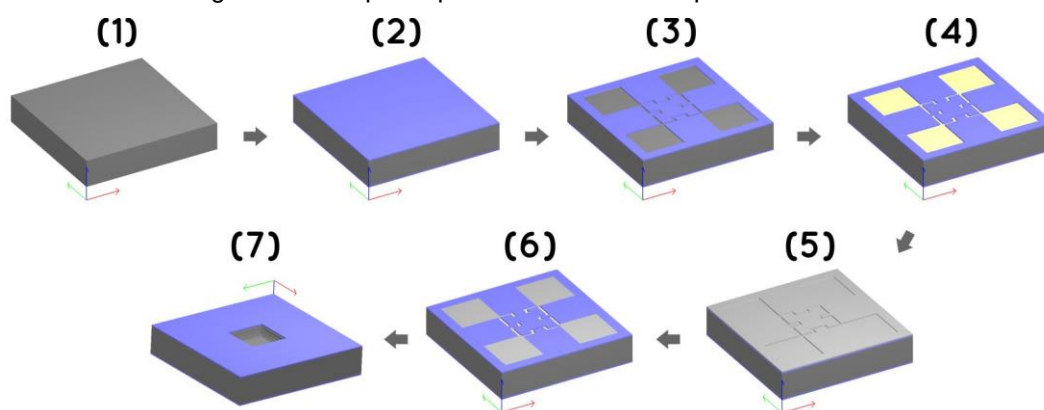


Fonte: O próprio autor.

3.2.3 Resultados obtidos na simulação:

Com os dados fornecidos no módulo de entrada obteve-se a simulação das etapas e processos de fabricação, através desta simulação pode-se observar de uma maneira geral as etapas e processos (Figura 47), evitando assim erros na sequência de fabricação do microssensor. Pode-se também observar as características do microssensor, como a difusão do dopante e a anisotropia gerada pela corrosão com KOH (Figura 31).

Figura 31 - Etapas e processos simulados pelo SimMems.

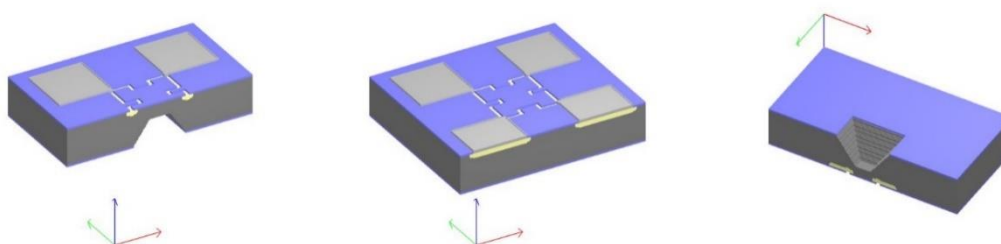


Fonte: O próprio autor.

Onde:

- (1) Limpeza da lâmina de Silício.
- (2) Oxidação da lâmina.
- (3) Litografia - Abertura da área do sensor com a máscara (A).
- (4) Dopagem da lâmina de silício.
- (5) Deposição de alumínio.
- (6) Litografia - Abertura da área dos contatos com a máscara (C).
- (7) Litografia - Abertura do canal para corrosão com a máscara (B), corrosão da lâmina de silício e proteção da área do sensor com a máscara (D).

Figura 32 - Cortes na simulação do microsensor de pressão.



Fonte: O próprio autor.

Conclui-se que esse simulador é eficiente para a definição das etapas e processos, de modo que, pode ser usado para obter as sequências necessárias de fabricação do microssensor de pressão com tecnologia MEMS. A interface desse simulador é bem amigável e fácil de trabalhar, por se tratar de um simulador gratuito e aberto ele pode auxiliar a quem tem interesse em aprofundar seus conhecimentos nas etapas e processos de fabricação da microeletrônica, não ficando restrito apenas a dispositivos MEMS.

3.3 Procedimentos Experimentais

Neste tópico serão apresentados os processos utilizados para a fabricação do microssensor de pressão.

3.3.1 Limpeza da lâmina

A limpeza da lâmina de silício serve para retirar contaminações e impurezas, evitando assim defeitos e/ou problemas nos processos seguintes.

Sequência das limpezas:

- 1°- Água DI: Fluxo contínuo, tempo 5 minutos.
- 2°- Solução Piranha: Submergir a lâmina, tempo 10 minutos.
- 3°- Água DI: Fluxo contínuo, tempo 5 minutos.
- 4°- Solução de HF: Mergulhar a lâmina até ela sair seca, tempo aproximado 1 minuto.
- 5°- Água DI: Fluxo contínuo, tempo 5 minutos.
- 6°- RCA-1 ou SC-1 (Standard Clean 1): Submergir a lâmina, tempo: 10 minutos.

7°- Água DI: Fluxo contínuo, tempo 5 minutos.

8°- Solução de HF: Mergulhar a lâmina até ela sair seca, tempo aproximado 1 minuto.

9°- Água DI: Fluxo contínuo, tempo 5 minutos.

10°- RCA-2 ou SC-2 (Standard Clean 2): Submergir a lâmina, tempo 10 minutos.

11°- Água DI: Fluxo contínuo, tempo 5 minutos.

12°- Solução de HF: Mergulhar a lâmina até ela sair seca, tempo aproximado 1 minuto.

13°- Água DI: Fluxo contínuo, tempo 5 minutos.

3.3.2 Oxidação da lâmina

Para obter um óxido de qualidade e espesso, de modo que, suporte os processos de corrosão, foram utilizados os dois métodos de oxidação térmica.

1°- Oxidação Seca:

- Fluxo de oxigênio: 2 l/min;
- Tempo: 1 hora;
- Temperatura: 1150 °C.

2°- Oxidação Úmida:

- Aquecimento da água a 90°C;
- Fluxo de nitrogênio: 2 l/min;
- Tempo: 15 horas.
- Temperatura: 1150 °C.

A espessura do óxido medida através da interferometria e perfilometria.

3.3.3 Fotolitografia

Este processo de litografia serve para definir a área onde ficam os resistores e os contatos de alumínio.

Aplicação do filme fino de fotorresiste por spin coating:

- Parâmetros:

Velocidade: 3.500 RPM;

Tempo: 20 Segundos.

- Etapas:

1°- Aplicação de álcool isopropílico;

2°- Aplicação do HMDS, promotor de aderência;

3°- Aplicação do fotorresiste, 3 ml;

4°- Pré-baking no hot plate:

- Temperatura: 105°C;

- Tempo: 90 segundos.

Alinhamento e exposição:

- Máscara utilizada: (Resistores e contatos);

- O alinhamento feito através do chanfro da lâmina de silício;

- Exposição de 12 segundos com os raios U.V.

Revelação:

- 1°- Revelação feita com 500 ml de solução de KOH já diluída em 17 g/l;
- Proporções: 1 H₂O + 2 KOH diluído;
- 2°- Enxague com fluxo contínuo de H₂O.
- 3°- Secagem com jato de N₂.

Pós-baking no hot plate:

- Temperatura: 135°C;
- Tempo: 5 minutos.

Remoção do óxido:

A remoção do óxido serve para deixar a superfície do silício exposta para difusão do dopante, porém o óxido da face rugosa da lâmina não pode ser corroído, pensando nisso foi desenvolvido e utilizado o suporte de proteção feito com PTFE.

- Etapas:

- 1°- Posicionamento da lâmina no suporte, vedando a face rugosa;
- 2°- Aplicação da solução BOE, que é uma solução tamponada de HF, esta tem maior seletividade entre o óxido de silício e o fotorresiste:
- Tempo de corrosão: 35 minutos, renovando a solução BOE de 5 em 5 minutos.

Remoção do fotorresiste:

1°- Acetona:

- Temperatura: 70°C

- Tempo: 5 minutos.

