

Este exemplar corresponde à edição final da tese defendida por LUIZ OTÁVIO SARAIVA FERREIRA aprovada pela Comissão Julgadora em 07.02.94.

Universidade Estadual de Campinas
UNICAMP

Faculdade de Engenharia Elétrica - FEE.

Departamento de Eletrônica e Microeletrônica DEMIC.

Tese de Doutorado

Título da Tese : MICROSCANNER DE SILÍCIO.

Autor : Luiz Otávio Saraiva Ferreira. 413/1

Orientador : Prof. Dr. Sergio Moehlecke. t

Data da Defesa : 07 de fevereiro de 1994.

7405030325
457030325
2001-60
12
8.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Sergio Moehlecke - IFGW/UNICAMP

Prof. Dr. Wilmar Bueno de Moraes - FEE/UNICAMP

Prof. Dr. Edmundo da Silva Braga - FEE/UNICAMP

Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira - FEE/UNICAMP

Prof. Dr. Peter Jurgen Tatsh - FEE/UNICAMP

0107532

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mulher Rosângela, pelo apoio incondicional durante os longos anos deste trabalho.

Agradeço especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. Sergio Moehlecke, pela confiança depositada em meu trabalho, pela segura orientação nas inúmeras encruzilhadas, e pela paciência ante os incontáveis obstáculos.

Agradeço ao fundamental apoio da Telecomunicações Brasileiras S.A. - TELEBRAS, cujo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento - CPqD -, nas pessoas do seu Diretor Superintendente, Dr. Leôncio Vieira de Rezende Neto, e do Gerente do Departamento de Tecnologias Básicas, Dr. Hélio José Malavazi, cedeu sua equipe de Dispositivos de Alta Velocidade e suas instalações de microeletrônica para a realização da maior parte deste trabalho, equipe essa composta das seguintes pessoas:

Célio Anônio Finardi.

Antônio Marini Almeida.

Alexander Flaker.

Moacir Barnett.

Maria Filomena Cássia dos Santos.

Antônio César Gozzi.

José Molina.

Agradeço ao ex-coordenador do Laboratório de Eletrônica e Dispositivos da UNICAMP, Prof. Dr. Ozéas Valente de Avilez Filho, e ao Prof. Dr. José Antônio Siqueira Dias, pelo apoio na fase inicial deste trabalho, e ao atual coordenador do Centro de Componentes Semicondutores da UNICAMP, Prof. Dr. Luís Carlos Krettly, pela minha liberação para a conclusão deste trabalho no Laboratório de Materiais e

Dispositivos do Instituto de Física Gleb Wataghin da UNICAMP -
LMD/IFGW/UNICAMP.

Agradeço aos seguintes funcionários e ex-funcionários do Laboratório de Eletrônica e Dispositivos da UNICAMP, que ultrapassaram as obrigações profissionais para que este trabalho se concretizasse:

José Godoy Filho

Sílvia Barbutti

Patrícia Scadiucci de Freitas

Daniel Roseno da Silveira

Mara Adriana Canesqui

Agradeço a Antônio Celso Saragossa Ramos, do Laboratório de Pesquisas em Dispositivos do Instituto de Física Gleb Wataghin da UNICAMP, por ceder suas instalações e prestar preciosos serviços de corrosão por plasma.

Agradeço a Carlos Salles Lambert, do Laboratório de Filmes Finos do Instituto de Física Gleb Wataghin da UNICAMP, por prestar preciosos serviços deposição de filmes finos.

Agradeço a Antônio Augusto Godoy von Zuben, do Laboratório de Fotogravação do Instituto de Física Gleb Wataghin da UNICAMP, pelos preciosos serviços de fotogravação e metalização.

Agradeço em especial ao Prof. Dr. Edmundo da Silva Braga e sua equipe, do Laboratório de Corrosão por Plasma da Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP, composta pelo candidato a doutor Marco Antônio Robert Alves e pelo arquiteto José Godoy Filho, cujo apoio foi essencial à conclusão deste trabalho.

Agradeço ao meu irmão Nilo Martins Ferreira Filho e ao meu amigo Antônio Carlos Alexandre pelo empréstimo de suas respectivas câmaras de vídeo, com as quais documentei parte do trabalho realizado.

Dedico esta tese à minha mulher Rosângela

RESUMO

Este trabalho consiste da concepção, construção e caracterização de micro-defletores de feixes luminosos, doravante denominados "microscanners", fabricados utilizando-se a técnica de corrosão anisotrópica de silício.

Confrontaram-se, por análises quantitativas dos parâmetros ópticos e dinâmicos, as características dos diferentes defletores citados na literatura, concluindo-se pela concepção de um atuador galvanométrico monolítico de silício e chegando-se a protótipos originais que apresentam vantagens com relação aos congêneres.

Diversas técnicas, métodos e processos de microfabricação tiveram que ser desenvolvidos ou criados na UNICAMP, tais como: corrosão anisotrópica de Si; afinamento de lâminas simultâneo à corrosão; bobina planar e sua alimentação; máscaras de proteção contra corrosão; alívio de tensões mecânicas, etc. Além de dominar-se cada processo, foi necessário compatibilizá-los, de modo que os dispositivos suportassem todas as etapas da microfabricação sem deteriorar-se, pois os filmes finos usados na microfabricação sofrem agressões violentas, que causam-lhes problemas de tensões mecânicas internas, de aderência e de corrosão, os quais foram resolvidos com a seleção de materiais, otimização das condições de deposição dos filmes, tratamento térmico posterior adequado, e com o desenvolvimento de máscaras de proteção aderentes e de baixa tensão mecânica, capazes de protegê-los e aos substratos, e de suportar o processo de corrosão anisotrópica.

Cinco seqüências de fabricação foram concebidas e experimentadas, e duas geraram dispositivos caracterizáveis quanto à resposta em freqüência. Primeiro fêz-se o microscanner com suspensão por fio, com ângulo de deflexão máximo de $31,1^\circ$ à freqüência de 29,4 Hz, excitação senoidal de 3,1 mA_{pp} e campo magnético externo de 1400 Gauss. Por último fêz-se o microscanner com suspensão por barras de torção, com ângulo de deflexão máximo de 160 miligraus à freqüência de 1.570 Hz, excitação senoidal de 23,2 mA_{pp} e campo magnético externo de 3500 Gauss. O de barras de torção, mais indicado para a fabricação em larga-escala, teve analisadas alterações de parâmetros de fabricação que melhorassem seu desempenho. Por exemplo, a redução da resistência da bobina por um fator de dez implicou ângulo de deflexão oito vezes maior. Pode-se, pelo controle da largura da barra de torção e espessura da lâmina, produzir o ângulo de deflexão e a freqüência de ressonância desejados.

O domínio de todos esses processos também abriu caminho para a fabricação de outras categorias de dispositivos, tais como microsensores, microatuadores, microtriodos, displays planos, etc.

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
Capítulo 2 - Sistemas de Varredura	4
Introdução	4
Sistema de Varredura Genérico	5
Fontes de Luz	6
Defletores de Luz (Scanners)	6
O Plano Óptico de Trabalho	7
Introdução aos Lasers	7
Características de Desempenho dos Lasers	10
Eficiência	10
Portabilidade	10
Colimação	11
Coerência	12
Introdução aos Defletores de Luz (Scanners)	14
Defletores Mecânicos	14
Defletores Galvanométricos	15
Polígonos Girantes	17

Discos Holográficos.....	18
Defletores Acústicos.....	18
Defletores Acustoópticos.....	18
Defletores Eletroópticos.....	21
Defletores Birefringentes.....	21
Defletores Fotorefrativos.....	23
Lentes de Varredura.....	24
Linearidade.....	26
Diâmetro do Foco.....	26
Telecentricidade.....	27
Resolução.....	28
Transdutores de Posição.....	29
Transdutores Discretos Absolutos.....	29
Transdutores Discretos Incrementais.....	30
Transdutores Discretos Incrementais de Dois Eixos.....	32
Transdutores Analógicos PIN.....	33
O Plano Óptico de Trabalho.....	34
Conclusão.....	35
Capítulo 3 - Concepção do Microscanner Galvanométrico.....	37
Histórico.....	37
Especificações Iniciais.....	38

A Primeira Proposta de Defletor.....	38
O Microscanner de Silício.....	39
Especificação do Microscanner com Suspensão por Fitas.....	41
O Microscanner de Petersen.....	43
Crítica ao Microscanner de Petersen.....	44
Máquinas Eletrostáticas e Máquinas Eletromagnéticas.....	44
Torques Máximos Teóricos.....	49
Torques Máximos Utilizáveis.....	50
Microscanner Galvanométrico com Suspensão por Fitas.....	51
Cálculo do Desempenho Dinâmico.....	51
Microscanner Galvanométrico de Barras de Torção.....	55
Dimensionamento das Barras de Torção.....	56
Cálculo do Desempenho Dinâmico.....	66
Cálculo do Momento de Inércia do Microscanner. . .	66
Cálculo da Frequência de Ressonância Mecânica.....	67
Conclusão.....	69
Capítulo 4 - Fabricação dos Microscanners Galvanométricos.....	70
Introdução.....	70
Especificação das Trilhas Metálicas.....	71
A Primeira Sequência de Fabricação.....	72
Os Protótipos Exploratórios.....	73

A Máscara dos Protótipos Exploratórios.....	73
O Problema da Limpeza na Fabricação.....	74
Os Primeiros Protótipos Fabricados.....	76
A Caracterização do Protótipo Exploratório.....	78
Micromachining de Silício.....	80
Histórico.....	80
O Cristal de Silício.....	81
Processos de Corrosão Anisotrópica de Silício.....	82
A Escolha do Corrosivo.....	85
Causas da Tensão Mecânica em Filmes Finos.....	85
O Processo LED.....	87
Sequência de Fabricação do Microscanner de Barras de Torção - Processo LED:.....	88
Projeto das Fotomáscaras.....	90
O Primeiro Ensaio de Corrosão Anisotrópica.....	91
Proteção do Metal Contra o Ataque por KOH.....	97
Estabelecimento do Processo de Afinamento de Lâminas de Silício.....	99
Primeiro Ensaio do Processo LED.....	100
O Processo LMD1.....	104
Sequência de Fabricação do Microscanner de Barras de Torção - Processo LMD1.....	104

O Processo CPqD1.	107
Sequência de Fabricação do Microscanner de Barras de Torção - Processo CPqD1.....	108
Testes de Corrosão das Lâminas do Processo CPqD1.	110
O Processo CPqD2.	120
Sequência de Fabricação do Microscanner de Barras de Torção - Processo CPqD2.....	121
Dispositivos Fabricados Segundo o Processo CPqD2	123
O Processo LMD2.	125
Nova Geometria do Microscanner de Barras de Torção.....	127
Dispositivos Fabricados Segundo o Processo LMD2.....	129
Caracterização do Microscanner de Silício de Barras de Torção.	130
Capítulo 5 - Discussão.	133
Análise dos Resultados	133
Novos Rumos para Pesquisa.....	136
BIBLIOGRAFIA.....	138

CAPÍTULO 1

Introdução

Esta tese de doutorado consiste da concepção, construção e caracterização de micro-defletores de feixes luminosos, doravante denominados "microscanners", fabricados utilizando-se a técnica de corrosão anisotrópica de silício.

A motivação do trabalho foi a existência de um novo material para memórias ópticas de massa, pesquisado no Laboratório de Materiais e Dispositivos do Instituto de Física Gleb Wathagin da UNICAMP (LMD/IFGW/UNICAMP), que abre a possibilidade de se realizar um sistema de leitura e escrita num cartão óptico pela varredura de feixes de raios laser. Como o ponto crítico de um tal possível sistema é o dispositivo de varredura, esta tese nasceu como a busca da solução desse problema crítico.

Dentre os diversos tipos de dispositivos defletores de luz existente, os dispositivos eletromecânicos ainda são os que apresentam melhores características de custo e desempenho, ao passo que os demais tipos de dispositivos ainda permanecerão por um bom tempo longe das aplicações em grande escala. Daí se escolher o caminho de buscar, através da microfabricação em silício, que é a união do conjunto de técnicas, métodos e processos da microeletrônica com os da micromecânica em silício, dar um passo avante em matéria de defletores mecânicos para raios laser.

A pesquisa que resultou nos microscanners galvanométricos está descrita nos capítulos que se seguem, conforme a descrição abaixo:

No **Capítulo 2** é apresentada uma visão geral dos sistemas de varredura de feixes luminosos, bem como dos seus subsistemas associados, quais sejam, defletores de luz, lentes e detectores de posição, com suas características de desempenho mais relevantes.

No **Capítulo 3** são apresentadas duas propostas de defletores de luz galvanométricos planares (espelhos inscritos em bobinas planares), confeccionáveis segundo os processos de microfabricação em silício, e é feita uma comparação entre o sistema de deflexão galvanométrico proposto e o sistema de deflexão eletrostática

proposto por Petersen^[90]. Em seguida são feitos os modelamentos matemáticos dos dois tipos de microscanners galvanométricos propostos, e é dimensionado um microscanner galvanométrico monolítico de silício com suspensão por barras de torção.

No **Capítulo 4** são apresentados os processos de microfabricação pesquisados e os dispositivos com eles produzidos. Foram inicialmente implementados dispositivos com suspensão por fio, e em seguida dispositivos com suspensão por barras de torção. A fabricação dos dispositivos com suspensão por fio consistiu dos processos de limpeza de substrato, evaporação de Al, fotolitografia, corte de lâminas de silício, microsolda de fios de contato e montagem mecânica (encapsulamento). Apresentaram ângulo de deflexão máximo de $31,1^\circ$ à frequência natural de ressonância mecânica de 29,4 Hz, com uma excitação senoidal de 3,1 mA pp e campo magnético externo de 1400 Gauss. Demonstraram a viabilidade da deflexão galvanométrica na geometria planar e na escala de tamanho propostos.

A fabricação dos dispositivos com suspensão por barras de torção demandou o domínio de diversos outros processos de microfabricação, a destacarem-se os processos de mascaramento do silício para corrosão anisotrópica por KOH e o processo de corrosão anisotrópica de silício por KOH propriamente dito. Foram testadas máscaras de Si_3N_4 , Au, Pd, Au/WTi, Au/Cr, e SiO_2 , sendo as últimas duas as mais bem sucedidas. Também trabalhou-se no afinamento de lâminas de Si por corrosão isotrópica. Em ambos os tipos de corrosão foi detectada a indução de tensões mecânicas nos substratos e filmes finos de mascaramento. Propôs-se um procedimento de alívio de tais tensões, cuja efetividade foi comprovada comparando-se os difratogramas de raios X de amostras antes da corrosão, depois da corrosão, e após a corrosão e o procedimento de alívio de tensões.

O uso de furos de alinhamento demonstrou-se inconveniente, por atrapalhar a aplicação de fotoresiste nos processos de fotolitografia, e a fragilidade dos dispositivos micromecânicos levou à criação de procedimentos de fabricação de modo a manipularem-se os microscanners sem fraturá-los.

Foi obtido um microscanner de barras de torção operacional, cuja resposta em frequência apresentou ângulo de deflexão de $0,16^\circ$ à frequência natural de ressonância mecânica de 1.570 Hz, com uma excitação senoidal de 22,2 mA pp. e campo magnético externo de 3.500 Gauss.

No **Capítulo 5** são analisados os resultados alcançados, mostrando-se que os microscanners obtidos têm processos de fabricação economicamente muito convenientes e têm características de desempenho interessantes, como a linearidade com o sinal de excitação e com o campo magnético externo. Mostra-se ainda que foram abertos caminhos para pesquisas de otimização do desempenho dos microscanners; para pesquisas de suas aplicações em sistemas de memória óptica e em sistemas de impressão e de projeção de imagens a laser; e que o domínio de todas as etapas de microfabricação do microscanner, por sua vez, abriu caminho para a microfabricação de outras categorias de dispositivos, tais como microsensores, microatuadores e dispositivos microeletrônicos a vácuo (microtriodos, displays, etc).

Ao final da tese há uma extensa bibliografia, que engloba desde dispositivos de memória de massa para computadores (discos e cartões ópticos e magnéticos) até processos de fabricação de circuitos integrados e dispositivos micromecânicos.

CAPÍTULO 2

Sistemas de Varredura.

Neste capítulo o leitor terá uma visão geral dos sistemas de varredura a laser, dos dispositivos que os compõem, e de suas principais características.

Introdução.

Os sistemas de varredura a laser constituem-se em importante setor tecnológico, responsável por vastas atividades industriais e de pesquisa e desenvolvimento.

Destaca-se a área de impressão eletrônica, onde as impressoras a laser revolucionaram o mercado, seja na deposição direta da informação no papel, seja na produção de fotolitos para a indústria gráfica.

As máquinas de leitura de código de barras, em lojas e supermercados, são outro importante segmento consumidor de sistemas de varredura a laser.

Outros setores, estes ainda emergentes, são o setor de sistemas de armazenamento e recuperação de informações a raios laser, onde uma cabeça móvel de leitura e escrita de dados (vide sistemas de discos e cartões ópticos) é substituída por um sistema de varredura a laser, e o setor de projetores de TV a laser.

Descreveremos a seguir diversos tipos de sistemas de varredura a laser, seus principais componentes, princípios de funcionamento, e parâmetros críticos.

Sistema de Varredura Genérico.

Os sistemas de varredura destinam-se a produzir a varredura de um feixe luminoso sobre uma superfície denominada **Plano de Trabalho**. Tal varredura pode ser sequencial ("raster") ou caligráfica ("vector"), caso em que há a necessidade de posicionamento aleatório do feixe luminoso. A luz, gerada por uma fonte qualquer (p. ex.: lâmpada, LED, ou LASER), é posicionada sobre o plano de trabalho (que pode ser um disco ou cartão a laser de armazenamento de dados, uma amostra num sistema de medidas ou de análise, o cilindro de uma impressora a laser, a tela de um projetor de imagens, etc). Um sistema de varredura deve ter, no mínimo, as seguintes partes:

- Fonte de luz.
- Defletor de luz (ou "scanner").
- Lentes de varredura.
- Plano de trabalho.

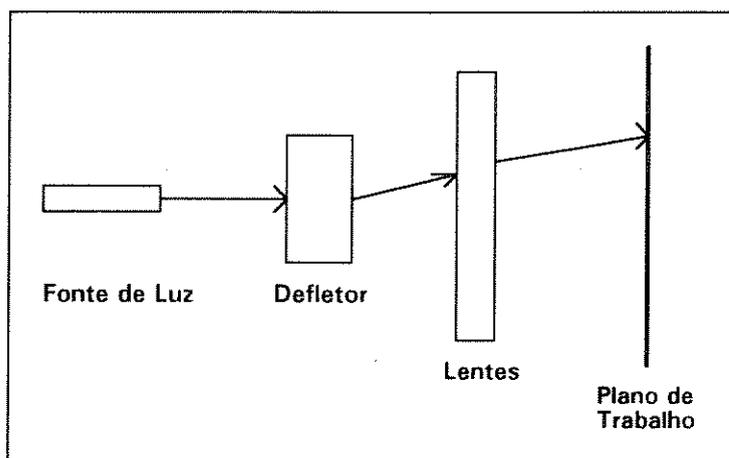


Figura 2.1: Sistema de varredura genérico.

Fontes de Luz.

As fontes de luz geralmente utilizadas em sistemas de varredura são LASERs. Este nome é uma abreviatura de "Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation" (ou Amplificação da Luz através da Emissão Estimulada de Radiação).

Os lasers caracterizam-se por emitir um feixe de luz *monocromática, coerente, intenso, concentrado, e altamente paralelo* (vide definição de tais propriedades da luz mais adiante, neste mesmo capítulo). Tais propriedades não estão todas presentes simultaneamente nas lâmpadas e LEDs. Sua presença simultânea na luz gerada pelos LASERs os torna a fonte de luz preferida em sistemas de varredura, de vez que possibilitam a obtenção de focos de luz diminutos e de alta potência, com sistemas de lentes mais simples do que com outras fontes de luz. As fontes de luz policromáticas, por sua vez, exigem complexos sistemas ópticos de correção de aberrações, e as fontes de luz não-coerentes impossibilitam a obtenção de focos de luz tão concentrados quanto os das fontes coerentes.

Defletores de Luz (Scanners).

Os defletores de luz são dispositivos que alteram a direção de propagação de um feixe luminoso. Dividem-se em três grandes categorias:

- Defletores Mecânicos^{[55][56][50][62][60][61]}
- Defletores Acusto-ópticos^[171]
- Defletores Eletro-ópticos^{[68]...[74]}

Os defletores mecânicos são constituídos de espelhos ou hologramas móveis que, ao serem girados em torno de um eixo, provocam o desvio da direção de propagação da luz incidente. São os dispositivos mais utilizados, os mais desenvolvidos, e os mais baratos.

Os defletores acusto-ópticos são constituídos de um meio transparente cujo índice de refração é modulado espacialmente pela propagação de ondas acústicas de elevada frequência. Um feixe de luz que incida em ângulo conveniente será defletido segundo o *princípio de difração de Bragg*^[17].

Os defletores eletro-ópticos operam a deflexão da luz incidente de uma das seguintes maneiras: ou através do efeito fotorefrativo^{[69][70]}, ou através de guias-de-ondas ópticas^{[71][72][74]}, ou através de espelhos de fase conjugada^[73], ou através da combinação de prismas de calcita com células de Kerr^[68].

O Plano Óptico de Trabalho.

Após ser defletido, o feixe de luz incide sobre uma superfície chamada, genericamente, de plano de trabalho, que é representado pelo cilindro, nas impressoras a laser; ou pela tela, num sistema de projeção de imagens; ou por um filme sensível à luz, no caso de um sistema de armazenamento de informação a laser com acesso aos dados por varredura; ou por uma peça mecânica a ser medida, num micrômetro a laser; etc.

Introdução aos Lasers.

Como os lasers são as principais fontes de luz utilizadas nos sistemas de varredura, serão apresentados a seguir os princípios básicos de seu funcionamento^[50], principais tipos, e características relevantes para os sistemas de varredura^[86].

O princípio básico de funcionamento dos lasers é o de *emissão estimulada de radiação*.

Consideremos um recipiente, cheio de gás com átomos ou moléculas livres, que possuem muitos *níveis de energia*, dos quais pelo menos um é *metaestável*. Incidindo-se, p. ex., luz branca sobre esse gás, muitos átomos ou moléculas serão levados, por

ressonância, a um estado quântico de energia superior. Quando os átomos ou moléculas decaem do estado de energia superior, muitos deles são retidos num estado metaestável. Caso a intensidade da luz seja suficientemente intensa, pode-se obter uma *inversão de população*, com mais átomos ou moléculas no estado metaestável do que no estado de energia inferior.

Quando um elétron qualquer passa de um estado "excitado" para o estado fundamental, é emitido um fóton de energia $h\nu$. Isto é chamado de *fluorescência*, ou *radiação fosforescente*. Através do fenômeno de ressonância, um átomo ou molécula que está no estado metaestável pode ser estimulado, quando um fóton de mesma frequência que o estado metaestável interage com ele, a emitir um outro fóton, com exatamente a mesma frequência e fase do fóton excitador (i.e., coerente com o fóton excitador), e a retornar ao seu estado de energia inferior (vide Figura 2.2).

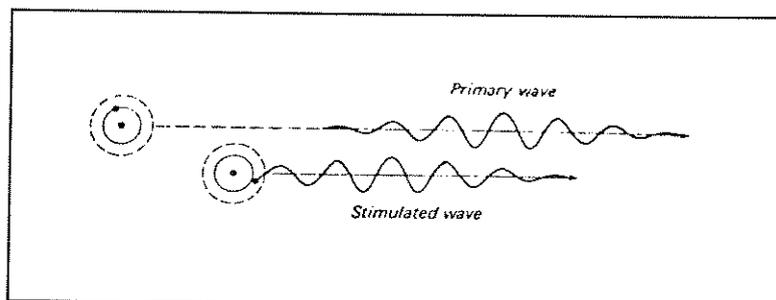


Figura 2.2: Ilustração da emissão estimulada de radiação. Ambas as ondas têm o mesmo comprimento de onda, estão em fase, e vibram em planos paralelos. (Figura extraída de [51]).

Para se produzir o efeito LASER é necessário que se *colime* a radiação estimulada, o que é feito através de uma cavidade adequada, na qual as mesmas ondas podem transitar repetidamente para produzir radiação estimulada. Suponhamos uma cavidade com espelhos altamente refletivos nas extremidades (Figura 2.3), na qual é introduzido um sólido, líquido ou gás apropriados, que possui estados metaestáveis nos seus átomos ou moléculas.

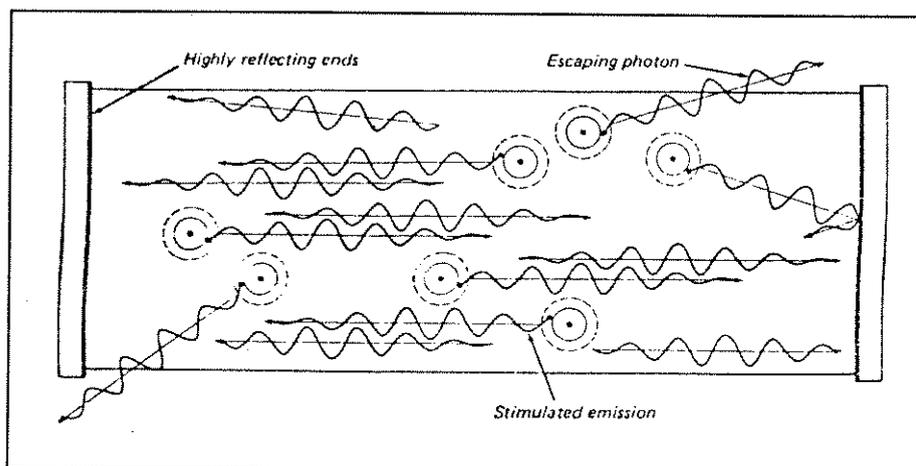


Figura 2.3: Cavidade com espelhos nas extremidades, mostrando a emissão estimulada de luz e a perda de fótons pelas paredes laterais (Figura extraída de [51]).

Excita-se de alguma maneira os elétrons desses átomos ou moléculas. Se um ou mais átomo ou moléculas do estado metaestável irradia espontaneamente, tem-se dois efeitos: os fótons que se movem a elevados ângulos com relação às paredes da cavidade ou tubo irão escapar e se perder; os fótons que se movem paralelamente às paredes da cavidade irão ser refletidos pelos espelhos, fazendo um caminho de ida-e-volta entre eles. Suas chances de provocar radiação estimulada dependem da elevada reflectância dos espelhos e da elevada população de átomos metaestáveis na cavidade. Se ambas as condições forem satisfeitas, a geração de fótons na cavidade será auto-sustentada, e o sistema oscilará espontaneamente, constituindo-se numa cavidade ressonante.

Se um dos espelhos das extremidades da cavidade ressonante for semi-transparente, sairá através dele um feixe de LASER, ao qual se poderá dar a destinação conveniente.

Existem lasers em que não são necessários espelhos nas extremidades da cavidade ressonante, como, por exemplo, os lasers de nitrogênio, embora seu princípio de funcionamento seja análogo ao descrito anteriormente.

Os lasers semicondutores têm sido os preferidos na maioria das aplicações nas áreas de impressão e de armazenamento de informação, devido à sua superioridade em eficiência, custo e portabilidade, e por possibilitarem modulação direta do feixe

luminoso pela variação da corrente de excitação, dispensando os volumosos e caros moduladores necessários aos outros tipos de laser. Apresentam como desvantagens o comprimento de onda fora do espectro visível, na faixa do infravermelho próximo, e o astigmatismo do feixe gerado. Já estão começando a aparecer no mercado lasers semicondutores com emissão no espectro visível, mas ainda são muito caros e de baixa potência. Uma solução intermediária disponível é passar-se o feixe infravermelho emitido por lasers semicondutores através de cristais de materiais ópticos não-lineares, e assim obter-se um feixe no espectro visível, com frequência igual a um múltiplo da frequência do feixe original.

Características de Desempenho dos Lasers.

Na escolha de um laser, além da potência e do comprimento de onda desejado, tem-se que considerar outras características de desempenho, as quais serão apresentadas em seguida.

Eficiência.

É a razão entre a energia gasta para excitar o dispositivo e a energia convertida na radiação desejada. Varia desde 0,002%, nos lasers de argônio^[54], passando pelos 0,01% dos lasers de hélio-neônio^[54], até chegar a mais de 40% nos lasers semicondutores^[86].

Portabilidade.

O tamanho e o peso dos dispositivos é determinante na viabilidade de algumas aplicações como, por exemplo, as impressoras a laser^[54]. Neste aspecto os lasers semicondutores são os melhores, pois são do tamanho de grãos de sal de cozinha. Os outros tipos de laser necessitam de estruturas físicas muito maiores. Por exemplo, os lasers de argônio geram 0,6 mW (a 514,5 nm) por centímetro de comprimento do

tubo^[54], e os de hélio-neônio geram 0,167 mW (a 632,8 nm) por centímetro de comprimento do tubo^[54].

Colimação.

Neste caso, significa o paralelismo dos raios luminosos que compõem o feixe emergente da cavidade ressonante do laser. Idealmente os raios seriam perfeitamente paralelos, ou perfeitamente "colimados". No entanto, o feixe que emerge da cavidade ressonante sofre, dentre outros, o efeito de difração no orifício de saída, o qual, supondo-se um feixe de intensidade uniforme em toda a sua seção transversal D , é descrito^[50] pela Equação 2.1.

$$\theta = 2,44 \frac{\lambda}{D} \quad (2.1)$$

Onde

θ	=	ângulo de abertura do feixe, em rad.
λ	=	comprimento de onda do laser, em cm.
D	=	diâmetro de feixe de laser, em cm.

O perfil do feixe geralmente é gaussiano (vide Figura 2.4) e não, como suposto acima, uniforme.

Outra característica desejável do feixe de laser é que sua seção transversal seja circular, por ser a forma que tanto possibilita a maior concentração de potência numa dada área quanto apresenta simetria em todas as direções. A seção mais comum é a elíptica. Geralmente corrige-se a divergência e a assimetria do feixe com o mesmo conjunto óptico. No caso de feixe com seção circular, uma simples lente convergente corrigiria a divergência, tornando-o colimado. No caso de feixe com seção elíptica é necessário o acréscimo de uma lente cilíndrica, a fim de se lhe corrigir a seção para a forma circular ideal.

Coerência.

Entende-se por *coerência espacial*^[50] a constância da diferença de fase entre os raios que passam em dois pontos fixos do plano normal ao feixe, e por *coerência temporal*^[50] a constância da diferença de fase entre as medidas efetuadas em um único ponto do feixe em dois instantes de tempo separados por um intervalo de tempo fixo. Os lasers, desde que operando em faixa de frequência muito estreita, são fontes quase ideais de luz coerente. A coerência é fundamental na produção dos fenômenos de interferência, que são a base, por exemplo, da holografia.

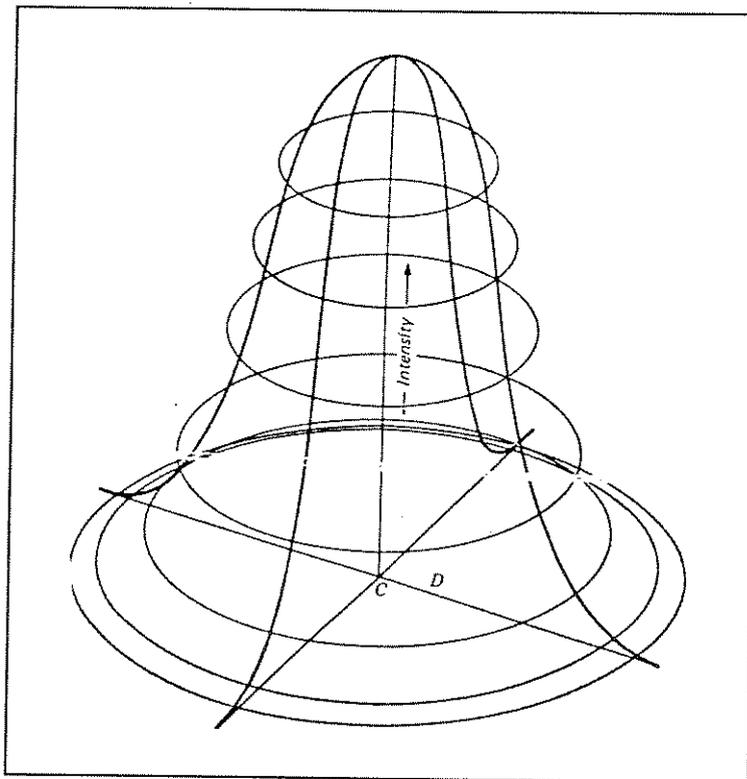


Figura 2.4: Perfil gaussiano de um feixe de laser.
(Figura extraída de [51]).

A coerência também é fundamental para a capacidade de se concentrar o feixe de laser em um foco muito pequeno que, a depender do sistema de focalização empregado, pode chegar ao diâmetro de aproximadamente um comprimento de onda. A Figura 2.5 mostra um feixe de luz de comprimento-de-onda λ , frente de onda plana,

coerente, monocromático e polarizado, emergindo de um laser, onde os pontos x_1 e x_2 são os pontos de medida da coerência temporal, e os pontos y_1 e y_2 são os pontos de medida da coerência espacial.

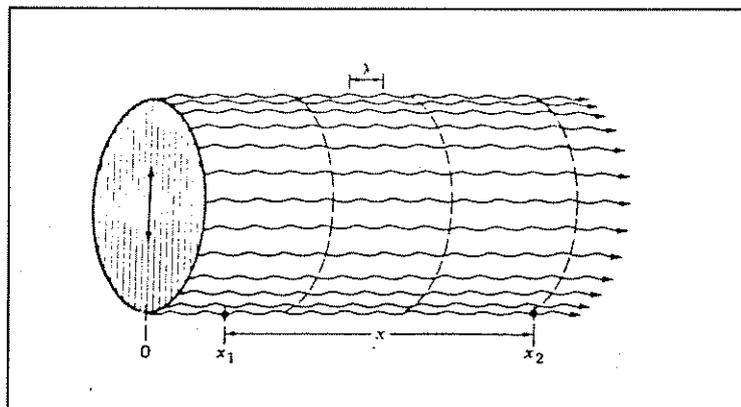


Figura 2.5: Ilustração das coerências espacial e temporal de um feixe de laser.

A Figura 2.6 mostra a colimação de um feixe de laser. Na parte superior da figura está mostrada a secção do feixe em cada trecho de sua trajetória, notando-se que o feixe é, inicialmente, divergente e elíptico. Após atravessar a lente esférica o feixe torna-se colimado, mas continua elíptico. Somente após atravessar a lente cilíndrica é que o feixe torna-se circular.

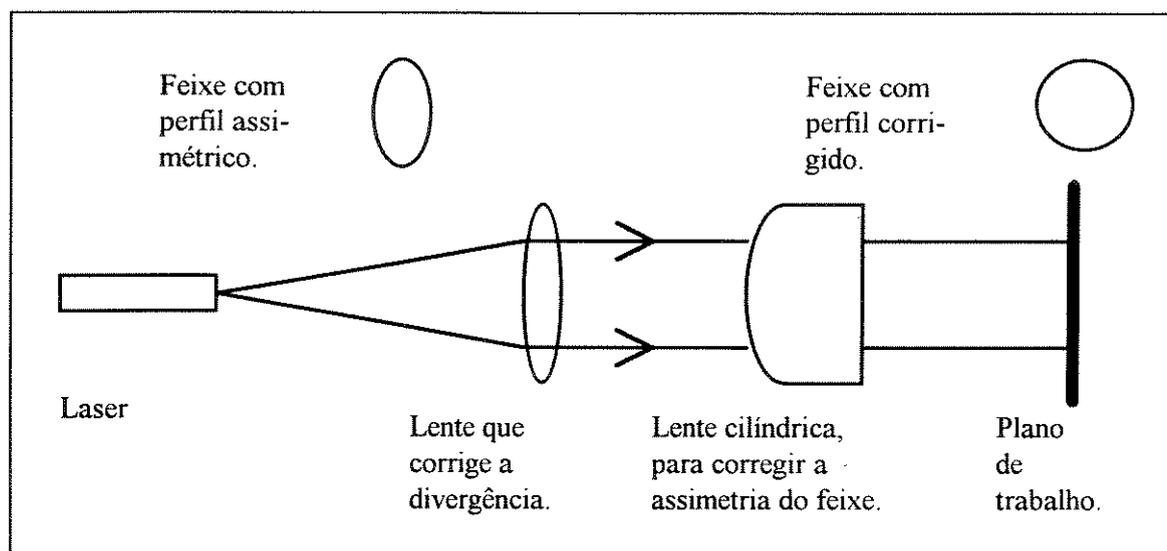


Figura 2.6: Sistema colimador de feixe luminoso.

Introdução aos Defletores de Luz (Scanners).

Os "scanners" são dispositivos capazes de, sob comando, alterar a direção de propagação de um feixe luminoso. Conforme [50], são os seguintes os tipos de "scanners":

Scanners						
Mecânicos			Acústicos	Eletroópticos		
Galvanométricos		Polígonos Girantes	Discos Holográ- ficos	Acustoópticos	Birefrin- gentes	Fotore- frativos
Resso- nantes	Faixa-larga					

Cada um dos tipos de "scanner" listados acima será apresentado nos itens a seguir.

Defletores Mecânicos.

Foram os primeiros a serem desenvolvidos. Desses, os mais recentes são os discos holográficos. São robustos e confiáveis, mas volumosos e de desempenho limitado.

Defletores Galvanométricos.

Baseiam-se no princípio do galvanômetro^[104]. A modulação da corrente na bobina do ferro-móvel produz uma deflexão proporcional à corrente aplicada. A força defletora F_1 é proporcional à corrente I aplicada e, ligando-se o ferro-móvel à base de sustentação por uma mola de constante de elasticidade K_M conhecida, tem-se um ângulo de deflexão θ proporcional à corrente aplicada (Figura 2.7), no qual a mola gera uma força de reação F_2 contrária à força F_1 .

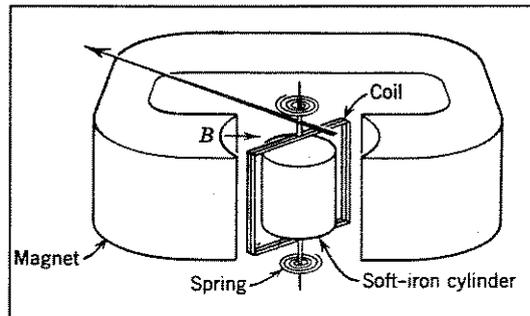


Figura 2.7: Vista interna de um galvanômetro (Figura extraída de [104]).

A condição de equilíbrio do sistema é atingida quando a força de ação F_1 se iguala à força de reação F_2 , conforme as equações abaixo:

$$\begin{aligned} F_1 &= K_1 I \\ F_2 &= K_M \theta \end{aligned} \quad (2.2)$$

onde:

- F_1 = Força de deflexão gerada pela corrente I .
- F_2 = Força restauradora da mola do galvanômetro.
- K_1 = Constante do circuito magnético do galvanômetro.
- K_M = Constante da mola do galvanômetro.
- θ = Ângulo de deflexão do ferro-móvel.
- I = Corrente da bobina do ferro-móvel.

Quando em equilíbrio ter-se-á:

$$\begin{aligned} F_1 &= F_2 \\ K_M \theta &= K_1 I \\ \theta &= \frac{K_1}{K_M} I \end{aligned} \quad (2.3)$$

Tais equações supõem elementos ideais na construção do galvanômetro. Nos galvanômetros reais tem-se que levar em consideração a histerese do núcleo do ferro-móvel e da mola, além das distorções devidas a imperfeições do eixo (que desalinham o espelho), e devidas a deformações que o espelho sofre por causa das acelerações durante o acionamento do sistema. A dissipação de calor pela bobina-móvel também contribui para alterar as características do sistema.

Os melhores galvanômetros dão uma resolução de 1.000 pontos por varredura. O uso de realimentação de posição neutraliza a maior parte das perturbações do sistema: num primeiro passo adiciona-se um codificador de posição angular ao eixo do galvanômetro, conseguindo-se assim uma resolução de posicionamento de até 4.000 pontos por varredura; e num segundo passo mede-se diretamente a posição do feixe defletido pelo galvanômetro, quando então, segundo a literatura^[62], obtém-se resolução melhor que 40.000 pontos por varredura.

Os defletores galvanométricos dividem-se em duas categorias: Banda-Base e Ressonantes. Os defletores Banda-Base podem ser acionados por sinais que vão de zero Hz até uma frequência máxima de operação, e possibilitam o posicionamento aleatório do feixe luminoso defletido. Os galvanômetros ressonantes têm sua operação restrita a uma frequência de varredura fixa, e são mais indicados para sistemas de varredura tipo televisão (diz-se sistemas tipo "raster"), onde não é necessário o posicionamento aleatório do feixe luminoso como por exemplo: leitoras de código de barras, impressoras a laser, projetores de imagens a laser, fotocompositoras, fotoplotters, etc.

Polígonos Girantes.

Os polígonos girantes^[50] reúnem as vantagens de elevada taxa de varredura e grande confiabilidade. Suas desvantagens são ter apenas varredura cíclica, grande tamanho e peso, e muita sensibilidade às vibrações do eixo do motor. Não podem ser empregados em sistemas que exijam posicionamento aleatório do feixe. Oferecem resolução de até 30.000 pontos por varredura.

Sua estrutura consiste de um polígono de faces espelhadas que gira acoplado ao eixo de um motor elétrico (Figura 2.8). Geralmente são empregados motores elétricos C.C. sem escovas, por motivo de confiabilidade.

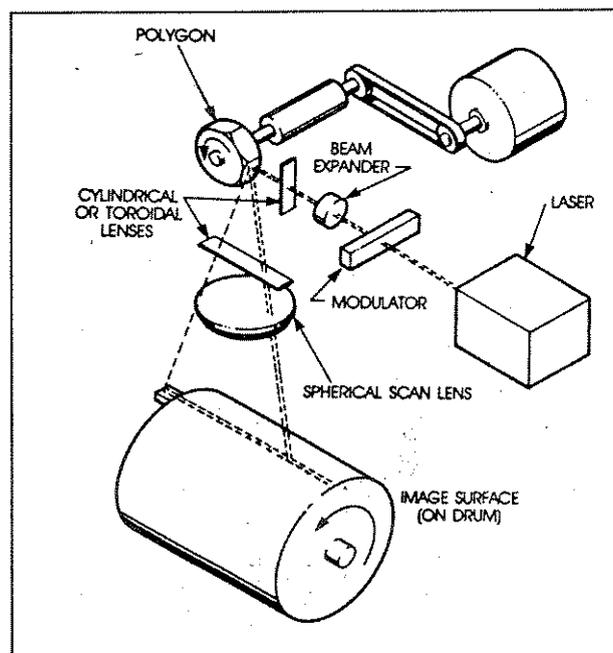


Figura 2.8: Sistema de varredura com polígono girante (Figura extraída de [50]).

