Marcelo Silva Guimarães

**Proposta de Método para
Caracterização de Propriedades
Termomecânicas de Filmes Finos
Utilizando Dispositivos MEMS**

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

São Paulo

2002

Marcelo Silva Guimarães

**Proposta de Método para
Caracterização de Propriedades
Termomecânicas de Filmes Finos
Utilizando Dispositivos MEMS**

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

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Amilton Sinatora

São Paulo

2002

Aos meus pais Eliene Silva
Guimarães e Vitor Ferreira Guimarães
que sempre apoiaram os meus estudos

Agradecimentos

Ao Prof. Marcelo N. P. Carreño que coorientou este trabalho.

Ao GNMD/LME (Marco Alayo, Alexandre T. Lopes) pelos filmes de Oxinitreto de Silício.

À equipe técnica do LME pela fabricação dos dispositivos.

Ao LSI (Roberto J. Rodrigues, Eliphas W. Simões e o Prof. Rogério Furlan) pelo esforço no desenvolvimento inicial do projeto.

Ao LFS pelas discussões e sugestões que sempre contribuíram para o trabalho.

Ao Prof. Roberto M. De Souza pelo seu auxílio nos artigos.

Ao Prof. Amilton Sinatora por ter aceito orientar este trabalho.

À FAPESP pelo financiamento feito pelo Processo 00/01068–8.

A todos que de alguma forma ajudaram na realização deste trabalho.

Sumário

Lista de Figuras	6
Lista de Símbolos	10
Resumo	13
Abstract	14
1–Introdução	15
2–Revisão	19
2.1–Caracterização	19
2.2–Microfabricação	25
2.3–Microusinagem de superfície	29
2.4–Microusinagem de substrato	31
2.5–Processo LIGA	32
3–Materiais e métodos	34
3.1–Oxinitreto de Silício	34
3.2–Caracterização elétrica	36
3.3–Métodos de microscopia	39
4–Modelagem	42
4.1–Dispositivo	42
4.2–Temperatura no contorno do dispositivo	47
5–Desenvolvimento do processo de fabricação	51
5.1–Primeiro experimento	61
5.2–Desenvolvimento da segunda série de máscaras	62
5.2.1–Oxidação térmica	64
5.3–Desenvolvimento da terceira série de máscaras	67
6–Caracterização elétrica dos dispositivos	71
7–Observando a deformação	80
7.1–Experimento com os microdispositivos	84
8–Discussão sobre o método de caracterização de propriedades termomecânicas	89
8.1–Medição do coeficiente de dilatação térmica e condutividade térmica	89
8.2–Medição do módulo de elasticidade	90
9–Estudo das microvigas após a falha	94
10–Últimas discussões , sugestões para futuros trabalhos e conclusões	101
11–Bibliografia	103
11.1–Referências bibliográficas	103
11.2–Bibliografia consultada	105
11.3–Referências na WWW	107