2°- Álcool isopropílico:

- Temperatura: 70°C

- Tempo: 5 minutos

3°- Enxague com fluxo constante de H₂O:

- Tempo: 5 minutos

3.3.4 Dopagem

Para definir os resistores é feita a dopagem do silício, essa dopagem é feita através da difusão térmica.

Aplicação do dopante SOG, por spin coating:

- Parâmetros:

Velocidade: 2.000 RPM;

Tempo: 20 Segundos;

- Etapas:

1°- Aplica-se 1 ml de SOG;

2°- Evaporação do solvente no hot plate:

- Temperatura: 200 °C;

- Tempo: 10 minutos.

Difusão no forno:

- Temperatura: 1150°C;
- Tempo: 15 minutos;
- Fluxo de nitrogênio: 2,4 l/min.

Remoção do óxido gerado:

- 1°- Posicionamento da lâmina no suporte, vedando a face rugosa;
- 2°- Aplicação da solução HF;
- Tempo de corrosão: 6 minutos.

Através do microscópio óptico foi feita a inspeção da remoção do óxido e do SOG.

3.3.5 Deposição de alumínio

A deposição de alumínio foi feita através da evaporação térmica, com o alumínio pode-se definir os contatos do microsensor de pressão.

Evaporação do alumínio:

- Parâmetros:

Peso dos fios de alumínio: 219,8 mg;

Pressão da evaporadora: $4 \cdot 10^{-5}$ mbar;

Corrente do filamento: 40 a 80 amperes.

- Etapas:

1°- Limpeza dos fios de alumínio com álcool isopropílico:

- Temperatura: 70°C;

- Tempo: 5 minutos;

2°- Colocação dos fios de alumínio no filamento;

3°- Diminuição da pressão na câmara;

4°- Aumento da corrente até a evaporação do alumínio.

3.3.6 Fotolitografia e corrosão do alumínio

Fotolitografia para definir os contatos de alumínio:

- Parâmetros:

Velocidade: 3.500 RPM;

Tempo: 20 Segundos.

- Etapas:

1°- Aplicação de álcool isopropílico;

2°- Aplicação do HMDS, promotor de aderência;

3°- Aplicação do fotorresiste, 3 ml;

4°- Pré-baking no hot plate:

- Temperatura: 105°C;

- Tempo: 90 segundos.

Alinhamento e exposição:

- Máscara utilizada: (Contatos Metálicos);
- O alinhamento feito através das marcas de alinhamento impressas na lâmina, com as marcas da máscara;
- Exposição de 10 segundos com os raios U.V.

Revelação:

1°- Revelação feita com 500 ml de solução de KOH já diluída em 17 g/l:

- Proporções: 1 H₂O + 2 KOH diluído;

2°- Enxague com fluxo contínuo de H₂O.

3°- Secagem com jato de N₂.

Pós-baking no hot plate:

- Temperatura: 135°C;
- Tempo: 5 minutos.

Corrosão do alumínio com ácido fosfórico:

Esta corrosão serve para removermos o alumínio indesejado da lâmina de silício deixando apenas alumínio nos contatos elétricos do microsensor.

- Parâmetros:

Temperatura da solução: 40°C;

Proporção: 80 H₃PO₄ + 10 H₂O + 15HNO₃;

- Etapas:

1°- Submergir a lâmina na solução aquecida:

- Tempo: 5 minutos;

2°- Enxague com fluxo contínuo de H_2O .

3°- Secagem com jato de N_2 .

Remoção do fotorresiste:

1°- Acetona:

- Temperatura: 70°C

- Tempo: 5 minutos.

2°- Álcool isopropílico:

- Temperatura: 70°C

- Tempo: 5 minutos

3°- Enxague com fluxo constante de H_2O :

- Tempo: 5 minutos

3.3.7 Fotolitografia e corrosão da face rugosa da lâmina

Fotolitografia para definir a área da membrana:

- Parâmetros:

Velocidade: 3.500 RPM;

Tempo: 20 Segundos.

- Etapas:

1°- Aplicação de álcool isopropílico;

2°- Aplicação do HMDS, promotor de aderência;

3°- Aplicação do fotorresiste, 3 ml;

4°- Pré-baking no hot plate:

- Temperatura: 105°C;

- Tempo: 90 segundos.

Alinhamento e exposição:

- Máscara utilizada: (Corrosão do Fundo);

- Para alinhar a máscara de corrosão do fundo seque as seguintes etapas:

1°- Alinhar a máscara (Resistores e contatos) na face lisa da lâmina;

2°- Fixar a lâmina na máscara (Resistores e Contatos);

3°- Alinhar as marcas de alinhamento externas da máscara (Corrosão do Fundo) com a as marcas de alinhamento externas da máscara (Resistores e Contatos).

- Exposição de 12 segundos com os raios U.V.

Revelação:

1°- Revelação feita com 500 ml de solução de KOH já diluída em 17 g/l:

- Proporções: 1 H₂O + 2 KOH diluído;

2°- Enxague com fluxo contínuo de H_2O .

3°- Secagem com jato de N_2 .

Pós-baking no hot plate:

- Temperatura: $135^{\circ}C$;

- Tempo: 5 minutos.

Corrosão anisotrópica da face rugosa da lâmina de silício:

Para efetuar a corrosão anisotrópica da lâmina de silício utiliza-se o arranjo do circulador, ele mantém o controle preciso da temperatura da solução.

- Parâmetros:

Temperatura: $80^{\circ}C$;

Concentração: $70 H_2O + 30 KOH$;

Tempo de processo: 5h40min;

- Etapas:

1°- Posicionamento da lâmina no suporte de PTFE, vedando a face que contém os resistores e os contatos de alumínio;

2°- Colocar o suporte com a lâmina no béquer que está no arranjo do circulador e colocar a solução de KOH no béquer até a lâmina ficar submersa.

3°- Usa-se o hot plate com o agitador magnético para agitar a solução.

4°- Enxague com fluxo contínuo de H_2O .

5°- Secagem com jato de N_2 .

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados das etapas e processos

A lâmina passou por todas as etapas e processos de fabricação, conforme a sequência pré-determinada no simulador SimMEMS. Os parâmetros utilizados dentro de cada processo de fabricação foram aplicados a partir dos estudos teóricos e práticos realizados no LSI da USP.

Através dos métodos interferometria e perfilometria, se obtém a espessura de óxido de silício crescido no processo de oxidação. As (Tabelas 4 e 5) expõe os valores medidos.

Tabela 4 - Espessura medida por interferometria.

INTERFEROMETRIA		
Medidas	Espessura [nm]	Confiabilidade [%]
1	2785,6	98
2	2782,9	98
3	2793,7	98

Fonte: O próprio autor.

Tabela 5 – Espessura medida por perfilometria.

PERFILOMETRIA	
Medidas	Espessura [nm]
1	2680,0

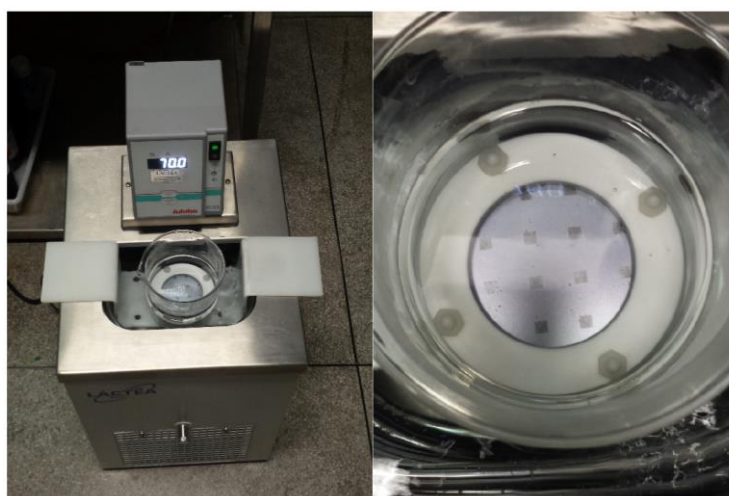
Fonte: O próprio autor.