Não se conseguem fazer polígonos isentos de imperfeições, das quais a mais crítica é o erro piramidal, que é a diferença de inclinação das faces com relação ao eixo de rotação. Este erro faz com que a varredura seja não-uniforme, com linhas entrecruzadas ("cross-scan error").

Discos Holográficos.

Os discos holográficos são, na verdade, redes de difração giratórias, acopladas ao eixo de um motor. À medida que o disco gira, o feixe de laser que o atravessa sofre deflexão (Figura 2.9). Oferecem resolução de até 20.000 pontos por varredura. Têm a vantagem de baixa sensibilidade da varredura às vibrações do eixo do motor, mas também não permitem posicionamento aleatório do feixe defletido.

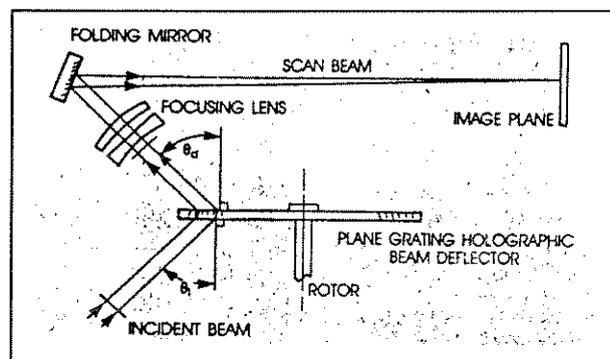


Figura 2.9: Sistema de varredura com disco holográfico (Figura extraída de [50]).

Defletores Acústicos.

Foram desenvolvidos mais recentemente que os defletores mecânicos. Têm pouca aplicação, resolução limitada, e complexa eletrônica de acionamento.

Defletores Acustoópticos.

Possuem resolução de até 2.000 pontos por varredura^[17]. Baseiam-se na interação de um feixe de luz com um feixe ultrasônico. Tal interação foi prevista por Brillouin em 1922, e teve verificação experimental em 1932.

Pode-se fazer uma analogia entre a deflexão acústico-óptica e a difração de raios X nos cristais (Figura 2.10), onde os planos atômicos causam reflexões múltiplas de uma onda plana incidente. Tais reflexões interferem construtivamente, para certos ângulos de incidência da onda eletromagnética, produzindo um reforço na reflexão total resultante.

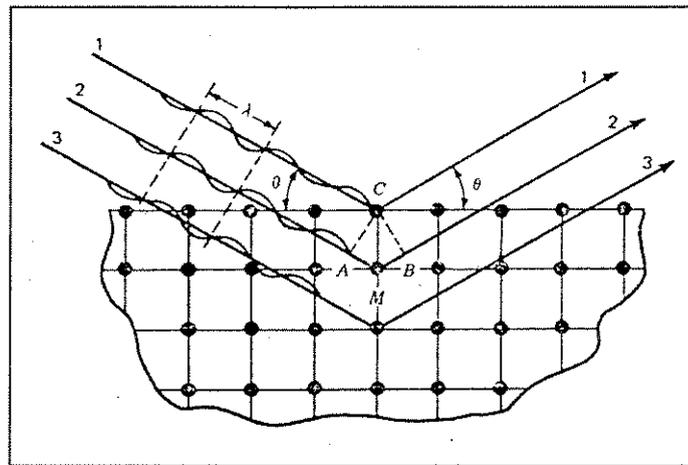


Figura 2.10: Difração de Bragg de raios X num cristal (Figura extraída de [51]).

Na difração acústica os planos atômicos são substituídos pelos planos de compressão e rarefação do material do transdutor, efeito esse causado pela propagação das ondas ultrasônicas. As frequências ultrasônicas usuais situam-se entre 1 MHz e 2 GHz.

Para certos ângulos críticos α_B de incidência de uma onda luminosa de frequência ω_p , denominados **ângulos de Bragg**, é gerado um novo feixe luminoso cuja direção de propagação difere da direção do feixe incidente por um ângulo $2\alpha_B$ (Figura 2.11).

Conforme o feixe ultrasônico se propaga em sentido igual ou contrário ao do feixe luminoso, ocorre um deslocamento Doppler negativo (parte superior da figura) ou positivo (parte inferior da figura) do feixe luminoso incidente, resultando num desvio de sua direção de propagação.

Variando-se a frequência ω da onda ultrasônica, varia-se o ângulo de deflexão do feixe luminoso, pois este tem sua frequência alterada para $\omega_l \pm \omega$, o que, pela lei de Snell, resulta em alteração do seu ângulo de refração.

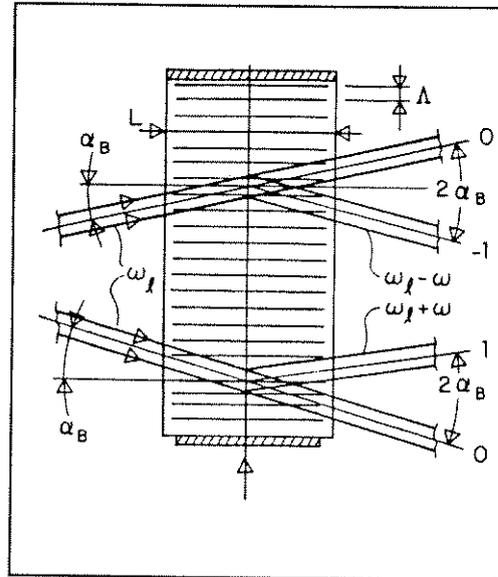


Figura 2.11: Defletor acustoóptico (Figura extraída de [17]).

O ângulo de Bragg, α_B , é dado por:

$$\sin(\alpha_B) = \frac{\lambda}{2\Lambda} \quad (2.4)$$

onde

λ = comprimento de onda da luz no meio acústico.

Λ = comprimento de onda do feixe ultrasônico.

Donde se vê que, variando-se a frequência (comprimento de onda) do feixe ultrasônico varia-se o ângulo de Bragg α_B .

Defletores Eletroópticos.

Os defletores eletroópticos possibilitam não só o posicionamento aleatório do feixe defletido, como também altíssima velocidade de operação. Têm aplicação restrita a laboratórios, pois encontram-se em fase de pesquisa e desenvolvimento, e as resoluções obtidas são relativamente baixas. Seus principais tipos são: defletores Birefringentes, e defletores Fotorefrativos.

Defletores Birefringentes.

Baseiam-se na propriedade de dupla refração da luz apresentada por certos materiais, sendo que o mais conhecido é o cristal de calcita. A literatura registra sistemas com resolução de até 1024 pontos por varredura^[68].

O feixe de luz incidente, ao passar pelo cristal, é dividido em dois feixes: o feixe **extraordinário (e)** e o feixe **ordinário (o)**. O feixe extraordinário tem polarização paralela ao eixo óptico, e o feixe ordinário tem polarização ortogonal ao feixe extraordinário (Figura 2.12).

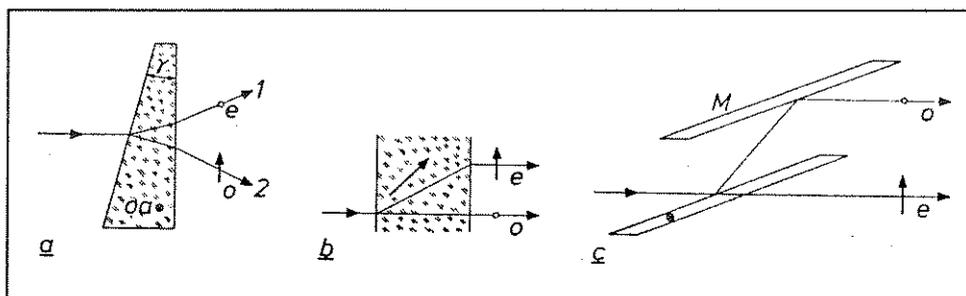


Figura 2.12: Defletores birefringentes. (a) Prisma. (b) Placa de faces paralelas. (c) Placa birefringente e espelho (Figura extraída de [68]).

Fazendo-se com que o feixe incidente tenha polarização tipo ordinária ou extraordinária, faz-se com que apenas um ou outro feixe saia do outro lado do cristal. Fazendo-se o plano de propagação do feixe girar, pode-se comutar também o sentido de propagação do feixe. Um dispositivo usado para girar o plano de polarização do

feixe é a **célula de Kerr**, um par de eletrodos que submete o nitrobenzeno entre eles a um campo elétrico. Variando-se o campo elétrico varia-se o ângulo de rotação do plano de polarização da luz que atravessa a célula. Girando-se o ângulo de 90° , muda-se o feixe de um tipo para outro (de ordinário para extraordinário ou vice-versa), fazendo-o seguir um dos dois caminhos (ângulos) possíveis (Figura 2.13).

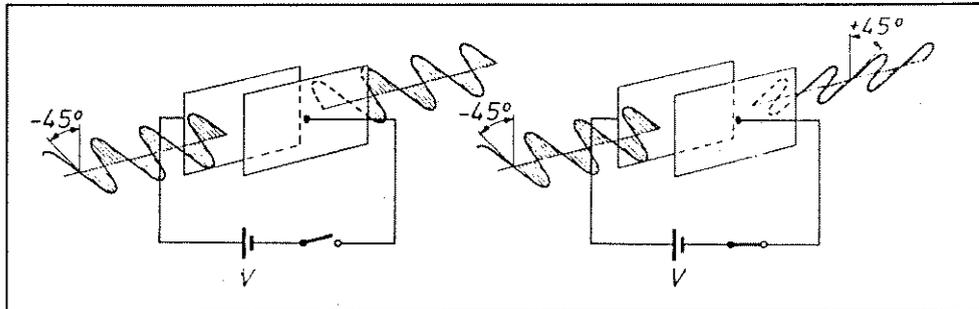


Figura 2.13: Célula de Kerr (Figura extraída de [68]).

Assim sendo, cada conjunto "prisma de calcita-célula de Kerr" dobra o número de caminhos que um feixe de luz incidente pode percorrer. Para N conjuntos tem-se 2^N possíveis caminhos que o feixe pode percorrer, ou 2^N ângulos de deflexão (Figura 2.14).

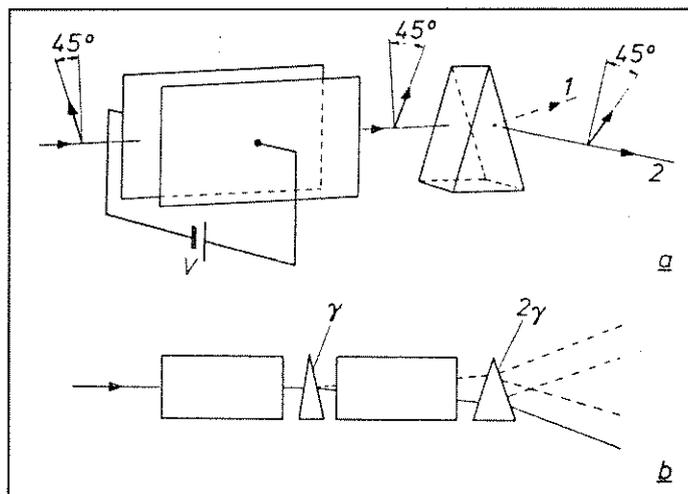


Figura 2.14: Estágio defletor: Célula de Kerr e prisma birefringente (Figura extraída de [68]).

Um arranjo conveniente possibilita a deflexão simultaneamente em dois eixos (Figura 2.15). A literatura^[68] mostra que sistemas deste tipo com até 20 estágios de deflexão já foram construídos com êxito.

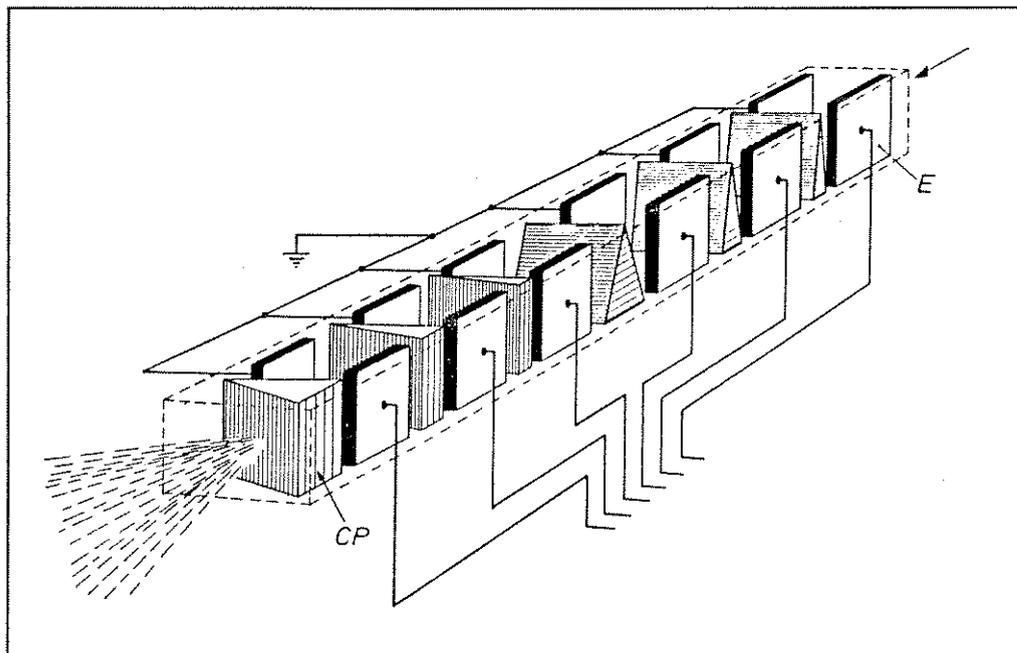


Figura 2.15: Defletor birefringente X - Y de seis estágios (Figura extraída de [68]).

Defletores Fotorefrativos.

Os defletores fotorefrativos baseiam-se num princípio semelhante ao da difração de Bragg, com a diferença que, ao invés de planos de compressão e rarefação do material devidos a uma onda ultrasônica, tem-se a modulação espacial do índice de refração de um material óptico não-linear através da interferência de dois feixes de laser. Variando-se a frequência de um dos lasers, varia-se o ângulo de deflexão do terceiro feixe de laser^[73].

Uma variação deste método mantém fixa a frequência dos lasers de excitação, e modula a rede de difração induzida pelos feixes através de campos eletrostáticos aplicados ao cristal não-linear^[70] (Figura 2.16).

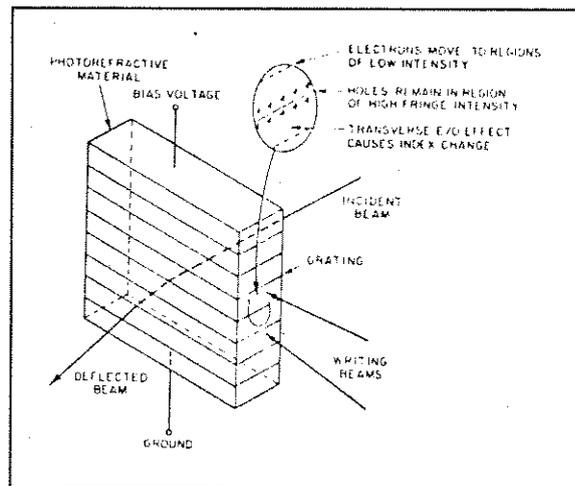


Figura 2.16: Defletor fotorefrativo (Figura extraída de [70]).

Outro método de deflexão eletroóptico é através de um conjunto de guias-de-onda ópticas paralelas, nas quais são aplicados campos elétricos externos, de modo a se provocarem diferentes mudanças de fase na frente de onda luminosa que atravessa o dispositivo. Resulta então um padrão de interferência das frentes de onda defasadas, padrão esse que muda de acordo com os campos aplicados. O ponto focal é o ponto de interferência construtiva das frentes de onda emergentes das guias de onda. O ângulo de propagação desse feixe assim definido varia conforme a intensidade do campo elétrico aplicado^[71]. As referências citadas noticiam resoluções na faixa de até 1.000 pontos por varredura.

Lentes de Varredura.

As fontes de luz de interesse neste trabalho são os LASERs, de maneira que, por serem fontes monocromáticas e coerentes, as lentes são específicas^[77]. As lentes usadas para outras fontes de luz não serão consideradas.

Lentes de varredura consistem do conjunto óptico que coleta o feixe defletido, de diâmetro D , e o faz convergir para o plano de trabalho, num foco de diâmetro d (Figura 2.17). Essas lentes são necessárias porque as fontes de luz geram feixes luminosos que podem apresentar divergência, perfil não-circular, e diâmetro diferente do desejado. Com o uso de lentes é possível alterar-se o perfil do feixe luminoso, sua divergência e seu diâmetro, de maneira que no plano de trabalho obtenha-se o foco com o perfil adequado.

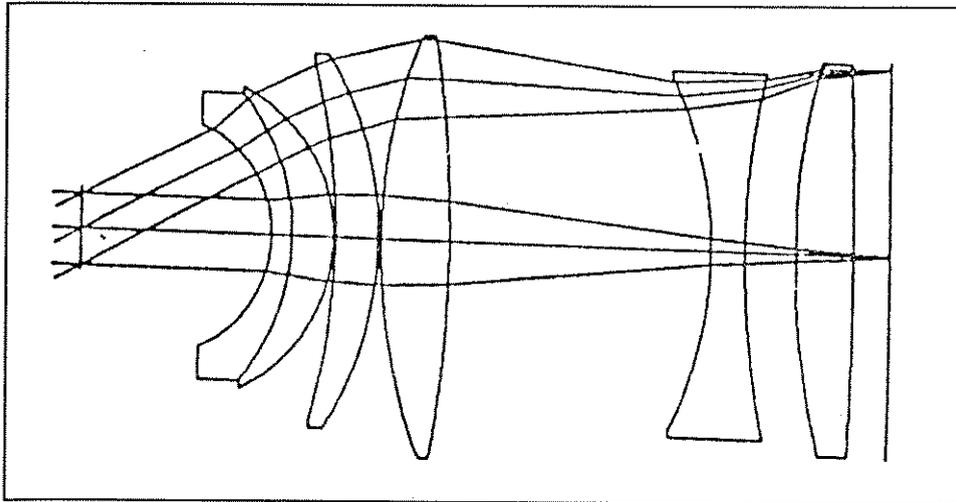


Figura 2.17: Diagrama óptico de uma lente de varredura (Figura extraída de [77]).

Como o plano de trabalho é, geralmente, uma superfície plana, tornam-se necessárias lentes que apresentem curvatura do plano focal muito pequena (o ideal seriam lentes com plano focal sem curvatura). Com lentes comuns tem-se que a posição do feixe no plano de trabalho é proporcional à tangente do ângulo θ de deflexão. É também desejável que a posição do feixe no plano de trabalho seja linearmente proporcional ao ângulo de deflexão do feixe luminoso o que pode ser obtido com o emprego das lentes " $f-\theta$ ", que apresentam a seguinte relação básica:

$$L = 2f\theta \quad (2.5)$$

onde:

L	=	comprimento total da linha varrida.
f	=	distância focal.
θ	=	metade do ângulo total de varredura.

Serão apresentadas a seguir as principais características das lentes de varredura.

Linearidade.

É a capacidade da lente manter a proporção entre o deslocamento do feixe luminoso no plano de trabalho e o ângulo θ . É expressa pela seguinte relação:

$$\text{Linearidade} = \frac{S}{L} 100(\%) \quad (2.6)$$

onde:

S	=	desvio da posição teórica.
L	=	comprimento da linha de varredura.

Os valores típicos de linearidade situam-se entre 1% e 0,1%, conforme [77].

Diâmetro do Foco.

O feixe luminoso produzido por um laser e focalizado por uma lente perfeita produziria um foco de perfil de intensidade gaussiano (Figura 2.4). A definição de diâmetro do foco mais aceita é a de que ele é igual ao diâmetro de intensidade $1/e^2$ (13,5%) do perfil gaussiano, que é dado pela fórmula:

$$d = k\lambda \frac{f}{n} \quad (2.7)$$

onde:

$$\begin{aligned}
 d &= \text{diâmetro do foco.} \\
 k &= \text{constante fornecida pelo fabricante da lente.} \\
 \lambda &= \text{comprimento de onda do laser.} \\
 \frac{f}{n} &= \text{número } f \text{ da lente.}
 \end{aligned}$$

O número f das lentes de varredura não guarda relação direta com seu diâmetro, mas sim com o diâmetro do feixe de laser. Como o feixe de entrada ilumina apenas uma parte da lente em cada instante, a abertura limitante do sistema óptico é ou o expensor de feixe ou o espelho de varredura (no caso de defletor eletromecânico). No projeto de lentes de varredura considera-se que a pupila de entrada tem o diâmetro D do feixe de laser expandido. Daí que a definição de número f da lente, que é igual à sua distância focal dividida pelo seu diâmetro torna-se igual a:

$$\text{número } f \text{ da lente} = \frac{f}{D} \quad (2.8)$$

Para um sistema óptico perfeito o valor de k (Eq. 2.7) seria igual a 1,83. Na prática obtém-se valores em torno de 2. Tal valor deve-se a um aumento de 10% no diâmetro do foco, causado por erros e aproximações de projeto e manufatura da lente, que degradam a frente-de-onda do feixe de luz. Por exemplo: para um diâmetro do foco teórico de $6,48\mu\text{m}$ ($k=1,83$), obtém-se um diâmetro real em torno de $7,1\mu\text{m}$ ($k=2,0$).

Telecentricidade.

É a capacidade da lente em fazer com que os feixes emergindo dela sejam todos paralelos ao eixo óptico. Isto força o elemento final da lente a ser maior que a linha de varredura, i.e., ter um diâmetro maior que o comprimento total L da linha varrida, o que faz com que a lente telecêntrica (Figura 2.18) seja melhor e mais cara que uma lente convencional equivalente (Figura 2.19):

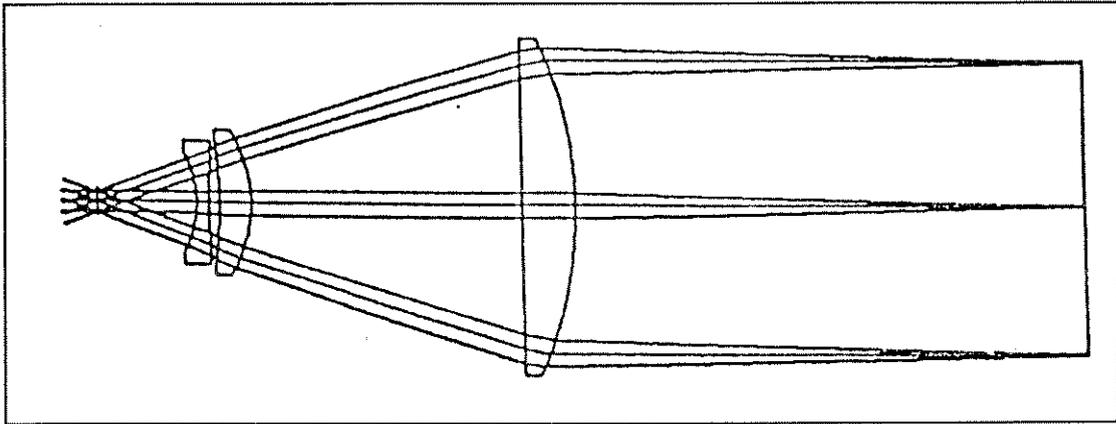


Figura 2.18: Lente telecêntrica de 200 mm f/20 (Figura extraída de [77]).

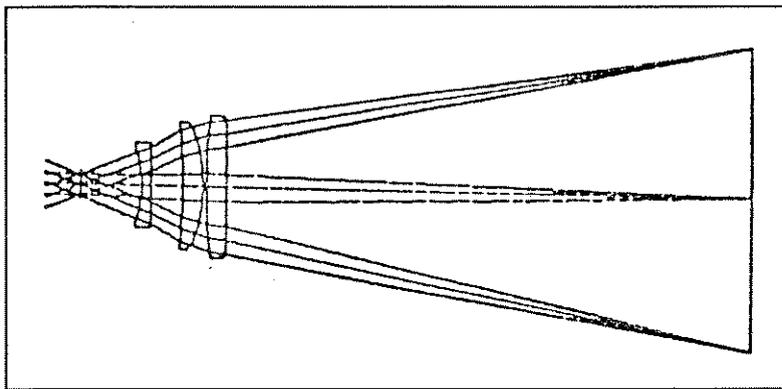


Figura 2.19: Lente comum de 200 mm f/20 (Figura extraída de [77]).

Resolução.

É o número de "pixels" que podem ser alinhados numa mesma varredura, onde cada "pixel" tem o diâmetro do foco do feixe de laser. É dada pela seguinte equação:

$$R = \frac{L}{d} = \frac{D\theta}{L} \quad (2.9)$$

onde:

- R = resolução, em "pixels" por varredura.
 L = comprimento da linha de varredura.
 d = diâmetro do foco do laser no plano de trabalho.
 D = diâmetro do foco expandido do laser na entrada da lente.
 θ = metade do ângulo total de varredura.

Usando-se a resolução das lentes como referência, pode-se classificá-las da seguinte forma:

Resolução de Lentes de Varredura (em "pixels").	
< 5.000	baixa resolução.
5.000 - 10.000	média resolução.
10.000 - 25.000	alta resolução.
>25.000	estado-da-arte.

Transdutores de Posição.

Em alguns sistemas de varredura é necessária a realimentação de posição do feixe de laser. Para tal utilizam-se uma série de tipos de dispositivos, descritos a seguir.

Transdutores Discretos Absolutos.

Consistem de um arranjo de fotodetectores, cada um numa posição pré-estabelecida^{[78][79]} (Figura 2.20).

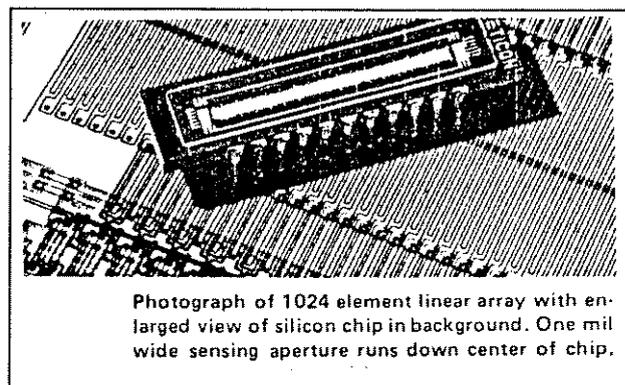


Figura 2.20: Transdutor discreto absoluto (Figura extraída de [79]).

Apresentam a vantagem de posição já discretizada, eliminando-se os erros de uma eventual medida analógica, e se forem usados fotodiodos tem-se resposta muito rápida (nanosegundos), e se forem utilizados CCDs tem-se grande sensibilidade à luz.

No entanto apresentam como eventual desvantagem a limitação física do número de pontos discretos detectados, porque os detectores são relativamente grandes.

Transdutores Discretos Incrementais.

Uma variação do dispositivo anterior consiste de um reticulado no caminho óptico do feixe de laser^[55] de tal forma que, contando-se o número de vezes que o feixe é interrompido durante a varredura tem-se o número de incrementos de posição de que o feixe foi defletido (Figura 2.21).

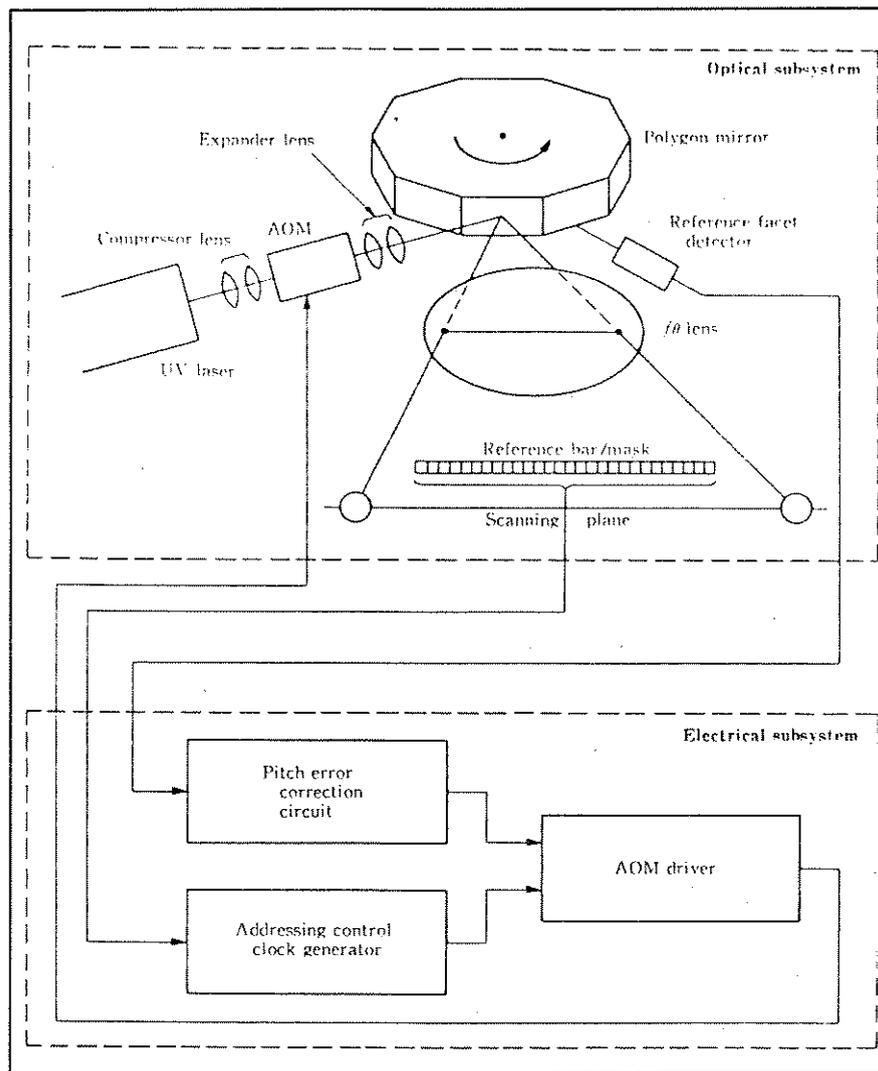


Figura 2.21: Transdutor discreto incremental num sistema de varredura com polígono girante. Distinguem-se as seguintes partes do sistema: a) Modulador acústico-óptico (AOM) b) Sincronizador do AOM com a posição do feixe (Addressing control clock generator) c) Compensador das imperfeições de alinhamento (pitch error) das faces do polígono (Pitch error correction circuit). (Figura extraída de [55]).

Conforme a figura anterior, o detector de início de varredura aciona o contador de posição. A partir daí, toda interrupção do feixe de laser devida ao reticulado faz com que o contador seja incrementado. O conteúdo do contador será um número inteiro correspondente ao número de incrementos de posição de que o feixe foi defletido. Ao ser atingido o detector de fim de varredura a contagem é inibida e o contador é zerado, preparando-se o sistema para um novo ciclo.

Este tipo de detector é adequado para sistemas de varredura unidirecionais (p. ex.: impressoras a laser), pois não há detecção do sentido do movimento do feixe.

Nos casos onde é importante se saber o sentido do movimento utiliza-se uma variação do sistema anterior^[52], que consiste de dois reticulados paralelos defasados de meia retícula (Figura 2.22).

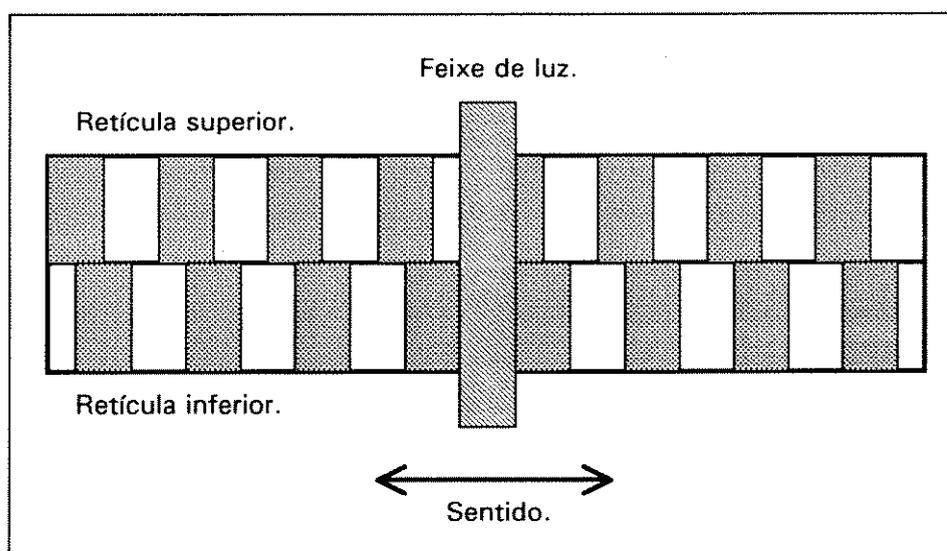


Figura 2.22: Interseção do feixe de laser com o reticulado.

Transdutores Discretos Incrementais de Dois Eixos.

Pode-se estender os conceitos utilizados no item anterior para a detecção da posição de um feixe de laser segundo dois eixos (X - Y), mediante o uso de um reticulado bidimensional e dois feixes de laser para cada eixo. O emprego de luz polarizada permite que se separem os feixes referentes aos eixos X e Y através de filtros polarizadores (Figura 2.23).

Um sistema baseado neste princípio, com resolução de 44.000 "pixels" por eixo, já foi implementado com êxito^[62].

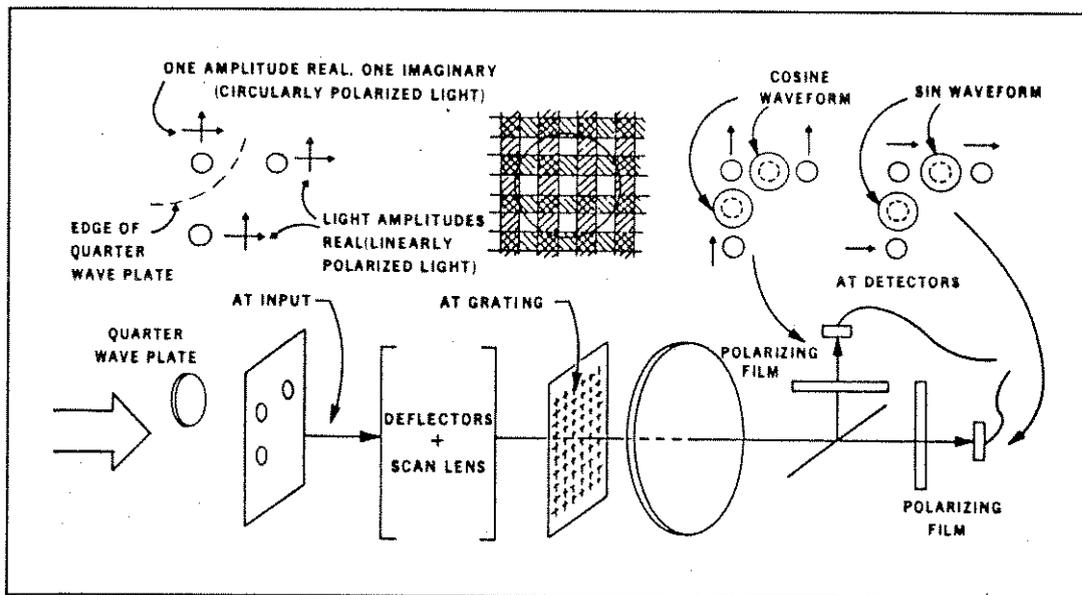


Figura 2.23: Transdutor de posição incremental bidirecional de dois eixos (Figura extraída de [62]).

A interseção do feixe circular com os retículos produz uma modulação espacial senoidal da intensidade luminosa transmitida pelo reticulado em função da posição do feixe de luz. Como para cada eixo tem-se dois feixes separados de meia retícula, tem-se um par de sinais SENO e COSENO para cada eixo, o que reduz o problema ao caso anterior.

Transdutores Analógicos PIN.

Utilizam uma estrutura semicondutora tipo PIN (Positivo, Intrínseco, Negativo) para gerar o sinal analógico correspondente à posição do feixe de luz incidente (Figura 2.24).

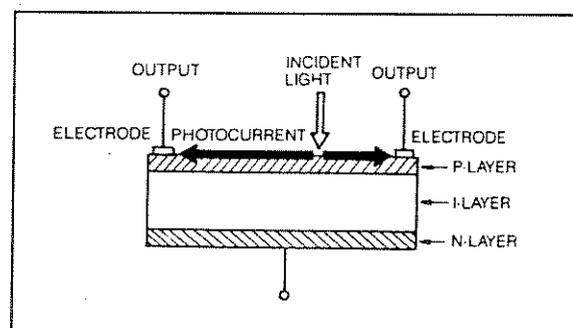


Figura 2.24: Transdutor analógico PIN (Figura extraída de [80]).

A luz incidente gera cargas elétricas proporcionalmente à sua energia. As cargas fluem pela camada P para os eletrodos. Como a camada P tem resistividade uniforme, a fotocorrente coletada por cada eletrodo é inversamente proporcional à distância entre ponto de incidência do feixe e o eletrodo.

Para medidas de posição em dois eixos, usa-se um dispositivo com eletrodos nas faces superior e inferior de um fotodiodo. É como se houvessem dois dispositivos iguais ao descrito acima colocados ortogonalmente um sobre o outro. Cada um mediria a posição segundo um eixo.

O Plano Óptico de Trabalho.

Denomina-se **Plano de Trabalho** à superfície sobre a qual o feixe de luz defletido incide a fim de cumprir com a finalidade desejada. Como exemplo tem-se o cilindro das impressoras a laser, ou a superfície dos cartões de armazenamento de dados a laser, ou a tela dos projetores de imagens a laser. No primeiro caso a varredura é unidimensional e unidirecional, e nos outros dois casos a varredura é bidimensional, o que exige lentes, transdutores de posição e controladores específicos. Como exemplo temos um sistema de confecção de fotomáscaras metálicas por varredura de laser^[62], onde o plano de trabalho é uma placa recoberta por um filme fino metálico (Figura 2.25).

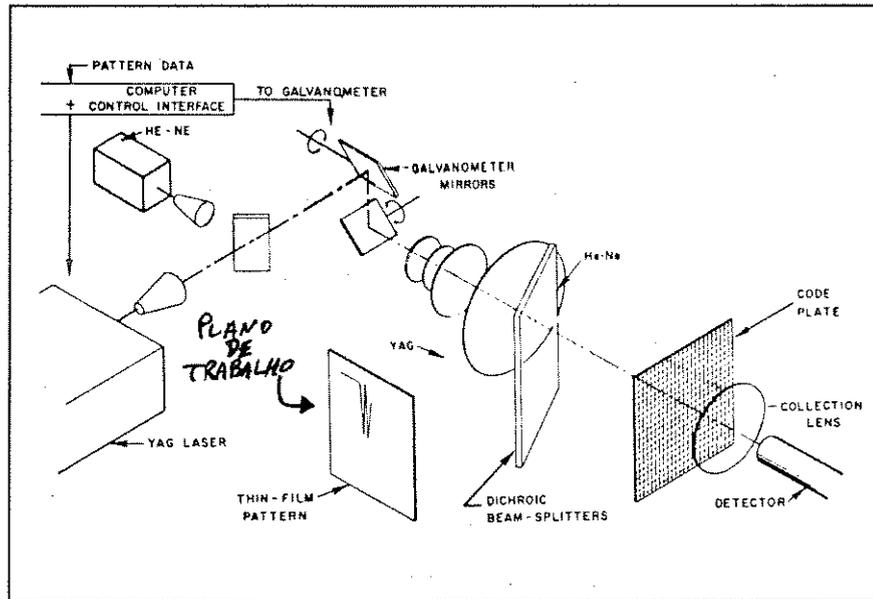


Figura 2.25: Plano de trabalho (Figura extraída de [62]).

Conclusão.

Como os defletores de luz de maior interesse prático da atualidade são do tipo eletromecânico, e pesquisas recentes indicam a possibilidade de se construírem defletores eletromecânicos monolíticos de silício, material que apresenta excelentes propriedades mecânicas e tecnologia de processamento muito avançada, herdada da tecnologia de fabricação de circuitos eletrônicos integrados, propõe-se a concepção e implementação de um tal dispositivo, doravante chamado de microscanner, que teria as seguintes vantagens sobre os dispositivos eletromecânicos equivalentes hoje disponíveis:

- Baixo custo, devido à produção em lotes.
- Grande reprodutibilidade, devido à produção por fotolitografia.
- Resposta rápida, devido às suas reduzidas dimensões, que implicam em baixa inércia.

- Grande confiabilidade, devido à grande resistência do silício a esforços mecânicos, que permite que o dispositivo seja submetido a grandes acelerações sem prejuízo de sua integridade estrutural ou degradação do seu desempenho óptico.

O próximo capítulo será dedicado à apresentação do princípio de funcionamento e ao dimensionamento dos microscanners que são objeto desta tese.

CAPÍTULO 3

Concepção do Microscanner Galvanométrico.

Neste capítulo serão apresentados o histórico e o dimensionamento do microscanner.

Histórico.

A bem-sucedida pesquisa de um novo material para gravação de informações a laser, pelo Laboratório de Materiais e Dispositivos do Instituto de Física Gleb Wataghin da UNICAMP (LMD/IFGW/UNICAMP), gerou a possibilidade de se fazer um sistema de armazenamento óptico de informações. Os sistemas atualmente existentes geralmente se baseiam nos equivalentes de discos ou cartões magnéticos, e são constituídos de um disco ou cartão móveis, sobre os quais é posicionada uma cabeça de leitura e/ou escrita de dados. Tais sistemas têm uma grande limitação de velocidade de acesso à informação, devido à inércia das partes mecânicas móveis. Num sistema a laser a cabeça de leitura/escrita não tem necessariamente que ser móvel. Podem-se fazer fixos a cabeça de leitura/escrita e o disco ou cartão de armazenamento de dados, e realizar o acesso aos dados através de um sistema de varredura do feixe de laser^[2]. Para tanto é necessário um sistema de varredura compacto e de alto desempenho, e que seja ao mesmo tempo adequado à produção em massa. O componente-chave para tal sistema é o defletor de luz (scanner), de vez que as demais partes já contam com tecnologia adequada para produção em massa a preços baixos. Daí nasceu a idéia de se propor a concepção de um tal defletor como tema de tese de doutorado.