Lista de Figuras

Figura 1.1:	Diagrama de blocos de um microssistema.	17
Figura 2.1:	Esquema de um equipamento de nanoindentação.	21
Figura 2.2:	Diagrama descrevendo o ensaio de flexão de microviga por meio de um nanoindentador.	21
Figura 2.3:	Diagrama descrevendo o ensaio de carregamento da membrana.	22
Figura 2.4:	Diagrama descrevendo o ensaio dinâmico para caracterização do módulo de elasticidade.	23
Figura 2.5:	Diagrama descrevendo o ensaio para caracterização da dilatação térmica.	24
Figura 2.6:	Diagrama descrevendo o ensaio para caracterização da condutividade térmica.	24
Figura 2.7:	Diagrama de um reator PECVD.	28
Figura 2.8:	Técnica de fotolitografia A) utilizando máscara óptica, B) utilizando feixe direcionado. Resultado C) no fotoresiste positivo D) e no fotoresiste negativo.	28
Figura 2.9:	Cavidades típicas formadas na gravação: A) corrosão anisotrópica; B) corrosão isotrópica.	29
Figura 2.10:	Fabricação de uma estrutura móvel (microengrenagem), a partir da retirada da camada de sacrifício, consiste das seguintes etapas: a) a partir de um substrato; b) deposita-se o material de sacrifício; c) grava-se os apoios da engrenagem; d) grava-se o ponto de fixação do eixo no substrato; e) deposita-se o material estrutural da engrenagem; f) grava-se a engrenagem; g) deposita-se uma segunda camada de sacrifício; h) deposita-se o material estrutural do eixo; i) grava-se o eixo; j) remove-se o material de sacrifício finalizando o processo.	30
Figura 2.11:	Fabricação de por microusinagem de substrato: A) deposição do filme; B) gravação; C) corrosão do substrato.	31
Figura 2.12:	No caso da janela B, em razão das suas pequenas dimensões as paredes formadas pela corrosão se encontram, praticamente interrompendo o processo.	32
Figura 2.13:	Etapas de fabricação do LIGA. (a) Resiste plástico depositado sobre substrato metálico (b) litografia (c) microestrutura em plástico (d) eletroformação (e) retirada do resiste (f) moldagem.	33
Figura 3.1:	Processo de fabricação empregado para construir estruturas suspensas apresentado por Lopes.	35
Figura 3.2:	a) Vista do microprovador e gerador de pulsos. b) Detalhe das micropontas e objetivas.	37
Figura 3.3:	Diagrama do aparato experimental para caracterização elétrica.	37
Figura 3.4:	Aparato experimental para caracterização elétrica com multímetro, osciloscópio, fonte de alimentação e microscópio com analisador de imagens.	38

Figura 3.5:	Detalhe da montagem da amostra para observação.	38
Figura 3.6:	Porta amostra.	39
Figura 3.7:	Apresenta como o feixe é dividido pelo prisma.	40
Figura 3.8:	Apresenta um esquema do sistema Nomarski.	41
Figura 4.1:	Microdispositivo a ser estudado.	42
Figura 4.2:	Modelo de estrutura que representa a viga.	44
Figura 5.1:	Etapas de fabricação inicialmente propostas para serem empregadas no LME.	51
Figura 5.2:	Primeiras máscaras feitas para o LME. a) Máscaras para gravação do oxinitreto dorsal. b) Máscaras para gravação do oxinitreto frontal. c) Máscara para gravação do Alumínio.	52
Figura 5.3:	Microvigas fabricadas por microusinagem em substrato, vistas pelas costas da lâmina (microscopia eletrônica).	54
Figura 5.4:	Uma das microvigas vista pela frente da lâmina (microscopia eletrônica).	54
Figura 5.5:	Um dos microdispositivos visto pelas costas da lâmina (microscopia eletrônica).	55
Figura 5.6:	Detalhe de uma viga pertencente a um dos microdispositivos (microscopia eletrônica).	55
Figura 5.7:	Detalhe de um dos microdispositivos na qual se observa irregularidades na geometria devido a baixa qualidade da máscara (microscopia eletrônica).	56
Figura 5.8:	Vista em perspectiva das vigas que formam um dos dispositivos (microscopia eletrônica).	56
Figura 5.9:	Vista em perspectiva da extremidade de uma das vigas pela frente (microscopia eletrônica).	57
Figura 5.10:	Vista em perspectiva da extremidade de uma das vigas pelas costas (microscopia eletrônica).	57
Figura 5.11:	Vista em perspectiva de um bloco de silício remanescente após o processo de microusinagem do substrato nas costas de uma membrana, evidenciando a anisotropia do processo (microscopia eletrônica).	58
Figura 5.12:	Observa-se nesta imagem a não fixação do fotoresiste próximo a borda do microdispositivo (microscopia óptica).	59
Figura 5.13:	Observa-se nesta imagem a não fixação do fotoresiste nas vigas (microscopia óptica).	60
Figura 5.14:	Alterações propostas para o processo de fabricação do LME.	60
Figura 5.15:	Gravação do alumínio sobre as membranas suspensas (microscopia óptica).	61
Figura 5.16:	Imagens do primeiro experimento. Comparando a imagem a) com a imagem b) nota-se uma mudança de cor nas extremidades da microviga devido a deformação.	62
Figura 5.17:	Padrões presentes no segundo conjunto de máscaras.	63
Figura 5.18:	Vista em perspectiva dos restos de uma estrutura que não resistiu ao processamento (microscopia eletrônica).	65
Figura 5.19:	Detalhe da microviga fabricada com o segundo conjunto de máscaras (microscopia eletrônica).	65