Essa espessura do óxido serve para garantir que o silício ficará protegido dos processos onde temos corrosões. O fato de ter sido feito primeiramente a oxidação seca, faz com que o óxido presente na superfície tenha uma qualidade maior, tornando-o assim mais resistente aos processos.

Inicialmente para definir a espessura do óxido foi levado em consideração a taxa de corrosão anisotrópica com a solução de KOH. Os parâmetros considerados são a concentração de 15% de KOH a uma temperatura de 70 °C, esses parâmetros de acordo com a literatura nos dá uma taxa de corrosão de 49 $\mu\text{m}/\text{hora}$. Sabendo que a lâmina de silício possui 345,9 μm (medida obtida através do micrometro), devemos corroer 315,9 μm para obter a espessura desejada da membrana, que é 30 μm . Com base nesses valores, temos que o tempo de corrosão para obter a membrana de silício com 30 μm é de 6 horas e 27 minutos, portanto a espessura mínima do óxido de silício somente para a corrosão anisotrópica é de 0,55 μm . No entanto a lâmina passa por diversas etapas onde ela é exposta a solução de HF, a solução tem uma taxa de corrosão muito elevada com relação ao óxido de silício, sendo assim, foi crescido 2 μm além do estipulado para garantir a proteção do silício.

Na etapa da corrosão anisotrópica para obter a membrana de silício, primeiramente foi colocado o béquer com a solução e o suporte contendo a lâmina, diretamente no sistema de circulação de água (Figura 33). A concentração de KOH foi de 15% e a temperatura foi de 70 °C, durante o processo de corrosão percebemos que a solução estava formando pequenas bolhas de ar na superfície do silício, que deveria ser corroída (Figura 33). O processo de corrosão foi mantido por 6h e 15 minutos, porém ao fazer a inspeção óptica com microscópio percebemos que a lâmina não havia sido corroída.

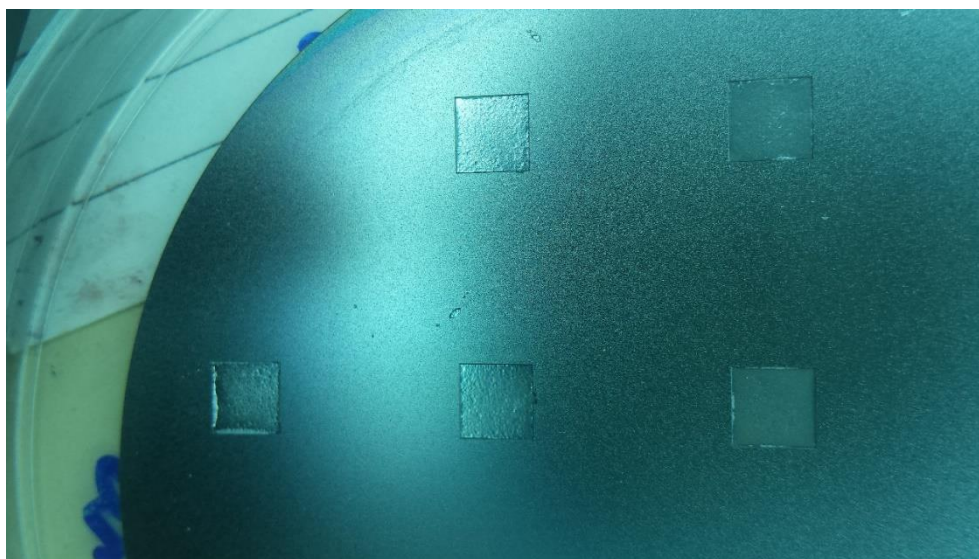
Figura 33 - Sistema de aquecimento para solução de KOH.



Fonte: O próprio autor.

Com o intuito de evitar a criação de bolhas na área do silício que deve ser corroída, foi necessário montar um sistema de circulação externo, desse modo o agitador magnético poderia ser usado renovando a solução na superfície da lâmina de silício. Já com o sistema externo de controle de temperatura e agitação da solução montado a lâmina foi submetida mais uma vez ao processo de corrosão, porém com os parâmetros alterados para acelerar o processo de corrosão e evitar o acúmulo de bolhas no silício. Os parâmetros adotados foram 30% de KOH a uma temperatura de 80°C, com esses parâmetros a taxa de corrosão dada pela literatura é de 79 $\mu\text{m}/\text{hora}$, portanto, para chegar a espessura desejada são necessárias 4 horas de corrosão. O processo de corrosão foi mantido por 3 horas e 40 minutos, pois o óxido que era para servir de proteção começou a apresentar pequenos buracos, expondo assim o silício (Figura 34).

Figura 34 – Lâmina corroída.



Fonte: O próprio autor.

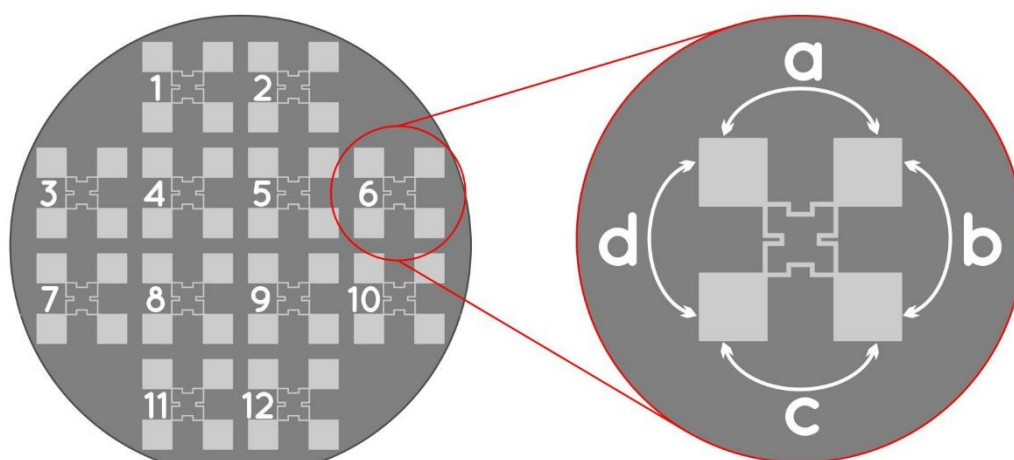
Por perfilometria medimos a profundidade da corrosão de 131 μm , portanto a espessura da membrana estabelecida é de 214,9 μm . Como o óxido não suportou a corrosão em alguns pontos, tornou inviável submeter a lâmina ao processo de corrosão novamente. Levando em consideração que a espessura obtida afetará na sensibilidade e na faixa de pressão que o sensor vai medir, o submetamos a

caracterização elétrica para verificar se mesmo com membrana mais espessa conseguiríamos algum resultado.

4.2 Medições elétricas no microsensor de pressão

A lâmina de silício de 3 polegadas comporta em sua estrutura 12 sensores de pressão nas dimensões estabelecida, levando em conta que os sensores próximos a borda da lâmina podem não funcionar ou apresentar mau funcionamento, por causa da limitação dimensional causada pelo suporte de PTFE. Para obtermos a medida de cada sensor dividimos os sensores em grupos numéricos e cada resistor da lâmina em letras conforme a (Figura 35) expõe.

Figura 35 - Definição dos microsensores e piezorresistores.



Fonte: O próprio autor.