Especificações Iniciais.

Consideradas as diversas tecnologias de defletores de luz (scanners) apresentadas no capítulo anterior, concluiu-se que os defletores mecânicos ainda serão por um bom tempo a alternativa mais viável, em função do estado embrionário das outras alternativas. Assim sendo, dever-se-ia procurar um caminho que levasse a defletores mecânicos compactos, baratos, confiáveis e de alto desempenho.

Uma característica fundamental a ser buscada é a de posicionamento aleatório do feixe de luz, para se realizarem acessos aleatórios à informação em discos ou cartões ópticos, o que reduz as alternativas (dentre os defletores mecânicos convencionais) aos defletores galvanométricos banda-base. Outra característica importante é que o ângulo de deflexão do espelho seja o mais próximo possível da faixa usual em defletores galvanométricos, que vai de 20° a 50° pico-a-pico à frequência de varredura de 1 kHz^[60].

A Primeira Proposta de Defletor.

Uma proposta de defletor que atenderia, em tese, a todas as especificações, seria um dispositivo constituído de finíssima membrana de eletreto, com região central rígida e espelhada, esticada sobre uma moldura de sustentação, e provida de eletrodos de deflexão eletrostática posicionados numa base também aderida à moldura de sustentação (**Figura 3.1**).

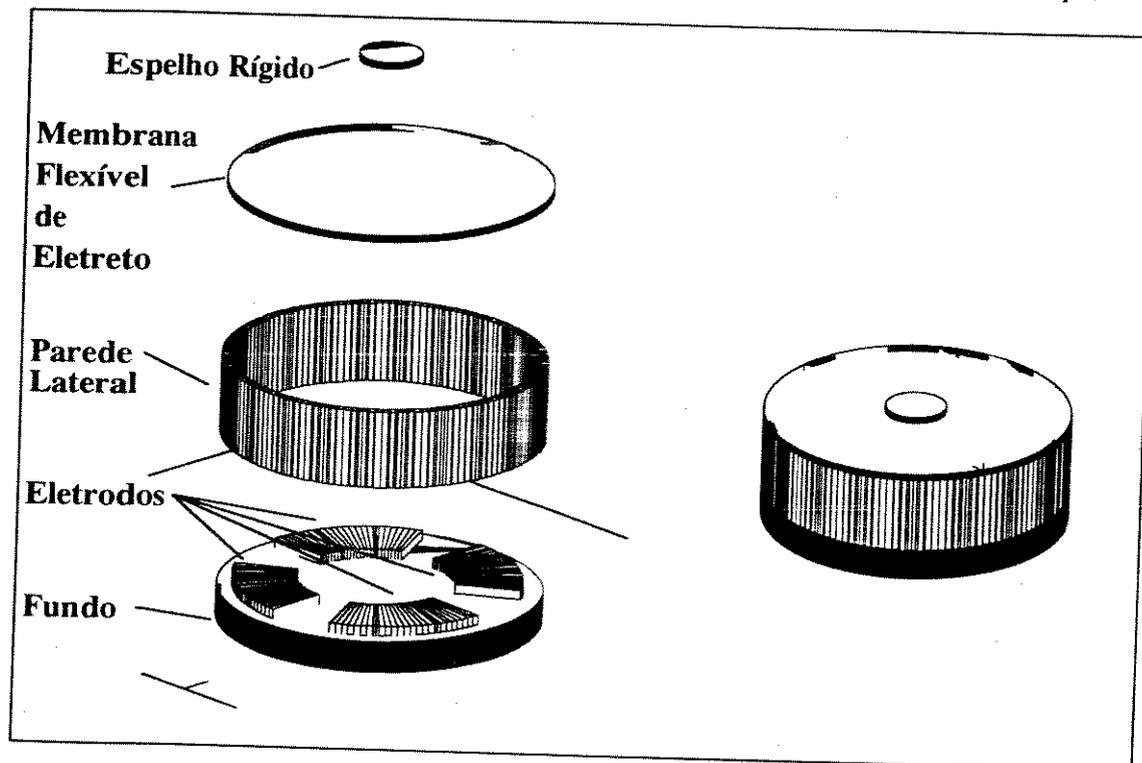


Figura 3.1: Defletor X-Y de membrana de eletreto: à esquerda vista explodida, e à direita vista normal.

Tal proposta foi desconsiderada, em função de não dispormos, na UNICAMP, de facilidades para a confecção de dispositivos micromecânicos de eletreto^{[81][82][83]}

O Microscanner de Silício.

Como o doutorado seria feito na Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP, o departamento de microeletrônica estava passando por um reequipamento geral, e a infraestrutura básica para o trabalho com micromecânica de silício é a mesma de microeletrônica, a alternativa mais viável para realizar o dispositivo em questão passou a ser a micromecânica, que através dos processos de microlitografia e corrosão anisotrópica de silício permite a confecção de dispositivos mecânicos microscópicos com alta precisão e a preços relativamente baixos, em função dos processos de produção em massa adotados no setor.

Pela absoluta novidade do trabalho, achou-se prudente restringir as especificações do defletor à deflexão em apenas um eixo, a fim de que, partindo-se para um objetivo menos complexo, se acumulasse a experiência necessária à posterior realização do objetivo inicial de um defletor de dois eixos.

Como a tecnologia de defletores galvanométricos é bem estabelecida e apresenta excelente confiabilidade, concluiu-se que a confecção de um defletor galvanométrico de silício seria a alternativa natural para o trabalho de tese.

A concepção inicial foi de uma bobina planar com um espelho concêntrico inscrito, tudo isso sobre um substrato de silício (**Figura 3.2**). O giro do conjunto bobina-espelho se daria em torno de fitas metálicas de suspensão, tal e qual nos galvanômetros convencionais, apenas com a diferença de que tudo seria feito por fotolitografia e demais processos comuns à microeletrônica e micromecânica.

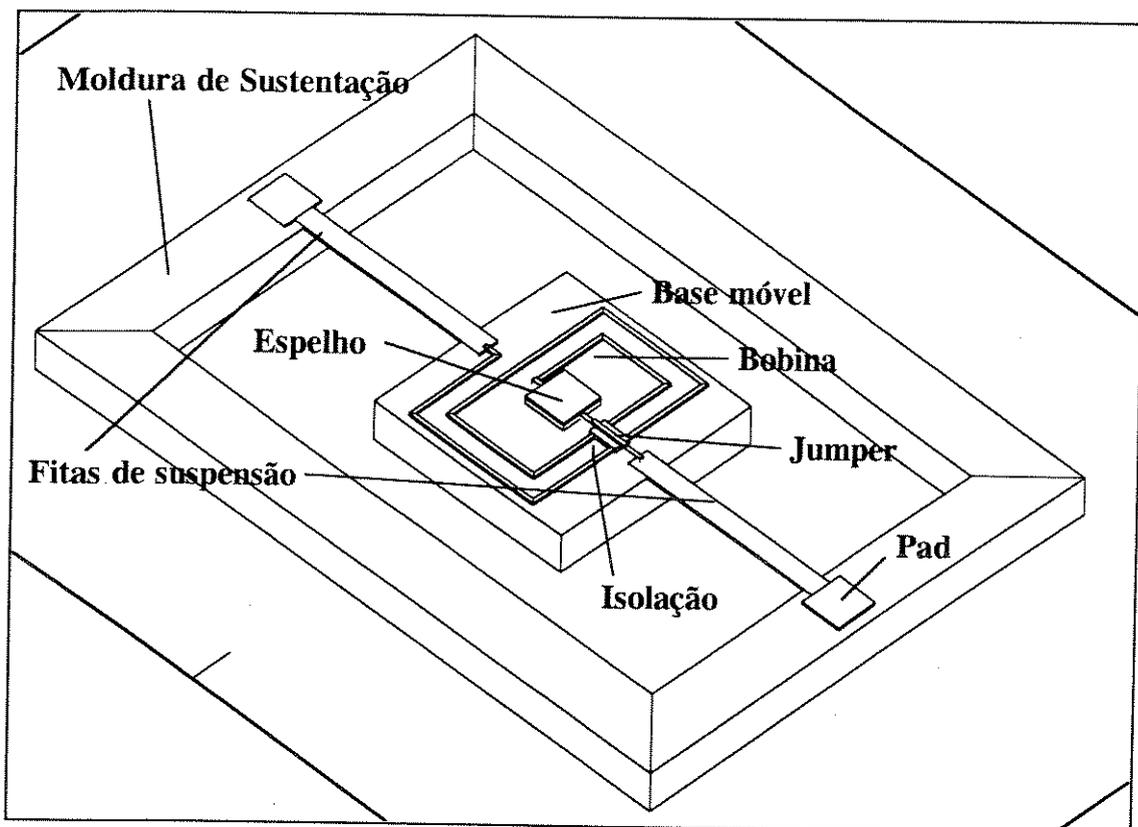


Figura 3.2: Primeiro esbôço do microscanner galvanométrico.

Especificação do Microscanner com Suspensão por Fitas.

As especificações de desempenho do microscanner teriam que ser pelo menos iguais à dos bons scanners galvanométricos tradicionais, que são as seguintes^[60]:

Ângulo de deflexão de 20° pico-a-pico.

Tempo de resposta ao degrau de corrente ≤ 1 ms.

Quanto à geometria do dispositivo, primeiramente definiu-se que o espelho defletor teria um tamanho mínimo aproximado de 5 x 5 mm, que é o tamanho do espelho dos menores scanner galvanométricos comerciais.

Para se evitarem movimentos verticais indesejáveis no defletor, devidos à interação da corrente circulante nas fitas de suspensão/alimentação com o campo magnético **B** externo, previram-se duas bobinas interdigitais (**Figura 3.3**)

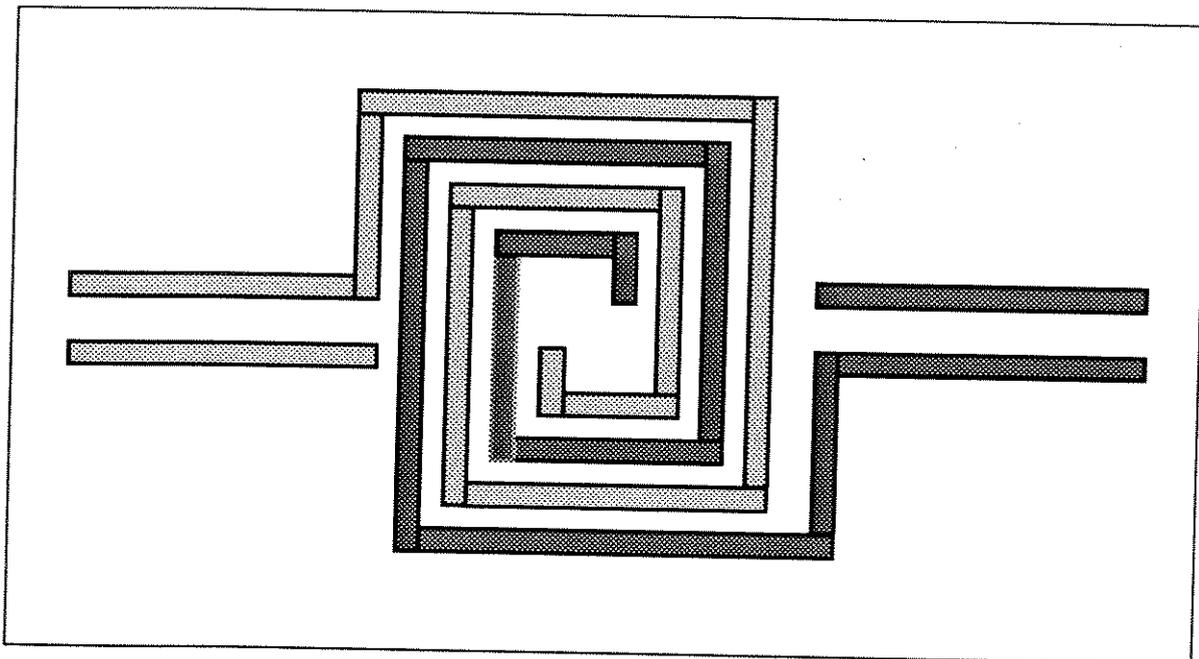


Figura 3.3: Bobinas interdigitais do microscanner galvanométrico.

com as duas fitas de alimentação posicionadas paralelamente e o mais próximas possível, simétricas ao eixo do rotação do dispositivo (**Figura 3.4.**)

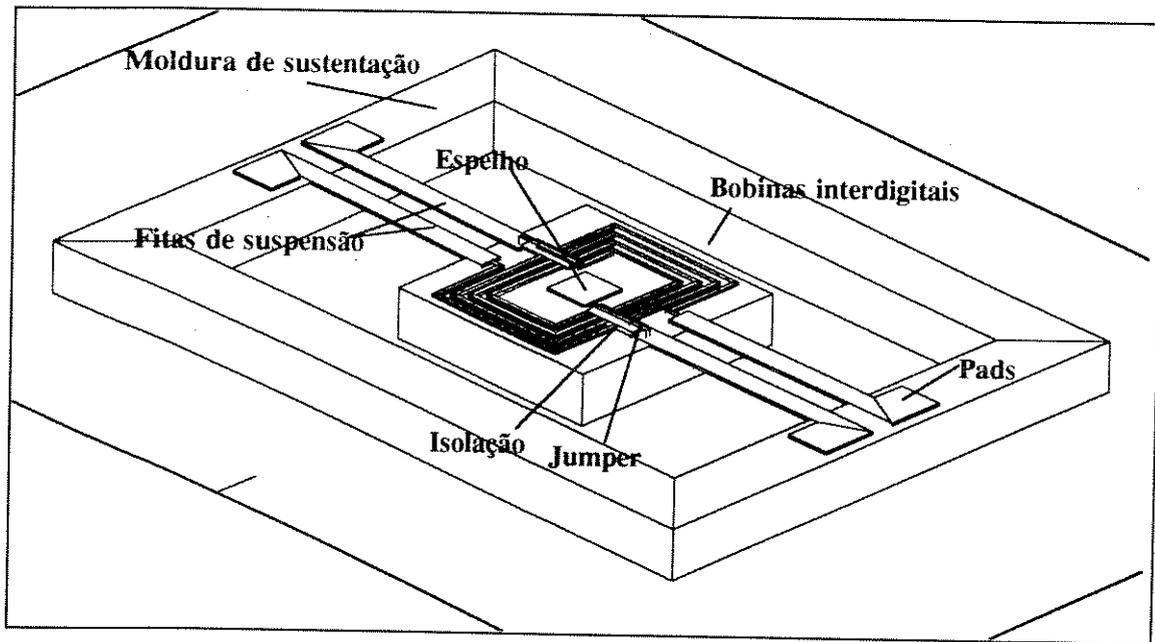


Figura 3.4: Suspensão das bobinas por fitas metálicas.

Crítica ao Microscanner de Petersen.

Se comparado aos scanners galvanométricos convencionais^[60], o ângulo de deflexão apresentado é muito pequeno, e o dispositivo equivale apenas aos scanners galvanométricos ressonantes, cujas aplicações são para os casos de varreduras repetitivas (tipo "raster"), não atendendo aos casos de varredura caligráfica (tipo "vector"), que são a motivação desta tese. Além disso, necessitam de circuitos de alta tensão (300 a 400 volts) para acionamento, têm grandes não-linearidades e são instáveis, o que representa grande desvantagem prática.

Nos itens a seguir será feita uma comparação entre os mecanismos de acionamento eletrostático e eletromagnético, a fim de se explicitarem as diferenças entre o microscanner de Petersen e o microscanner galvanométrico.

Máquinas Eletrostáticas e Máquinas Eletromagnéticas.

A força gerada pelas máquinas eletrostáticas é limitada essencialmente pela máxima intensidade de campo elétrico E que se pode aplicar sem ocorrência de ruptura do dielétrico que separa os eletrodos^[101], o que, para dielétrico de ar, significa uma intensidade de campo elétrico máxima de 3×10^6 V/m.

Nas máquinas eletromagnéticas tem-se como fatores limitantes a máxima corrente suportada pelo fio condutor, sem ocorrerem danos à integridade do fio por aquecimento devido ao efeito Joule, e a máxima densidade de fluxo magnético B que se pode aplicar sem que ocorra saturação do material magnético. Para máquinas eletromagnéticas convencionais, a máxima densidade de fluxo utilizável é da ordem de 1,5 Teslas, e para as máquinas de imã permanente a máxima densidade de fluxo é da ordem de 1,2 Teslas (com imãs de ferro-neodímio-boro). Em máquinas supercondutoras são possíveis densidades de fluxo de até 5 Teslas, mas tal tecnologia ainda necessita de refrigeração dos supercondutores até as vizinhanças do zero absoluto, o que é caro e volumoso.

Dado que se deseja a produção de um torque que deflita um espelho de 5×5 mm, suspenso por barras de torção, deve-se equacionar os torques produzidos por deflexão eletrostática e por deflexão galvanométrica, para efeito de comparação dessas alternativas.

As equações a seguir supõem um ângulo de deflexão constante de zero graus, pois têm apenas o objetivo de comparar-se o torque produzido por deflexão eletrostática com o produzido por deflexão galvanométrica.

A deflexão eletrostática seria efetuada dividindo-se a área do espelho em duas metades, uma de cada lado do eixo de rotação (Figura 3.6), nas quais haveria um par de eletrodos de deflexão: um eletrodo no espelho e o outro na base de fixação, havendo um "gap" entre o espelho e a base de fixação. Ao ser aplicada uma tensão num dos pares de eletrodos, seria desenvolvido um torque no espelho, que o faria girar ao longo do eixo das barras de torção.

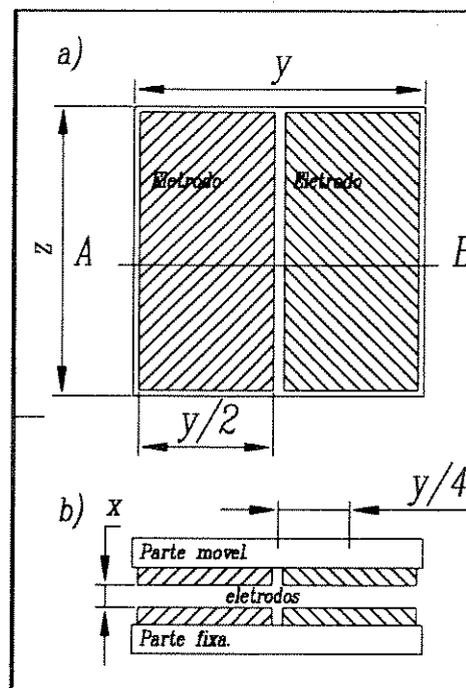


Figura 3.6: Arranjo de eletrodos para deflexão eletrostática do microscanner: a) Vista do tampo. b) Vista do corte AB. A largura dos eletrodos pode ser aproximada para $y/2$, e a distância entre o centro dos eletrodos e o eixo de rotação do dispositivo é igual a $y/4$.

Tal torque seria igual à força de atração entre um par de eletrodos (f_x) vezes a distância do centro do eletrodo ao centro do espelho ($y/4$):

$$\Gamma_E = f_x \cdot \frac{y}{4} \quad (3.1)$$

onde:

$$\Gamma_E = \text{Torque sobre o espelho} \quad [\text{Nm}].$$

$$f_x = \text{força de atração entre par de eletrodos} \quad [\text{N}].$$

$$\frac{y}{4} = \text{dist. centro do eletrodo - centro do espelho} \quad [\text{m}].$$

A força de atração entre o par de eletrodos^[104] é dada por:

$$f_x = QE \quad (3.2)$$

onde:

$$f_x = \text{força de atração dos eletrodos} \quad [\text{newtons}].$$

$$Q = \text{carga elétrica nos eletrodos} \quad [\text{coulombs}].$$

$$E = \text{intensidade de campo elétrico} \quad [\text{volts}].$$

e a carga elétrica nos eletrodos^[104] é dada por:

$$Q = yz\varepsilon_0 E \quad (3.3)$$

onde:

$$Q = \text{carga elétrica nos eletrodos} \quad [\text{coulomb}].$$

$$\frac{y}{2} = \text{largura das placas} \quad [\text{m}].$$

$$z = \text{comprimento das placas} \quad [\text{m}].$$

$$\varepsilon_0 = \text{permissividade elétrica do vácuo} \quad [\text{coulomb}^2/\text{Nm}^2].$$

$$E = \text{intensidade de campo elétrico} \quad [\text{volts/m}].$$

Substituindo-se a expressão da carga elétrica Q na equação da força f_x de atração entre os eletrodos, nota-se que a força é proporcional ao quadrado do campo elétrico E entre os eletrodos. O campo elétrico, por sua vez, para uma tensão

constante V aplicada, aumenta com o inverso do quadrado da separação x entre os eletrodos. Conseqüentemente o torque de deflexão crescerá à medida que o ângulo de deflexão for aumentando, mesmo que a tensão de deflexão seja mantida constante. Como o torque de reação das barras de torção (como será equacionado mais adiante) varia linearmente com o ângulo de deflexão, haverá instabilidade do dispositivo^[91] (o que representa séria desvantagem prática), pois o torque de ação cresce mais rapidamente que o torque de reação.

$$f_x = \frac{y}{2} z \epsilon_0 E^2$$

$$f_x = \frac{y}{2} z \epsilon_0 \frac{V^2}{x^2}$$
(3.4)

onde:

E	=	intensidade de campo elétrico	[volts/m].
V	=	tensão entre os eletrodos	[volts].
ϵ_0	=	permissividade elétrica do vácuo	[coulomb ² /Nm ²].
x	=	distância entre os eletrodos	[m].
$\frac{y}{2}$	=	largura das placas	[m].
z	=	comprimento das placas	[m].

A deflexão eletromagnética seria efetuada através de uma bobina planar (Figura 3.7) retangular de n espiras, conduzindo uma corrente elétrica I , situada em torno do espelho, que estaria imersa em um campo magnético de densidade de fluxo B tangente à superfície e perpendicular ao eixo de rotação do espelho.

O torque defletor será igual à força exercida sobre cada seção da espira que seja perpendicular ao campo magnético, multiplicada pela distância da seção da espira ao eixo de rotação do espelho^[104], o que é dado pela seguinte equação:

$$\Gamma_M = nBIA$$
(3.5)

onde A é igual à área da bobina, que é igual à sua largura y vezes seu comprimento z .

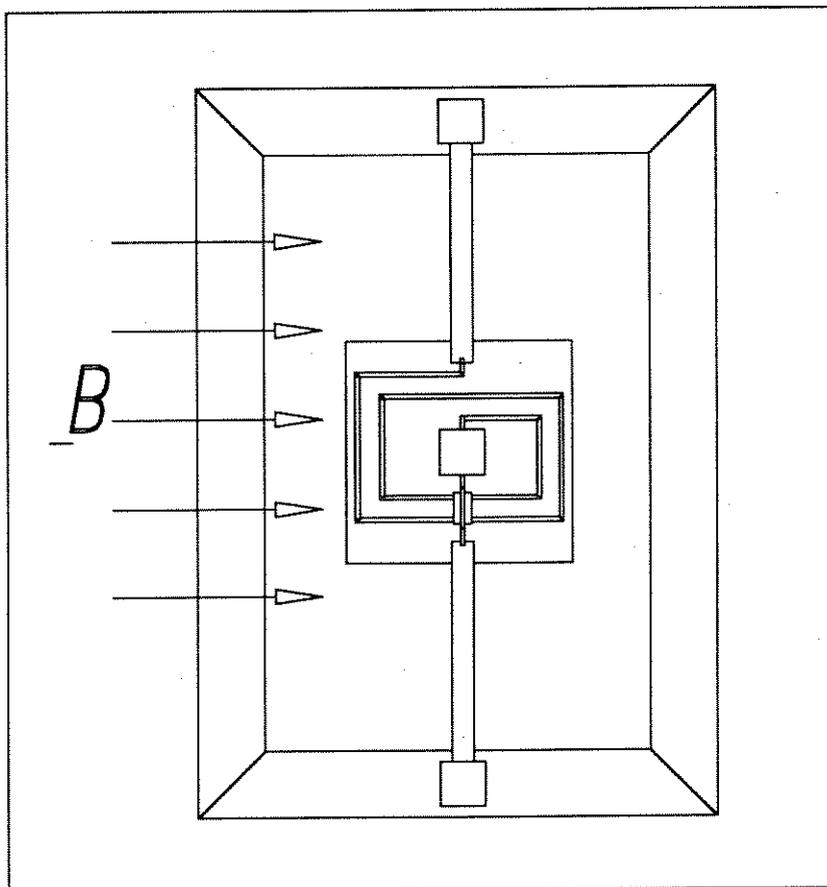


Figura 3.7: Arranjo para deflexão eletromagnética do microscanner, distinguindo-se a moldura externa de sustentação; as fitas de suspensão; a plataforma móvel central; a bobina defletora sobre a plataforma; e o espelho inscrito na bobina, tudo isso imerso num campo magnético externo B .

Torques Máximos Teóricos.

Para um espelho de 5 x 5 mm ter-se-iam os seguintes torques máximos possíveis, conforme o tipo de deflexão:

a) Deflexão eletrostática:

Sejam a distância entre os eletrodos: $x = 1$ mm; a largura do espelho: $y = 5$ mm; e o comprimento do espelho: $z = 5$ mm; e a intensidade de campo elétrico: $E = 3 \times 10^6$ V/m. Substituindo-se os dados acima nas equações (3.3) e (3.1), o torque seria:

$$\Gamma_E = 2,49 \cdot 10^{-6} \quad [\text{Nm}] \quad (3.6)$$

b) Deflexão eletromagnética:

Sejam a distância entre os eletrodos: $x = 1$ mm; a largura do espelho: $y = 5$ mm; e o comprimento do espelho: $z = 5$ mm; a densidade de fluxo magnético $B = 1,2$ T; a corrente elétrica $I = 500$ mA. Substituindo-se os dados acima na equação (3.5) o torque seria:

$$\Gamma_M = 3 \cdot 10^{-4} \quad [\text{Nm}] \quad (3.7)$$

Donde a razão entre os torques obtidos por deflexão eletrostática e por deflexão eletromagnética seria:

$$\frac{\Gamma_M}{\Gamma_E} = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{2,49 \cdot 10^{-6}} = 120,5 \quad (3.8)$$

Daí conclui-se que, no limite teórico^[101], é vantajoso o uso de deflexão eletromagnética, em função de se poder obter um torque máximo de deflexão duas ordens de grandeza maior que o torque obtido por deflexão eletrostática.

Torques Máximos Utilizáveis.

No entanto, considerando-se as restrições práticas de operação de um tal dispositivo, em que a máxima tensão normalmente utilizada em circuitos integrados está na faixa dos 30 volts, a corrente máxima pode ser na faixa dos 500 mA, e um campo magnético produzido por ímãs de samário-cobalto situa-se na faixa de 0,5 Teslas, ter-se-ia:

a) Deflexão eletrostática:

Sejam a distância entre os eletrodos: $x = 1$ mm; a largura do espelho: $y = 5$ mm; e o comprimento do espelho: $z = 5$ mm; e a intensidade de campo elétrico: $E = 30$ volts/1 mm. Substituindo-se os dados acima nas equações (3.3) e (3.1), o torque seria:

$$\Gamma_E = 2,49 \cdot 10^{-10} \quad [\text{Nm}] \quad (3.9)$$

b) Deflexão eletromagnética:

Sejam a distância entre os eletrodos: $x = 1$ mm; a largura do espelho: $y = 5$ mm; e o comprimento do espelho: $z = 5$ mm; a densidade de fluxo magnético $B = 0,5$ T; a corrente elétrica $I = 500$ mA. Substituindo-se os dados acima na equação (3.5) o torque seria:

$$\Gamma_M = 1,25 \cdot 10^{-4} \quad [\text{Nm}] \quad (3.10)$$

Donde a razão entre os torques obtidos por deflexão eletrostática e por deflexão eletromagnética seria:

$$\frac{\Gamma_M}{\Gamma_E} = \frac{1,25 \cdot 10^{-4}}{2,49 \cdot 10^{-10}} = 5,02 \cdot 10^5 \quad (3.11)$$

Daí conclui-se que, na prática, o uso de deflexão eletromagnética é muito mais vantajoso do que se poderia supor considerando-se apenas os aspectos teóricos da

questão, com o que se justifica a preferência pela utilização da deflexão galvanométrica no microscanner de silício.

Microscanner Galvanométrico com Suspensão por Fitas.

Os microscanner galvanométricos implementados neste trabalho são de dois tipos: com suspensão por fitas/fios metálicos, e com suspensão por barras de torção de silício. Seguem-se os cálculos para dimensionamento de cada um deles.

Cálculo do Desempenho Dinâmico.

O desempenho dinâmico do microscanner galvanométrico, na sua versão inicial, seria função do torque defletor gerado pela interação da corrente circulante na bobina planar com o campo magnético externo, perpendicular ao eixo de rotação da bobina e tangente ao espelho, e do coeficiente de rigidez da suspensão por fitas ou fios metálicos

O torque é dado pela seguinte equação:

$$\Gamma_1 = nBIA \cos\theta \quad (3.12)$$

onde:

Γ_1	=	torque gerado	[Nm].
n	=	número de espiras da bobina.	
B	=	campo magnético	[Tesla].
I	=	corrente da bobina	[Amperes].
A	=	área média da bobina	[m ²].
θ	=	ângulo de deflexão	[graus].

Para ângulos de deflexão muito pequenos pode-se assumir que $\cos\theta=1$.

Opondo-se ao torque Γ_I tem-se o torque devido ao momento de inércia do conjunto bobina-espelho e à força restauradora das fitas metálicas de suspensão. O momento de inércia do conjunto bobina-espelho é dado por^[103]:

$$J = \int_{-w}^w x^2 \rho h l dx = \frac{2}{3} \rho h l w^3 \quad (3.13)$$

onde:

J	=	momento de inércia	[Kg.m ²].
x	=	variável de integração	[m].
ρ	=	densidade do substrato da bobina	[Kg/m ³].
h	=	espessura do substrato	[m ²].
l	=	comprimento do substrato	[m].
w	=	metade da largura do substrato	[m].

A força restauradora das fitas metálicas de suspensão é dada por^[103]:

$$\Gamma_F = K_F \theta \quad (3.14)$$

onde:

Γ_F	=	torque restaurador da fita	[Nm].
K_F	=	coeficiente de rigidez da fita	[Nm/grau].
θ	=	ângulo de deflexão da bobina	[grau].

O torque final resultante da superposição do torque restaurador da fita metálica de suspensão com o torque atuador da bobina imersa num campo magnético e conduzindo uma corrente elétrica é dado por:

$$\Gamma = \Gamma_I - \Gamma_F \quad (3.15)$$

onde:

Γ	=	torque final resultante	[Nm].
Γ_I	=	torque gerado pela corrente I na bobina	[Nm].
Γ_F	=	torque restaurador da fita de suspensão	[Nm].

A aceleração do conjunto mecânico é dada por^[103]:

$$\alpha = \frac{\Gamma}{J} \quad (3.16)$$

onde:

Γ	=	torque final resultante	[Nm].
α	=	aceleração angular	[rad/seg ²].
J	=	momento de inércia	Kg.m ²].

Substituindo-se (3.13) e (3.14) em (3.15), e (3.13) e (3.15) em (3.16) tem-se:

$$\alpha = \frac{nBI A - K_F \theta}{\frac{2}{3} \rho h l w^3} \quad (3.17)$$

Para um sistema com suspensão por fitas metálicas com coeficiente de rigidez muito pequeno ($K_F \approx 0$), e aproximando-se a área A da bobina por $2lw$, pode-se reescrever a equação (3.17) da seguinte maneira:

$$\alpha = \frac{nBI 2lw}{\frac{2}{3} \rho h l w^3} = \frac{3nBI}{\rho h w^2} \quad (3.18)$$

onde a aceleração independe do comprimento l do conjunto bobina-espelho.

O coeficiente de rigidez do sistema de suspensão, que definiria a frequência de ressonância mecânica do dispositivo e sua resposta dinâmica, teria que ser determinado experimentalmente, junto com o fator de amortecimento devido às perdas de energia mecânica por atrito viscoso com o ar.

Para um sistema com suspensão por barras de torção deve-se calcular as dimensões das barras antecipadamente, de maneira que o dispositivo apresente o ângulo de deflexão desejado ao ser aplicada a corrente máxima, e que as barras de torção não se fraturem ao serem submetidas à torção máxima, e ainda que a resposta em frequência do dispositivo seja a desejada. Isto será feito no item a seguir.

Microscanner Galvanométrico de Barras de Torção.

Neste caso o papel que, no caso anterior, era exercido pelas fitas ou fios metálicos de suspensão, é exercido por barras de torção esculpidas no próprio silício, através do processo de corrosão anisotrópica^[88], formando com a plataforma de suporte do espelho e da bobina defletora um conjunto monolítico (**Figura 3.8**).

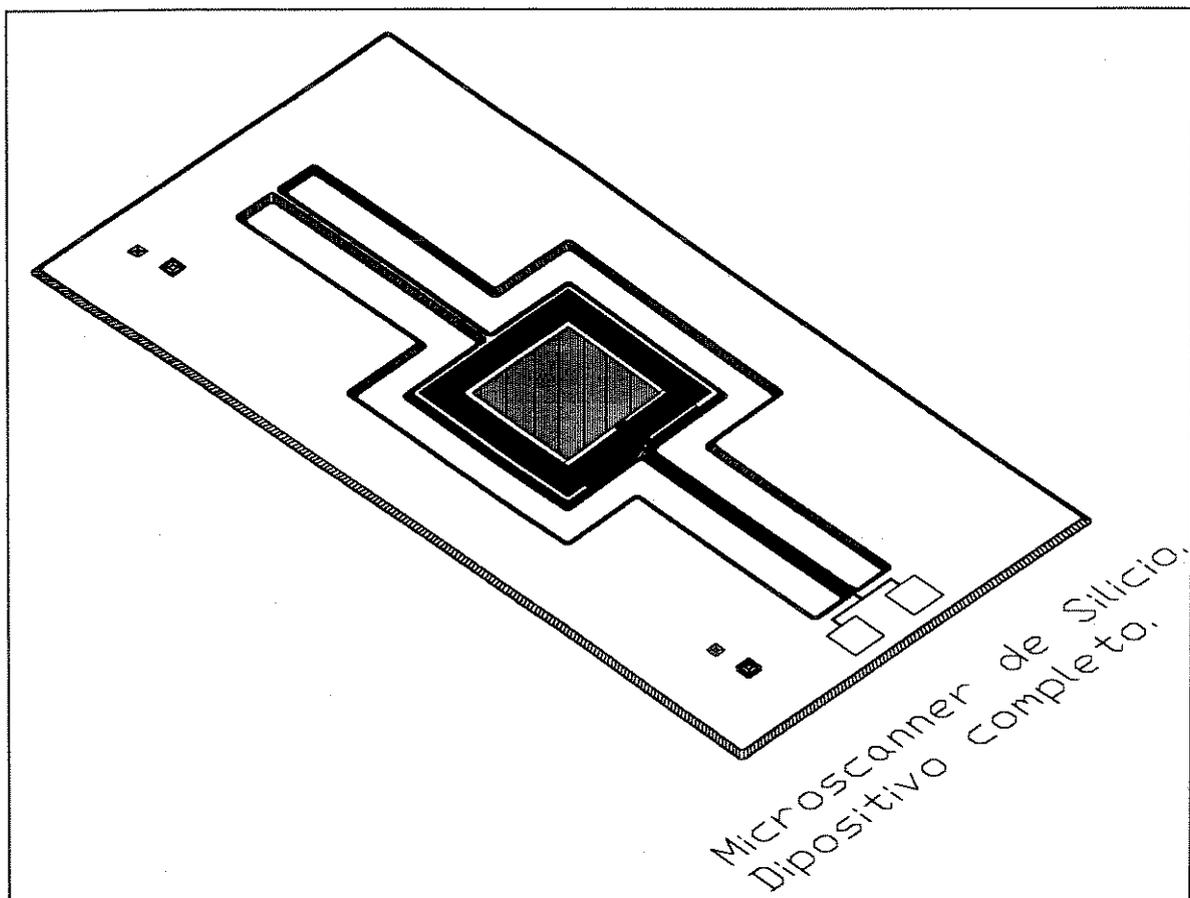


Figura 3.8: Microscanner galvanométrico de barras de torção. É constituído de uma estrutura externa ligada a um retângulo central através de barras de torção de perfil triangular. Sobre o retângulo central há uma bobina planar, na qual está inscrito um espelho retangular. A bobina liga-se a dois terminais de solda de fios externos através de trilhas que correm sobre uma das barras de torção.

Dimensionamento das Barras de Torção.

Para maior clareza repetiremos abaixo as especificações do microscanner galvanométrico, as quais definirão o dimensionamento das barras de torção:

- Máximo ângulo de deflexão de 10° .
- Plataforma móvel de 5 x 5 mm.
- Corrente máxima de 500 mA.
- Campo magnético de 5.000 Gauss.
- Bobina de 20 espiras.

A questão fundamental para o dimensionamento do microscanner é a resistência mecânica do silício^[88], que é o material do seu substrato, à torção, de vez que a parte mecânica do dispositivo consiste de uma plataforma retangular, sobre a qual estão o espelho e as espiras, que gira sobre barras de torção, tudo constituído de um bloco monolítico de silício esculpido por corrosão anisotrópica. A corrosão anisotrópica é preferível, no caso, por possibilitar melhor controle sobre a geometria resultante.

Devido às propriedades do cristal de silício, sua corrosão anisotrópica por KOH produz depressões com paredes laterais inclinadas^[88]. Para lâminas de silício de orientação cristalográfica $\langle 100 \rangle$ a inclinação das paredes laterais resultantes é de $54,74^\circ$ com relação à superfície da lâmina. Denomina-se tais depressões por *recortes em V*.

Se forem feitos dois recortes em V, suficientemente profundos para atravessarem a lâmina de silício e suficientemente próximos, define-se uma estrutura em forma de barra com perfil triangular:

Assim, pode-se usinar quimicamente uma lâmina de silício de maneira a se definir barras de torção de perfil triangular, as quais podem servir de suspensão para um espelho retangular usinado simultaneamente na mesma lâmina.

Para se dimensionar as barras de torção tem-se que especificar o máximo ângulo de torção desejado ao ser aplicado o torque máximo de deflexão do espelho e, a partir daí, considerando-se as propriedades mecânicas do silício e a geometria das barras, calcular-lhes o comprimento, largura e espessura.

O dimensionamento de barras de torção é feito a partir das relações entre a tensão cisalhante e o momento torçor aplicado à barra, e entre o ângulo de torção e o momento torçor, o comprimento da barra e o módulo de rigidez do material. Tais relações são relacionadas à geometria do perfil da barra por funções específicas, que geralmente são funções aproximadas.

Segundo Roark^[105] as relações entre tensão cisalhante e momento torçor, e entre o ângulo de torção e momento torçor, comprimento da barra e o módulo de rigidez do material são:

$$s = \frac{T}{Q} \quad (3.19)$$

$$\theta = \frac{T \cdot L}{K \cdot G} \quad (3.20)$$

onde:

s = tensão cisalhante	[psi] .
θ = ângulo de torção	[rad] .
T = momento torçor	[lb.pol] .
L = comprimento da barra	[pol] .
G = módulo de rigidez do material	[psi] .
K e Q = funções da forma da barra.	

Para barras de torção de perfil triangular (Figura 3.9), as funções **K** e **Q** são:

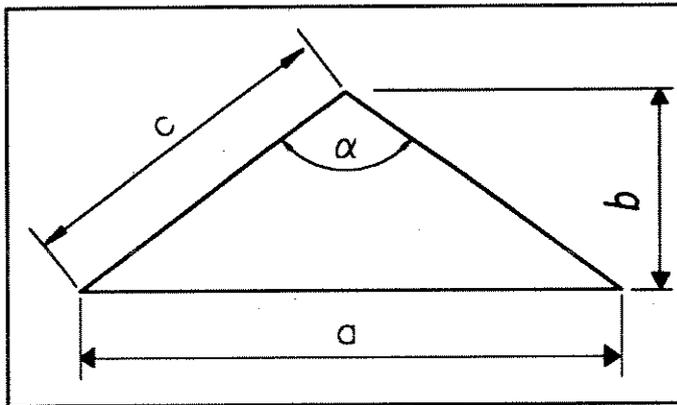


Figura 3.9: Perfil de uma barra de torção triangular.

Para $39^\circ < \alpha < 82^\circ$:

$$K = \frac{a^3 \cdot b^3}{15a^2 + 20b^2} \quad (3.21)$$

Esta fórmula é exata para $\alpha = 60^\circ$, onde: $K = 0,0265c^4$

Para $82^\circ < \alpha < 120^\circ$ tem-se:

$$K = 0,0915b^4 \left(\frac{a}{b} - 0,8592 \right) \quad (3.22)$$

Esta fórmula é exata para $\alpha = 90^\circ$, onde: $K = 0,0261c^4$

O erro máximo da função **K**, em ambas as fórmulas, é de 4%.

A equação de **Q** é válida para α entre 39° e 120° :

$$Q = \frac{K}{b \left(0,2 + 0,309 \frac{a}{b} - 0,0418 \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right)} \quad (3.23)$$

A máxima tensão mecânica ocorre no centro do lado maior do perfil das barras de torção.

Para lâminas de silício tipo <100> corroidas por KOH, as barras de torção produzidas têm o ângulo α dado pela relação de ângulos internos dos triângulos isósceles, que é:

Sejam β os ângulos iguais do triângulo isósceles. Para o caso em estudo tem-se:

$$\beta = 54,74^\circ \quad (3.24)$$

Dada a relação entre α e β :

$$\alpha = 180^\circ - 2\beta \quad (3.25)$$

tem-se que:

$$\alpha = 70,52^\circ \quad (3.26)$$

Portanto, dada a espessura b da lâmina de silício (e portanto o espessura da barra de torção), pode-se calcular as dimensões a e c :

$$a = \frac{2b}{\tan \beta} \quad (3.27)$$

$$c = \frac{b}{\sin \beta} \quad (3.28)$$

O módulo de rigidez G pode ser obtido a partir da Razão de Poisson μ e do Módulo de Young E . Para o silício tais valores são:

$$E = 27 \cdot 10^6 \text{ psi} \quad (3.29)$$

e

$$\mu = 0,09 \quad (3.30)$$

Dado que

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (3.31)$$

tem-se que

$$G = 1,2385 \cdot 10^7 \text{ psi} \quad (3.32)$$

Repetindo-se as expressões para **K** e **Q**:

$$K = \frac{a^3 \cdot b^3}{15a^2 + 20b^2} \quad (3.33)$$

$$Q = \frac{K}{b \left(0,2 + 0,309 \frac{a}{b} - 0,0418 \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right)} \quad (3.34)$$

e substituindo-se **a** pela sua função de **b** tem-se:

$$K = \frac{8b^6}{\tan(\beta)^3 \left(60 \frac{b^2}{\tan(\beta^2)} + 20b^2 \right)} \quad (3.35)$$

$$Q = \frac{K}{b \left(0,2 + \frac{0,618}{\tan(\beta)} - \frac{0,1672}{\tan(\beta)^2} \right)} \quad (3.36)$$

A espessura dos filmes de ouro com que serão feitas as trilhas deve ser tal que possam conduzir a corrente elétrica necessária à deflexão do sistema ao ângulo máximo, o que será dimensionado no final dos cálculos.