Figura 5.20:	Corrosão interrompida devido as pequenas dimensões das janelas (microscopia eletrônica).	66
Figura 5.21:	Corrosão interrompida devido as pequenas dimensões das janelas (microscopia eletrônica).	66
Figura 5.22:	a)Borda da lâmina quando não foi oxidada b)Borda da lâmina quando oxidada.	67
Figura 5.23:	Conjunto de máscaras das vigas.	68
Figura 5.24:	Conjunto de máscaras dos dispositivos.	69
Figura 5.25:	Etapas de fabricação estabelecidas.	70
Figura 6.1:	Gráfico Vxi para viga 1.	73
Figura 6.2:	Gráfico Vxi para viga 2.	73
Figura 6.3:	Gráfico Vxi para viga 3.	74
Figura 6.4:	Gráfico Vxi para viga 4.	74
Figura 6.5:	Gráfico Vxi para viga 5.	75
Figura 6.6:	Gráfico Vxi para viga 6.	75
Figura 6.7:	Gráfico Vxi para viga 7.	76
Figura 6.8:	Linha transversal característica da falha na Viga 2.	77
Figura 6.9:	Região característica da falha na Viga 6, detalhe superior.	77
Figura 6.10:	Região característica da falha na Viga 6, detalhe inferior.	78
Figura 6.11:	Região característica da falha na Viga 7.	78
Figura 7.1:	Diagrama apresentando a influência da inclinação de uma superfície especular na defasagem entre os feixes de luz.	80
Figura 7.2:	Perfil do padrão para aferição de rugosímetros.	82
Figura 7.3:	Micrografia Nomarski do padrão de rugosidade, rotacionado em relação ao eixo de observação.	83
Figura 7.4:	Direção $\vec{u}$ de derivação da superfície.	84
Figura 7.5:	Micrografias Nomarski do ensaio de caracterização elétrica da viga 7 (Região Linear).	85
Figura 7.6:	Micrografias Nomarski do ensaio de caracterização elétrica da viga 7 (Região Não-Linear).	86
Figura 7.7:	Análise qualitativa da interferometria Nomarski: a) Imagem típica do experimento; b) Curvas de nível do modelo; c) Modelo da imagem interferométrica; d) Modo de deformar da microviga.	88
Figura 9.1:	Detalhe das regiões mais danificadas após a falha da microviga. Nota-se na região I as trincas, observa-se pequenas esferas na região II e as bolhas na região III (MEV).	94
Figura 9.2:	Anáglifo da Figura 9.1 o que possibilita verificar o relevo das bolhas e esferas (MEV).	95
Figura 9.3:	Imagem apresentando a formação de bolhas (MEV).	95
Figura 9.4:	Formação semelhante um “descascamento” da microviga (MEV).	96
Figura 9.5:	Detalhe do “descascamento” da microviga (MEV).	96
Figura 9.6:	Detalhe da formação das bolhas (MEV).	97
Figura 9.7:	Formação de bolhas e e esferas sobre a superfície.	97
Figura 9.8:	Detalhe das esferas (MEV).	98
Figura 9.9:	Detalhe da formação bolhas (MEV).	98

Figura 9.10:	Detalhe de uma trinca (MEV).	99
Figura 9.11:	Formação eruptiva presente no centro de algumas microvigas após a falha (MEV).	99

Lista de Símbolos

L	Comprimento da viga
U_B	Voltagem aplicada na extremidade B da viga
ΔU	Diferença de potencial elétrico aplicado na viga
x	Coordenada ao longo do comprimento da viga
y	Coordenada na direção transversal da viga
$\hat{x}$	Versor na direção do comprimento da viga
$\hat{y}$	Versor na direção transversal da viga
s	Condutividade elétrica
Q	Potência gerada por unidade de volume
J	Densidade de corrente elétrica
k	Condutividade térmica
q	Fluxo de calor
ϑ	Temperatura
v	Flecha da viga
I	Momento de inércia de área da seção transversal na direção de flexão
i	Corrente elétrica
E	Módulo de elasticidade
P	Força aplicada devido a dilatação térmica
V_B	Força reativa na extremidade B
M_B	Momento reativo na extremidade B
α	Coefficiente de dilatação térmica
σ	Tensão
ε	Deformação
ε_d	Distância entre os feixes de luz
A_a	Área da seção transversal da viga
$A_n \quad n=1,2,3,4$	Coeficientes da solução da equação da linha elástica