Utilizando o multímetro na escala ôhmica, obtivemos os valores dos resistores difundidos de cada sensor distribuído na lâmina de silício. Nos sensores 6, 10, 11 e 12 observa-se (Tabela 6) que nem todos resistores deram resultados, isso é devido ao seu posicionamento ao decorrer da lâmina de silício. Os sensores que apresentaram defeitos na constituição dos resistores, estão localizados na borda da lâmina de silício, o defeito é devido ao alinhamento inicial da lâmina de silício e ao fato

de o suporte de PTFE exercer pressão na vedação de um dos lados da lâmina, pressionando a lâmina com o anel de borracha.

Tabela 6 - Valor ôhmico dos resistores de cada microsensor de pressão.

Sensores	Resistência [Ω]			
	a	b	c	d
1	215	222	201	209
2	153	204	190	205
3	223	242	215	258
4	204	231	207	223
5	202	218	200	219
6	-	-	268	324
7	214	231	208	238
8	208	237	219	236
9	212	226	243	228
10	-	-	-	329
11	278	-	-	-
12	291	-	-	-

Fonte: O próprio autor.

Definidos os sensores que estão com os piezorresistores em funcionamento, foi feita a medida da tensão em função do peso aplicado na membrana de silício através do arranjo montado para o teste do sensor. A tensão aplicada foi de 5 V entre os terminais dos resistores “da” e “cb” e a variação de tensão foi medida com o voltímetro digital MDM-8165 entre os terminais dos resistores “ab” e “dc”. As (Tabelas 7, 8 e 9) expõem os valores obtidos através da medição. Observa-se que o único sensor que não apresentou variação de tensão foi o sensor 2, este também apresentou uma grande variação em seus valores ôhmicos, isso pode ser devido ao fato que ele está próximo a borda da lâmina de silício.

Tabela 7 - Variação de tensão em função da massa dos sensores 1,2 e 3.

Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3	
Massa [g]	Tensão [mV]	Massa [g]	Tensão [V]	Massa [g]	Tensão [mV]
0	123,0	0	1,055	0	456,9
50	123,0	50	1,055	50	456,5
100	122,9	100	1,055	100	456,4
150	122,8	150	1,055	150	456,2
200	122,7	200	1,055	200	456,1
250	122,6	250	1,055	250	456,0
300	122,6	300	1,055	300	456,0
350	122,6	350	1,055	350	456,0
400	122,5	400	1,055	400	455,9

Fonte: O próprio autor.

Tabela 8 - Variação de tensão em função da massa dos sensores 4,5 e 7.

Sensor 4		Sensor 5		Sensor 7	
Massa [g]	Tensão [mV]	Massa [g]	Tensão [mV]	Massa [g]	Tensão [mV]
0	381,7	0	317,7	0	412,0
50	381,6	50	317,6	50	411,8
100	381,4	100	317,5	100	411,6
150	381,2	150	317,3	150	411,5
200	381,0	200	317,2	200	411,5
250	380,8	250	317,1	250	411,3
300	380,6	300	316,9	300	411,3
350	380,5	350	316,7	350	411,2
400	380,3	400	316,5	400	411,1

Fonte: O próprio autor.

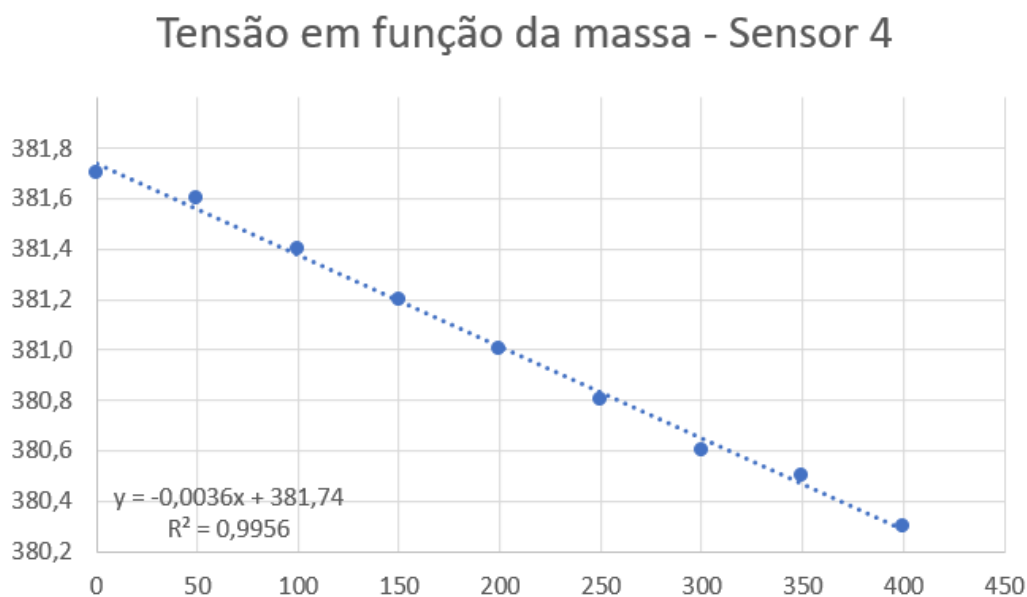
Tabela 9 - Variação de tensão em função da massa dos sensores 1,2 e 3.

Sensor 8		Sensor 9	
Massa [g]	Tensão [mV]	Massa [g]	Tensão [mV]
0	395,5	0	-7,8
50	395,2	50	-8,1
100	394,9	100	-8,5
150	394,7	150	-8,8
200	394,4	200	-9,0
250	394,2	250	-9,1
300	394,00	300	-9,2
350	393,7	350	-9,3
400	393,2	400	-9,4

Fonte: O próprio autor.

Com base nas tabelas foi montado o gráfico do sensor que apresentou a melhor sensibilidade e precisão. No gráfico consta também a linha de tendência da curva (pontilhada em azul), a equação da reta e o R-quadrado.

Figura 36 - Tensão em função da massa do sensor 4.



Fonte: O próprio autor.

Através dos gráficos pode-se observar a variação de tensão, de modo que, a tensão diminui conforme o peso aumenta. Com o intuito de termos uma relação tensão em função da pressão, definimos de acordo com a literatura que pressão (P) é igual força (F) sobre área (A) (Equação 4.1).

Equação:

$$P = \frac{F}{A} \quad (4.1)$$

Sabendo que a força (F) é igual a massa (m) vezes a aceleração gravitacional (g), montamos a (Tabela 10) considerando que a aceleração gravitacional é 9,81 m/s² e que a área do microsensor é 0,000025 m². Para fins de comparação, a unidade de

medida de pressão em pascal (Pa) foi convertida para a libra força por polegada quadrada (Psi).

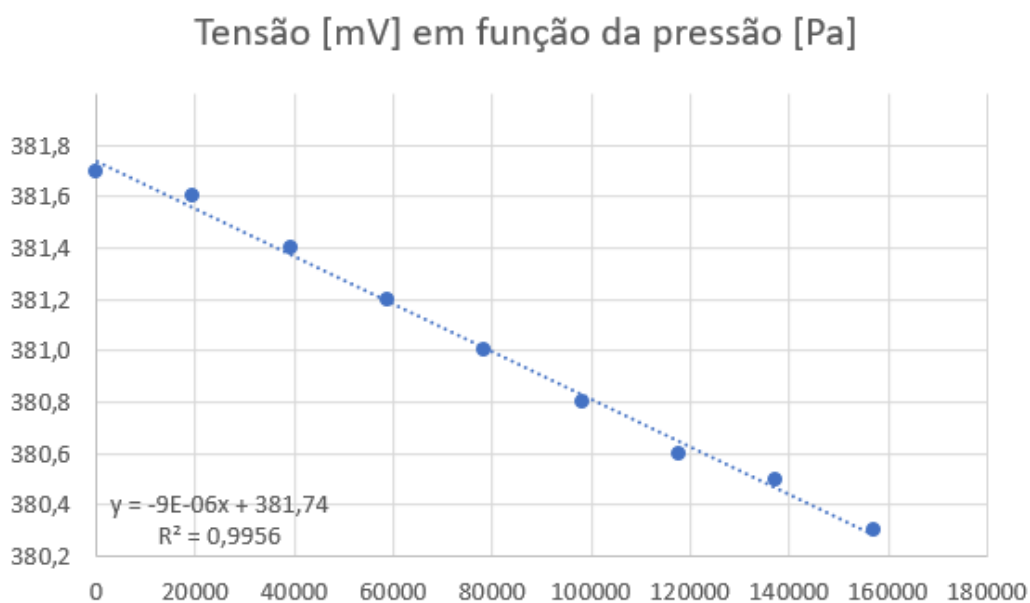
Tabela 10 - Cálculo da força e pressão.