O número de espiras foi arbitrado em 20, com 20 μ m de largura separadas por 30 μ m, devido ao limite de resolução do processo litográfico do LED à época, tendo-se então:

$$N = 20 \quad (3.37)$$

O tamanho da plataforma defletora do microscanner foi arbitrada em 5x5mm, por serem estas as dimensões mínimas usuais em scanners comerciais, donde a bobina defletora inscrita na plataforma tem dimensões externas de 5x4,74mm (4,74mm devido ao espaço reservado para as janelas de contato) e dimensões internas de 3,44x3,18mm, e o espelho refletor do laser tem dimensões de 3,2x2,9mm, devido ao espaço livre entre as espiras e o espelho. Consequentemente tem-se que a área média da bobina é:

$$A = \frac{5 \text{ mm} + 3,44 \text{ mm}}{2} \cdot \frac{4,74 \text{ mm} + 3,18 \text{ mm}}{2} \quad (3.38)$$

$$A = 1,6711 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (3.39)$$

A deflexão da plataforma do espelho é provocada pelo torque gerado pela interação da corrente que circula na bobina com o campo magnético externo B , que pode ter densidade de fluxo máxima de até 0,5 Teslas, caso se usem ímãs permanentes de samário-cobalto.

$$B_{\text{max}} = 0,5 \text{ Teslas} \quad (3.40)$$

O máximo torque defletor é dado por:

$$T_{\text{max}} = N B_{\text{max}} i_{\text{max}} A \quad (3.41)$$

O máximo ângulo de deflexão do espelho foi especificado em 10°, por ser um valor típico para scanners de alto desempenho. Daí ter-se que:

$$\theta_{\text{max}} = 10^\circ \quad (3.42)$$

Definindo-se o torque defletor em função do ângulo de deflexão tem-se:

$$\Gamma(\theta) = N B_{\text{max}} i_{\text{max}} A \cos(\theta) \quad \text{Nm} \quad (3.43)$$

onde o torque máximo ocorre a zero graus de deflexão, e é igual a:

$$\Gamma(0^\circ) = N \cdot B_{\max} \cdot i_{\max} \cdot A \quad \text{Nm} \quad (3.44)$$

A dez graus de deflexão o torque à corrente máxima é dado por:

$$\Gamma(10^\circ) = N \cdot B_{\max} \cdot i_{\max} \cdot \cos(10^\circ) \quad \text{Nm} \quad (3.45)$$

que será designado como o torque ao ângulo máximo:

$$\Gamma_\theta = \Gamma(10^\circ) \quad (3.46)$$

O máximo ângulo de deflexão desejado é de 10° , o que implica que as dimensões da barra devem ser tais que, a este ângulo, o torque de reação de cada barra seja igual à metade do torque à corrente máxima a 10° , e o stress máximo das barras seja (arbitrando-se um fator de segurança igual a cinco) de no máximo 20% do stress de fraturamento do silício, que é de 1 milhão de libras por polegada quadrada.

$$s_f = 10^6 \text{ psi} \quad (3.47)$$

Dadas as equações do stress e do ângulo, que são repetidas abaixo:

$$s = \frac{T}{Q}$$

$$\theta = \frac{TL}{KG}$$

e arbitrado o comprimento das barras de torção:

$$L = 7,5 \text{ mm} \quad (3.48)$$

pode-se definir o stress em função do ângulo de deflexão e da espessura da lâmina de silício:

dado que

$$T(\theta, b) = \frac{K(b)G\theta}{L} \quad (3.49)$$

tem-se que

$$s(\theta, b) = \frac{T(\theta, b)}{Q(b)} \quad (3.50)$$

O stress máximo, para lâminas de 150 μm (150 μm por ser a espessura final de uma lâmina de silício de 300 μm após o processo de corrosão anisotrópica empregado) de espessura e ângulo de deflexão de 10° , é dado por:

$$s(10^\circ, 150\mu\text{ m}) = 23922,8\text{ psi} \quad (3.51)$$

que é 41,8 vezes menor que o stress de fraturamento do silício.

Dados:

$$\theta = 10^\circ \quad (3.52)$$

$$50\mu\text{ m} < b < 170\mu\text{ m} \quad (3.53)$$

$$L = 7,5\text{ mm} \quad (3.54)$$

pode-se calcular o torque de reação de cada barra de torção, ao ângulo de torção de 10° , em função da espessura do substrato de silício:

$$T(\theta, b) = \frac{K(b)G\theta}{L} \quad (3.55)$$

cujo gráfico é (T em [μNm] e b em [μm]) (Figura 3.10):

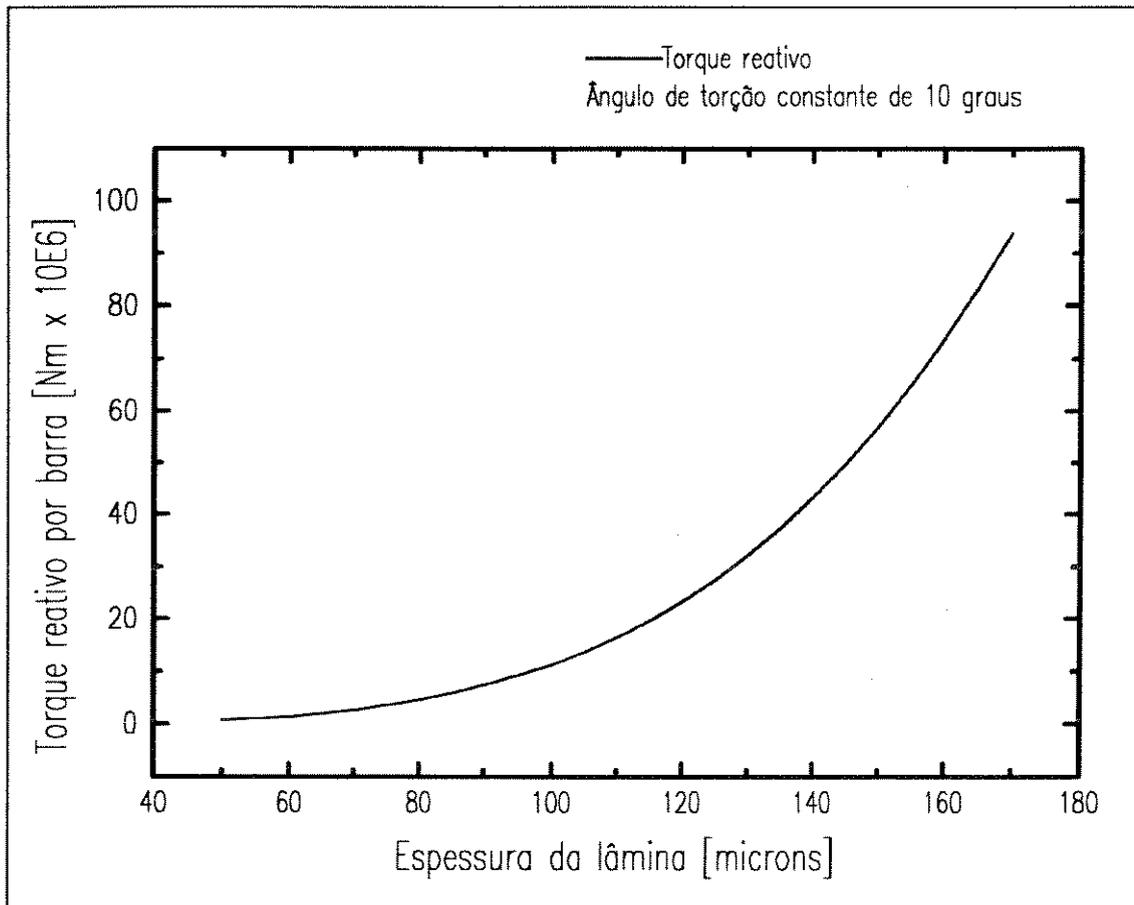


Figura 3.9: Torque de reação de uma barra de torção triangular de silício, ao ângulo de torção de 10° , em função da espessura da lâmina de silício.

Para a espessura de $150\mu\text{m}$ tem-se que o torque de reação de cada barra é:

$$T(10^\circ, 150\mu\text{m}) = \frac{K(150\mu\text{m}) \cdot G \cdot 10^\circ}{L} \quad (3.56)$$

$$T(10^\circ, 150\mu\text{m}) = 5,6893 \cdot 10^{-5} \text{ Nm} \quad (3.57)$$

Igualando-se o torque reativo produzido pelas barras de torção, a partir da equação acima, ao torque produzido pela bobina (Eq. 3.45), pode-se calcular a corrente elétrica necessária nas espiras do microscanner para defletí-lo ao ângulo de dez graus à frequência de zero Hertz:

$$\Gamma_{\theta} = 2 \cdot T(10^{\circ}, 150 \mu m)$$

$$i_{\max} = \frac{2 \cdot T(10^{\circ}, 150 \mu m)}{N \cdot B \cdot A \cdot \cos(10^{\circ})} = 691 \text{ mA} \quad (3.58)$$

Calculado o torque de reação das barras do torção, pode-se calcular-lhes o stress máximo em função da espessura da lâmina de silício, para o ângulo constante de 10° , o que é dado por:

$$s(\theta, b) = \frac{T(\theta, b)}{Q(b)} \quad (3.59)$$

cujo gráfico é (s em [psi] e b em [μm]) (Figura 3.11):

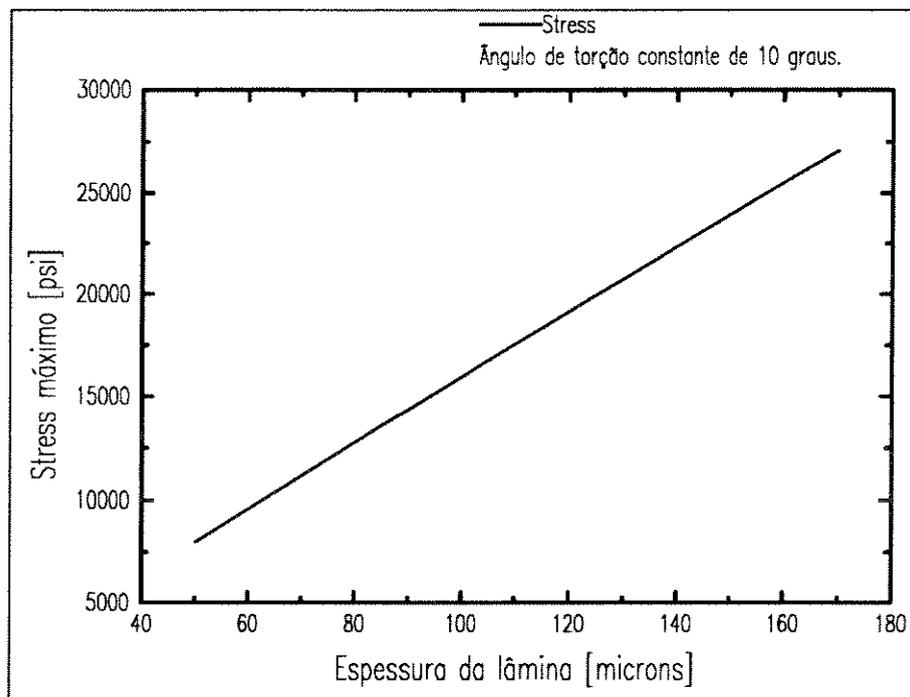


Figura 3.11: Stress máximo de uma barra de torção triangular de silício, ao ângulo de deflexão constante de 10° , em função da espessura da lâmina.

Cálculo do Desempenho Dinâmico.

Dimensionadas as barras de torção, e determinada a espessura da lâmina de silício, pode-se determinar o momento de inércia do suporte do espelho e da bobina, e então determinar o desempenho dinâmico do dispositivo, calculando-se sua resposta em frequência, e resposta ao degrau de corrente elétrica.

Cálculo do Momento de Inércia do Microscanner.

Sejam as seguintes variáveis que designam as dimensões do suporte do espelho e da bobina do microscanner:

- b** = espessura da lâmina [m].
- d** = comprimento do suporte [m].
- e** = metade da largura do suporte [m].
- ρ** = densidade do material [kg/m^3].

O momento de inércia do defletor é dado por^[103]:

$$J = \int_{-e}^e \rho d b x^2 dx \quad (3.60)$$

cuja solução é:

$$J = \frac{2}{3} d b \rho e^3 \quad (3.61)$$

Definido-se as dimensões do suporte do espelho, e dando-se a densidade do silício:

$$\begin{aligned}d &= 5 \text{ mm} \\b &= 150 \mu\text{m} \\e &= 2,5 \text{ mm} \\ \rho &= 2,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\end{aligned}$$

Pode-se calcular o momento de inércia do suporte do espelho:

$$J = 1,7969 \cdot 10^{-11} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (3.62)$$

que servirá para o cálculo do seu desempenho dinâmico.

Cálculo da Frequência de Ressonância Mecânica.

Tendo-se o torque de necessário para torcer as barras até um determinado ângulo, pode-se calcular-lhes o coeficiente de rigidez, que é igual ao torque dividido pelo ângulo:

$$k_r = \frac{T(\theta, b)}{\theta} \quad (3.63)$$

Donde se pode calcular coeficiente de rigidez para uma barra de torção de 150 μm de espessura (que é a espessura ao final da corrosão de uma lâmina de silício de 300 μm de espessura) :

$$k_r(150 \mu\text{m}) = 5,6893 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Nm}}{\text{rad}} \quad (3.64)$$

Passando-se o ângulo para graus tem-se :

$$k_r(150 \mu\text{m}) = 9,9296 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Nm}}{\text{grau}} \quad (3.65)$$

Do modelo de segunda ordem para a oscilação do conjunto suporte - barras de torção, tem-se a frequência de ressonância do dispositivo, dada por:

$$\omega_0^2(b) = \frac{2k_r}{J} \quad (3.66)$$

Obs: o numerador da equação acima é multiplicado por dois por que são duas barras de torção.

$$\omega_0^2(b) = 6,3324 \cdot 10^5 \left[\frac{rad}{seg} \right]^2 \quad (3.67)$$

$$\omega_0 = 5000 Hz \quad (3.68)$$

Plotando-se a frequência de ressonância mecânica do microscanner para b entre 50 e 170 μm tem-se (Figura 3.12):

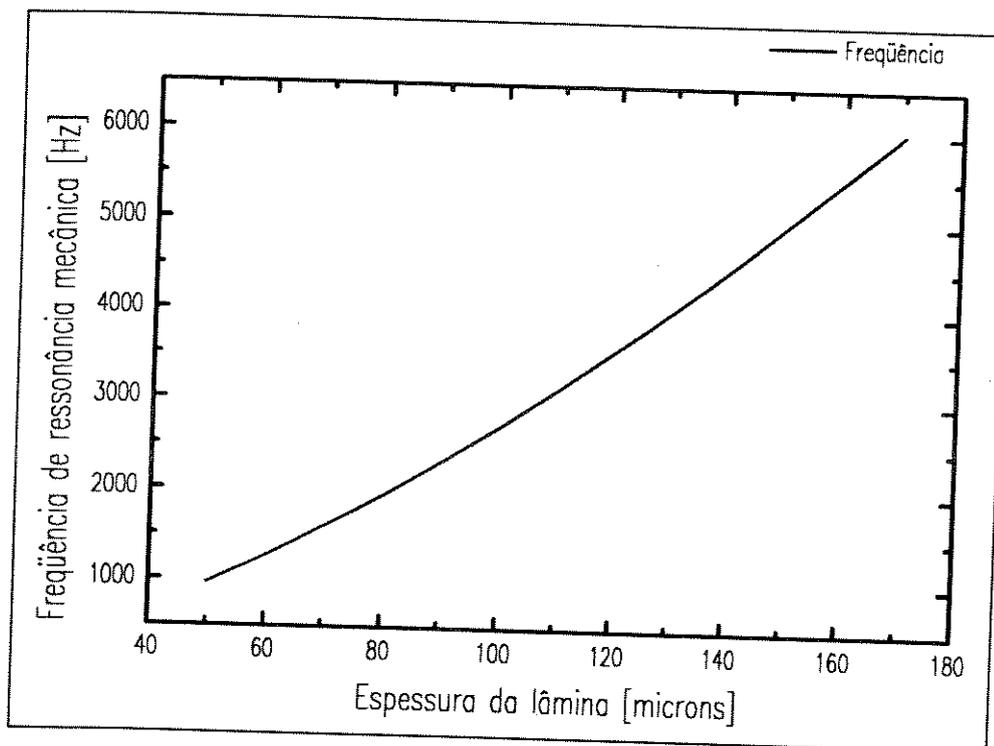


Figura 3.12: Frequência de ressonância mecânica do microscanner galvanométrico em função da espessura das barras de torção.

No processo implementado a corrosão anisotrópica por KOH tem sido utilizada para, ao mesmo tempo, usinar as barras de torção e a plataforma de suporte do espelho e da bobina, e afinar o substrato de silício, que nos é disponível apenas na forma de lâminas <100> de 300 microns de espessura. Ao ser vazada a lâmina o substrato está com 150 μm de espessura. Para essa espessura o ângulo máximo de deflexão, o stress máximo e a frequência de ressonância mecânica são:

$$\omega_0 = 5.000 \text{ Hz} \text{ ---- Frequência de ressonância mecânica.}$$

$$\theta_{0\text{Hz}} = 10^\circ \text{ --- Ângulo máximo de deflexão a 0 Hz.}$$

$$s = 23923 \text{ psi} \text{ --- Tensão mecânica ao ângulo máximo.}$$

Conclusão

Pelos cálculos acima, um microscanner galvanométrico de suspensão de barras de torção com 7,5 mm de comprimento, 150 μm de espessura, tampo das barras com 100 μm de largura, plataforma móvel de 5 x 5 mm, e 20 espiras na bobina defletora, poderá apresentar ângulo de deflexão de mais ou menos 10° a 0 Hz, desde que alimentado com a corrente elétrica suficiente para tal. Seu ângulo máximo de deflexão à frequência de ressonância mecânica deverá ser determinado experimentalmente, pois depende do fator de amortecimento do sistema mecânico, que é função, dentre outros elementos, do atrito viscoso com o ar.

São características bastantes superiores ao scanner de Petersen, que apresenta ângulo de deflexão máximo de $\pm 1^\circ$ à frequência de ressonância mecânica, e ângulo desprezível a zero Hertz. É de se supor, no entanto, que o ângulo de deflexão do microscanner galvanométrico à frequência de ressonância mecânica possa vir a ser maior que o apresentado por um scanner de Petersen de mesmas dimensões.

No próximo capítulo serão apresentados os procedimentos experimentais que levaram à fabricação dos protótipos do microscanner galvanométrico com suspensão por fio e do microscanner galvanométrico com suspensão por barras de torção. Serão apresentadas também as suas respectivas características de desempenho.

CAPÍTULO 4

Fabricação dos Microscanners Galvanométricos.

Introdução

Neste capítulo é apresentada a parte experimental da tese, essencialmente na ordem cronológica de sua execução.

Mostram-se dois tipos de dispositivos: o primeiro tipo tem suspensão da parte móvel por fio, e o segundo tipo tem suspensão por barras de torção.

Primeiramente foram implementados os dispositivos de suspensão por fio, que tiveram o objetivo de demonstrar a viabilidade da deflexão galvanométrica na geometria planar e na escala de tamanho propostos.

Uma vez demonstrada tal viabilidade, procedeu-se à implementação dos dispositivos de barras de torção, para o que foram propostos e tentados cinco diferentes procedimentos de fabricação.

Antes da apresentação dos procedimentos de fabricação dos dispositivos de barras de torção, é feita uma introdução à corrosão anisotrópica de silício, que é o processo fundamental de todos os procedimentos de fabricação propostos e testados.

A questão-chave da fabricação dos microscanners de barras de torção foi descobrir-se um tipo de máscara protetora para a corrosão anisotrópica de silício por KOH (o tipo de corrosivo utilizado), de vez que constatou-se que tal processo de corrosão provoca elevado nível de tensão mecânica interna no silício e nas máscaras utilizadas, provocando-lhes trincas e flambagens, e inutilizando-os. Foi proposto e utilizado um procedimento para o alívio de tais tensões, o que permitiu se chegasse à realização de um protótipo funcional do dispositivo com barras de torção desejado.

Ficou assim demonstrada a possibilidade de se realizar um microscanner galvanométrico de silício com barras de torção, cujo desempenho é apresentado na parte final do capítulo.

Especificação das Trilhas Metálicas.

Como o microscanner galvanométrico deve possuir espiras planares metálicas, iniciou-se sua fabricação pelo dimensionamento das trilhas, que deveriam, a princípio, ser de alumínio, que é o metal normalmente utilizado em microeletrônica.

Para trilhas de filme de alumínio^[127] de $1\mu\text{m}$ de espessura tem-se que, para uma corrente (arbitrariamente escolhida) de 50 mA, sua largura deve ser de $20\mu\text{m}$.

A largura das trilhas e a distância entre elas poderiam ter um mínimo de $10\mu\text{m}$, em função da resolução do sistema de fotolitografia disponível no LED à época.

Outra limitação de processo do LED é que não se pode realizar metalização em duplo-nível, o que dificulta a execução de uma bobina planar, que precisa de um "jumper" entre sua extremidade interna e o respectivo terminal de conexão aos ("pads") do dispositivo (**Figura 4.1**)

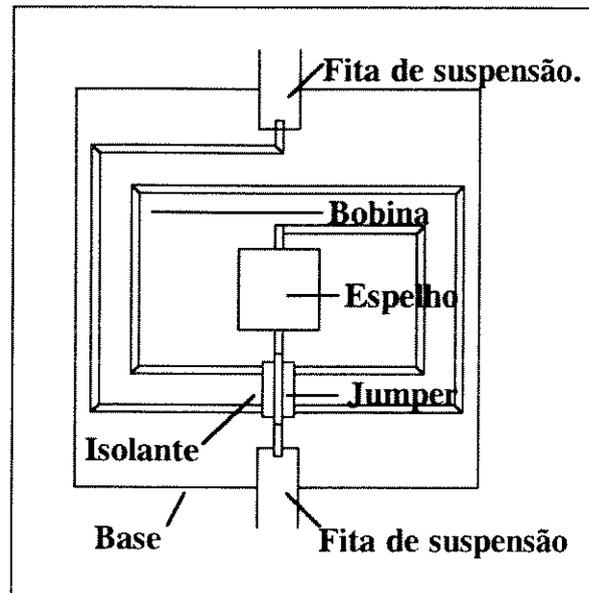


Figura 4.1: Esquema da bobina defletora e sua conexão aos "pads".

A Primeira Seqüência de Fabricação.

Em função disso, optou-se por refazer o projeto do dispositivo em função dos processos disponíveis, que à época eram os seguintes:

- Fotomáscaras.
- Fotolitografia.
- Oxidação úmida.
- Difusão.
- Metalização com alumínio.
- Corte de lâminas de silício.
- Solda ultrasônica de fios de Al de 25 μ m de diâmetro.

Os Protótipos Exploratórios.

Como se desejava, num primeiro passo, investigar a viabilidade da confecção do microscanner com os processos de fabricação disponíveis, concebeu-se um dispositivo que poderia ser realizado com a deposição de filme de alumínio sobre substrato de vidro. O alumínio seria litografado para formar as bobinas defletoras e o espelho. O "jumper" das bobinas seria feito por fios soldados ultrasonicamente, e as fitas metálicas de suspensão, previstas no capítulo anterior, seriam substituídas por fios de alumínio de 25 μ m de diâmetro, que são os fios normalmente utilizados para conectar os "pads" dos "chips" eletrônicos aos terminais dos seus encapsulamentos.

Uma vez feita a litografia do alumínio, o dispositivo seria separado da lâmina de substrato pelo processo de corte de lâminas de silício por máquina riscadora a diamante.

A Máscara dos Protótipos Exploratórios.

Foi feito um programa de computador para o projeto da máscara e geração dos arquivos de corte de rubilyth no coordenatógrafo do LED. A máscara gerada tem quatro dispositivos, de três tamanhos diferentes, escolhidos aleatoriamente, e foi dimensionada para os substratos de vidro de 24mm x 40 mm x 100 μ m (**Figura 4.2**).

Cada dispositivo é composto de duas bobinas entrelaçadas (também se diz "bobinas interdigitais"), cujos terminais se encontram diametralmente opostos, de maneira que em cada extremidade do dispositivo devem ser soldados dois fios, que servirão ao mesmo tempo como suspensão, em torno dos quais girará o dispositivo ao ser aplicada uma corrente elétrica na presença de campo magnético externo, e como fios de alimentação das bobinas defletoras.

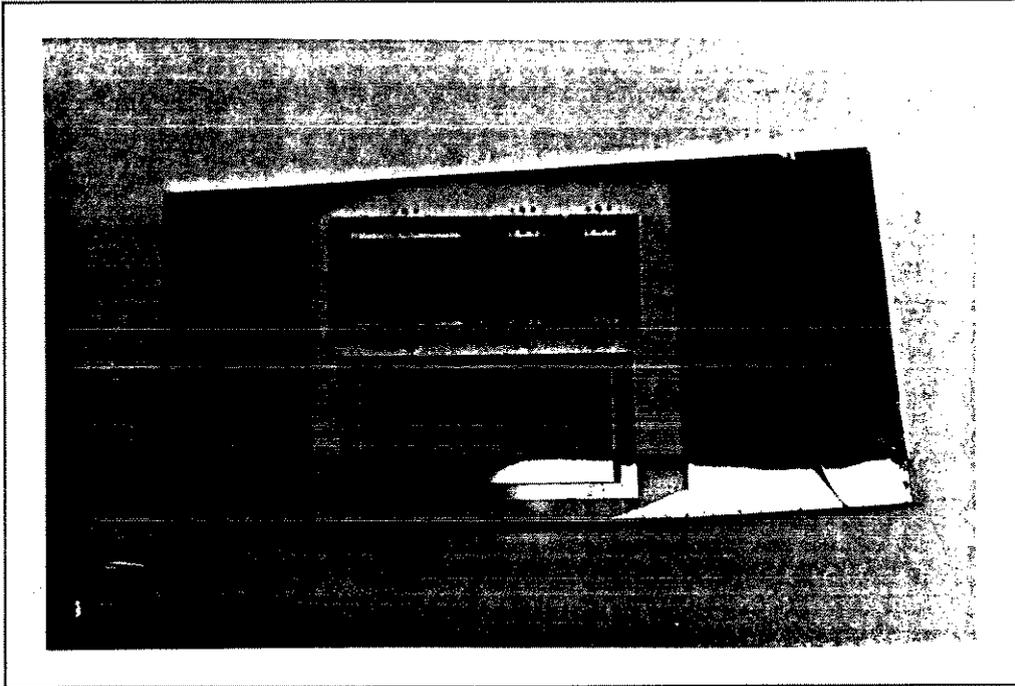


Figura 4.2: Fotomáscara do metal dos protótipos exploratórios.

O Problema da Limpeza na Fabricação.

De vez que o LED estava voltando à atividade após cinco anos fechado, e a equipe de processo era inexperiente, houve dificuldade em se fazer a metalização sem "pin-holes", o que pode ser notado pelas fotos das primeiras tentativas (**Figura 4.3**).

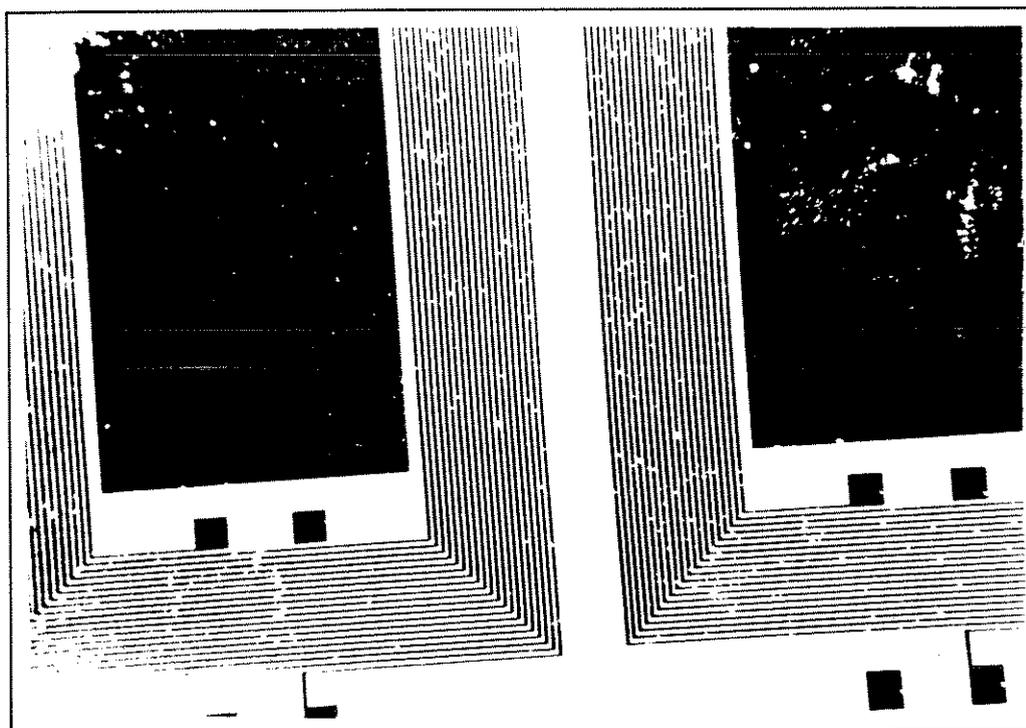


Figura 4.3: Primeiras metalizações com alumínio sobre vidro.

Após dois meses de tentativas, em que foram solucionados os problemas de limpeza no processo, obtiveram-se filmes metálicos com a qualidade necessária à consecução dos dispositivos de teste, conforme a foto abaixo (**Figura 4.4**).

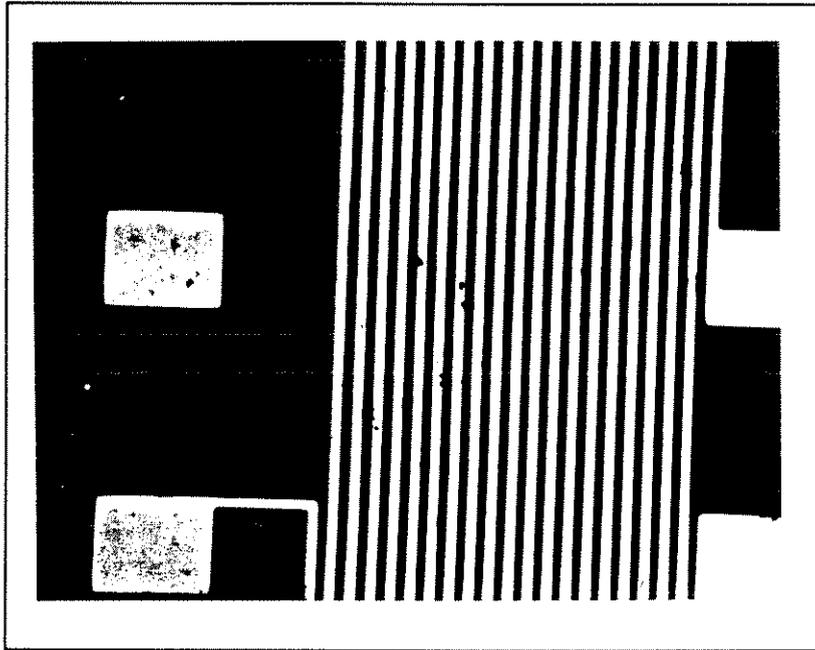


Figura 4.4: Filmes de alumínio sobre vidro com poucos "pin holes".

Os Primeiros Protótipos Fabricados.

Foram feitas algumas amostras com substrato de vidro, mas nesse meio tempo resolveu-se substituir o substrato de vidro por substrato de silício, de vez que os processos estabelecidos no laboratório eram para substrato de silício, e seria necessário desenvolver novos procedimentos para o caso de substrato de vidro. Processou-se então um conjunto de lâminas de silício, fotogravando-se a máscara dos dispositivos em filme de alumínio, depositado por evaporação na face polida do substrato. Com um microprovador foram selecionados os dispositivos cujas bobinas não continham curtos ou interrupções. O que de melhor se conseguiu foram dispositivos com apenas uma das duas bobinas em bom estado.

Selecionados os dispositivos aproveitáveis, procedeu-se ao corte das lâminas numa serra de diamante (por gentileza do Engo. Nivaldo, da HOBER), após o que foram soldados artesanalmente os fios de "jumper" das bobinas e os fios de suspensão/alimentação.

Finalmente os dispositivos foram montados em bases de sustentação.

Por ser baixa a resistência dos fios de alumínio para serem utilizados como suspensão do dispositivo, resolveu-se usar um fio de borracha como sistema de suspensão, ficando os fios metálicos apenas com a função de alimentação elétrica. Foram confeccionados finíssimos fios de borracha de silicone (utilizando-se uma técnica sugerida pelo Prof. Dr. Edmundo da Silva Braga), que foram esticados sobre as bases de sustentação, e sobre eles foram aderidos os defletores, procedendo-se à centragem possível manualmente (**Figura 4.5**)

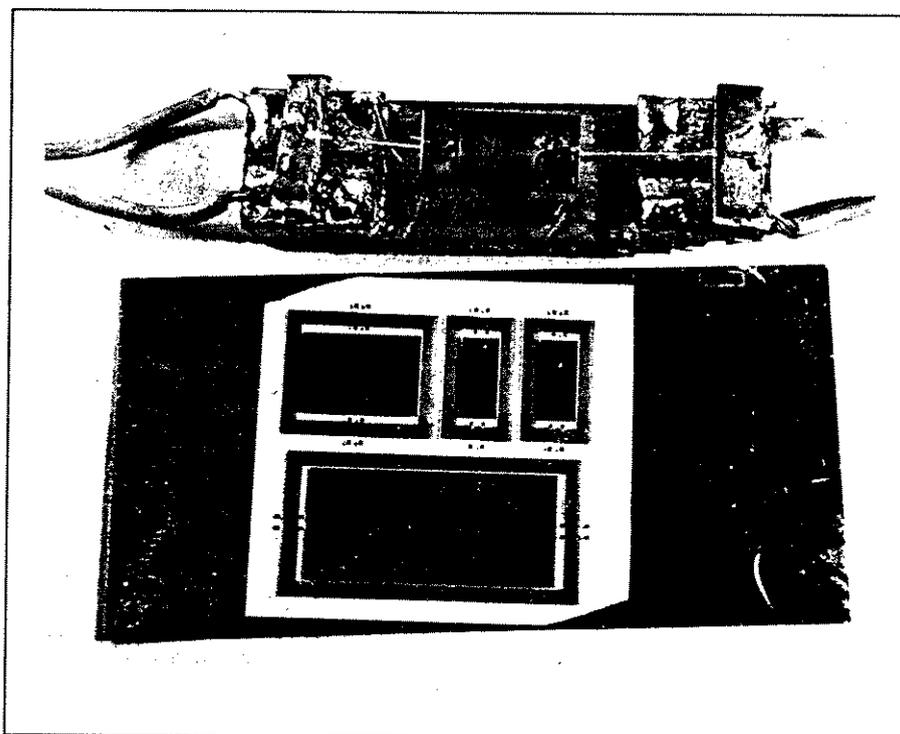


Figura 4.5: Protótipos exploratórios: (em baixo) de vidro sem suspensão de fios; (em cima) de silício, com suspensão por fios de borracha.

Utilizando-se o imã de um alto-falante como fonte do campo magnético externo (campo de 1400 Gauss), montou-se o arranjo final, com o microscanner no entreferro do circuito magnético (**Figura 4.6**).

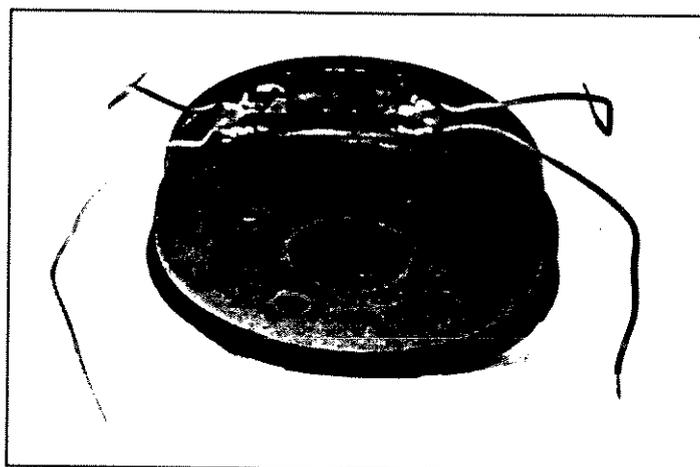


Figura 4.6: Montagem final do protótipo exploratório.

A Caracterização do Protótipo Exploratório.

Apenas um dos protótipos exploratórios sobreviveu a todo o manuseio a que foram submetidos, e chegou a ser submetido ao teste de resposta em frequência.

A caracterização do protótipo exploratório foi feita levantando-se sua resposta em frequência da seguinte maneira: um laser de He-Ne era apontado para o espelho do dispositivo, que estava num suporte de altura regulável e era excitado por uma fonte de tensão senoidal de frequência e amplitude variáveis. O laser refletido e defletido era projetado num anteparo branco localizado a 50 cm do microscanner sob teste. Tabulando-se a amplitude da varredura do laser no anteparo e as respectivas tensão e frequência de excitação, calculou-se a resposta em frequência do defletor (obs: o ângulo de deflexão do espelho é a metade do ângulo de deflexão do feixe de luz). Ao ângulo de deflexão do espelho se denominará, doravante, de "ângulo de varredura".

A caracterização do dispositivo deu os seguintes resultados:

- Máximo ângulo de varredura de $31,1^\circ$ a 29,4 Hz, à corrente senoidal de 3,1 mA e campo magnético externo de 1400 Gauss.
- Resposta em frequência com pico em 29,4 Hz (**Figura 4.7**)

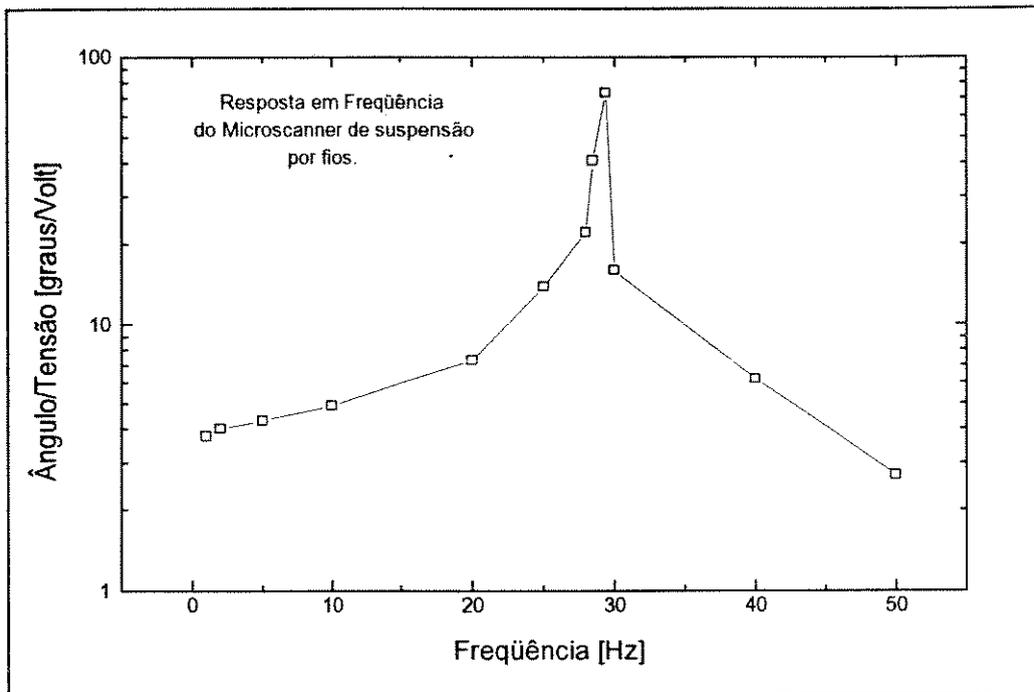


Figura 4.7: Resposta em frequência do protótipo exploratório do microscanner.

Conforme esperado, por se ter utilizado o processo de corte mecânico para separar os dispositivos da lâmina, ao invés da separação por corrosão anisotrópica do substrato de silício, geraram-se algumas assimetrias que desbalancearam os dispositivos. E por ter sido adotado um sistema de suspensão acrescentado manualmente, ao invés de fitas de metal fotolitografadas em filmes finos, acrescentaram-se novas assimetrias à montagem do dispositivo. Em consequência, o defletor caracterizado apresentou movimentos espúrios em frequências de varredura superiores a 30 Hz.

Os protótipos exploratórios mostraram-se capazes de resistirem a quedas de 30 cm sem danos observáveis, o que evidencia boa resistência ao manuseio desde que montados nos suportes mecânicos apropriados.

Uma observação importante foi de que os fios de alimentação das bobinas rompiam-se após duas ou três horas de funcionamento contínuo dos dispositivos a frequências menores que 30 Hz, o que aponta para a possibilidade de pesquisas complementares de maneira a se chegar a fios mais duráveis, viabilizando assim a possível aplicação deste tipo de dispositivo em sistemas de varredura óptica de baixa frequência.

Paralelamente à fabricação do protótipo exploratório foi-se investigando o processo de corrosão anisotrópica de silício, ou "micromachining", que seria a base da confecção do dispositivo de barras de torção.

No próximo item será feita uma introdução à corrosão anisotrópica de silício, com ênfase a suas aplicações tecnológicas na fabricação de dispositivos micromecânicos, dentre os quais os microscanners galvanométricos de barras de torção que são objeto desta tese.