c_a	Coeficiente da equação da linha elástica
Θ	Temperatura no contorno da viga
Q_c	Energia dissipada por unidade de volume pelo filme no contorno
k_f	Condutividade térmica do filme no contorno
b	Espessura do filme
b_i	Coeficiente da equação voltagem em função da corrente
h	Coeficiente de transferência de calor
Θ_∞	Temperatura ambiente
q_v	Fluxo de calor dissipado por uma das extremidades da viga
ϑ_c	Coeficiente de temperatura no contorno
m	Coeficiente na equação de condução
C_1 e C_2	Coeficientes da solução da equação de transferência de calor
ϑ_b	Temperatura de contorno da equação de transferência de calor
C	Constante de proporcionalidade potência versus temperatura
R	Resistência elétrica
α_R	Coeficiente de variação de resistência elétrica em função da temperatura
$\Delta\vartheta$	Diferença de temperatura
$Q_\forall$	Potência dissipada no dispositivo
ρ	Resistividade elétrica do material
q_R	Coeficiente de temperatura versus corrente elétrica
a	Coeficiente da equação voltagem em função da corrente
Λ	Defasagem entre os feixes de luz
β	Ângulo de incidência do feixe de luz
γ	Ângulo de inclinação da superfície incidida
λ	Comprimento de onda
κ	Constante inteira

$\vec{u}$	Versor da direção dada projeção dos dois pontos de incidência do feixe
F	Função que descreve a topografia da superfície
D_1 e D_2	Coeficientes do modelo de deformação
d_1 e d_2	Coeficientes do modelo de deformação (velocidade angular)
ψ , ψ_1 e ψ_2	Fase de uma função periódica
ϑ_m	Temperatura média da viga
$\Delta \vartheta_m$	Variação de temperatura média da viga
Θ_{ref}	Temperatura de referência para o cálculo da dilatação
t	Tempo
$\tilde{m}$	Densidade do filme
f_n	Função dependente do tempo que faz parte da solução da equação diferencial dinâmica da viga
ω	Parâmetro da equação diferencial dinâmica
W	Frequência angular do carregamento cíclico
P_o e P_a	Componentes do carregamento cíclico
Ω	Parâmetro da equação de Mathieu
μ	Parâmetro da equação de Mathieu
W_e	Velocidades angulares limites da regiões de instabilidade

Resumo

Um fator importante para o desenvolvimento de projetos de microssistemas é o conhecimento de propriedades termomecânicas dos materiais e a compreensão dos mecanismos de falhas.

Este trabalho estuda o comportamento mecânico de microvigas atuadas termicamente e propõem um método para ser utilizado na caracterização de propriedades termomecânicas de filmes finos.

Fabricou-se vigas de Oxinitreto de Silício em que se aplicou a microscopia Nomarski para observar a deformação e a ocorrência do fenômeno de flambagem.

Abstract

An important factor to develop microsystems is knowledge of materials properties and failure mechanisms.

This research studies the thermal actuated microbeam mechanical behavior and propose a method in order to characterize thermomechanical properties of thin films.

Silicon Oxynitride microbeams are fabricated and it was applied Nomarski microscopy to observe strain and buckling phenomenon occurrence.

1–Introdução

A microengenharia se refere às tecnologias para construção de estruturas tridimensionais, dispositivos fluídicos, ópticos e eletromecânicos miniaturizados (com dimensões na ordem de micrometros) de alta performance, os quais são funcionalmente sofisticados e na maioria das vezes baseados nas tecnologias de fabricação de circuitos integrados. As duas principais tecnologias da microengenharia são a microeletrônica e a microusinagem.

A área mais conhecida das tecnologias de microengenharia é a microeletrônica, que se desenvolveu a partir da invenção dos transistores, permitindo a miniaturização dos dispositivos eletrônicos. A microusinagem engloba as técnicas utilizadas para produzir estruturas e peças móveis dos dispositivos de microengenharia.