Sensor 4				
Massa [g]	Tensão [mV]	Força [N]	Pressão [Pa]	Pressão [Psi]
0	381,7	0,000	-	-
50	381,6	0,491	19620,0	2,8
100	381,4	0,981	39240,0	5,7
150	381,2	1,472	58860,0	8,5
200	381,0	1,962	78480,0	11,4
250	380,8	2,453	98100,0	14,2
300	380,6	2,943	117720,0	17,1
350	380,5	3,434	137340,0	19,9
400	380,3	3,924	156960,0	22,8

Fonte: O próprio autor.

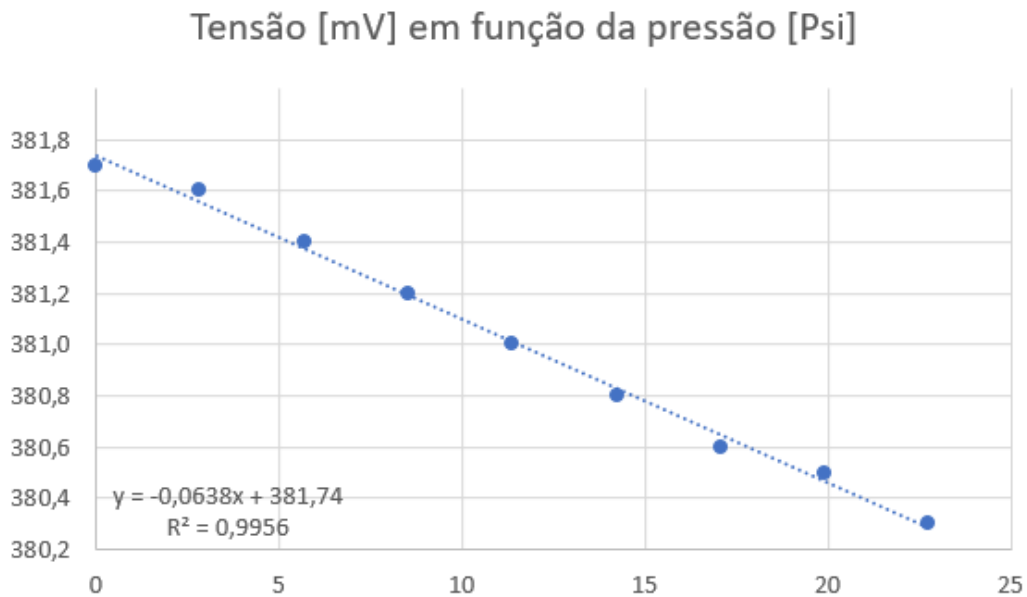
Com os valores calculados na tabela, os gráficos foram plotados. Nos gráficos constam também a linha de tendência da curva (pontilhada em azul), a equação da reta e o R-quadrado.

Figura 37 - Tensão em função da pressão.



Fonte: O próprio autor.

Figura 38 - Tensão em função da pressão.



Fonte: O próprio autor.

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento de microestruturas com tecnologia MEMS foi descrito neste trabalho. Para o desenvolvimento dos microssensores de pressão com tecnologia MEMS, foi empregado o uso da tecnologia em microeletrônica. Com o intuito do trabalho servir como base para fins didáticos foram desenvolvidos alguns equipamentos.

Utilizando a tecnologia nas etapas e processos de produção da microeletrônica foi definida a área do microssensor de pressão. Foi estabelecida uma membrana de silício de 214,9 μm através da corrosão anisotrópica com KOH. Através da caracterização elétrica, conseguimos obter a variação de tensão em função da força aplicada na membrana de silício.

O processo se apresentou didático e funcional. Através da construção do microssensor de pressão, pode-se observar as etapas e processos que são utilizados no curso de microeletrônica e também a tecnologia MEMS para obtenção de microestruturas.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Esse trabalho apresenta apenas uma pequena parte na fabricação do microssensor de pressão com tecnologia MEMS. Esse trabalho abre porta para o estudo em diversas áreas. Nesse tópico serão apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

- Estudo teórico da piezorresistividade de acordo com a orientação cristalográfica da lâmina de silício.
- Corte dos microssensores de pressão e encapsulamento. Testando-os com a aplicação de pressão.
- Aperfeiçoamento das máscaras para os processos de fotolitografia. Acrescentando marcas menores de alinhamento e definindo áreas para gerar trincheiras no silício no processo de corrosão anisotrópica, para facilitar a clivagem.
- Cálculo do erro percentual e cálculo do desvio padrão nesse trabalho. Obtenção dos gráficos plotando todos os pontos com erro e desvio padrão.

- Desenvolvimento do sistema para medição que converta a variação de tensão em uma unidade pressão. Comparação do sensor fabricado com o sensor comercial que foi encapsulado.

- Aperfeiçoamento do spinner que foi desenvolvido para a FATEC-SP.

- Aperfeiçoamento da alinhadora que foi desenvolvido para a FATEC-SP.

- Fabricação do microssensor de pressão na FATEC-SP com os materiais e equipamentos que foram desenvolvidos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MALUF, N.; WILLIAMS, K. An Introduction to Microeletromechanical Systems Engineering: 2. Ed. Boston: ARTECH HOUSE, 2004.
2. GAD-EL-HAK, M. MEMS - Introduction and Fundamentals: 2. Ed. New York: CRC Press, 2006.
3. MADOU, M. Fundamentals of Microfabrication: 1. Ed. New York: CRC Press, 1997.
4. BEEBY, S. et al. MEMS Mechanical Sensors: 1. Ed. Boston: ARTECH HOUSE, 2004.
5. Pirilamponet. SENSOR DE PRESSÃO E TEMPERATURA DOS PNEUS TPMS 800. Disponível em: <<https://multimídias.pirilamponet.com.br/br/acessorios-e-espelhamento/50-sensor-de-pressao-e-temperatura-dos-pneus-tpms-800.html>>. Acesso em: 5 dez. 2017.
6. FURLAN, H. DESENVOLVIMENTO DE MEMBRANAS PARA SENSORES DE PRESSÃO UTILIZANDO FREAMENTO ELETROQUÍMICO. 2003. 97f. Dissertação de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
7. YAMAMOTO, R. K. MATERIAL DA DISCIPLINA - ETAPAS E PROCESSOS. 2016. Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2016.
8. LDP ELETRONICS. Motor de HD de 3 ou 4 fios no Arduino utilizando ESC. Disponível em: <<https://ldpeletronics.wordpress.com/2014/11/22/motor-de-hd-de-3-ou-4-fios-no-arduino-utilizando-esc/>>. Acesso em: 18 fev. 2016.

9. NDS. Simulador simMEMS (em C++). Disponível em: <http://200.144.182.150/nds/?proj_id=2&sist_id=6&go=trabalhos>. Acessado em: 18 fev. 2016.
10. GHODSSI, R.; LIN, P. MEMS Materials and Processes Handbook: 1. Ed. New York: SPRINGER, 2011.
11. CORAUCCI, G. O. SENSOR DE PRESSÃO MICROELETRÔNICO BASEADO NO EFEITO PIEZORESISTIVO TRANSVERSAL EM SILÍCIO. 2008. 245 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

7 ANEXOS

7.1 Desenvolvimento e fabricação do spinner

O spinner é um equipamento muito utilizado na área da microeletrônica. Este é usado para aplicação de filmes finos na superfície das lâminas de silício, como por exemplo, fotorresiste, dopantes SOG e etc. Para o desenvolvimento deste spinner, foram utilizados equipamentos de fácil acesso para FATEC-SP e de baixo custo, comparado com equipamentos comerciais.