Micromachining de Silício.

A técnica de corrosão anisotrópica de silício aplicada à confecção de dispositivos micromecânicos é denominada "micromachining", que poderia ser traduzida para o português por "microusinagem".

Histórico.

O formidável progresso da microeletrônica nos últimos trinta anos produziu uma quantidade de conhecimentos sem precedentes sobre a matéria-prima básica dos microcircuitos: o silício. Sendo um dos materiais mais abundantes na natureza, tem ainda a vantagem de apresentar, além das propriedades elétricas que o tornaram a base da microeletrônica, excelentes propriedades mecânicas^[88]. À medida que os avanços da tecnologia permitiam que se conseguissem cristais de silício cada vez mais puro, a fim de se obterem melhores propriedades elétricas, também as propriedades mecânicas desse material se iam tornando melhores, mais estudadas e mais conhecidas, inicialmente tendo-se em vista apenas a fabricação de microcircuitos, mas com o passar do tempo tais propriedades foram despertando interesse com vistas à fabricação de artefatos eletromecânicos miniaturizados, tais como sensores integrados, cabeças de impressoras a jato-de-tinta, válvulas eletroópticas e outros.

O Cristal de Silício.

O silício cristalino tem estrutura cúbica de face centrada^[86] (Figura 4.8). Em cada vértice e no centro de cada face do cubo unitário do cristal há um átomo de silício. Os eixos do cubo unitário formam um sistema de coordenadas cartesianas que permitem a especificação das direções e planos internos do cristal. Uma direção do cristal é designada por três coordenadas, chamadas "índices de Miller", que são múltiplos inteiros do comprimento de uma das arestas do cubo unitário. Os mesmos índices designam os planos perpendiculares a essas direções.

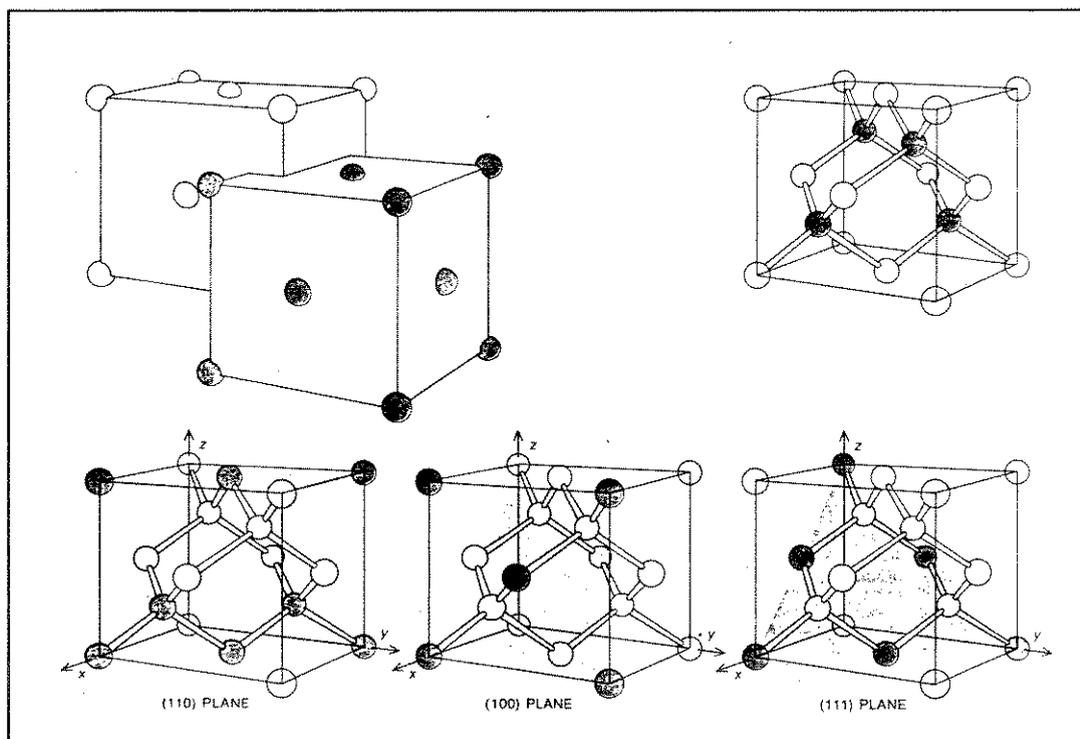


Figura 4.8: Cristal de Silício (Figura extraída de ^[86])

A orientação cristalina é importante na fabricação de dispositivos micromecânicos, porque alguns corrosivos atacam a diferentes taxas as diferentes direções do cristal. Muitos desses corrosivos atacam rapidamente na direção do cristal perpendicular ao plano (110), e a taxa menor na direção perpendicular ao plano (100). A direção perpendicular ao plano (111) é atacada numa taxa muito menor que as outras direções.

Diz-se então que, nesses casos, há um processo de *corrosão anisotrópica*, de vez que a taxa de corrosão varia conforme a direção do cristal.

Processos de Corrosão Anisotrópica de Silício.

A microusinagem de silício por corrosão anisotrópica é feita com o emprego das técnicas de fotolitografia normalmente utilizadas em microeletrônica, que consistem da utilização de lâminas de silício monocristalino de orientação cristalográfica específica (geralmente (110) ou (100)), sobre as quais é depositado um filme protetor (máscara), do qual são removidas, por processos fotolitográficos, certas regiões, denominadas *janelas*, nas quais fica exposta a superfície da lâmina monocristalina. A lâmina é então mergulhada na solução corrosiva anisotrópica, que lhe ataca as partes expostas, produzindo cavidades com paredes inclinadas de um ângulo de $54,75^\circ$ (no caso de lâminas $\langle 100 \rangle$) ou paredes retas (no caso de lâminas $\langle 110 \rangle$) (Figura 4.9).

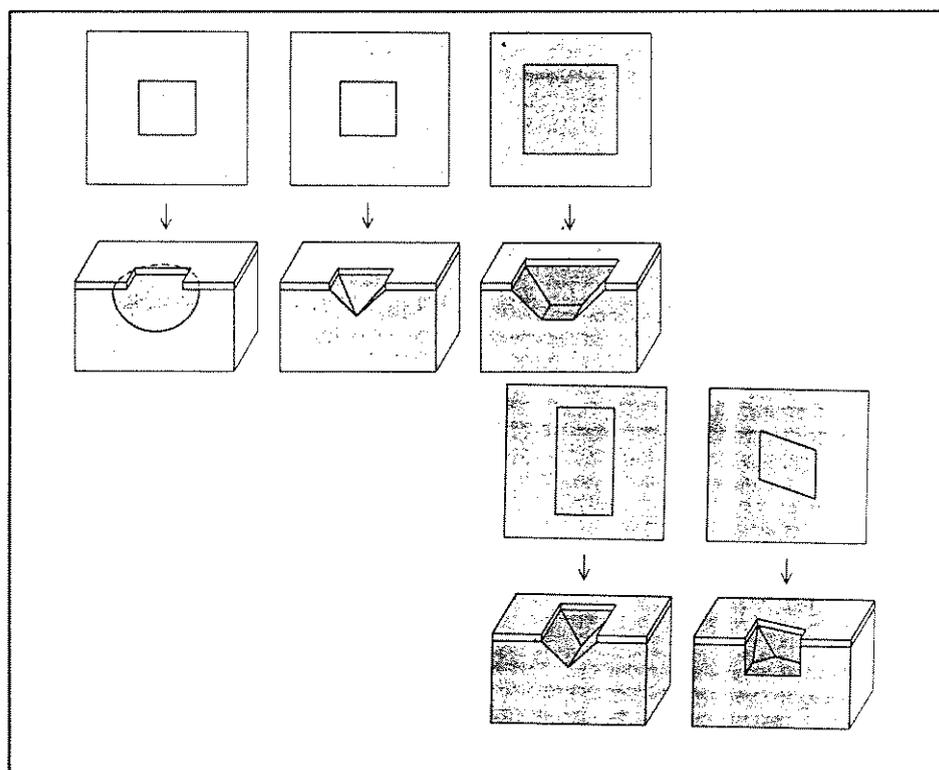


Figura 4.9: Formação de cavidades por corrosão anisotrópica de lâminas de silício $\langle 100 \rangle$ e $\langle 110 \rangle$ (Figuras extraídas de [86]).

Os processos de corrosão anisotrópica são extremamente sensíveis à temperatura e composição do corrosivo, com o que devem ser efetuados em reatores com recirculação de vapor e com temperatura controlada, a fim de se garantir a reprodutibilidade dos resultados.

Na tabela abaixo estão relacionados os principais processos de corrosão de silício utilizados atualmente, com seus corrosivos, máscaras, taxas de ataque aos planos do silício e às máscaras, e temperaturas típicas^[88].

Processos de Corrosão de Silício.					
Corrosivo (Diluyente)	Composições Típicas	Temperatura [°C]	Taxa de Corrosão [$\mu\text{m}/\text{min}$]	Razão de Corrosão (100)/(111)	Filmes de mascaramento (taxa de ataque das máscaras)
HF HNO ₃ (água CH ₃ COOH)	10 ml 30 ml 80 ml	22	0,7-3,0	1:1	SiO ₂ (300 Å/min)
	25 ml 50 ml 25 ml	22	40	1:1	Si ₃ N ₄
	9 ml 75 ml 30 ml	22	7.0	1:1	SiO ₂ (700 Å/min)
Etileno diamina Pirocatecol (água)	750 ml 120 gr 100 ml	115	0,75	35:1	SiO ₂ (2Å/min) Si ₃ N ₄ (1Å/min)
	750 ml 120 gr 240 ml	115	1,25	35:1	Au,Cr,Ag, Cu,Ta
Hidrazina (água)	64 %	90	1,6	30	SiO ₂ Al
KOH (água, isopropanol)	44 gr 100 ml	85	1,4	400:1	
	50 gr 100 ml	50	1,0	400:1	Si ₃ N ₄ SiO ₂ (14Å/min)

A Escolha do Corrosivo.

A escolha do tipo de corrosivo a ser utilizado levou em conta a razão de corrosão, que deveria ser elevada por tratarem-se de corrosões profundas, e a segurança de manuseio do corrosivo. Neste particular, o Etileno-diamina-Pirocatecol^[95] (EDP) é extremamente tóxico, e a Hidrazina^{[98][99]} é extremamente explosiva (dependendo da concentração utilizada), além de ser cancerígena, demandando ambos condições de trabalho rigorosamente seguras.

Em função de tais fatores, o KOH^{[95][94]} foi o corrosivo eleito para a microusinagem do microscanner de silício, de vez que, além de possuir a melhor razão de corrosão, não é explosivo, e tem toxicidade menor que o EDP.

Os primeiros testes com a corrosão anisotrópica foram feitos de maneira improvisada, utilizando-se apenas um bequer como reator e uma chapa-quente como aquecedor. Confirmou-se a taxa de corrosão do silício e da máscara de SiO₂ citadas na literatura, e o fato de a composição da solução variar com a evaporação gradual de seus componentes, implicando em mudança da taxa de corrosão. Constatou-se também a extrema suscetibilidade das amostras produzidas à fratura por manuseio.

Causas da Tensão Mecânica em Filmes Finos.

A tensão mecânica está presente em filmes finos^[143] produzidos por praticamente todos os processos de deposição existentes, e pode atingir valores da ordem de 10⁵ N/cm², que equivale a 10.000 atmosferas. Mesmo tensões menores que essas são capazes de alterar as características mecânicas, elétricas, magnéticas ou ópticas dos filmes.

Em muitos casos tais tensões são indesejáveis e prejudiciais, seja em simples filmes, seja em sensores, seja em outros dispositivos. Portanto é necessário se saibam a origem, natureza e valor da tensão, mesmo por que, se seu valor ultrapassar certo limite crítico, surgem instabilidades mecânicas, e o filme ou dispositivo apresenta trincas ou flambagens (ondulações).

Em outros casos as tensões podem ser desejáveis, gerando novas aplicações para os filmes finos através de alterações intencionalmente neles introduzidas através da tensão mecânica.

Também pode ocorrer que o filme e seu substrato adquiram tensões internas posteriormente ao ato da deposição do filme, como nos casos de lâminas de Si submetidas a corrosão, conforme se verá nos itens a seguir. Tais tensões se somam às produzidas no ato da deposição do filme.

A tensão mecânica pode ser de tração ou de compressão, conforme a tendência para comprimir o filme ou para esticá-lo, respectivamente, conforme o modelo apresentado abaixo (Figura 4.10).

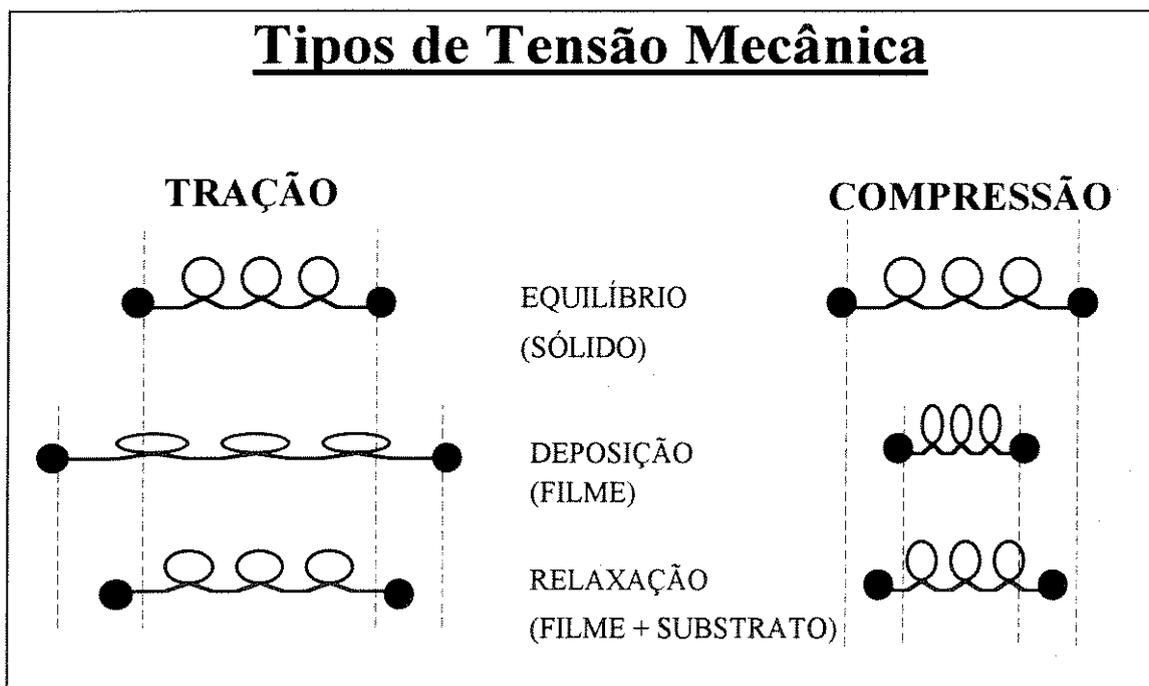


Figura 4.10: O parâmetro de rede do filme fino se altera durante o processo de deposição. À esquerda tem-se o caso em que a rede sofre tração durante a deposição, aumentando seu parâmetro de rede. À direita tem-se o caso em que a rede sofre compressão durante a deposição, diminuindo seu parâmetro de rede.

A interação entre filme e substrato faz com que as tensões induzidas em um se reflitam imediatamente no outro, podendo ocorrer que uma tensão de tração induzida no substrato o faça distender-se, forçando o filme, que está solidário ao substrato, a também distender-se, o que resulta numa alteração do seu estado de tensão, chegando a, em caso extremo, provocar-lhe trincas por excesso de tração. Da mesma forma, pode ocorrer que uma tensão de compressão induzida no substrato o faça comprimir-

se, forçando o filme a também comprimir-se, que o pode levar a flambar-se (enrugar-se) e, em caso extremo, a fraturar-se e soltar-se do substrato por excesso de compressão. Estes dois casos poderão ser vistos, na prática, nos próximos itens.

O Processo LED.

Baseando-se na estrutura mecânica do microscanner de Petersen e no processo de deflexão galvanométrica testado no protótipo exploratório e que, segundo os cálculos efetuados no capítulo anterior, é vantajoso em relação ao processo de deflexão eletrostática empregado por Petersen, foram concebidos o dispositivo deste trabalho (**Figura 4.11**) e a sua correspondente seqüência de fabricação no LED, pelo que tal seqüência será denominada de Processo LED:

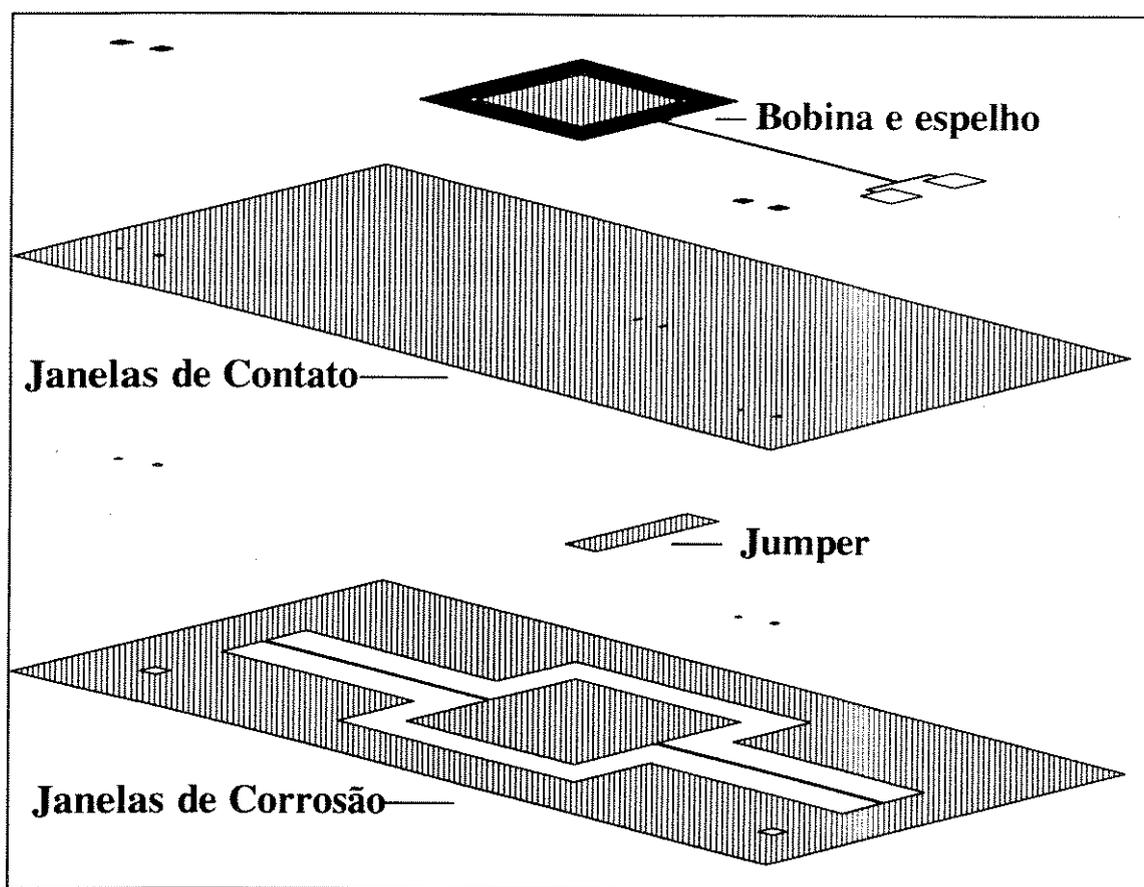


Figura 4.11: Estrutura do microscanner galvanométrico de barras de torção.

Sequência de Fabricação do Microscanner de Barras de Torção - Processo LED:

1. Limpeza do substrato.
2. Oxidação do substrato de silício.
3. Fotolitografia das janelas dos furos de alinhamento na face despolida.
4. Corrosão dos furos de alinhamento em KOH.
5. Remoção do óxido de silício.
6. Oxidação do substrato.
7. Abertura das janelas de difusão na face polida.
8. Difusão de boro, formando o "jumper".
9. Oxidação para formar o dielétrico sobre o "jumper".
10. Abertura de janelas de contato sobre o "jumper".
11. Metalização da face polida.
12. Fotogravação das bobinas, e espelho no metal.
13. Abertura de janelas de corrosão no óxido de silício da face despolida.
14. Proteção do metal contra a corrosão anisotrópica.
15. Corrosão anisotrópica.
16. Remoção do óxido remanescente da corrosão.
17. Encapsulamento.
18. Testes de integridade.
19. Caracterização.

É ilustrado abaixo (Figura 4.12) o processo de fabricação descrito.

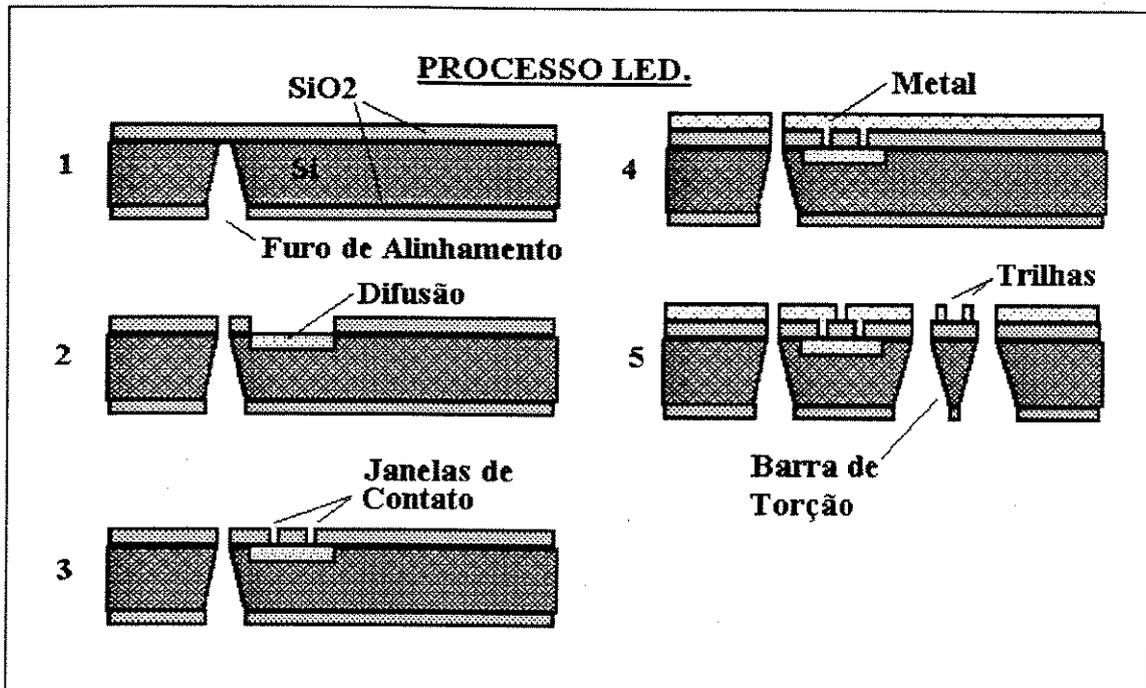


Figura 4.12: Ilustração do Processo LED: 1) Corrosão dos furos de alinhamento, 2) Difusão do "jumper", 3) Abertura das janelas de contato, 4) Deposição do nível de metal (bobina e espelho), 5) Corrosão anisotrópica, formando as barras de torção, a moldura e a plataforma móvel.

Foram então projetadas as fotomáscaras necessárias à fabricação do dispositivo segundo a sequência descrita acima.

Projeto das Fotomáscaras.

A primeira fotomáscara utilizada na fabricação é a máscara de furos de alinhamento, furos esses necessários para se alinharem as máscaras da bobina, da difusão e das janelas de contato, que devem ser fotolitografadas na face polida da lâmina, com a máscara das janelas de corrosão, deve ser fotolitografada na face despolida da lâmina. Consiste de dois quadrados de 440 μm de largura para cada um dos três dispositivos da lâmina, que são fotolitografados no filme de óxido de silício térmico crescido anteriormente nas lâminas, expondo-lhes assim a superfície de silício ao ataque por KOH.

A segunda fotomáscara é a das janelas de difusão, que são retângulos de 1000 x 5000 μm abertos no filme de óxido de silício térmico crescido nas lâminas, expondo-lhes a superfície à difusão de boro, que irá formar os "jumpers" das bobinas na face polida das lâminas.

A terceira fotomáscara é a das janelas de contato, que são dois pequenos quadrados, fotolitografados no filme de óxido de silício térmico crescido sobre as difusões, na face polida das lâminas, expondo-lhes a superfície para que haja o contato entre os "jumpers" e as bobinas metálicas.

A quarta fotomáscara é a da metalização, que consiste da bobina, espelho, e terminais de solda das conexões externas. É fotolitografada no filme metálico depositado sobre o óxido de silício de isolamento que recobre as difusões, na face polida da lâmina.

A quinta e última fotomáscara é a das janelas de corrosão, que é fotolitografada no filme de óxido de silício térmico crescido sobre a face despolida da lâmina, expondo a superfície do cristal de silício onde deve haver a corrosão anisotrópica com KOH, a fim de se formarem as barras de torção e a plataforma giratória sobre a qual estarão o espelho e a bobina.

O desenho das máscaras foi gerado por um programa de computador especialmente escrito para esta finalidade, na linguagem BASIC de um microcomputador compatível com o IBM-PC XT, que gerou arquivos de traços verticais e arquivos de traços horizontais. A fim de serem feitas as fotomáscaras em rubilyth, no coordenatógrafo do LED teve-se que transmitir, via porta serial, os

arquivos do IBM-PC XT para um APPLE II, que era o controlador do coordenatógrafo.

Como apenas o processo de corrosão anisotrópica de silício não era familiar à equipe de processos do LED, resolvemos iniciar a fabricação pela implantação de tal processo, utilizando para os testes iniciais lâminas de silício <100> de 2" de diâmetro, 300 μm de espessura, tipo P, e resistividade entre 5 e 10 Ohms, nas quais foi crescido um filme de SiO_2 , e em cuja face despolida foram abertas janelas de corrosão com a fotomáscara de número 5 (**Figura 4.13**).

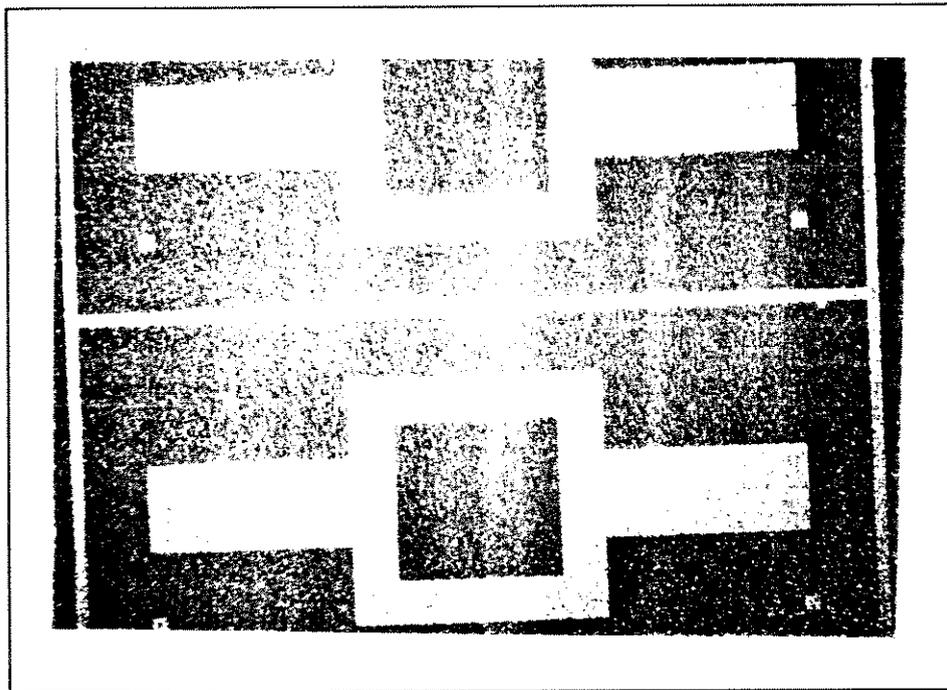


Figura 4.13: Lâmina de silício com as janelas de corrosão fotolitografadas na face despolida.

O Primeiro Ensaio de Corrosão Anisotrópica.

Em um béquer com a solução de $\text{KOH} : \text{Isopropanol} : \text{H}_2\text{O}$ nas proporções 5 : 4 : 16 (em massa) aquecida a 100°C numa chapa-quente, colocou-se uma lâmina de Si, a qual, após uma hora de corrosão, ficou tão fina que se tornou flexível (**Figura 4.14**).

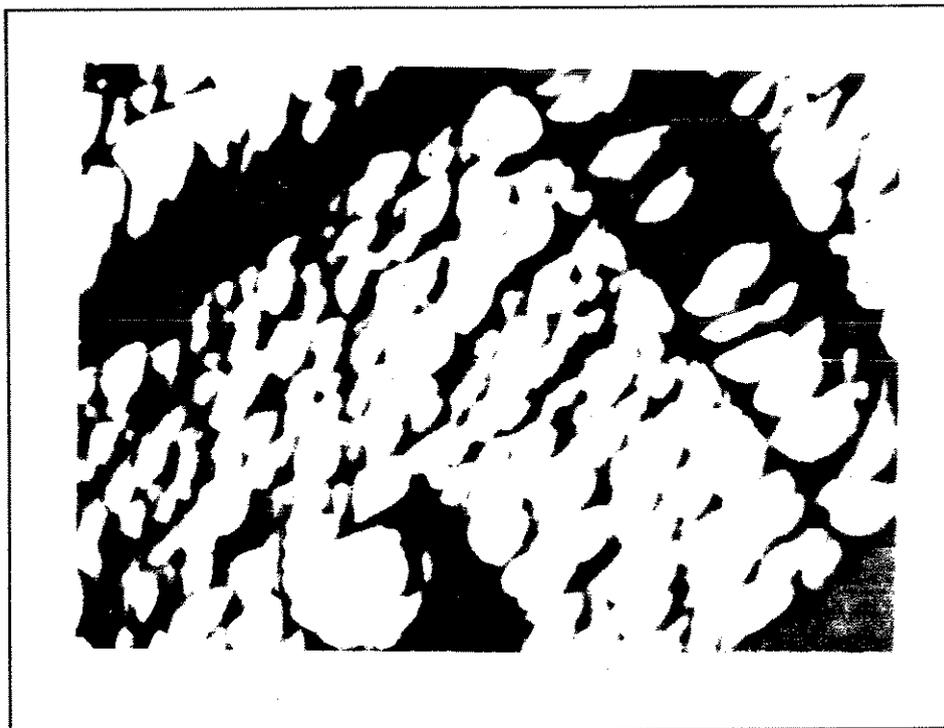


Figura 4.14: Detalhe de um furo de alinhamento da primeira lâmina corroida por KOH.

Tal resultado se explica pela variação da taxa de ataque do SiO_2 pelo KOH variar mais com a temperatura que a taxa de ataque do Si. Assim sendo, a máscara de SiO_2 foi completamente corroida antes que a lâmina de Si fosse corroida até ficar vazada nas janelas de corrosão. A solução para esse problema seria realizar-se a corrosão a uma temperatura em torno de 80°C , que, aliás, é a faixa de temperatura recomendada pela maioria das referências^{[96][93][95]}.

Outra lâmina foi submetida ao ataque por KOH durante 5h55', num béquer aquecido por chapa-quente e tampado com uma placa de vidro, a fim de se minimizar a perda de solução por evaporação, com a conseqüente alteração de proporção de suas fases (pois é uma solução trifásica), que têm pontos de ebulição diferentes.

Por exame ao microscópio verificou-se que a profundidade da corrosão do silício foi muito pequena, devido à má remoção do filme de óxido das janelas de corrosão.

Corroeu-se então uma terceira lâmina de silício, num béquer contendo 250 ml de solução de KOH aquecido em chapa-quente.

Concluiu-se que o SiO_2 da máscara de corrosão estava muito fino, daí não ter resistido por todo o tempo de ataque em KOH. No entanto chegaram a delinear-se as

estruturas mecânicas do dispositivo como, por exemplo, furos devidos às marcas de alinhamento da máscara de corrosão (**Figura 4.15**).

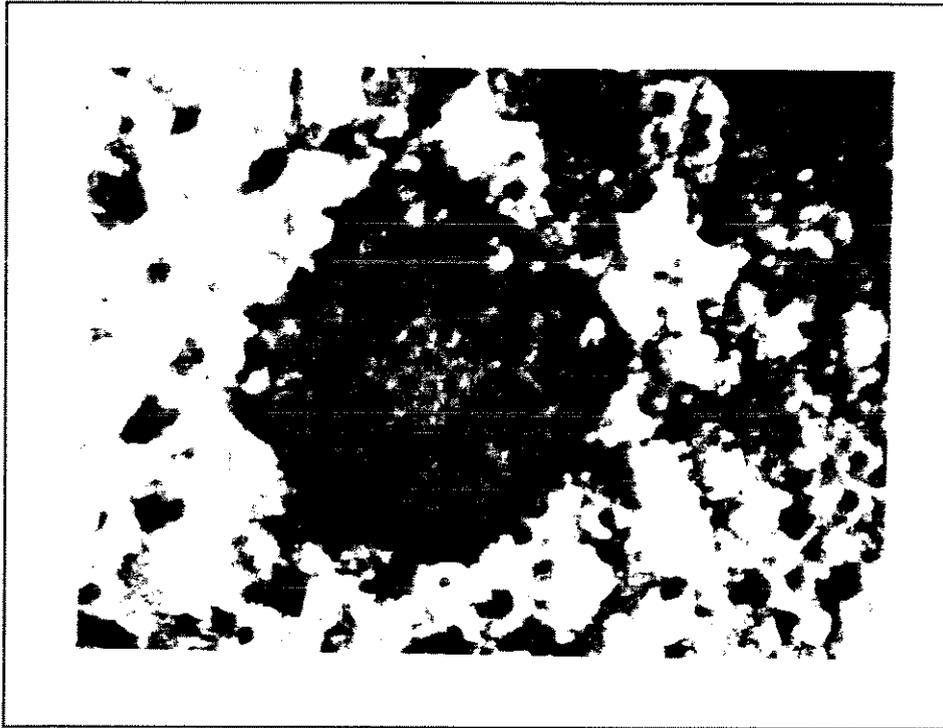


Figura 4.15: Furo devido à marca de alinhamento. Nota-se que a superfície da lâmina foi atacada, evidenciando a remoção total do SiO_2 de mascaramento.

Resolveu-se preparar mais duas lâminas de silício para corrosão, porém crescendo-se sobre elas um filme de SiO_2 mais espesso que nas lâminas anteriores. A oxidação foi feita durante 180 minutos à temperatura de $1150\text{ }^\circ\text{C}$.

Uma vez fotolitografada a máscara de corrosão no verso (face despolida) das duas lâminas, procedeu-se à corrosão da primeira lâmina nas mesmas condições da lâmina anterior (**Figura 4.16**).

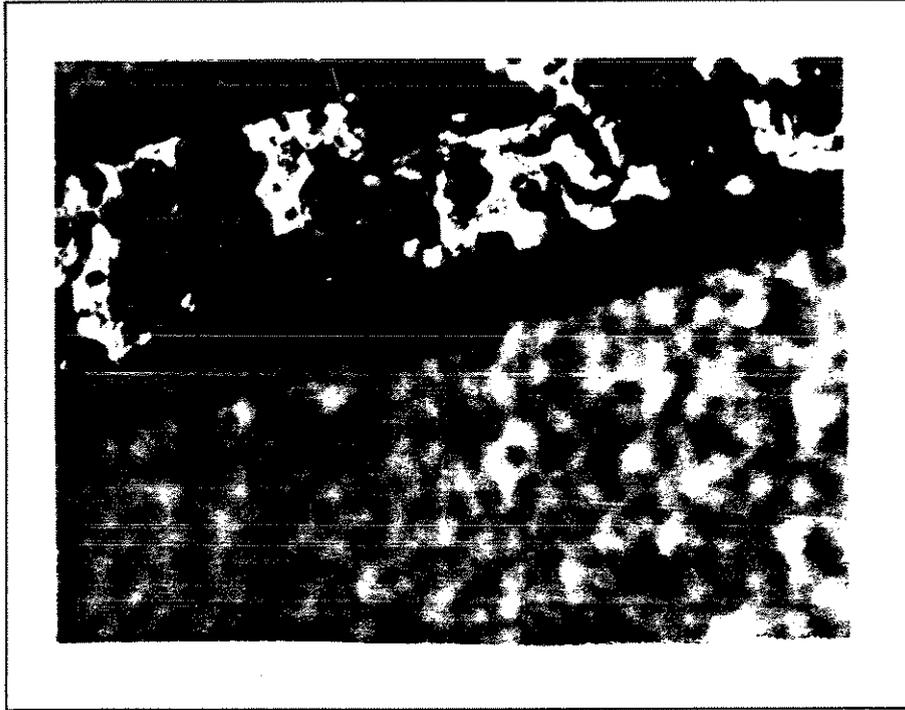


Figura 4.16: Tópo de barra de torção após 1h30' de ataque em KOH a 78°C. A lista escura é a fita de óxido de 20 μm de largura que protege o tópo da barra de torção.

Somente um dos dispositivos da lâmina não se quebrou devido ao manuseio. Os outros dois quebraram-se: um devido ao jato de N_2 para secagem, e o outro ao ser seguro com a pinça, evidenciando-se assim a sua fragilidade ao manuseio. Conclui-se então que são necessários procedimentos especiais, diferentes dos normalmente empregados em circuitos integrados.

As fotos a seguir são do dispositivo que não se quebrou:

A primeira mostra todo o dispositivo pela face despolida, mas com as barras de torção quebradas devido a manuseio posterior (Figura 4.17).

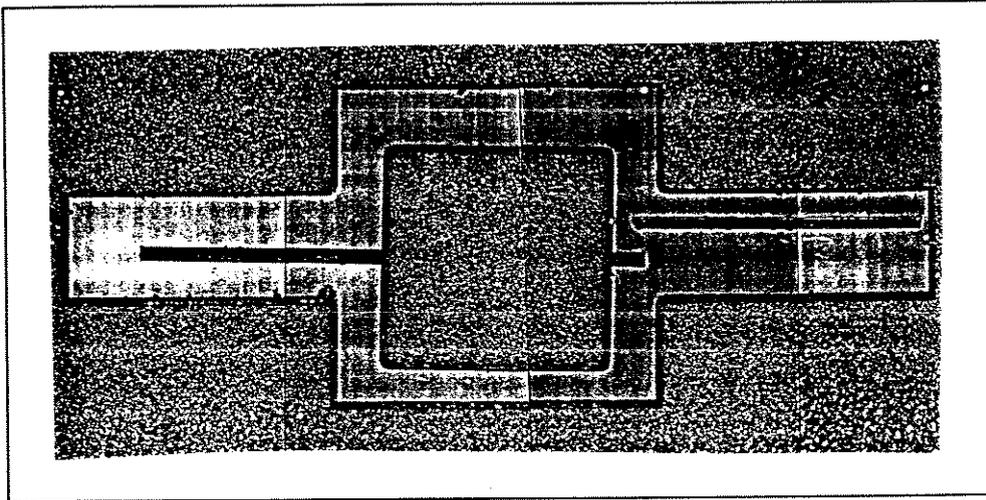


Figura 4.17: Primeira corrosão anisotrópica com KOH e máscara de SiO₂ bem-sucedida. Barras de torção fraturadas devido a manuseio posterior.

A foto seguinte (Figura 4.18) mostra o tópo de uma das barras de torção pela face despolida, sendo bem visíveis as paredes laterais da barra de torção e da estrutura de suporte, que estão com bom acabamento.

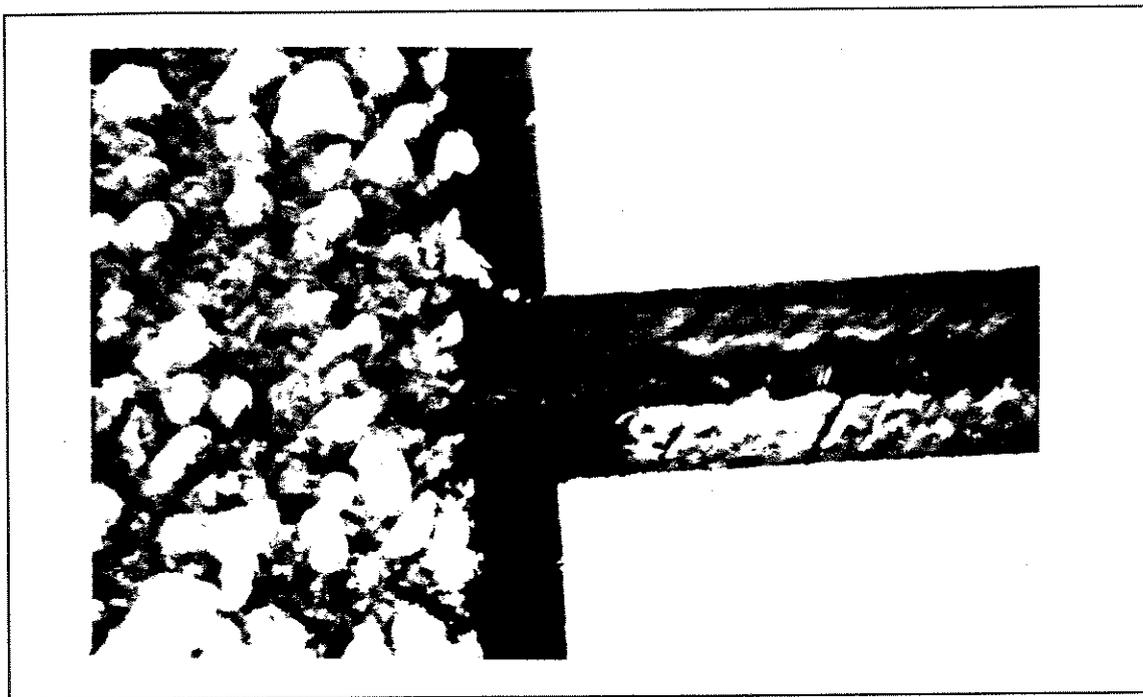


Figura 4.18: Junção de uma barra de torção com a estrutura de suporte, vista pela face despolida.