- Definição do motor e controle de velocidade:

Para aplicação do fotorresiste precisamos de uma rotação no spinner de em média 4000 RPM. Para chegar a essa rotação foram feitos testes com motores de HD. A (Figura 39) exhibe o motor utilizado no projeto.

Figura 39 - Motor de HD.



Fonte: O próprio autor.

O motor de HD é um motor brushless para esse tipo de motor é necessário um controlador para fazer com que este funcione. O controlador utilizado foi o ESC “Eletronic speed control” de 30A (Figura 40), que controla a velocidade através de pulsos PWM.

Figura 40 - ESC (Eletronic speed control)



Fonte: <https://lista.mercadolivre.com.br/aeromodelismo/esc-30a>

Para facilitar a programação, minimizar a quantidade de componentes eletrônicos e também pela facilidade de uso, se utiliza o arduino UNO (Figura 41) para fazer o comando do ESC.

Figura 41 - Arduino UNO.



Fonte: <http://rees52.com/593-arduino-uno-r3-atmega328p-ch340g-with-usb.html>

Para variar a velocidade do motor, utiliza-se um programa (Figura 42), através de um potenciômetro é feita a variação do pulso PWM do arduino que é enviado para o ESC, que por sua vez controla a velocidade do motor.

Figura 42 - Programa para controlar o motor de HD.

```
/* PROGRAMA PARA CONTROLAR O HD POR MEIO DE UM POTENCIOMETRO */

#include <Motor.h>

Motor meumotor;

int PinoPot = 0;
int var;

void setup()
{
    meumotor.attach(9);
}

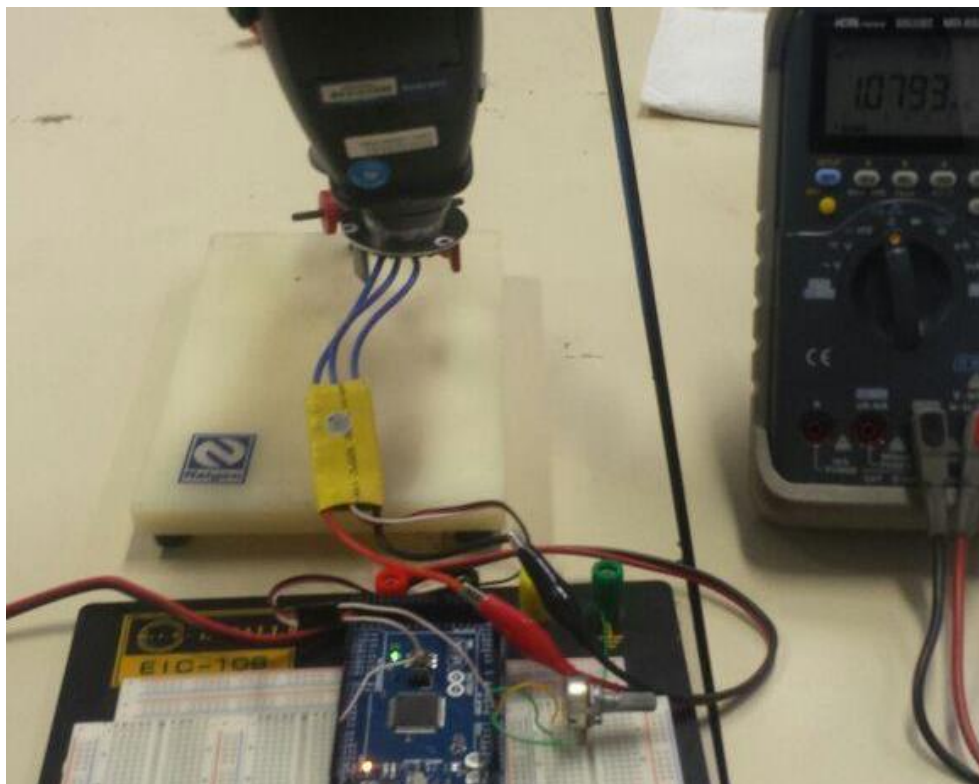
void loop()
{
    var = analogRead(PinoPot);
    var = map(var, 0, 1023, 98, 168);
    meumotor.write(var);
    delay(15);
}
```


Fonte: <https://ldpeletronics.wordpress.com/2014/11/22/motor-de-hd-de-3-ou-4-fios-no-arduino-utilizando-esc/> [8].

- Obtenção de dados:

Foi montado um arranjo experimental, para obter a velocidade máxima de rotação do motor. Para medir essa velocidade utiliza-se o tacômetro (Minipa, modelo MDT-2238A). A (Figura 43) demonstra o arranjo montado para medir a variação de rotação.

Figura 43 - Arranjo experimental para medir a velocidade do motor de HD.



Fonte: O próprio autor.

Variando a resistência do potenciômetro de 0 até 10 K Ω com passo de 1 K Ω , foi medida a velocidade do motor em RPM, com as informações obtidas foi montada a (Tabela 11) que relaciona a resistência e a velocidade.

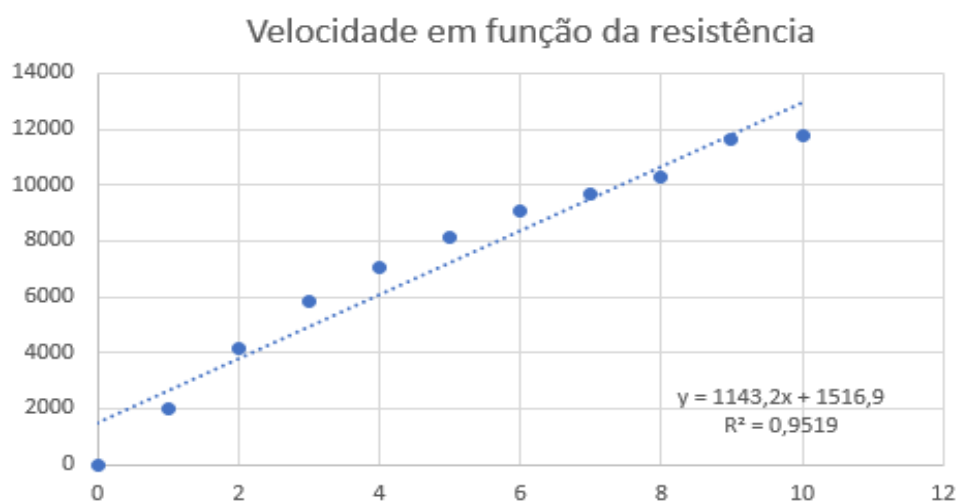
Tabela 11 - Velocidade em função da resistência.

Resistencia [kΩ]	Velocidade [RPM]
0	0
1	1979
2	4165
3	5810
4	7041
5	8100
6	9049
7	9688
8	10316
9	11612
10	11800

Fonte: O próprio autor.

Com os valores obtidos na (Tabela 11) foi plotado o gráfico da velocidade em função da resistência (Figura 44).

Figura 44 - - Velocidade em função da resistência.



Fonte: O próprio autor.

Com as informações obtidas através da tabela e o gráfico, conclui-se que o motor de HD pode ser utilizado na montagem do spinner, pois sua velocidade de rotação atende o parâmetro mínimo de 4000 RPM.