A foto seguinte (Figura 4.19) mostra a base de uma das barras de torção pela face polida, notando-se que a superfície da lâmina foi ligeiramente atacada pelo KOH,

revelando-se os grãos do silício. Note-se que as bordas da corrosão estão muito bem definidas.

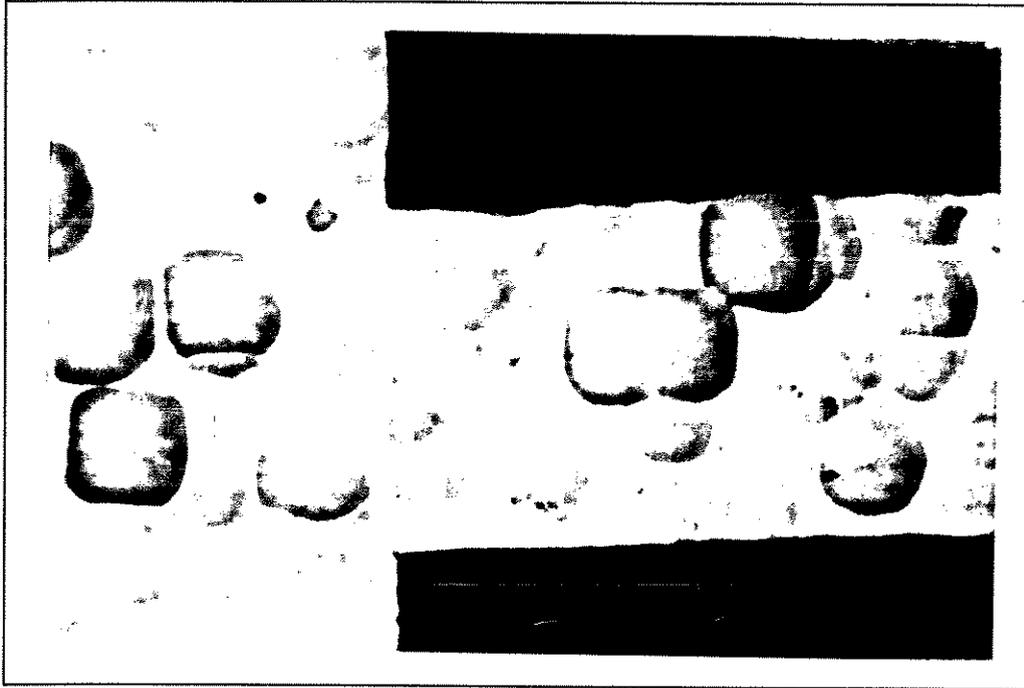


Figura 4.19: Junção de uma barra de torção com a estrutura de suporte, vista pela face polida.

A última foto da série (**Figura 4.20**) mostra um dos furos devidos às marcas de alinhamento da fotomáscara de corrosão, visto pela face polida da lâmina. Pode-se notar a boa definição das bordas do furo.

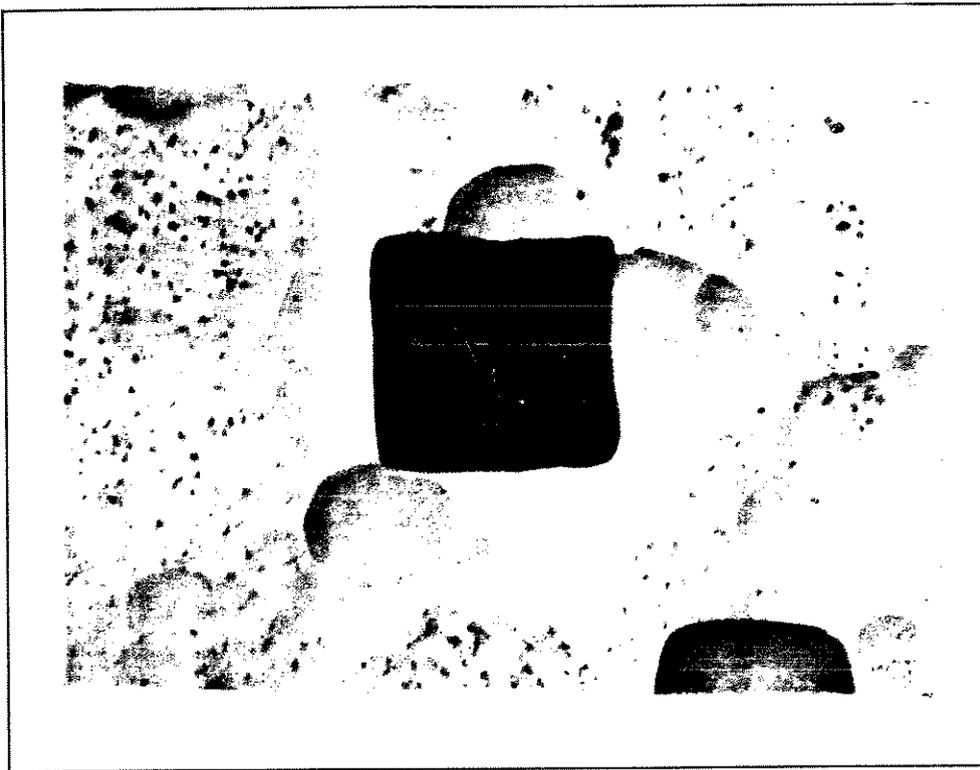


Figura 4.20: Furo devido a marca de alinhamento, visto pela face polida da lâmina.

Antes, porém, de se iniciar a sequência de fabricação, deparamo-nos com dois problemas a serem resolvidos: primeiro o fato de o KOH atacar o alumínio, do qual deveria ser feita a metalização do dispositivo, o que implica na necessidade de uma máscara protetora para a face polida da lâmina, onde estariam as bobinas e os espelhos; e segundo o fato de não se disporem, no LED, de lâminas de silício de 150 μm de espessura, que eram as especificadas para o trabalho em função do dimensionamento realizado no capítulo anterior.

Primeiramente atacou-se o problema da proteção do filme de alumínio da face polida da lâmina contra o ataque por KOH, conforme descrito a seguir.

Proteção do Metal Contra o Ataque por KOH.

Na face polida de uma lâmina de silício, das especificadas para a confecção do microscanner, depositou-se um filme de alumínio de 500 nm. Aplicou-se sobre o filme de Al uma camada protetora de verniz de silicone. Após 20" de ataque em KOH o verniz dissolveu-se, expondo o filme de Al à corrosão.

Ídem acima, protegida com uma camada de resina de poliéster de 10mm de espessura. Resistiu perfeitamente ao ataque por KOH, mas não conseguiu-se remover a resina após o ataque. Consultas ao Instituto de Química da UNICAMP não revelaram qualquer solvente para a resina de poliéster que deixasse intacto o silício.

Ídem acima, protegida com uma placa de vidro soldada nas bordas da lâmina, conforme a (Figura 4.21). A borracha de silicone utilizada como adesivo para o vidro soltou-se em poucos minutos de ataque por KOH.

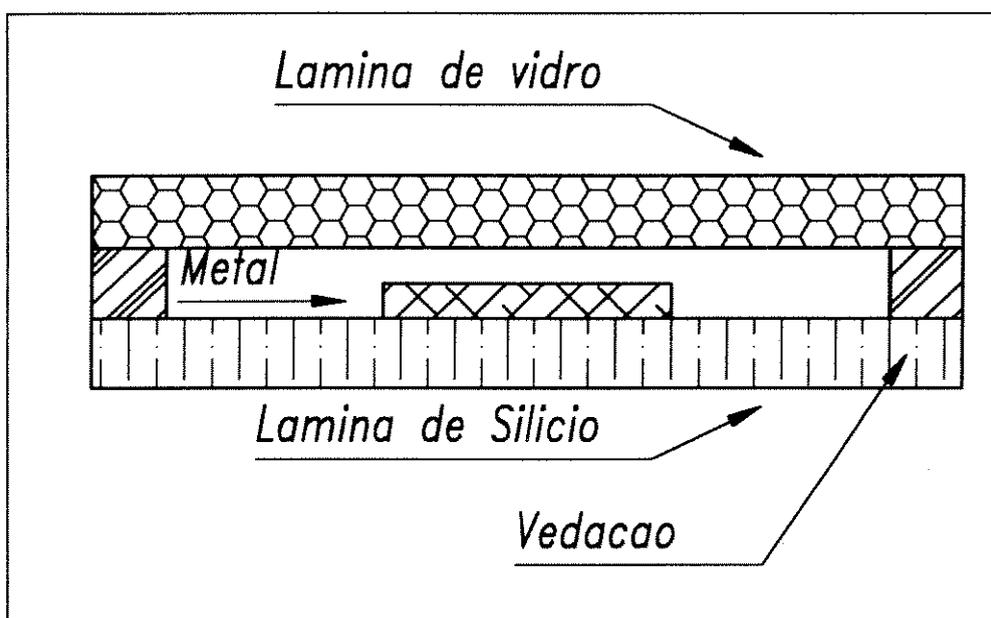


Figura 4.21: Proteção do metal das lâminas com vidro soldado à face metalizada.

Há a possibilidade de se utilizar Hidrazina ou EDP para a corrosão final das lâminas, mas a hidrazina é extremamente explosiva, e tem que ser aquecida a 110°C para a corrosão do silício. Como não se dispunha de um reator adequado para esse ataque, foi eliminada essa possibilidade. O EDP, por sua vez, é extremamente tóxico, e as capelas químicas disponíveis para o trabalho no LED não ofereciam a segurança necessária à sua manipulação, o que levou a eliminar-se também esta possibilidade.

Resolveu-se tentar a utilização de trilhas de ouro, no lugar de alumínio, com o que o problema de se ter uma máscara protetora contra o ataque por KOH seria eliminado. Precisar-se-iam apenas conseguir os reagentes para a fotolitografia do ouro, que não eram disponíveis no LED.

Passou-se então à solução do problema do afinamento das lâminas de silício.

Estabelecimento do Processo de Afinamento de Lâminas de Silício.

Após equacionado o problema do ataque indesejado do KOH ao metal do dispositivo, foi atacado o problema do afinamento das lâminas de silício de 300 μ m de espessura, conforme descrito a seguir.

Num primeiro passo foi empregada uma solução de " $\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2$ ", nas proporções 7 : 1 : 1 em massa, para o afinamento das lâminas^[97].

Um conjunto de duas lâminas de Si<100> de diâmetro de 2" e espessura de 290 μ m foram submetidas a esse corrosivo durante 8 minutos à temperatura ambiente. A face polida das lâminas estava protegida com cêra. A espessura reduziu-se para 210 μ m após o ataque, o que dá uma taxa de afinamento de 10 μ m/min.

E num segundo passo foi empregada uma solução de " $\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O}$ ", nas proporções de 7 : 1 : 1 em massa, para o afinamento das lâminas^[97].

Tanto neste caso quanto no caso anterior foram observadas irregularidades na corrosão, que se manifestavam por reentrâncias na face atacada das lâminas. Observou-se que, para lâminas corroidas na posição vertical, tais reentrâncias assumiam a forma de canaletas na direção vertical, e que girando-se as lâminas de 90° as canaletas continuavam se formando na direção vertical. Concluiu-se que tais canaletas eram devidas ao fluxo de bolhas do gás que se formam durante a corrosão e que, por uma questão de tensão superficial da solução, tendiam a permanecer na superfície da lâmina. A solução encontrada foi corroerem-se as lâminas sob agitação, conforme o arranjo mostrado na **Figura 4.22**.

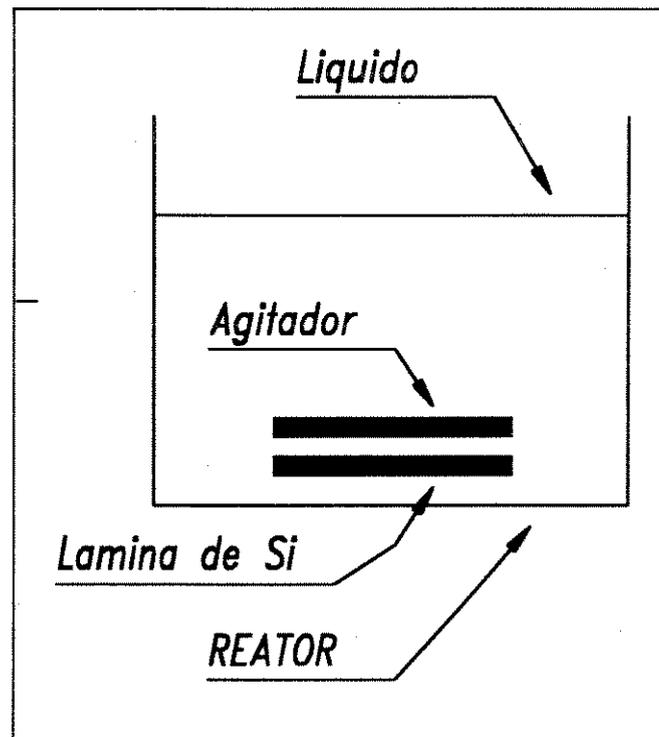


Figura 4.22: Reator para afinamento de lâminas de silício.

Neste processo as lâminas foram postadas horizontalmente no fundo do béquer e diretamente sobre elas foi colocado o elemento agitador. O béquer foi colocado sobre o motor do agitador e a velocidade de agitação regulada até que o fluxo de solução provocado pela agitação removesse todas as bolhas da superfície da lâmina.

Num primeiro teste uma lâmina de $290\ \mu\text{m}$ de espessura foi afinada para $210\ \mu\text{m}$ nos primeiros 15 min., e para $140\ \mu\text{m}$ nos 15 min. subseqüentes.

Notou-se que a velocidade de agitação é um fator relevante na uniformidade do afinamento das lâminas. Quanto maior a velocidade, melhor a uniformidade.

Primeiro Ensaio do Processo LED.

Embora ainda não se tivesse resolvido o problema da proteção das espiras metálicas contra a corrosão anisotrópica, de vez que ainda não havia sido possível experimentar-se o uso de espiras de Au, resolveu-se ganhar tempo realizando-se todo o restante do processo enquanto se atacava este problema.

De um conjunto de oito lâminas de silício <100> de 2" de diâmetro e 300 μm de espessura submetidas ao afinamento para 120 μm e oxidadas, apenas três permaneceram inteiras até a etapa de abertura dos furos de alinhamento, devido à fragilidade das lâminas afinadas, à qual a equipe do laboratório não estava habituada. Uma das lâminas foi fotografada antes de se remover o óxido remanescente à corrosão. Fotografaram-se todos os furos de alinhamento pelas duas faces da lâmina. Tais fotos demonstram, pelo enrugamento observado no óxido remanescente no fundo dos furos, a existência de tensão mecânica nas lâminas.

Na **Figura 4.23** são mostradas as duas extremidades de um dos furos de alinhamento.

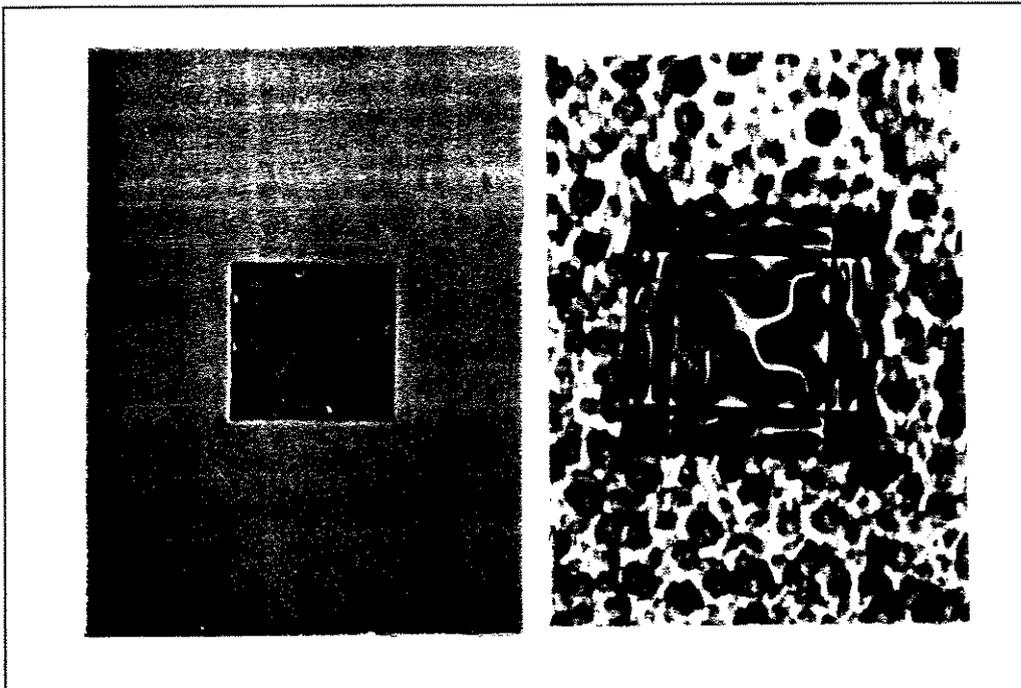


Figura 4.23: Furo de Alinhamento com aumento de 5X. À esquerda vê-se a face polida. À direita vê-se a face despolida. Note-se o enrugamento do óxido do fundo do furo, o que evidencia que a corrosão induziu tensão mecânica na lâmina

Após esta etapa o óxido remanescente foi removido das lâminas e elas foram reoxidadas para fazerem-se as máscaras de difusão.

Após a difusão de Boro as lâminas fraturaram-se espontaneamente quando deixadas em repouso num béquer com água deionizada à temperatura ambiente.

Supôs-se que a corrosão anisotrópica tivesse produzido um nível de tensão mecânica tal que, somada às tensões provocadas pelos processos posteriores, as fêz fraturar, o que foi confirmado posteriormente pela análise por difração de raios X.

Na **Figura 4.24** tem-se a foto de um caco das lâminas, onde é mostrada uma das difusões.



Figura 4.24: Difusão do "jumper" numa das lâminas processadas pelo processo LED.

Deve-se ressaltar que as lâminas furadas apresentaram grande dificuldade de processamento no spinner, pois o fotoresiste entrava pelos furos e entupia o sistema de vácuo de fixação da lâmina ao suporte, impedindo o funcionamento do aparelho. Além disso, pelo fato das lâminas serem muito finas elas se tornavam muito flexíveis, e envergavam sob o vácuo de fixação, impedindo um perfeito escorrimento do fotoresist. Inúmeras tentativas foram necessárias para se conseguir executar a contento esta etapa do processo.

Concluiu-se pela inadequação do processo concebido, alterando-o de maneira a que a corrosão anisotrópica que define as barras de torção fosse feita pela mesma face das bobinas, eliminando-se assim a necessidade dos furos de alinhamento. Teve-se apenas que refazer o projeto da máscara de corrosão das barras de torção de modo

que seu topo fosse suficientemente largo ($100\mu\text{m}$) para a passagem das trilhas dos "pads" (Figura 4.25).

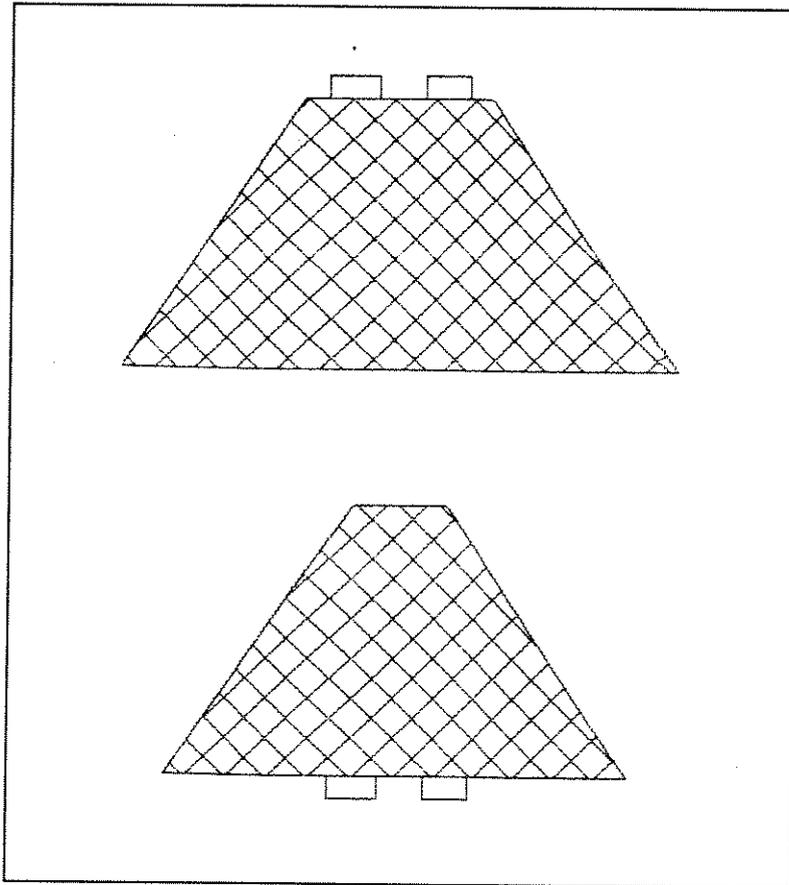


Figura 4.25: Acima o novo perfil das barras de torção, e abaixo o perfil antigo. Note-se que as trilhas que unem a bobina aos "pads" passaram para o tampo da barra de torção no novo perfil.

Nesse meio-tempo todos os processos do LED pararam de funcionar, a menos da parte de fotolitografia, sendo-se obrigado a tentar fazer o dispositivo utilizando-se as facilidades de confecção de filmes finos por "sputtering" no IFGW e o processo de fotolitografia do LED. À nova seqüência de fabricação, adequada aos processos então disponíveis denominou-se Processo LMD1, que será apresentada logo após o próximo item, em que se recordarão alguns conceitos relativos à tensão mecânica em filmes finos, que são necessários para a compreensão dos problemas havidos nos processos de corrosão de lâminas de Si.

O Processo LMD1.

Imaginou-se um processo em que se substituiria a difusão, que forma o "jumper", por uma segunda camada metálica, sob a bobina, depositada por "sputtering", e isolada da desta por um filme de Si_3N_4 também depositado^[129] por "sputtering".

O Si_3N_4 tem a vantagem sobre o SiO_2 de ser inerte ao ataque por KOH ^[93], e com isto poder ser usado para proteger a bobina metálica na etapa de corrosão anisotrópica.

A abertura de janelas nos filmes de Si_3N_4 seria feita no Laboratório de Pesquisas em Dispositivos - LPD/IFGW, através de corrosão por plasma^[127].

O novo processo de fabricação seria composto das etapas descritas a seguir:

Sequência de Fabricação do Microscanner de Barras de Torção - Processo LMD1.

1. Limpeza do substrato de silício.
2. Sputtering de filme de ouro na face polida.
3. Fotolitografia do "jumper" no filme de ouro (nível 1 de metal).
4. Sputtering de filme de Si_3N_4 na face polida (nível 1 de isolante).
5. Abertura de janelas de contato sobre o "jumper".
6. Sputtering de outro filme de ouro na face polida (nível 2 de metal).
7. Fotogravação das bobinas, e espelho no segundo filme de ouro.

8. Sputtering de outro filme de Si_3N_4 na face polida (nível 2 de isolante).
9. Abertura das janelas de corrosão nos filmes de Si_3N_4 .
10. Corrosão anisotrópica.
11. Remoção do Si_3N_4 exposto.
12. Encapsulamento.
13. Testes de integridade.
14. Caracterização.

A ilustração abaixo (Figura 4.26) representa o processo de fabricação descrito:

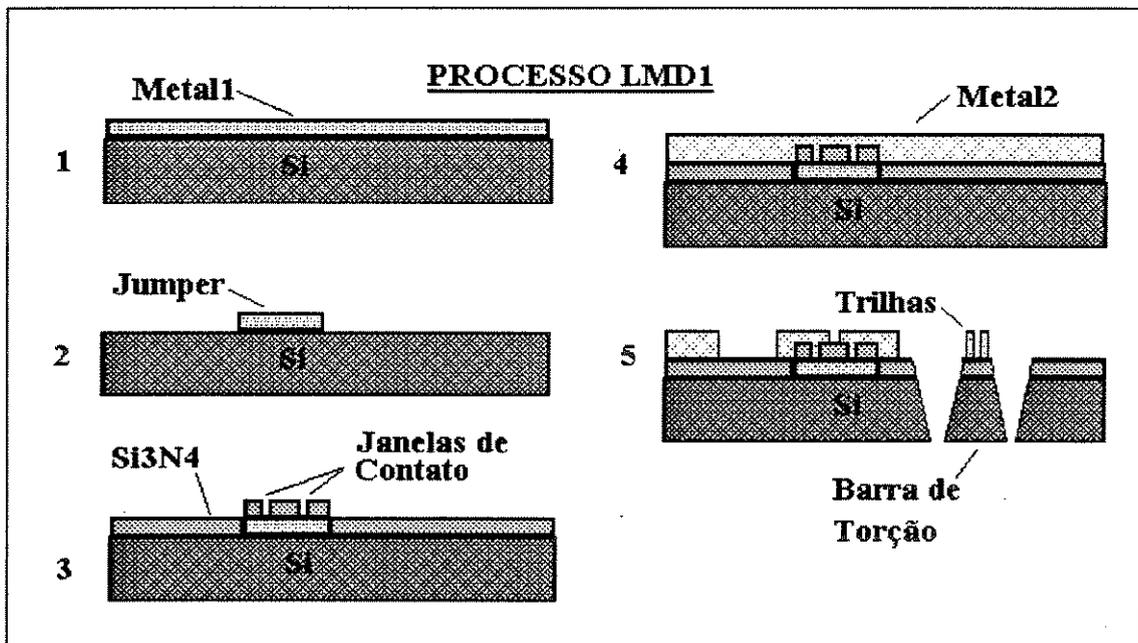


Figura 4.26: Ilustração do Processo LMD1: 1) Deposição do nível de metal número 1, 2) Microlitografia do "jumper" no metal número 1, 3) Deposição da camada isolante de Si_3N_4 e abertura de janelas de contato, 4) Deposição do nível de metal número 2, 5) Microlitografia do nível de metal número 2 (formando a bobina e o espelho) e corrosão anisotrópica, formando as barras de torção, a moldura e a base móvel.

Caracterizou-se a deposição de Au e de Si_3N_4 na máquina de sputtering disponível, que era a do Laboratório de Propriedades Magnéticas/IFGW, e iniciaram-se os testes da nova seqüência de fabricação.

Primeiramente tentou-se fazer o "jumper" da bobina. Empregou-se Au ao invés de Al, pois o Au tem melhores propriedades elétricas. Constatou-se um grave problema de aderência do filme de Au ao substrato de Si, que não se resolveu mesmo após diversos tratamentos térmicos diferentes, seja em fornos comuns seja em forno de recozimento rápido. Após os tratamentos térmicos os filmes de Au ou apresentavam-se quase que soltos do substrato, tamanha era a falta de aderência, ou difundiam-se totalmente em algumas regiões apenas, enquanto que em outras regiões permaneciam soltos.

Uma lâmina de Au/Si sem tratamento térmico foi submetida ao ataque por KOH a 78°C, e teve o filme de Au solto do substrato após 20 segundos de ataque.

Depositou-se um filme de Au de 0,1 μm sobre um substrato de silício, e realizou-se a litografia do "jumper" no Au. Sobre a lâmina com os "jumpers" de Au depositou-se um filme de Si_3N_4 , e abriu-se, através do processo de "plasma etch" do LPD/IFGW, as janelas de contato sobre o "jumper" (Figura 4.27).



Figura 4.27: Amostra de $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Au}/\text{Si}$, com o "jumper" de Au recoberto com Si_3N_4 e com as janelas de contato abertas no filme de Si_3N_4 .

Como se pode notar pela foto, o "jumper" de Au apresenta várias trincas devidas à sua má aderência ao substrato, que faz com que as tensões internas do material, mesmo que relativamente pequenas, lhe induzam trincas e dobras.

Concluiu-se que não haveria condições para se executar o processo de fabricação do microscanner na UNICAMP. Resolveu-se tentar o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da TELEBRÁS (CPqD), onde havia um processo de fabricação de microcircuitos em operação. Após um primeiro contato com o Departamento de Tecnologias Básicas do CPqD, onde foi avaliada a viabilidade técnica do trabalho, fez-se um pedido oficial de colaboração, o qual foi aprovado pela direção daquela empresa estatal e os trabalhos foram iniciados, tendo-se que mais uma vez repensar toda a seqüência de fabricação do microscanner em face da mudança de processos disponíveis, concebendo-se então o Processo CPqD1, descrito a seguir.

O Processo CPqD1.

A fabricação do microscanner no CPqD seria feita utilizando-se os processos de deposição de filmes finos por "sputtering"^[129], corrosão por plasma^[127], e fotolitografia disponíveis na Seção de Dispositivos de Alta Velocidade do CPqD. Decidiu-se que as trilhas metálicas seriam feitas de filmes de Au com uma camada de aderência de WTi (Wolfranato de Titânio), a qual faria com que não houvesse problemas de aderência do Au aos outros materiais, e tanto a isolamento entre os níveis metálicos quanto a máscara de corrosão anisotrópica seriam feitas de Si_3N_4 . A corrosão anisotrópica seria feita na UNICAMP, nas instalações do IFGW, e as máscaras fotolitográficas do processo seriam fornecidas pela UNICAMP (as mesmas concebidas para o processo LED).

Embora as máscaras fossem as mesmas, as etapas do processo difeririam na medida em que a cada nível metálico do processo LMD1 corresponderiam três deposições de filmes metálicos, sendo duas camadas de aderência (de WTi) e uma camada de Au. As etapas do processo realizadas no CPqD foram as seguintes:

Sequência de Fabricação do Microscanner de Barras de Torção - Processo CPqD1.

1. Limpeza do substrato de silício.
2. Sputtering de filme de WTi de 400 Å (camada de aderência-metal1).
3. Sputtering de filme de Au de 1200 Å (camada de condução-metal1).
4. Sputtering de filme de WTi de 400 Å (camada de aderência-metal1).
5. Litografia dos filmes do metal1 conforme a máscara do jumper.
6. Sputtering de filme de Si_3N_4 de 900 Å (isolante 1).
7. Abertura de janelas de contato no isolante 1 (plasma etch).
8. Sputtering de filme de WTi de 400 Å (camada de aderência-metal2).
9. Sputtering de filme de Au de 1200 Å (camada de combinação-metal2).
10. Sputtering de filme de WTi de 400 Å (camada de aderência-metal2).
11. Litografia do metal2 conforme a máscara das bobinas.
12. Sputtering de filme de Si_3N_4 de 900 Å (isolante 2).
13. Litografia do isolante2 conforme a máscara de corrosão.

A ilustração abaixo (Figura 4.28) mostra as etapas do processo descrito:

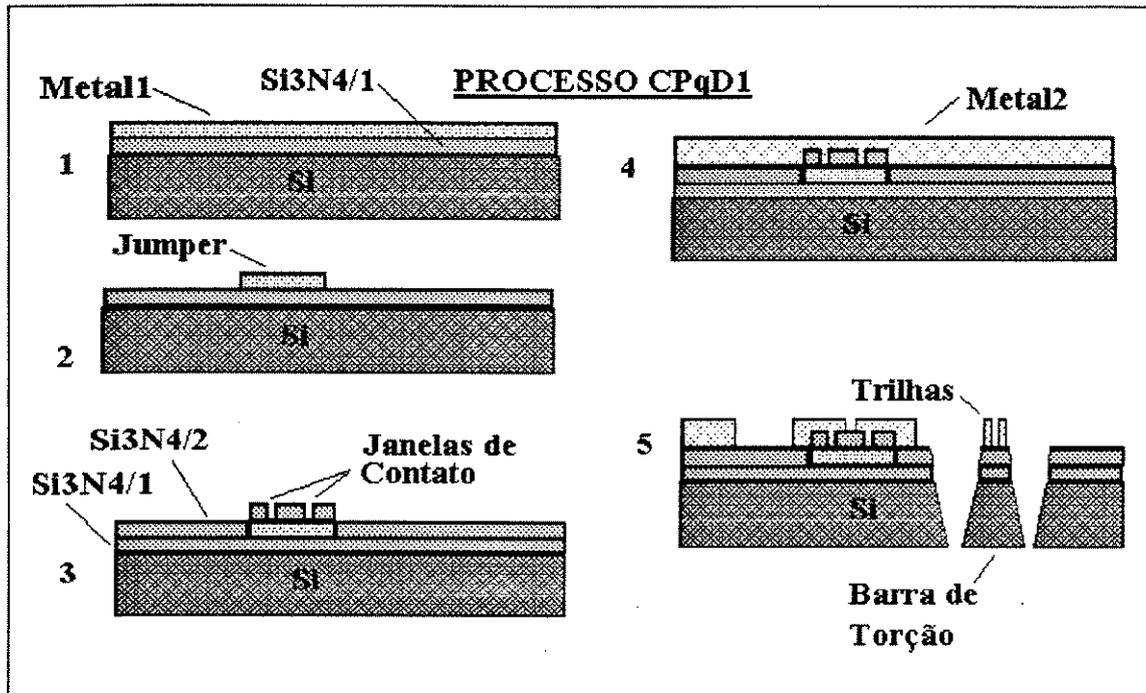


Figura 4.28: Ilustração do Processo CPqD1: 1) Disposição dos níveis 1 de Si₃N₄ e metal, 2) Microlitografia do "jumper" no metal 1, 3) Deposição do nível 2 de Si₃N₄ e abertura das janelas de contato, 4) Deposição do nível 2 de metal, 5) Microlitografia da bobina e do espelho no nível 2 de metal e corrosão anisotrópica, formando as barras de torção, a moldura e a base móvel.

Foram processadas 3 lâminas de Si <100> fornecidas pelo LMD e duas lâminas de Si <111> fornecidas pelo CPqD.

Testes de Corrosão das Lâminas do Processo CPqD1.

A corrosão das lâminas foi efetuada na capela química do LPD/IFGW/UNICAMP, com o seguinte procedimento:

1. Limpeza de vidraria.
2. Limpeza da lâmina em acetona fervente: 2 x 5 min.
3. Lavagem da lâmina em água DI.
4. Enxagüe da lâmina em HF a 5% durante 20 seg.
5. Enxagüe da lâmina em água DI.
6. Corrosão da lâmina em KOH.

A lâmina foi colocada num béquer de 250 ml, contendo 200 ml de solução de KOH : IPA : H₂O nas proporções 5 : 4 : 16 em massa, à temperatura inicial de 72 °C.

O béquer foi tampado com uma placa de Petri e teve um termômetro inserido lateralmente até a solução, a fim de se monitorar a temperatura. Após duas horas foi terminada a corrosão da amostra.

A máscara de corrosão, feita de Si₃N₄, rompeu-se em inúmeros pontos, inutilizando os dispositivos, conforme pode ser visto na foto da **Figura 4.29**. Supôs-se que poderia ter havido influência da alteração da composição do corrosivo causada por evaporação durante o processo. Resolveu-se construir um reator especial para a corrosão, que fizesse a recirculação do vapor, e assim eliminasse esta possível fonte do problema, pois Bean^[93] reporta que o Si₃N₄ é inerte ao ataque por KOH mesmo após 5 horas de ataque a 80°C. Somente depois se constatou que o problema era devido à indução de tensões mecânicas nos materiais pelo processo de corrosão.

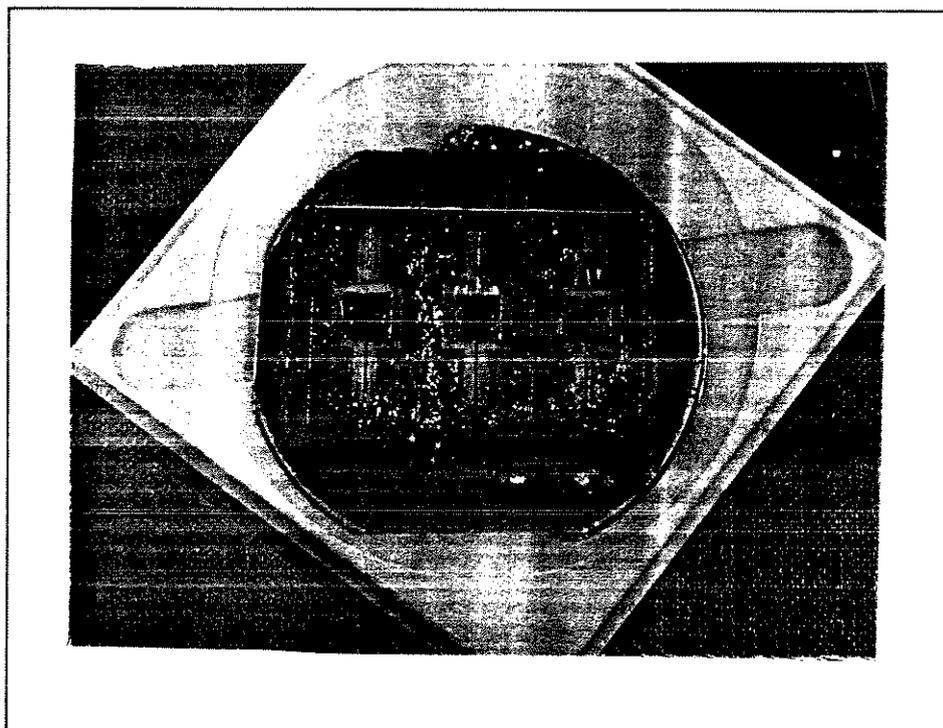


Figura 4.29: Primeira lâmina <100> do processo CPqD1 corroida em KOH.

O reator de corrosão utilizado doravante é mostrado na foto da **Figura 4.30**.

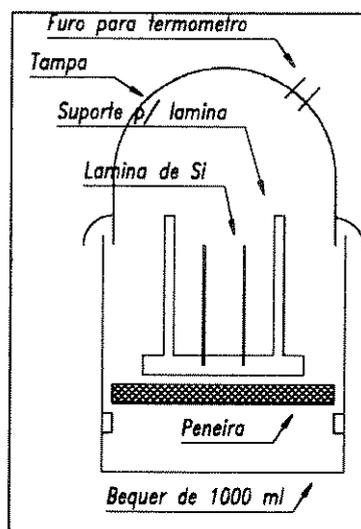


Figura 4.30: Reator de corrosão anisotrópica de Si por KOH com recirculação de vapor.

Foi então corroida uma segunda lâmina <100> processada no CPqD, empregando-se o reator repleto com 800 ml de solução de KOH, e utilizando-se todos os procedimentos de limpeza empregados na lâmina anterior.

O filme de Si_3N_x ficou muito enrugado (Figura 4.31). Supôs-se que pudesse ter havido algum problema de estequiometria, que fez com que o filme fosse atacado pelo KOH. Seis amostras de Si_3N_x de estequiometrias diferentes, produzidas no CPqD, foram atacadas com KOH e o problema se repetiu igualmente em todas, eliminando-se assim tal hipótese.

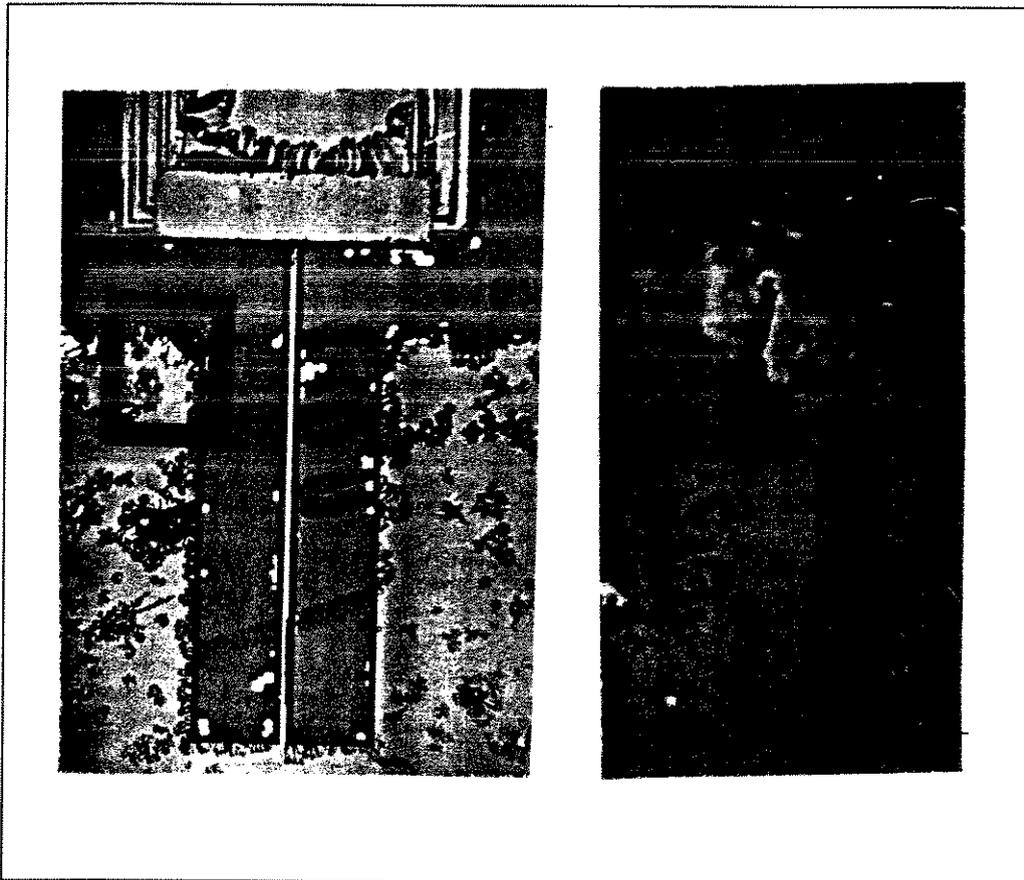


Figura 4.31: Lâmina corroida por KOH no reator. a) Dispositivo central da lâmina. b) Detalhe do dispositivo central. Nota-se o ataque ao filme de nitreto de silício, que se enrugua em alguns pontos e se rompe em outros, evidenciando estado de compressão mecânica.

Resolveu-se utilizar máscara de corrosão feita de Au/Cr, empregada por Lee e Wise na fabricação de um sensor de pressão capacitivo^[117]. Foram feitas quatro amostras de Au/Cr/ Si_3N_4 /Si, as quais foram litografadas segundo a máscara de

corrosão do microscanner. Tentou-se, paralelamente, no CPqD, efetuar a corrosão de uma lâmina de Si com plasma etch, mas a taxa de corrosão obtida foi muito baixa: apenas 9 $\mu\text{m/h}$ a 1000 W.

Feita a corrosão de uma das amostras com máscara de Au/Cr/Si₃N₄/Si em KOH, observou-se que, após 10 min. de ataque, apareceram trincas no filme de Au, as quais se expandiram lentamente durante toda a corrosão, que durou 4 horas, evidenciando tensão de tração na máscara.

Apesar das falhas da máscara de corrosão, as barras de torção se formaram razoavelmente bem na amostra, apresentando apenas pequenas falhas no seu tópo (**Figura 4.32**).

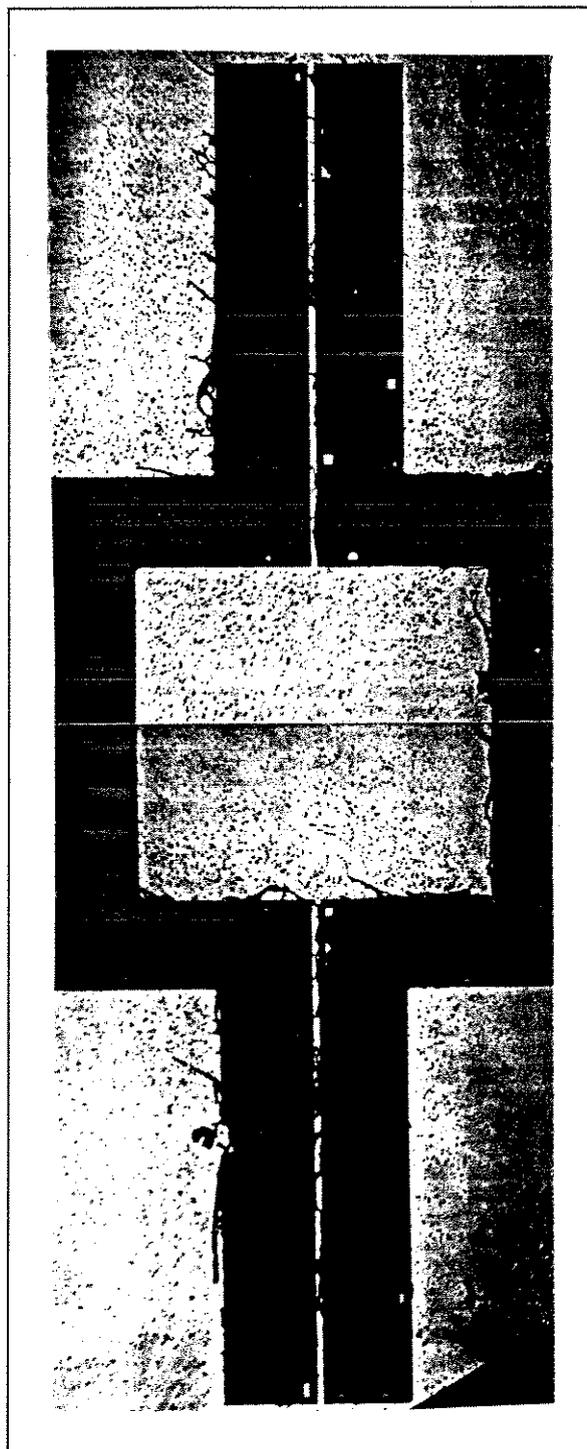


Figura 4.32: Amostra de Au/Cr/Si₃N₄/Si corroída por KOH. Apresentou pequenas trincas na máscara de corrosão.

Procedeu-se a exame da amostra em microscópio metalográfico, onde se observaram detalhes das falhas da máscara de corrosão de Au/Cr/Si₃N₄ (**Figura 4.33**) que evidenciam a má aderência do filme de Au ao filme de Cr nos pontos de falha. As áreas escuras da foto mostram o filme de Cr da camada de aderência, que ficou exposto ao ataque de KOH quando o filme de Au que o recobria soltou-se durante o processo. Pode-se ver que o filme de Cr apresenta depressões provocadas pelo ataque por KOH. As regiões claras à direita e abaixo na foto são pedaços intactos do filme de Au.



Figura 4.33: Detalhe de falha da máscara de Au/Cr/Si₃N₄ sobre uma barra de torção da amostra (aumento de 1000X). Nota-se o Cr exposto nas áreas escuras.

A análise da mesma amostra por microsonda não foi conclusiva, mas o enrugamento sistemático dos filmes de Si₃N₄ submetidos ao ataque por KOH evidencia a indução de tensão de compressão no material, o que, segundo Wu e Rosler^[122], pode ser resolvido através de um tratamento térmico adequado.

Foram tomadas uma lâmina do processo CPqD1 (com máscara de corrosão de Si₃N₄) e uma amostra com máscara de Au/Cr/Si₃N₄/Si e recozidas a 400°C por 15 min. em fluxo de N₂. A primeira amostra apresentou trincas nas bordas e sobre o "jumper" dos microscanners (**Figura 4.34**), evidenciando que em tais regiões o filme de Si₃N₄ passou de um estado de compressão para um estado de tração mecânica.

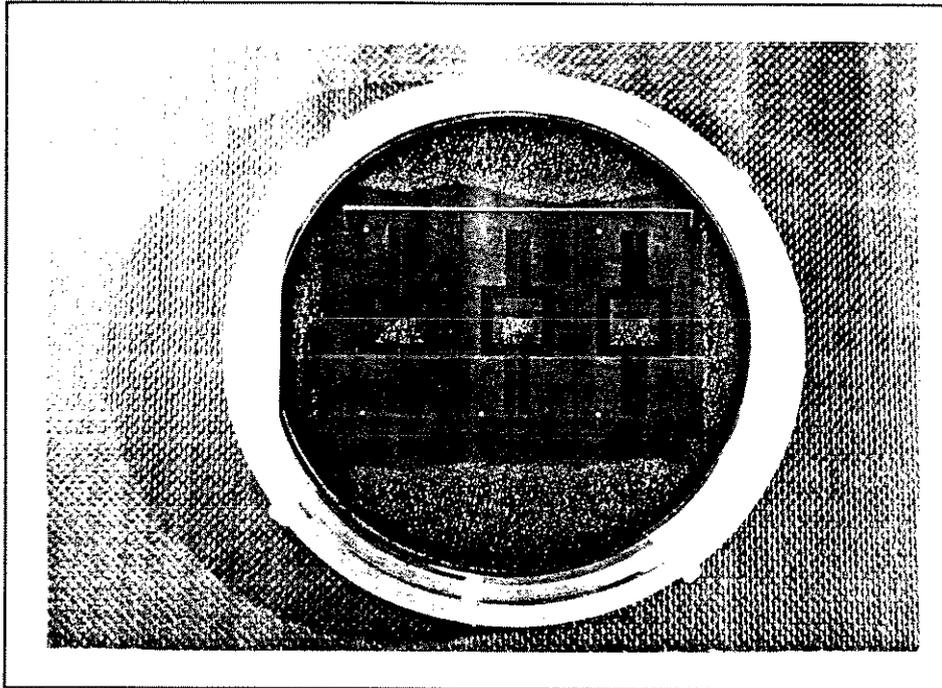


Figura 4.34: Amostra submetida ao processo completo do CPqD e submetida a recozimento. O filme de Si_3N_4 trincou onde passou ao estado de tração mecânica.

A segunda amostra (de $\text{Au/Cr/Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$) apresentou sensível mudança de coloração do filme de Au, evidenciando que houve interdifusão^[127] do filme de Au com o filme de Cr (**Figura 4.35**).

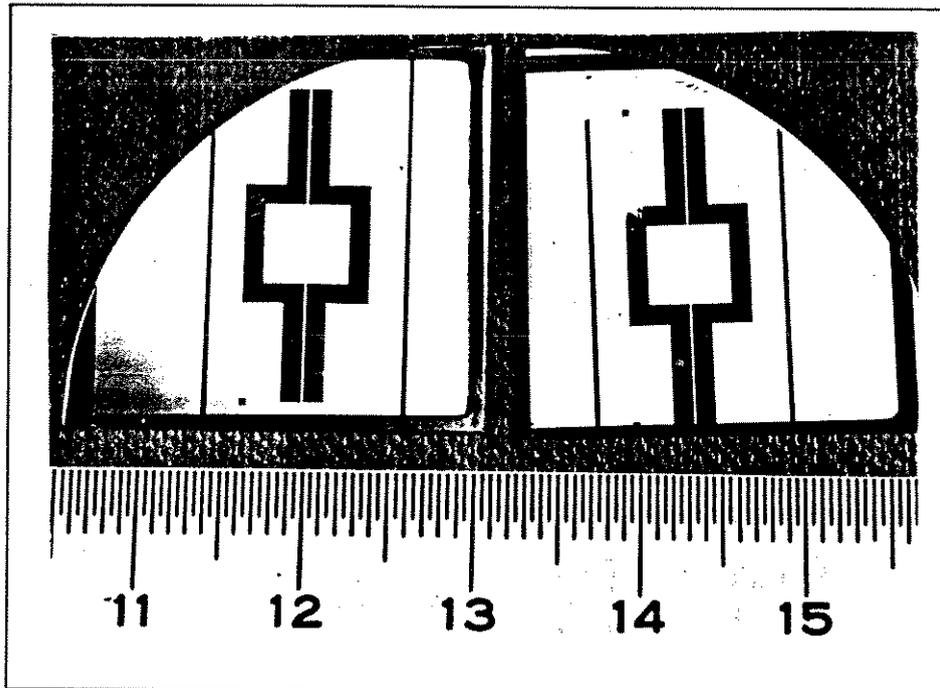


Figura 4.35: Amostras de Au/Cr/Si₃N₄/Si: à esquerda sem recozimento, e à direita com recozimento.

Submeteram-se as duas amostras simultaneamente à corrosão por KOH. A primeira amostra apresentou poucos problemas de fratura da máscara de Si₃N₄, ficando bem melhor que a amostra similar que não foi recozida (**Figura 4.36**). Isto evidencia que o filme de nitreto de silício sofre um acréscimo de tensão de compressão durante o processo de corrosão devido à absorção do hidrogênio^[122] resultante da reação^[94] do KOH com o silício. Ao ser feito o recozimento^[122], o filme teve sua tensão interna deslocada para a região de tração, o que fez com que, ao ser submetido à corrosão, o acréscimo de compressão induzido não fosse suficiente para que atingisse a tensão de ruptura. Daí a máscara de nitreto ter permanecido inteira nas regiões em que não foi fraturada pelo recozimento.

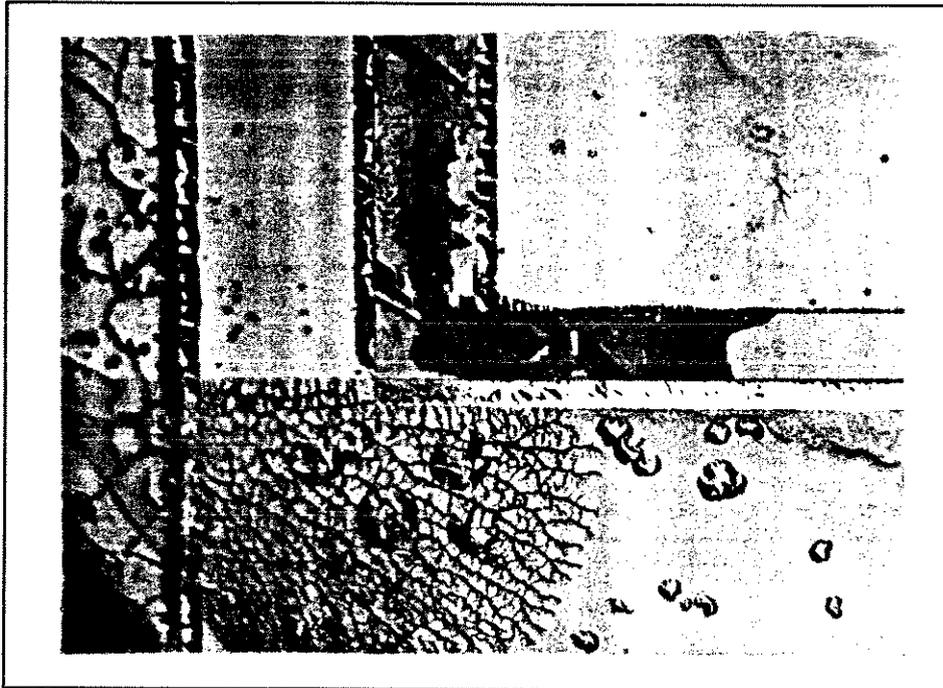


Figura 4.36: Amostra com máscara de Si_3N_4 recozida e atacada por KOH. A máscara ficou mais inerte ao ataque.

A amostra de $\text{Au/Cr/Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ ficou perfeita. Não houve qualquer dano da máscara de corrosão devida ao ataque por KOH (Figura 4.37), sejam trincas ou flambagens, evidenciando que o recozimento melhorou substancialmente sua aderência ao substrato.

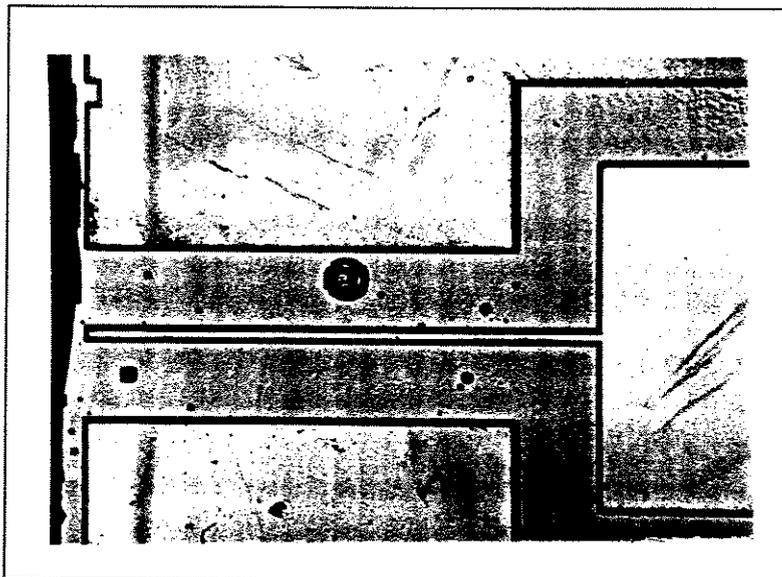


Figura 4.37: Amostra com máscara de $\text{Au/Cr/Si}_3\text{N}_4$ atacada por KOH. Ficou perfeita.

A análise dos difratogramas de raios X (**Figura 4.38**) de uma lâmina de Si mascarada com Au/Cr/Si₃N₄ e atacada por KOH, feitos respectivamente antes do ataque, após o ataque, e depois do ataque e de um tratamento térmico, evidencia a existência de tensões mecânicas de compressão no substrato de silício, as quais são aliviadas pelo tratamento térmico.

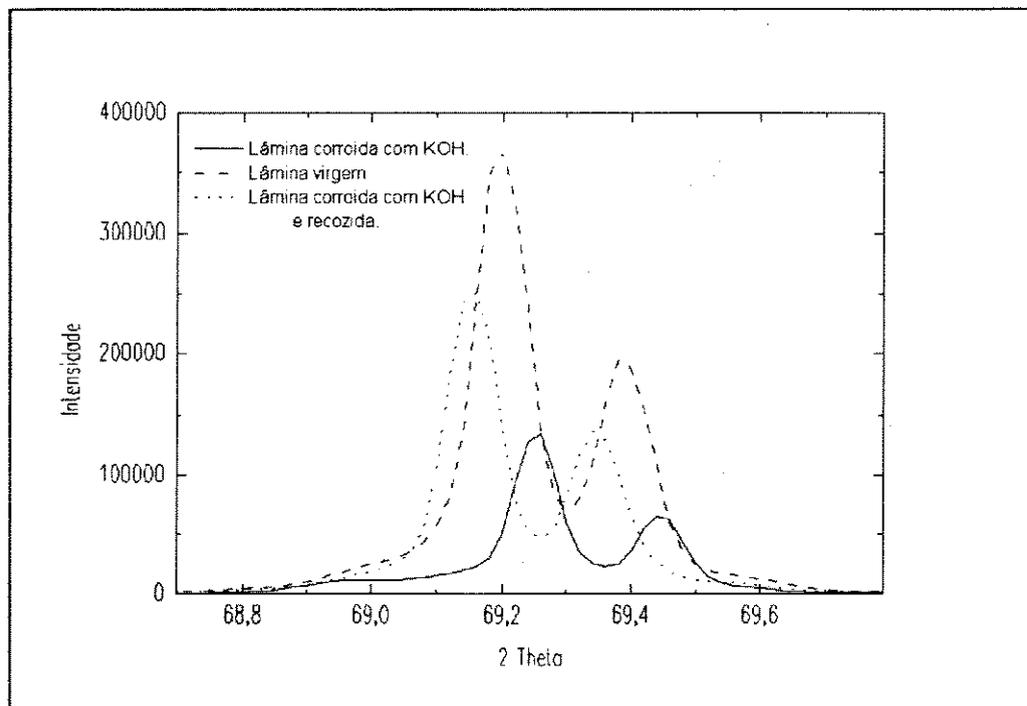


Figura 4.38: Difratogramas de raios X de uma lâmina de Si mascarada por Au/Cr/Si₃N₄ e atacada por KOH. Nota-se que o ataque por KOH aumenta a compressão do substrato (desvio do pico para a direita, que significa diminuição do parâmetro de rede), e que o tratamento térmico (recozimento) alivia a compressão (desvio do pico para a esquerda, que significa aumento do parâmetro de rede), levando-a a um nível menor que o da lâmina virgem.

O único problema encontrado quanto ao uso da máscara de Au/Cr/Si₃N₄ foi o fato de não se conseguir remover a liga de Cr-Au formada pelo recozimento. Em função disto resolveu-se tentar o uso de máscara de Au/WTi/Si₃N₄, que não apresentaria tal problema por não haver interdifusão entre os metais na temperatura de recozimento utilizada. Feitas as amostras e efetuado o ataque por KOH constatou-se a presença de inúmeros buracos na máscara de corrosão após o ataque, devidos a "pin-holes" nos filmes (**Figura 4.39**), o que fez com que se preferisse não utilizá-la, de vez que não era conhecida a causa dos "pin-holes", e descobri-la poderia demandar um tempo excessivo.

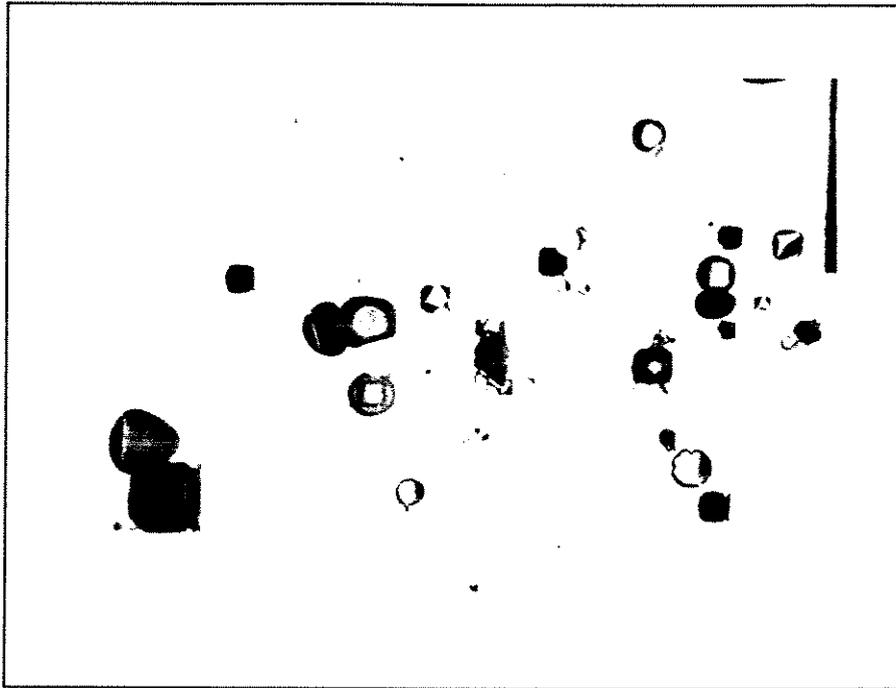


Figura 4.39: Amostra com máscara de corrosão de Au/WTi/Si₃N₄ atacada por KOH. Vêm-se os buracos causados por "pin-holes".

Em função de não se ter conseguido remover a liga de Cr-Au das amostras após sua formação por recozimento, teve-se que reformular a seqüência de fabricação dos dispositivos, de maneira que sua fabricação fosse possível. O novo processo de fabricação foi denominado de CPqD2, e é descrito a seguir.

O Processo CPqD2.

Aproveitando-se parte das fotomáscaras do processo anterior, (eliminando-se a do "jumper") refez-se a seqüência de fabricação do microscanner para a utilização da liga Cr-Au tanto para a confecção das bobinas quanto para o mascaramento da corrosão do silício por KOH, respeitando-se o fato de não se ter conseguido remover a liga Cr-Au formada na etapa de recozimento.

Sequência de Fabricação do Microscanner de Barras de Torção - Processo CPqD2.

1. Limpeza do substrato de Si (lâminas <100> de 2" de diâmetro e 300 μm de espessura).
2. Sputtering de filme de Si_3N_4 de 900 Å.
3. Sputtering de filme de Cr de 300 Å.
4. Sputtering de filme de Au de 1200 Å.
5. Sputtering de filme de Cr de 300 Å.
6. Sputtering de filme de Si_3N_4 de 900 Å.
7. Abertura de janelas de contato nos filmes dos passos 5 e 6.
8. Sputtering de filme de Cr de 300 Å.
9. Sputtering de filme de Au de 1200 Å.
10. Fotogravação de bobinas nos filmes dos passos 5,6,8 e 9.
11. Abertura das janelas de corrosão nos filmes dos passos 2,3 e 4.
12. Recozimento.
13. Corrosão anisotrópica por KOH.

A ilustração abaixo (Figura 4.40) mostra o processo descrito:

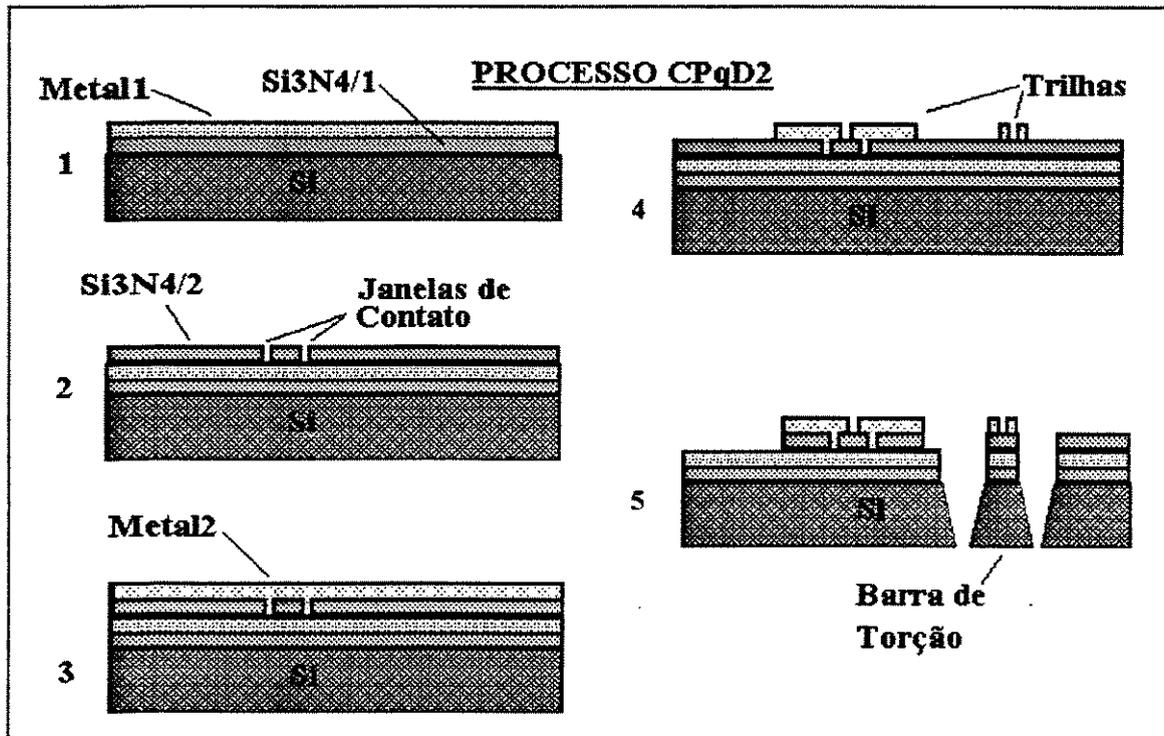


Figura 4.40: Ilustração do Processo CPqD2: 1) Deposição dos níveis número 1 de Si_3N_4 e metal, 2) Deposição do nível 2 de Si_3N_4 e abertura das janelas de contato, 3) Deposição do nível 2 de metal, 4) Microlitografia da bobina e do espelho no metal número 2, 5) Abertura das janelas de corrosão no metal número 1 e corrosão anisotrópica, formando as barras de torção, a moldura e a plataforma móvel.

O primeiro nível metálico serve simultaneamente tanto como "jumper" da bobina quanto como máscara para a corrosão por KOH. O segundo nível metálico serve para a feitura dos espelhos, bobinas e "pads", que posteriormente ficam expostos ao ataque por KOH. Os níveis metálicos ficam isolados por um filme de Si_3N_4 , que fica protegido do ataque por KOH pelos níveis metálicos que os recobrem (ligas de Cr-Au).

Dispositivos Fabricados Segundo o Processo CPqD2

Foram processadas seis lâminas por este processo.

A primeira lâmina submetida a corrosão anisotrópica resultou em dispositivos perfeitamente delineados, mas teve seus dispositivos quebrados durante o transporte dentro do laboratório: uma lufada de ar jogou-os ao chão. Isto demandou novos procedimentos de manuseio das peças corroidas.

A lâmina seguinte também resultou em dispositivos perfeitamente delineados, mas ao se tentar fazer a solda dos fios nos "pads" a solda não aderiu ao filme metálico. A liga de Cr-Au formada pelo recozimento a que a lâmina foi submetida antes da corrosão não permitiu a solda dos fios de Au.

O problema da solda dos fios foi contornado fazendo-se a solda antes do recozimento da lâmina. Tal procedimento resultou num benefício adicional para o processo de fabricação: soldando-se fios entre os dispositivos e a borda da lâmina, ao terminar a corrosão os dispositivos não ficaram soltos dentro do reator, permanecendo presos à lâmina pelos fios. Isto diminuiu enormemente os riscos de fratura dos dispositivos na hora de retirá-los do reator.

No entanto, ao fazer-se a caracterização dos dispositivos assim fabricados (**Figura 4.41**), descobriu-se que os dois níveis metálicos estavam completamente em curto-circuito.

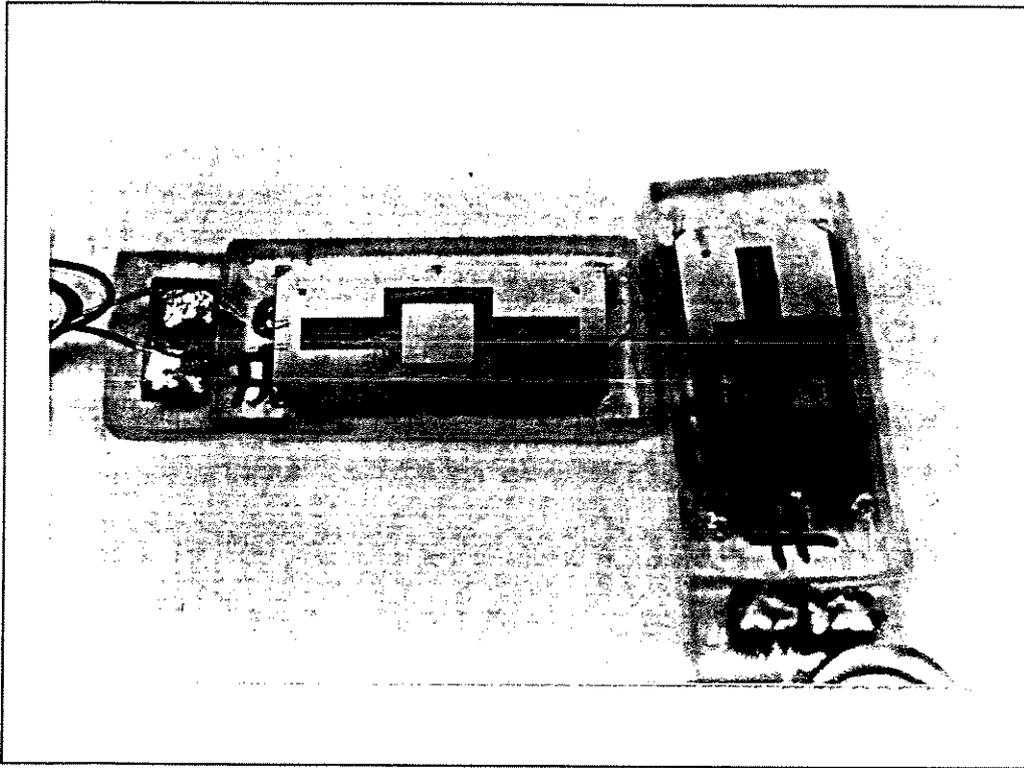


Figura 4.41: Dispositivos fabricados pelo processo CPqD2. Ficaram com os níveis metálicos em curto-circuito.

A análise dos filmes depositados, removendo-os um-a-um, não evidenciou qualquer problema. Supôs-se que o filme de Cr abaixo do segundo filme de Si_3N_4 tenha ficado muito irregular, com muitas protuberâncias, as quais atravessaram o filme de Si_3N_4 e curto-circuitaram os dois níveis metálicos, inutilizando assim todas as lâminas do lote.

Nesse ínterim a máquina de sputtering RF do CPqD foi desmontada para mudança de lugar, e o prazo de 40 dias inicialmente previsto estendeu-se por mais de quatro meses, após os quais não havia ainda previsão de reinício de operação do equipamento. Assim sendo, resolveu-se conceber uma nova seqüência de fabricação e uma nova geometria de dispositivo que possibilitasse sua realização na própria UNICAMP, batizando-a de Processo LMD2.

O Processo LMD2.

O principal problema de implementação do microscanner no IFGW/ UNICAMP foi a ausência de salas limpas para o processamento das lâminas de silício. Para solucionar esse problema reformulou-se tanto a geometria do dispositivo quanto a seqüência de fabricação.

O processo de fabricação adotado foi o seguinte:

1. Oxidação úmida das lâminas de silício - óxido de 9.000 Å.
2. Abertura de janelas de corrosão anisotrópica no óxido.
3. Fotogravação da bobina e do espelho em fotoresist.
4. Evaporação de filme de cromo de 200 Å.
5. Evaporação de filme de ouro de 2500 Å.
6. Lift-off do nível de metal.
7. Recozimento do metal.
8. Corrosão anisotrópica em KOH.
9. Encapsulamento.
10. Caracterização.

A ilustração abaixo (Figura 4.42) mostra o processo descrito:

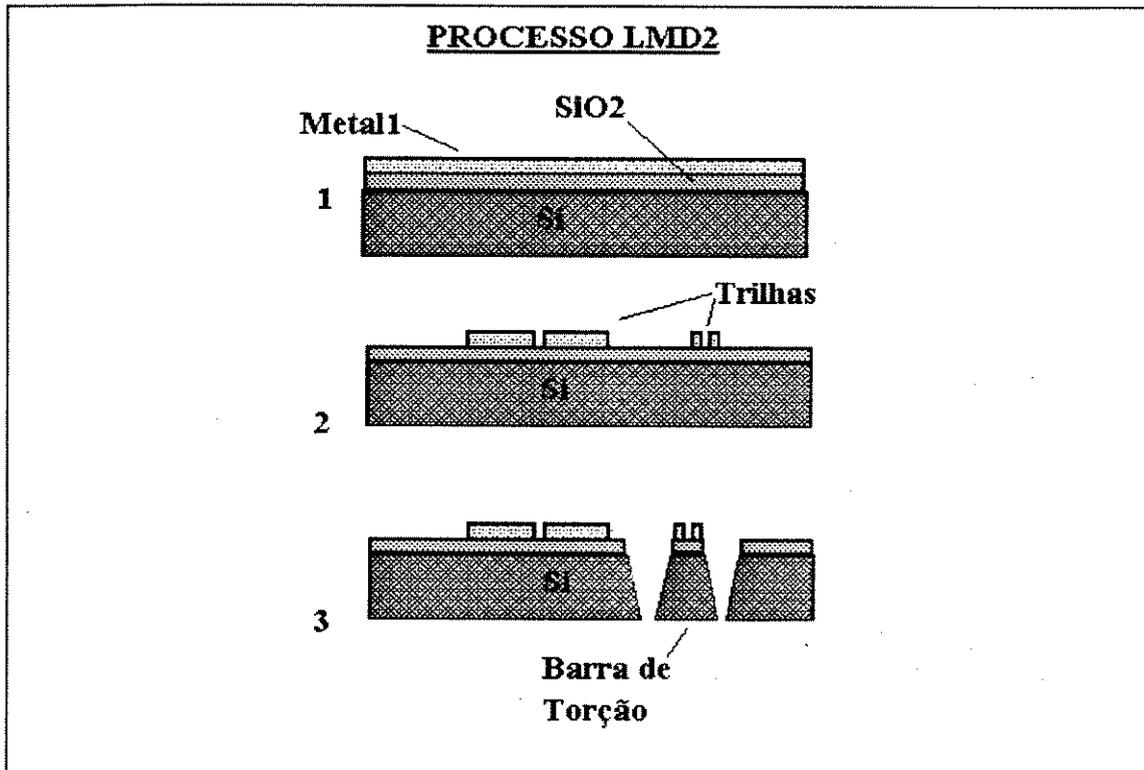


Figura 4.42: Ilustração do Processo LMD2: 1) Deposição do nível de metal, 2) Microlitografia das trilhas e do espelho no nível de metal, 3) Abertura das janelas de corrosão e corrosão anisotrópica, formando as barras de torção, a moldura e a plataforma móvel.

Nova Geometria do Microscanner de Barras de Torção

Na nova geometria do dispositivo, tendo em vista relaxarem-se as condições de limpeza na fabricação, aumentaram-se as dimensões mais críticas, eram as das barras de torção e as das trilhas metálicas da bobina defletora. Aumentou-se a largura do tampo das barras de torção de $100\ \mu\text{m}$ para $500\ \mu\text{m}$ (Figura 4.43).

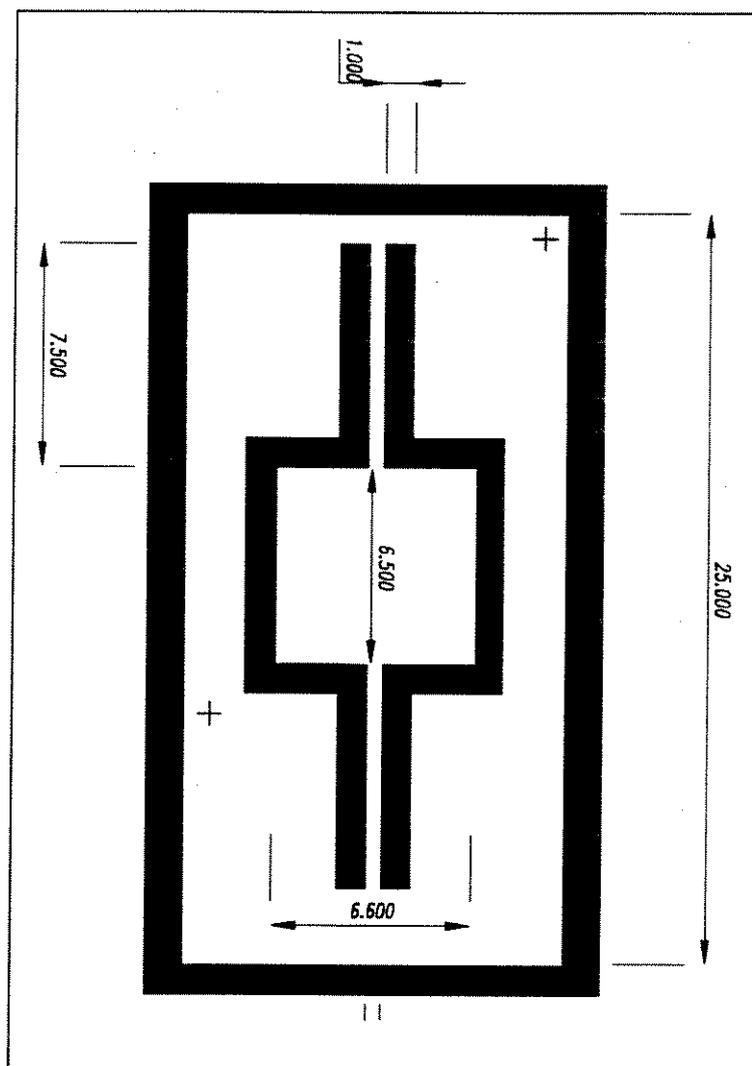


Figura 4.43: Janelas de corrosão no óxido de silício.

Aumentou-se ainda a largura das trilhas que passam por cima da barra de torção de $20\ \mu\text{m}$ para $100\ \mu\text{m}$, a das trilhas da bobina que contornam o espelho de $20\ \mu\text{m}$

para 500 μm de largura, e ainda reduziu-se o número de espiras da bobina defletora de 20 para apenas uma, com o que eliminou-se a necessidade do nível de "jumper" (Figura 4.44).

Como consequência, todos os cálculos de dimensionamento em função do desempenho desejado, realizados no capítulo anterior, foram desprezados, pois a prioridade passou a ser a exequibilidade do protótipo do dispositivo, deixando-se as considerações de desempenho para uma etapa posterior, pois o prazo para a conclusão da tese aproximava-se do seu limite.

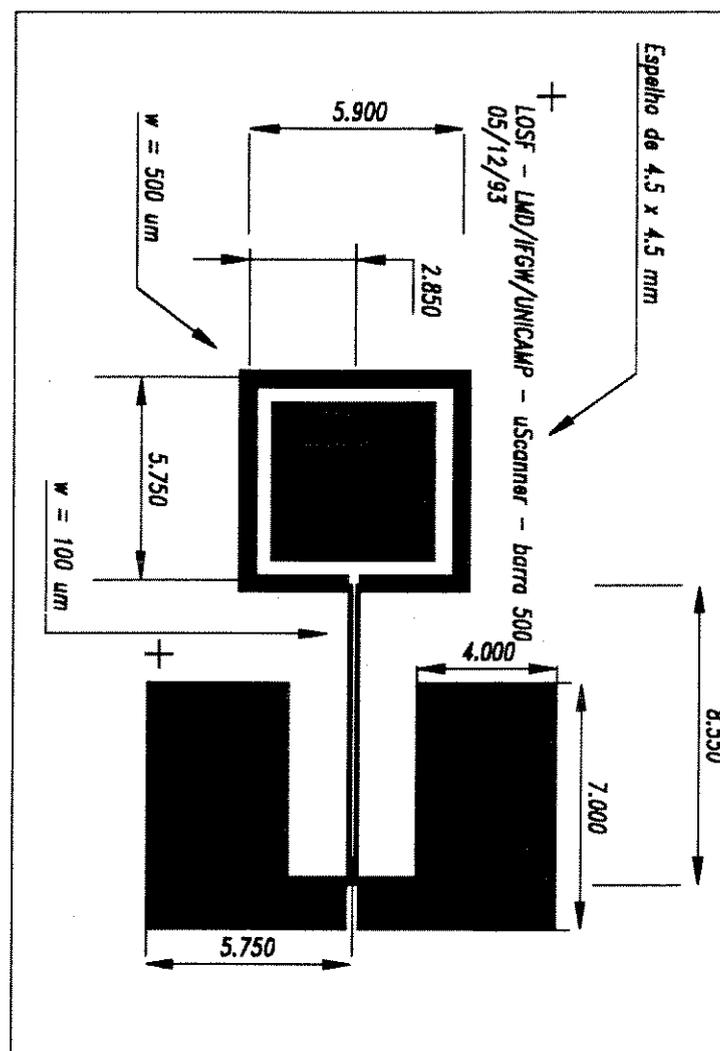


Figura 4.44: Nível metálico: pads, bobina e espelho.

Com tal geometria foi possível, a partir dos originais impressos em papel vegetal numa impressora a laser, fazerem-se as fotomáscaras de fotolito.

Dispositivos Fabricados Segundo o Processo LMD2

Realizou-se uma tentativa de oxidarem-se lâminas de Si no IFGW, mas os filmes de SiO_2 obtidos apresentaram muitos "pin-holes" devido a condições de limpeza inadequadas da sala de fornos disponível. Adquiriram-se então lâminas de Si já oxidadas, com filme de 9.000 Å de espessura, as quais foram utilizadas para as etapas seguintes do processo.

Na segunda etapa de fabricação (abertura de janelas do SiO_2) a máscara de fotoresist soltava-se ao se tentar abrir janelas no SiO_2 via ataque com HF. Tal problema foi contornado com a execução de uma máscara de Al, depositado por evaporação e litografado por "lift-off", para se fazer a abertura das janelas no SiO_2 por ataque a plasma.

Em seguida depositaram-se os filmes de Cr e Au, os quais foram litografados também por "lift-off"

Na **Figura 4.45** é mostrado o dispositivo após o processo de corrosão anisotrópica e encapsulamento.

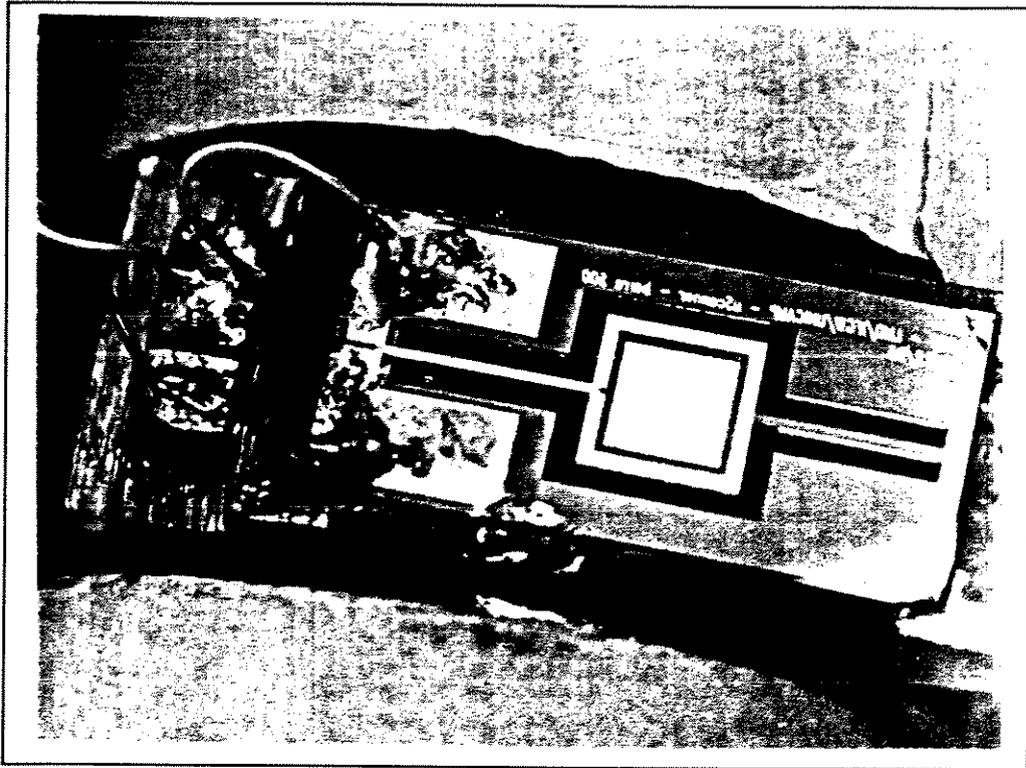


Figura 4.45: Microscanner LMD2 completo e encapsulado, posicionado do entreferro do eletroímã do banco de testes.