- Sistema de fixação da lâmina e montagem da estrutura:

Para fazer a fixação da lâmina de silício na estrutura do spinner foi utilizado um arranjo que contém um sistema de vácuo, onde a bomba mecânica de palhetas reduz a pressão no sistema e faz com que a lâmina fique fixada pela diferença de pressão no Chuck (Figura 45) que está no motor. Para isso foi necessário fazer um furo no eixo do motor, deste modo conseguimos bombear o volume do Chuck que fixa a lâmina.

A primeira tentativa de furar o eixo do motor foi utilizando o torno laboratório de usinagem, com uma broca de 1,5 mm, porém após algumas tentativas descobrimos que o eixo do motor era composto por um metal duro, tanto a broca quanto a velocidade de rotação eram insuficientes para furar o eixo.

Figura 45 - Tentativa de furação do eixo do motor com torno.



Fonte: O próprio autor.

Outro método que é utilizado para furação de metais duros ou endurecidos é a eletroerosão. O equipamento de para furação por eletroerosão fica localizado no laboratório de usinagem da FATEC-SP. O motor de HD foi desmontado e somente o eixo central foi submetido ao processo. Com o apoio dos auxiliares docentes Kleberon Cartolari e Felipe Ribeiro Toloskczzo foi feito o furo no eixo com um eletrodo de 2 mm (Figura 46).

Figura 46 - Processo de eletroerosão para a furação do eixo do motor de HD



Fonte: O próprio autor.

O processo de eletroerosão levou cerca de 12 horas de uso da máquina para conseguirmos um furo de fora a fora no eixo, após esse tempo obteve-se o eixo com um furo de 2 mm e alinhado para não causar desbalanceamento no motor. A (Figura 47) expõe o motor desmontado e o eixo furado.

Figura 47 - Motor desmontado e eixo central perfurado.



Fonte: O próprio autor.

Para montar o sistema de vácuo se utilizou uma peça de polipropileno já usinada para esse fim, de modo que o motor foi fixado na peça com 3 parafusos vedando-o com um anel de borracha para evitar vazamentos, a (Figura 48) exhibe o sistema já com o motor fixado.

Figura 48 - Base de polipropileno para fixação do motor no sistema de vácuo.



Fonte: O próprio autor.

Para fazer o controle da pressão na fixação da lâmina de silício é utilizada uma válvula de vácuo (Figura 49), cedida pelo Laboratório de tecnologia do vácuo LTV. Através dessa válvula a pressão pode ser controlada, para garantir que a lâmina fique fixada e para garantir que ela não quebre pelo excesso de pressão.

Figura 49 - Válvula para controle de pressão.



Fonte: O próprio autor.

Uma peça importante na fixação da lâmina no spinner é o chuck, essa peça permite que a lâmina fique firme assim que o sistema de vácuo bombeia o ar do volume interno do arranjo, gerando assim a diferença de pressão que segura a lâmina no chuck (Figura 50).

Figura 50 - Chuck para fixação da lâmina de silício.



Fonte: O próprio autor.

As partes eletrônicas e as de controle de pressão foram montadas dentro de uma caixa metálica, um recipiente metálico foi usado para conter o excesso de resiste ou filme no estado líquido que espirra da lâmina. A (Figura 51) apresenta o spinner montado e pronto para o funcionamento.

Figura 51 - Spinner montado.



Fonte: O próprio autor.

No spinner foram feitos testes com lâminas de 3 polegadas, o sistema de vácuo conseguiu mantê-la fixa no arranjo e a velocidade se manteve constante. A limitação deste spinner é que não possui controle de tempo e o controle de velocidade é analógico, de modo que estes parâmetros podem apresentar muitos erros e não apresentam reprodutibilidade, pois cada operador tem um tempo de reação, porém ele se mostrou eficiente na aplicação de filmes finos para fins didáticos, podendo ser

utilizado para fabricação de dispositivos que não necessite a reprodutibilidade de processo.

7.2 Desenvolvimento e montagem da alinhadora/Expositora

Para fazer a sensibilização do fotorresiste é necessário a exposição do filme fino aos raios U.V.. A FATEC-SP possui o corpo de uma alinhadora que foi doada pelo LSI da Poli elétrica USP, porém esta alinhadora não estava em funcionamento, pois não possuía lâmpada para emissão dos raios U.V. para sensibilização do resiste. Como as máscaras do microssensor de pressão possuem marcas de alinhamento de grandes dimensões, é possível fazer o alinhamento a olho nu, portanto só é necessário a exposição para sensibilizar o resiste. Como meio alternativo de emissão de raios U.V. foram utilizados LEDs de U.V.. Foi utilizada uma placa com uma face de cobre como base para os LEDs e na placa foram soldados 68 LEDs (Figura 52).

Figura 52 - Arranjo com 68 LEDs de U.V.

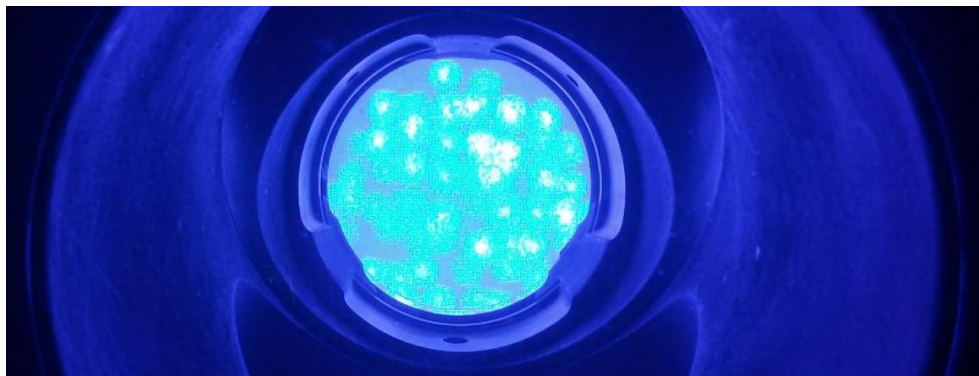


Fonte: O próprio autor.

O arranjo com os LEDs foram fixados na lateral do alinhadora, de modo que foi mantida uma distância de aproximadamente 5 cm do local que a lâmpada deveria estar fixada, esta distância ajuda a desfocar a imagem dos LEDs de modo que gera

uma maior uniformidade na exposição, para melhorar o espalhamento da luz foi colocada uma folha de papel vegetal na frente dos LEDs (Figura 53).

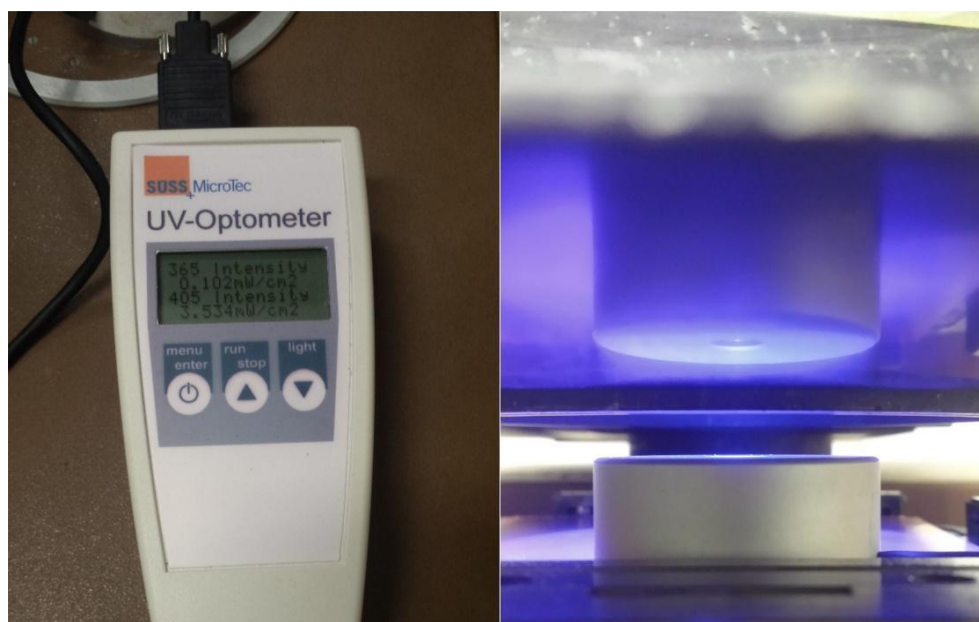
Figura 53 - Parte interna da alinhadora com os LEDs.