Caracterização do Microscanner de Silício de Barras de Torção.

A principal característica do dispositivo é a sua resposta em frequência, que foi levantada excitando-o com uma tensão senoidal e observando-se o desvio provocado pelo dispositivo num feixe de raios laser refletido pelo seu espelho e incidente num anteparo graduado em milímetros.

Antes de medir-se a resposta em frequência foi medida a resistência elétrica da bobina, igual a 500Ω .

Com uma resistência tão elevada, a corrente de excitação da bobina defletora ficou limitada pela capacidade de dissipação de potência do dispositivo e pela tensão da fonte de excitação. Com a fonte senoidal disponível foi possível fornecerem-se $11,6 V_{pp}$ ao dispositivo (à corrente de $23,2 \text{ mA}$), variando-se a frequência de 0 Hz a 3 kHz .

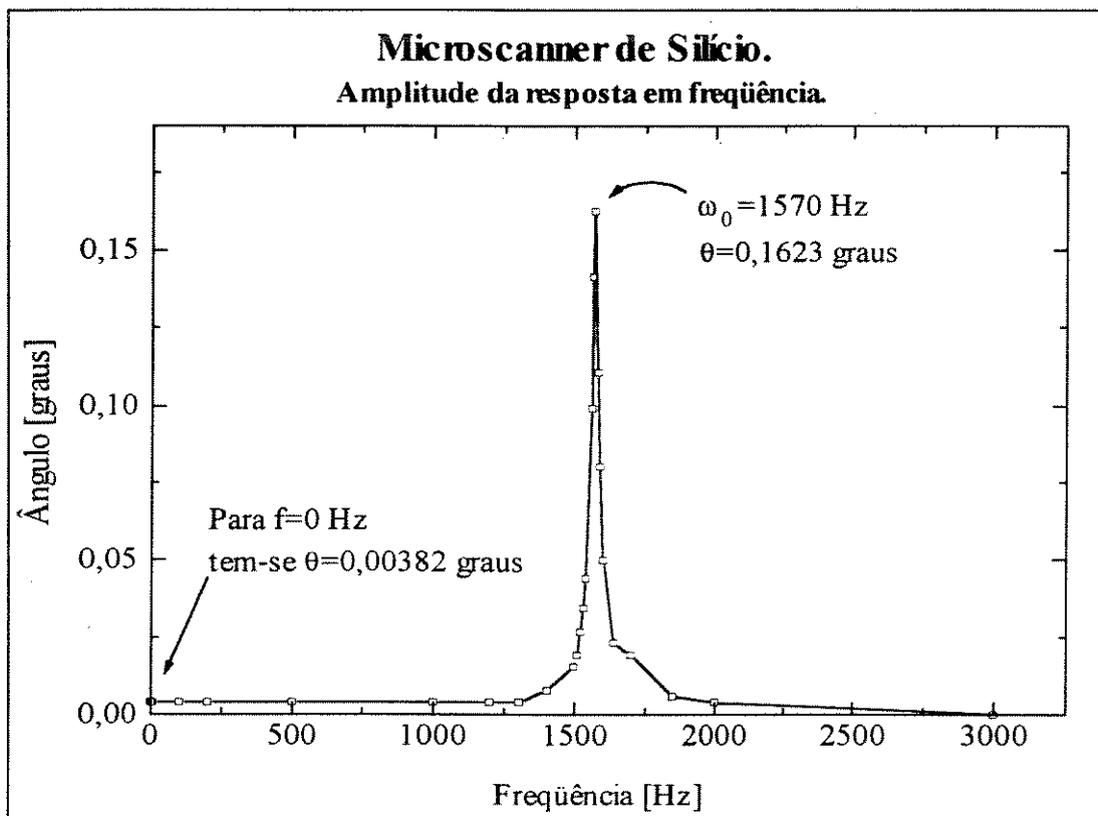


Figura 4.46: Resposta em Frequência do Microscanner fabricado pelo processo LMD2. Medidas com corrente de 23,2 mA.

A **Figura 4.46** mostra a amplitude da resposta em frequência obtida para um campo magnético externo de 3500 Gauss. Tal medida foi feita projetando-se o feixe de laser defletido num anteparo milimetrado colocado a 7 metros do microscanner.

Observa-se, no gráfico, que o dispositivo apresenta ângulo de deflexão de $0,16^\circ$ à frequência natural de ressonância de 1570 Hz, e evidencia boa seletividade de frequência.

Fez-se uma medida específica para zero Hz, com corrente de 44 mA, obtendo-se um ângulo no intervalo entre 5,7 e 9,5 miligráus (devido à imprecisão de medida).

Foi observada também uma deformação mecânica reversível no dispositivo, ao se aumentar a corrente de excitação para 44 mA. O calor dissipado deformou as barras de torção, provocando uma deflexão do feixe luminoso ortogonalmente ao eixo de giro do espelho. Entretanto, uma vez cessada a corrente excitadora o dispositivo retorna à sua condição anterior. Tal efeito pode ser utilizado em dispositivos microatuadores de silício excitados termicamente, conforme relatado por Riethmüller^[122].

Espessando-se as trilhas metálicas até $4,5 \mu\text{m}$, por eletrodeposição, baixou-se a resistência da bobina de 500Ω para 48Ω . Foi testada a aplicação de uma corrente elétrica de 250 mA , a qual resultou no aumento do ângulo de deflexão do laser, a 0 Hz , para algo em torno de 70 miligraus. A relação dos ângulos medidos (entre $7,9$ e $12,3$) não segue exatamente a relação das correntes medidas (igual a $5,7$), o que tanto pode ser devido à imprecisão das medidas quanto a não-linearidades do dispositivo. Durante esse teste manifestou-se novamente a deformação térmica reversível. A aplicação continuada de picos de corrente fez com que a bobina defletora se rompesse, inutilizando o dispositivo.

Observou-se um variação aparentemente linear do ângulo de deflexão com o campo magnético externo, mas não foi possível realizarem-se medidas precisas a esse respeito.

Outra observação importante foi a divergência do feixe de laser provocada pelo espelho, que pode ser causada tanto por uma deformação do espelho por tensão mecânica interna ao substrato e/ou tensão mecânica nos filmes finos de SiO_2 , Au e Cr . Isto, no entanto, não prejudica o desempenho do dispositivo, pois tal divergência pode ser compensada no sistema de lentes colimadoras.

Quanto à durabilidade do dispositivo, foi possível observá-lo funcionando apenas durante 3 horas descontínuas. Não foi observada qualquer degradação do seu funcionamento nesse período.

Os resultados obtidos demonstram a exequibilidade do dispositivo segundo o princípio de funcionamento proposto, e abrem caminho para a otimização do seu funcionamento, não se apresentando qualquer questão de princípio que impeça se alcancem as marcas de desempenho especificadas inicialmente.

No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões deste trabalho de tese.

CAPÍTULO 5

Discussão.

Neste capítulo serão analisados os principais resultados obtidos, apresentadas conclusões, e apontados rumos para o aprimoramento e continuação desta linha de pesquisa.

Análise dos Resultados

Os resultados obtidos podem ser divididos em dois grupos: dispositivos e processos de fabricação.

Obtiveram-se dois tipos de dispositivos defletores de luz galvanométricos planares de silício: um com suspensão por fio e o outro monolítico com suspensão por barras de torção. A diferença essencial entre eles está no tipo de suspensão do conjunto bobina-espelho. As diferentes características de cada tipo de suspensão foram as responsáveis pelas marcantes diferenças de desempenho apresentadas.

O de suspensão por fio apresentou ângulo de máximo de deflexão do espelho de $31,1^\circ$ à frequência de ressonância mecânica de 29,4 Hz, quando excitado com uma onda senoidal de $3,1 \text{ mA}_{pp}$ e submetido a um campo magnético externo de 1400 Gauss. Tal protótipo demonstrou a viabilidade da deflexão galvanométrica de um conjunto bobinas-espelho planar com as dimensões desejadas.

Pode-se dizer que os microscanners galvanométricos com suspensão por fio já seriam um avanço em relação aos tradicionais, pois seu tamanho compacto e sua baixa massa abrem perspectivas para bons desempenhos dinâmicos, ao passo que a microfabricação da parte móvel significa baixos custos de manufatura. A montagem dos fio de suspensão e alimentação das bobinas seria o elo em comum com os galvanômetros tradicionais. Ele apresentou pequena durabilidade (menor que 2 horas),

devido ao stress dos fios de alumínio de alimentação, mas este problema tem solução conhecida nos galvanômetros tradicionais, a qual poderá futuramente ser adotada no microscanner.

Apesar da geometria do microscanner de suspensão por barras de torção bem sucedido ter sido imposta pelas limitações das condições de fabricação, e não pelo dimensionamento feito a partir do desempenho desejado, ele funcionou satisfatoriamente, demonstrado a viabilidade da proposta de um microscanner galvanométrico monolítico de silício. Foram utilizados corrosão anisotrópica de silício por KOH com máscara de corrosão de SiO_2 , e trilhas metálicas e espelho de Au/Cr, os quais mantiveram sua integridade mesmo expostos ao ataque por KOH. O microscanner de barras de torção apresentou ângulo de deflexão do espelho de $0,16^\circ$ à frequência natural de ressonância mecânica de 1.570 Hz, quando excitado por uma corrente senoidal de $23,2 \text{ mA}_{pp}$ e por um campo magnético externo de 3.500 Gauss. Reduzindo-se a resistência elétrica das trilhas de 500Ω para 48Ω obteve-se um aumento de 7,3 vezes no ângulo de deflexão, para um aumento de 5,7 vezes na corrente de excitação. Demonstrou razoável linearidade do ângulo de deflexão com a corrente de excitação e com o campo magnético externo. A deformação mecânica provocada pelo efeito Joule da corrente elétrica nas trilhas metálicas, que chega a provocar um desvio do feixe ortogonalmente ao eixo de deflexão, não se manifestou para níveis pequenos de corrente (20mA a 500Ω), e foi eliminado para correntes maiores (100mA a 48Ω) pelo espessamento das trilhas metálicas, quando então somente aumentando-se a corrente de excitação acima de 200 mA foi atingido um nível elevado de deformação mecânica.

Apresentou, ao contrário do de fio, pequeno ângulo de deflexão e elevada frequência de ressonância. No entanto tais resultados são compatíveis com a geometria da bobina defletora e das barras de torção utilizadas, e confirmam que se poderão atingir maiores ângulos de deflexão, com o mesmo campo magnético externo e com menores correntes de excitação, desde que se possa adotar uma bobina defletora com maior número de espiras e barras de torção mais estreitas e mais finas. Para isto é necessário que sua fabricação seja feita em condições mais controladas.

Sua durabilidade já superou o dispositivo de suspensão por fio, e não foi notado qualquer movimento espúrio de deflexão devido a desalinhamento ou desbalanceamento. Isto é uma enorme vantagem da microfabricação, que permite se façam dispositivos com tão elevada precisão dimensional que ficam perfeitamente

alinhados e balanceados, dispensando os demorados e dispendiosos processos de balanceamento e alinhamento dos dispositivos eletromecânicos tradicionais.

Deve-se ressaltar o caráter quase-linear da resposta do dispositivo com relação tanto à corrente de excitação quanto ao campo magnético externo, o que é uma nítida vantagem sobre os dispositivos congêneres defletidos eletrostaticamente, que são altamente não-lineares e instáveis.

A divergência apresentada pelo espelho do dispositivo de barras de torção deve-se a tensões mecânicas do substrato, o qual, em consequência, apresenta a curvatura responsável pela divergência do espelho. Tal divergência pode ser tanto corrigida pelo sistema óptico de focalização do feixe de luz defletido sobre o plano de trabalho, quanto pode ser minimizada ou eliminada com a redução das tensões mecânicas do dispositivo.

Pode-se afirmar que o microscanner de barras de torção, pelo seu conjunto de características, é o mais adequado para fabricação em larga escala.

Quanto aos processos de fabricação, desenvolveu-se um processo de afinamento químico de lâminas de silício, a fim de se obterem lâminas com a espessura desejada a partir das lâminas disponíveis (300 μ m), implantou-se um processo de corrosão anisotrópica de Si por KOH, usando-se máscaras de SiO₂, processo esse utilizado para a confecção do microscanner de barras de torção, e realizou-se difusão de boro em Si. Além disso, procedeu-se ao domínio dos processos de "sputtering" de filmes de Al, Au, e Si₃N₄ sobre substratos de Si, procedeu-se também a um teste bem-sucedido de abertura, por plasma, de janelas de contato em filme de Si₃N₄ depositado sobre filme de Au e substrato de Si, e enfrentou-se com sucesso o problema de alívio de tensões nas lâminas de Si antes se submetê-las à corrosão anisotrópica, o que resultou em máscaras que não se trincavam durante a corrosão, obtendo-se dispositivos perfeitamente esculpidos e com as bobinas e espelhos incólumes após a corrosão.

Deve-se ressaltar a necessidade de que não só fosse dominado cada um dos processos em separado, mas que constituíssem um todo compatível, de modo que o dispositivo resistisse às diversas etapas de fabricação sem degradações que comprometessem sua funcionalidade.

Merecem destaque o processo de corrosão anisotrópica e afinamento simultâneo de lâminas de Si por KOH, que é o corrosivo de melhor preferencialidade e que

proporciona as estruturas mecânicas mais finamente delineadas, os dois processos de mascaramento do substrato para corrosão anisotrópica (por SiO_2 e por Au/Cr), e o processo de formação de trilhas metálicas (de Au/Cr) resistentes ao ataque por KOH. Igual destaque merece o processo de alívio de tensões mecânicas do substrato de Si e dos filmes finos, sem os quais as máscaras de corrosão e os filmes metálicos das trilhas e espelhos não resistiam ao ataque por KOH.

Esse conjunto de processos possibilita que se façam dispositivos micromecânicos cuja fabricação envolva corrosão anisotrópica de silício por KOH, e também que se façam dispositivos mistos mecânicos-eletrônicos de vez que, com as máscaras de corrosão pesquisadas, podem ser protegidos os eventuais circuitos eletrônicos dos dispositivos contra a corrosão anisotrópica.

Novos Rumos para Pesquisa

Inicialmente deve-se citar a óbvia otimização dos microscanners galvanométricos e seus respectivos processos de fabricação. São passíveis de melhoria tanto o sistema de suspensão dos microscanners com suspensão por fio, buscando-se as soluções consagradas para galvanômetros tradicionais, quanto a dissipação de potência pelos microscanners galvanométricos com suspensão por barras de torção, a qual pode ser minimizada pelo espessamento das trilhas da bobina defletora ou pela utilização de filmes dissipadores de calor.

Quanto ao desempenho dinâmico dos dispositivos, pode-se aumentar-lhes a frequência natural de ressonância mecânica empregando-se o processo de corrosão anisotrópica de silício para esculpir a plataforma móvel com buracos para alívio de massa. Tal plataforma, mais leve, teria menor momento de inércia e, conseqüentemente, o dispositivo teria maior frequência natural de ressonância mecânica para uma mesma geometria.

Pode-se ainda estabelecer curvas de calibração do ângulo de deflexão e da frequência natural de ressonância mecânica do microscanner com relação à suas

proporções geométricas, de maneira a se poder dimensionar a geometria para que apresente o desempenho dinâmico escolhido.

A causa da curvatura do espelho defletor é um outro assunto a merecer pesquisa futura, e está relacionada ao mecanismo causador das tensões mecânicas nos processos de corrosão de silício, que deve ser pesquisado conjuntamente com as técnicas de controle e alívio dessas tensões.

Enfim a presente tese, além de produzir scanners galvanométricos monolíticos de silício que apresentam vantagens em relação aos congêneres, abriu caminho para pesquisas sobre vários dispositivos que são frutos do domínio da tecnologia de microfabricação, pois o conjunto de processos de produção estabelecidos possibilita que se façam dispositivos cuja fabricação envolva corrosão anisotrópica de silício por KOH sem que hajam danos aos eventuais circuitos eletrônicos que os componham. Pode-se citar os microsensores integrados, os microatuadores excitados termicamente, eletrostaticamente, magneticamente, galvanometricamente, ou piezoeletricamente, e os dispositivos microeletrônicos a vácuo, dentre esses destacando-se os microtriodos, microlâmpadas incandescentes, microcatodos, lâmpadas e displays planos.

BIBLIOGRAFIA

1. Leonard Laub, "The Evolution of Mass Storage," *BYTE*, (USA), p. 161 , may/1986.
2. Albert R. Tebo, "Optical Recording and Storage Media," *Electro-Optics*, (USA), 30 mar/1983.
3. John Monforte, "The Digital Reproduction of Sound," *Sci. Am.*, (USA), vol. 251, p. 78 1984.
4. Bill Zoellick, "CD_ROM Software Development," *BYTE*, (USA), p.177, may/1986.
5. Rich Malloy, "A Roundup of Optical Disk Drives," *BYTE*, (USA), p. 215, may/1986.
6. Peter Pin-Shan Chen, "The compact disk ROM: how it works," *IEEE Spectrum*, (USA), p. 44, apr/1986.
7. Tim Oren, Gary A. Kildall, "The compact disk ROM: applications software," *IEEE Spetrum*, (USA), p. 49, apr/1986.
8. Solomon W. Golomb, "Optical Disk Error Correction," *BYTE*, (USA), p. 203, may/1986.
9. K. Bulthuis, M. G. Carasso, J. P. J. Heemskerk, P. J. Kivits, W. J. Kleuters, P. Zalm, "Ten billion bits on a disk," *IEEE Spectrum*, (USA), p. 26, aug/1979.
10. Edward S. Rothchild, "Optical Memory: Data Storage by Laser," *BYTE*, (USA), p. 215, oct/1984.
11. G. Bouwhuis, J. J. M. Braat, "Video disk player optics," *App. Opt.*, (USA), vol. 17, p. 1993, 1978.
12. B. A. J. Jacobs, "Laser beam recording of video masters disks," *App. Opt.*, (USA), vol. 17, p. 2001, 1978.
13. J. P. J. Heemskerk, "Noise in a video disk system: experiments with an (AlGa)As laser," *App. Opt.*, (USA), vol. 17, p. 2007, 1978.
14. J. J. M. Braat, G. Bouwhuls, "Position sensing in video disk readout," *App. Opt.*, (USA), vol. 17, p. 2013, 1978.
15. J. J. M. Braat, G. Bouwhuls, "Optical video disks with undulating tracks," *App. Opt.*, (USA), vol. 17, p. 2022, 1978.

16. C. H. F. Velzel, "Laser beam readings of video records," *App. Opt.*, (USA), vol. 17, p. 2029, 1978.
17. A. Korpel, "Simplified diffraction theory of the video disk," *App. Opt.*, (USA), vol. 17, p. 2037, 1978.
18. Shi-Shang Lin, Song-Jau Tsai, "A Microprocessor-Based Incremental Servo System with Variable Structure," *IEEE Trans. Ind. Electr.*, (USA), vol. IE-31, p. 313, 1984.
19. J. Naruse, M. Tsutsumi, T. Tamura, Y. Hirano, T. Hayama, O. Matsushita, "Design of a Large Capacity Disk Drive with Two Actuators," *IEEE Trans. on Mag.*, (USA), vol. MAG-19, p. 1695, 1983.
20. R. A. Scranton, T. K. Worthington, D. W. Hunter, D. A. Thompson, M. O. Thompson, J. Cocke, "A Novel, High Performance, Low Mass Disk Head Actuator," *IEEE Trans. on Mag.*, (USA), vol. MAG-19, p. 1692, 1983.
21. R. M. Wooton, "Position and Velocity Information Recovery from Rotational Drive Systems," *IBM Tech. Discl. Bull.*, (USA), vol. 22, p. 4644, 1980.
22. G. B. Fraser, "FM Processing of Position Error Signals," *IBM Tech. Discl. Bull.*, (USA), vol. 21, p. 3030, 1978.
23. K. B. Klaassen, "Capacitive Servo Detector," *IBM Tech. Discl. Bull.*, (USA), vol. 26, p. 2942, 1983.
24. C. Handen, R. W. Lissner, C. C. Liu, V. R. Witt, "Improvement in the Position Error Signal Detector Channel for a "Buried Servo" Recording System," *IBM Tech. Discl. Bull.*, (USA), vol. 23, p. 1203, 1980.
25. S. A. Jove, "Trigonal Buried Servo Encodement for Single Frequency Derivation of Position Error Signal," *IBM Tech. Discl. Bull.*, (USA), vol. 26, p. 2947, 1983.
26. F. E. Mueller, "Dual Frequency Servo-Positioning System Employing Saturated Recording," *IBM Tech. Discl. Bull.*, (USA), vol. 20, p. 4110, 1978.
27. W. A. Herrington, F. E. Mueller, "Quad-Burst PES System for Disk File Servo," *IBM Tech. Discl. Bull.*, (USA), vol. 21, p. 804, 1978.
28. Y. Mizoshita, N. Matsuo, "Mechanical and Servo Design of a 10 Inch Disk Drive," *IEEE Trans. on Mag.*, (USA), vol. MAG-17, p. 1387, 1981.
29. A. H. Bennet, P. J. Elliott, R. V. Fowler, "Writing Servo Patterns in Disk Files," *IBM Tech. Discl. Bull.*, (USA), p. 1234, 1980.
30. R. S. Palmer, "Fast Eigenvector Control of a Disk File Actuator," *IBM Tech. Discl. Bull.*, (USA), vol. 22, p. 5069, 1980.

31. D. M. Taub, "Sampled-Data Servos - A New Analysis (Part 1)," *Electron. & Wir. Word*, (UK), p. 29, Feb./1985.
32. D. M. Taub, "Sampled-Data Servos - A New Analysis (Part 2)," *Electron. & Wir. Word*, (UK), p. 57, Apr./1985.
33. D. M. Taub, "Sampled-Data Servos - A New Analysis (Part 3)," *Electron. & Wir. Word*, (UK), p. 65, May/1985.
34. D. M. Taub, "Sampled-Data Servos - A New Analysis (Part 4)," *Electron. & Wir. Word*, (UK), p. 34, Jun/1985.
35. D. M. Taub, "Sampled-Data Servos - A New Analysis (Part 5)," *Electron. & Wir. Word*, (UK), p. 59, Jul./1985.
36. Y. Mizoshita, A. Futamata, "Head-Positioning Servo Design for Disk Drives," *Fujitsu Sci. & Tech. J.*, (Japan), vol. 18, p. 101, 1982.
37. J. A. Wagner, "The Actuator in High Performance Disk Drives: Design Rules for Minimum Access Time," *IEEE Trans. on Mag.*, (USA), vol. MAG-19, p. 1686, 1983.
38. C. Maury, "High Track Density for Magnetic Disk Drives With an Embedded Servo Positioning System," *IEEE Trans. on Mag.*, (USA), vol. MAG-17, p. 1396, 1981.
39. R. C. Winfrey, C. M. Riggle, F. Bennett, J. Read, P. Svendsen, "Design of a High Performance Rotary Positioner for Magnetic Disk Memory," *IEEE Trans. on Mag.*, (USA), vol. MAG-17, p. 1392, 1981.
40. N. H. Hansen, "A Head-Positioning System Using Buried Servos," *IEEE Trans. on Mag.*, (USA), vol. MAG-17, p. 2735, 1981.
41. N. Koshino, S. Ogawa, "Optical Method of the Positioning in Magnetic Disk Systems," *IEEE Trans. on Mag.*, (USA), vol. MAG-16, p. 631, 1980.
42. M. K. Haynes, "Magnetic Recording Techniques for Buried Servos," *IEEE Trans. on Mag.*, (USA), vol. MAG-17, p. 2730, 1981.
43. C. Dong, "Dual-Path Electromagnetic Actuator for a High Performance Magnetic Disk Drive," *IEEE Trans. on Mag.*, (USA), vol. MAG-19, p. 1689, 1983.
44. R. C. Bauck, D. D. Palmer, "Linear Actuator," *IBM Tech. Discl. Bull.*, (USA), vol. 23, p. 4710, 1981.
45. M. W. Rudy, "Force Constant Linearity Optimization Techniques as Applied to a Long Gap, Short Coil Linear Actuator," *IBM Tech. Discl. Bull.*, (USA), vol. 22, p. 780, 1979.

46. J. S. Swartz, "Commutated Voice Coil," *IBM Tech. Discl. Bull.*, (USA), vol. 21, p. 4636, 1979.
47. D. O. Johnson, C. C. Roshon, "Small Modular/Linear Voice Coil Actuator," *IBM Tech. Discl. Bull.*, (USA), vol. 21, p. 4632, 1979.
48. D. O. Johnson, Jr., C. C. Roshon, "Modular Linear Actuator with Flat Coil Voice Motor," *IBM Tech. Discl. Bull.*, (USA), vol. 24, p. 1476, 1981.
49. D. R. Dobson, R. J. Flaherty, J. R. McDowell, Jr., R. A. Williams, "Position Encoder," *IBM Tech. Discl. Bull.*, (USA), vol. 21, p. 242, 1978.
50. F. A. Jenkins, H. E. White, *Fundamentals of Optics*, McGraw-Hill Book Company, New York, NY, USA, 1976.
51. W. G. Driscoll, W. Vaughan, *Handbook of Optics*, McGraw-Hill Book Company, New York, NY, USA, 1978.
52. G. A. Woolvet, *Transducers in Digital Systems*, Peter Peregrinus LDT., Southgate House, ENGLAND, 1977.
53. L. Baser, "Laser Scanning and Recording: Developments and Trends," *Laser Focus*, (USA), p. 88, Feb./1985.
54. J. C. Urbach, T. S. Fisli, G. K. Starkweather, "Laser Scanning for Electronic Printing," *Proc. IEEE*, (USA), vol. 70, p. 597, 1982.
55. T. Mikami, F. Abe, T. Matsuda, "Ultra-High Resolution UV Laser Scanning System," *FUJITSU Sci. Tech. J.*, (Japan), vol. 20, p. 125, 1984.
56. T. Mikami, F. Abe, T. Matsuda, "A Correction Method for Laser Scanning Errors in High Speed Laser Printers," *FUJITSU Sci. Tech. J.*, (Japan), vol. 18, p. 579, 1982.
57. C. C. K. Cheng, "Laser Scanning Systems for Supermarket Automation," *Electro-Opt. Sys. Des.*, (USA), p. 41, Jun./1980.
58. S. Minami, K. Minoura, H. Yamamoto, "Optical Scanner Design Leads to Commercial Laser Printer Success," *Laser Focus/Electro-Opt.*, (USA), p. 98, Oct./1987.
59. D. A. Thompson, C. D. Cullum, Jr., "Raster Scanning," *IBM Tech. Discl. Bull.*, (USA), vol. 21, p. 861, 1978.
60. P. Brosens, "Scanning Accuracy of the Moving-Iron Galvanometer Scanner," *Opt. Eng.*, (USA), vol. 15, p. 95, 1976.
61. D. J. Tweed, "Resonant Scanner Linearization Techniques," *SPIE - Laser Scanning and Recording*, (USA), vol. 498, p. 161, 1984.

62. D. P. Jablonowski, J. Raamot, "Galvanometer Deflection: A Precision High-Speed System," *App. Opt.*, (USA), vol. 15, p. 1437, 1976.
63. A. Cornejo, J. C. Fouere, "Ronchi Gratings for Small Linear Measurements," *App. Opt.*, (USA), vol. 13, p. 740, 1974.
64. P. J. Brosens, "Dynamic Mirror Distortions in Optical Scanning," *Appl. Opt.*, (USA), vol. 11, p. 2987, 1972.
65. R. J. Prilik, "Real-Time Testing of Optical Scanners Using a Logic Tester," *IBM Tech. Discl. Bull.*, (USA), vol. 22, p. 4442, 1980.
66. A. Korpel, "Acousto-Optics - A Review of Fundamentals," *Proc. IEEE*, (USA), vol. 69, p. 48, 1981.
67. M. D. Levenson, K. Chiang, "Image Projection with Nonlinear Optics," *IBM J. Res. Dev.*, (USA), vol. 26, p. 160, 1982.
68. U. J. Schmidt, "Electro-Optic Deflection of a Laser Beam," *Philips Tech. Rev.*, (ND), vol. 36, p. 117, 1976.
69. G. T. Sincerbox, G. Roosen, "Opto-Optical Light Deflection," *App. Opt.*, (USA), vol. 22, p. 690, 1983.
70. P. D. Henshaw, "Laser Beamsteering Using the Photorefractive Effect," *App. Opt.*, (USA), vol. 21, p. 2323, 1982.
71. K. Takizawa, "Electrooptic Fresnel Lens-Scanner With an Array of Channel Waveguides," *App. Opt.*, (USA), vol. 22, p. 2468, 1983.
72. M. B. Chang, "Total Internal Reflection Deflector," *App. Opt.*, (USA), vol. 21, p. 3879, 1982.
73. C. R. Giuliano, "Applications of Optical Phase Conjugation," *Phys. Today*, (USA), p. 27, Apr./1981.
74. J. F. Revelli, "High-Resolution Electrooptic Surface Prism Waveguide Deflector: an Analysis," *App. Opt.*, (USA), vol. 19, p. 389, 1980.
75. J. Goldhar, "Beam Deflecting Optical Switch Using Volumetric Thermal Gratings," *App. Opt.*, (USA), vol. 23, p. 113, 1984.
76. W. M. Richard, "Multiwavelength Test Bench Measures Scan Lens Properties," *Laser Focus/Electro-Opt.*, (USA), p. 120, Jan./1988.
77. S. J. Gum, *Specification of Scan Lenses*, application note from D. O. Industries, East Rochester, NY, USA, 1986.
78. EG&G RETICON, *Product Summary Solid State Image Sensors*, EG&G RETICON, Sunnyvale, CA, USA, 1985.

79. EG&G RETICON, *S-Series Solid State Line Scanners 128, 512 and 1024 Elements*, EG&G RETICON, Sunnyvale, CA, USA, 1985.
80. HAMAMATSU PHOTONICS K. K., Solid State Division, *catalog: Position-Sensitive Detectors*, HAMAMATSU PHOTONICS K. K., Hamamatsu City, Japan, 1985.
81. G. M. Sessler, J. E. West, "Foil-Electret Microphones," *The J. Ac. Soc. Am.*, (USA), vol. 40, p. 1433, 1966.
82. G. M. Sessler, "Electrostatic Microphones with Electret Foil," *The J. Ac. Soc. Am.*, (USA), vol. 35, p. 1354, 1963.
83. P. W. Chudleigh, "Charging of Polymer Foils Using Liquid Contacts," *Appl. Phys. Lett.*, (USA), vol. 21, p. 547, 1972.
84. R. F. Johnson, "A Modern Laser-Effects Projector," *Electro-Opt.*, (USA), p. 24, Feb./1983.
85. R. J. Rockwell, Jr., "Laser Lighting: Art, Entertainment and Architecture in the 1980s," *Electro-Opt. Sys. Des.*, (USA), p. 37, Oct./1981.
86. J. T. Verdeyen, *Laser Electronics*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA, 1989.
87. J. B. Angell, S. C. Terry, P. W. Barth, "Silicon Micromechanical Devices," *Sci. Am.*, (USA), vol. 248, p. 36, 1983.
88. K. E. Petersen, "Silicon as a Mechanical Material," *Proc. of the IEEE*, (USA), vol. 70, p. 420, 1982.
89. K. E. Petersen, "Micromechanical Transmission Light Modulator Array," *IBM Tech. Discl. Bull.*, (USA), vol. 22, p. 5076, 1980.
90. K. E. Petersen, "Silicon Torsional Scanning Mirror," *IBM J. Res. Develop.*, (USA), vol. 24, p. 631, 1980.
91. K. Gustafsson, B. Hok, "A Silicon Light Modulator," *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, (UK), vol. 21, p. 680, 1988.
92. E. Bassous, "Fabrication of Novel Three-Dimensional Microstructures by the Anisotropic Etching of (100) and (110) Silicon," *IEEE Tran. on Electron Devices*, (USA), vol. ED-25, p. 1178, 1978.
93. K. E. Bean, "Anisotropic Etching of Silicon," *IEEE Trans. on Electron Devices*, (USA), vol. ED-25, p. 1185, 1978.
94. J. B. Price, "Anisotropic Etching of Silicon with KOH-H₂O-Isopropyl Alcohol," *ECD Semiconductor Silicon*, (USA), p. 339, 1973.

95. G. Kaminsky, "Micromachining of Silicon Mechanical Structures," *J. Vac. Sci. Technol.*, (USA), vol. 3, p. 1015, 1985.
96. W. Kern, "Chemical Etching of Silicon, Germanium, Gallium Arsenide, and Gallium Phosphide," *RCA Rev.*, (USA), vol. 29, p. 278, 1978.
97. B. Schwartz, "Chemical Etching of Silicon: IV. Etching Technology," *J. Electrochem. Soc.*, (USA), vol. 123, p. 1903, 1976.
98. D. B. Lee, "Anisotropic Etching of Silicon," *J. Appl. Phys.*, (USA), vol. 40, p. 4569, 1969.
99. M. J. Declercq, L. Gerzberg, J. D. Meindl, "Optimization of the Hydrazine-Water Solution for Anisotropic Etching of Silicon in Integrated Circuit Technology," *J. Electrochem. Soc.*, (USA), p. 545, 1975.
100. G. Wallis, D. I. Pomerantz, "Field Assisted Glass-Metal Sealing," *J. Appl. Phys.*, (USA), vol. 40, p. 3946, 1969.
101. S. F. Bart, T. A. Lober, R. T. Howe, J. H. Lang, M. F. Schlecht, "Design Considerations for Micromachined Electric Actuators," *Sensors and Actuators*, (ND), vol. 14, p. 269, 1988.
102. A. Higdon, E. H. Ohlsen, W. B. Stiles, T. A. Weese, *Mechanics of Materials*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1967.
103. F. P. Beer, R. Johnston, Jr., *Vector Mechanics for Engineers: Statics and Dynamics*, McGraw-Hill Book Company, New York, NY, USA, 1972.
104. G. R. Slemon, *Magnetolectric Devices: Transducers, Transformers and Machines*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1966.
105. R. J. Roark, W. C. Young, *Formulas for Stress and Strain*, McGraw-Hill Book Company, New York, NY, USA, 1975.
106. M. Mehregany, K. J. Gabriel, W. S. N. Trimmer, "Integrated Fabrication of Polysilicon Mechanisms," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. 35, p. 719, 1988.
107. H. Fujita, "The Fabrication of an Electrostatic Linear Actuator by Silicon Micromachining," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. 35, p. 731, 1988.
108. S. W. Wenzel, R. M. White, "A Multisensor Employing an Ultrasonic Lamb-Wave Oscillator," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. 35, p. 735, 1988.
109. P. H. Huang, "Surface Acoustic Wave Microsensors Using Diffused Substrates," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. 35, p. 744, 1988.

110. M. A. Schmidt, R. T. Howe, S. D. Senturia, J. H. Haritonidis, "Design and Calibration of a Microfabricated Floating-Element Shear-Stress Sensor," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. 35, p. 750, 1988.
111. W. Riethmuller, W. Benecke, "Thermally Excited Silicon Microactuators," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. 35, p. 758, 1988.
112. B. Puers, L. Reynaert, W. Snoeys, W. M. C. Sansen, "A New Uniaxial Accelerometer in Silicon Based on the Piezjunction Effect," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. 35, p. 764, 1988.
113. S. Kordic, P. J. A. Munter, "Three-Dimensional Magnetic-Field Sensors," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. 35, p. 771, 1988.
114. A. Sasaki, S. Metavikul, M. Itoh, Y. Takeda, "Light-to-Light Transducers with Amplification," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. 35, p. 780, 1988.
115. R. L. Smith, S. D. Collins, "Micromachined Packaging for Chemical Microsensors," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. 35, p. 787, 1988.
116. G. J. Maclay, W. J. Buttner, J. R. Stetter, "Microfabricated Amperometric Gas Sensors," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. 35, p. 793, 1988.
117. Y. S. Lee, K. D. Wise, "A Batch-Fabricated Silicon Capacitive Pressure Transduces with Low Temperature Sensitivity," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. ED-29, p. 42, 1982.
118. O. Tabata, H. Inagaki, I. Igarashi, "Monolithic Pressure-Flow Sensor," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. ED-34, p. 2456, 1987.
119. K. E. Petersen, "Dynamic Micromechanics on Silicon: Techniques and Devices," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. ED-25, p. 1241, 1978.
120. C. S. Sander, J. W. Knutti, J. D. Meindl, "A Monolithic Capacitive Pressure Sensor with Pulse-Period Output," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. ED-27, p. 927, 1980.
121. K. E. Petersen, A. Shartel, N. F. Raley, "Micromechanical Accelerometer Integrated with MOS Detection Circuitry," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. ED-29, p. 23, 1982.
122. W. Riethmüller, W. Benecke, "Thermally Excited Silicon Microactuators," *IEEE Trans. Electron. Dev.*, (USA), vol. 35, p. 758, 1988.
123. T. Utsumi, "Keynote Address Vacuum Microelectronics: What's New and Exciting," *IEEE Trans. Electron. Dev.*, (USA), vol. 38, p. 2276, 1991.
124. M. Esashi, H. Komatsu, T. Matsuo, M. Takahashi, T. Takishima, K. Imabayashi, H. Ozawa, "Fabrication of Catheter-Tip and Sidewall Miniature

- Pressure Sensors," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. ED-29, p. 57, 1982.
125. G. N. Stemme, "A Monolithic Gas Flow Sensor with Polyimide as Thermal Insulator," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. ED-33, p. 1470, 1986.
 126. H. Tanigawa, T. Ishihara, M. Hirata, K. Suzuki, "MOS Integrated Silicon Pressure Sensor," *IEEE Trans. on Electron Dev.*, (USA), vol. ED-32, p. 1191, 1985.
 127. S. K. Ghandi, *VLSI Fabrication Principles: Silicon and Gallium Arsenide*, John Wiley, New York, NY, USA, 1983.
 128. W. S. Ruska, *Microelectronic Processing*, McGraw-Hill Book Company, New York, NY, USA, 1987.
 129. S. M. Hu, L. V. Gregor, "Silicon Nitride Films by Reactive Sputtering," *J. Electrochem. Soc.*, (USA), vol. 114, p. 826, 1967.
 130. S. M. Hu, "Properties of Amorphous Silicon Nitride Films," *J. Electrochem. Soc.*, (USA), vol. 113, p. 693, 1966.
 131. A. N. Saxena, O. Tkal, "Determination of the Etch Rate and the Refractive Index of Silicon Nitride Films with an Ellipsometer," *J. Electrochem. Soc.*, (USA), vol. 115, p. 227, 1968.
 132. T. L. Chu, C. H. Lee, G. A. Gruber, "The Preparation and Properties of Amorphous Silicon Nitride Films," *J. Electrochem. Soc.*, (USA), vol. 114, p. 717, 1967.
 133. V. Y. Doo, D. R. Nichols, G. A. Silvey, "Preparation and Properties of Pyrolytic Silicon Nitride," *J. Electrochem. Soc.*, (USA), vol. 113, p. 1279, 1966.
 134. K. E. Bean, P. S. Gleim, R. L. Yeakley, "Some Properties of Vapor Deposited Silicon Nitride Films Using the $\text{SiH}_4\text{-NH}_3\text{-H}_2$ System," *J. Electrochem. Soc.*, (USA), vol. 114, p. 733, 1967.
 135. W. van Gelder, V. E. Hauser, "The Etching of Silicon Nitride in Phosphoric Acid with Silicon Dioxide as a Mask," *J. Electrochem. Soc.*, (USA), vol. 114, p. 869, 1967.
 136. V. Y. Doo, D. R. Kerr, D. R. Nichols, "Property Changes in Pyrolytic Silicon Nitride with Reactant Composition Changes," *J. Electrochem. Soc.*, (USA), vol. 115, p. 61, 1968.
 137. F. K. Heumann, D. M. Brown, "Diffusion Masking of Silicon Nitride and Silicon Oxynitride Films on Si," *J. Electrochem. Soc.*, (USA), vol. 115, p. 99, 1968.

138. T. L. Chu, J. R. Szedon, C. H. Lee, "Films of Silicon Nitride-Dioxide Mixtures," *J. Electrochem. Soc.*, (USA), vol. 115, p. 318, 1968.
139. B. E. Deal, P. J. Fleming, P. L. Castro, "Electrical Properties of Vapor-Deposited Silicon Nitride and Silicon Oxide Films on Silicon," *J. Electrochem. Soc.*, (USA), vol. 115, p. 300, 1968.
140. M. J. Grieco, F. L. Worthing, B. Schwartz, "Silicon Nitride Thin Films from SiCl₄ Plus NH₃: Preparation and Properties," *J. Electrochem. Soc.*, (USA), vol. 115, p. 525, 1968.
141. K. Sugawara, "Facets Formed by Hydrogen Chloride Vapor Etching on Silicon Surfaces through Windows in SiO₂ and Si₃N₄ Masks," *J. Electrochem. Soc.*, (USA), vol. 118, p. 110, 1971.
142. T. H. T. Wu, R. S. Rosler, "Stress in PSG and Nitride Films as Related to Film Properties and Annealing," *Solid State Technol.*, (USA), vol. 35, p. 65, 1992.
143. J. Scarminio, *Propriedades Mecânicas em Filmes Finos de Nb/Pd. (Tese de Doutorado - IFGW/UNICAMP)*, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 1989.