Fonte: O próprio autor.

Com o intuito de obter a informação da intensidade da emissão dos raios U.V. em diversos pontos da superfície, foi utilizado um medidor de raios ultravioleta (Figura 54). A intensidade foi medida em 5 pontos diferentes, com as informações constatamos que a intensidade era maior no centro do que nas bordas da lâmina.

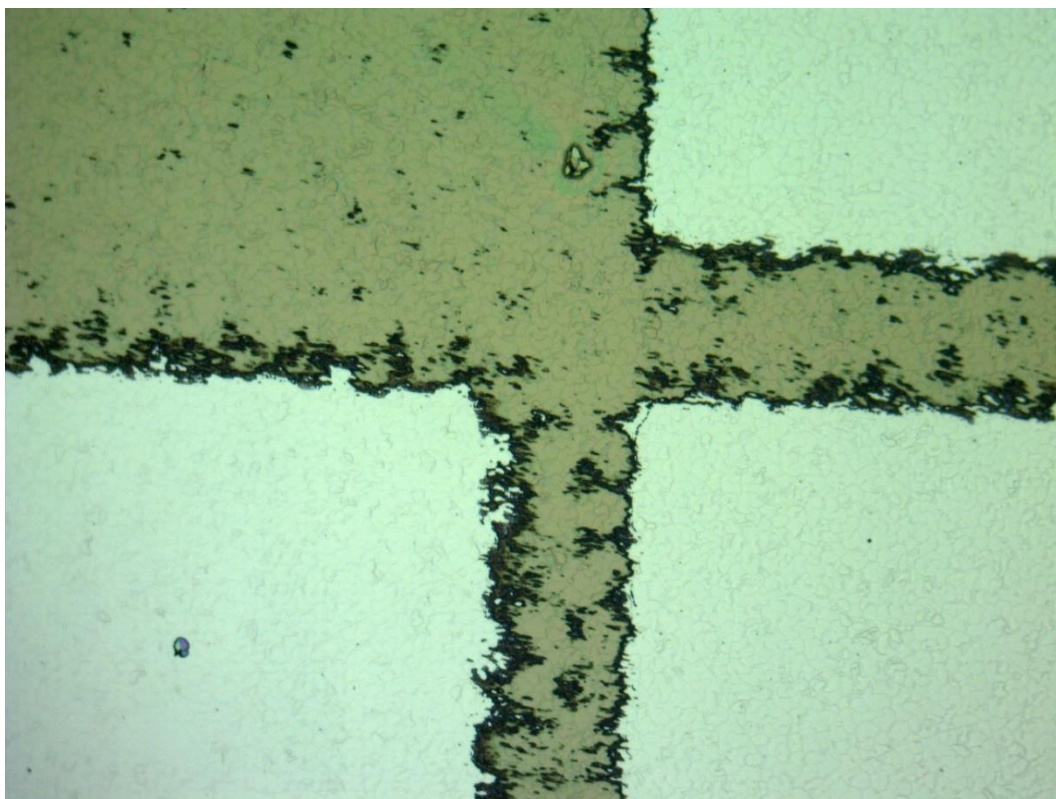
Figura 54 - Medição da intensidade dos raios U.V. em 5 pontos da lâmina.



Fonte: O próprio autor.

Para testar a exposição dos LEDs foi utilizada uma lâmina com fotorresiste positivo depositado. A lâmina foi exposta por 2 minutos em contato com a primeira máscara que foi confeccionada através de uma transparência na FATEC-SP (Figura N). Após a exposição foi revelada com a solução de KOH. Para verificar a qualidade da exposição foi utilizada a microscopia óptico (Figura 55).

Figura 55 - Resultado da exposição e revelação do resiste na lâmina de silício.



Fonte: O próprio autor.

As estruturas foram reveladas com sucesso ficando fotorresiste apenas nas áreas determinadas pela fotomáscara. As falhas da estrutura não são devido ao processo de exposição nem de revelação e sim pela fotomáscara utilizada, que foi feita na impressora a laser da FATEC-SP, de modo que, esta não possuía a melhor qualidade de impressão. O arranjo montado na expositora se mostrou eficiente em sensibilizar o resiste que foi exposto aos raios U.V., sendo assim a expositora pode ser utilizada na exposição de dispositivos de grandes dimensões, maiores que 100 μm , tornando-a assim útil na fabricação de dispositivos para fins didáticos.

7.3 Definição da abertura dimensional final da membrana de silício

Na corrosão anisotrópica do silício utilizando a solução de KOH. É formado um ângulo característico de $54,74^\circ$ com relação a superfície da lâmina de silício com plano cristalino (100). Para definirmos a dimensão da abertura final montamos uma equação utilizando a conceitos matemáticos.

Na corrosão anisotrópica temos o seguinte aspecto na lâmina de silício (Figura N).

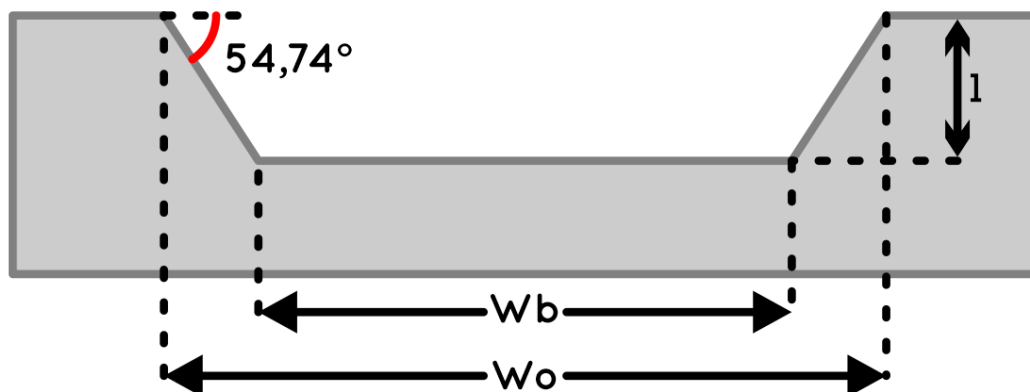
Figura 56 - Ilustração da corrosão anisotrópica.



Fonte: O próprio autor.

Definimos que a abertura inicial na lâmina de silício é (W_o), abertura formada após a corrosão é (W_b) e a profundidade da corrosão é (l), sabendo que o ângulo de corrosão é $54,74^\circ$ conseguimos formular uma equação relacionando esses parâmetros.

Figura 57 - Definições das aberturas, profundidade de corrosão e ângulo formado na corrosão anisotrópica.



Fonte: O próprio autor.

Sabendo que:

$$\operatorname{Tg} \theta = \frac{CO}{CA}$$

Temos que:

$$CO = l$$

$$CA = \frac{Wo - Wb}{2}$$

Sendo assim temos que:

$$\operatorname{Tg} 54,74^{\circ} = \frac{l}{\frac{Wo - Wb}{2}}$$

Manipulando matematicamente temos que:

$$\text{Cotg } 54,74^\circ = \frac{W_o - W_b}{2l}$$

Isolando apenas W_o temos:

$$W_o = W_b + 2l.\text{cotg}54,74^\circ \quad (2.7)$$

Equação:

Onde:

W_o = Abertura da máscara;

W_b = Abertura final na corrosão;

l = Profundidade da corrosão;