A tecnologia de microssistemas permitirá o desenvolvimento de produtos inteligentes, possibilitando a interface necessária entre o computador e o mundo físico, mediante o desenvolvimento de sensores e atuadores, levando a um salto tecnológico similar ao que foi a microeletrônica nas últimas duas décadas (Sze, 1994).

Atualmente, as indústrias espacial e automotiva já utilizam dispositivos microusinados como acelerômetros e sensores de pressão. Esta tecnologia igualmente começa a ser aplicada em vários setores industriais, como por exemplo no desenvolvimento de chaveadores opto–mecânicos, sensores de fluxo, microdispositivos para análise de fluidos e na microanálise química.

A tendência da microengenharia não é só agregar valor aos produtos conhecidos, como também permitir o desenvolvimento de novos produtos e mercados, possibilitando (<http://www.dbanks.demon.co.uk/ueng/what.html>):

- produção de dispositivos mecânicos menores, mais leves, mais rápidos.
Ex.: micromotores;
- produção de sensores, explorando as características eletromecânicas do silício. Ex.: sensores de temperatura, pressão, aceleração, umidade e radiação;
- uso de processos comuns para integração de microeletrônica e micromecânica, buscando o aumento de performance e redução de custos.
Ex.: fabricação de microestruturas no chip para dissipação de calor;
- processo de fabricação em lote de grandes volumes de componentes miniaturizados a baixo custo. Ex.: Cartuchos para impressora jato de tinta.

Dentre os itens acima, as duas principais metas da microengenharia são a integração da microeletrônica com estruturas microusinadas, para a construção de sistemas totalmente integrados (microssistemas) e a redução do custo decorrente da miniaturização.

Nos últimos anos está ocorrendo um crescente interesse sobre o estudo de microssistemas, que se deve às inúmeras possibilidades de aplicação desta técnica em áreas como telecomunicações, automobilística, química e bioquímica.

A terminologia empregada para microestruturas ainda não está padronizada. O termo micromáquinas é muito utilizado na Ásia. Na Europa são denominados microssistemas (MST), enquanto que nos EUA são utilizados os termos sistemas microeletromecânicos (MEMS) ou sistemas microptoeletromecânicos (MOEMS).

Os microssistemas podem ser definidos como sistemas miniaturizados compostos por três blocos (Figura 1.1): bloco de comunicação com o meio exterior (sensores e atuadores), bloco de interface analógica (aquisição, transmissão,

amplificação e conversão A/D ou D/A dos sinais dos sensores ou atuadores) e o bloco de controle e tratamento numérico (DSP) (Ribas, 1999).

Figura 1.1: Diagrama de blocos de um microssistema.

Até o momento há poucos estudos sobre a qualidade e a confiabilidade na fabricação e funcionamento dos microssistemas. Os métodos convencionais de verificação da qualidade (inspeção) de dispositivos mecânicos não são aplicáveis, devido às dimensões microscópicas, sendo necessário o desenvolvimento de novas técnicas (<http://qa-web.jpl.nasa.gov/quality/aip/mems.html-ssi>).

A integração de micromecanismos aos circuitos microeletrônicos definem um novo domínio da tecnologia, onde os efeitos das forças atômicas e os fenômenos de superfície são mais importantes que a inércia e a gravidade (Komvopoulos, 1997 & Pimentel, 1999).

Parece ser imprescindível a aplicação de investimentos no desenvolvimento dessa tecnologia sob pena de perder os benefícios da oportunidade diante da competitividade dos produtos que utilizam a micromecânica

(<http://www.ee.surrey.ac.uk/Personal/D.Banks/roughgui.html>).

No caso, o presente trabalho pretende estudar os atuadores térmicos. Esses atuadores apresentam como principais vantagens a produção de forças elevadas (na ordem de micronewtons) e grandes deslocamentos (dezenas de micrometros), tendo como sua principal desvantagem o seu alto consumo de potência (dezenas de miliwatts) (Conant, 1998). O estudo do funcionamento desses atuadores como proposto será útil para compreender o desgaste e o comportamento do material diante das forças atuantes em micromecanismos.

2–Revisão

2.1–Caracterização

Os filmes finos utilizados para fabricar os microssistemas precisam satisfazer vários critérios químicos, estruturais, mecânicos e elétricos. Por exemplo, ter uma boa adesão ao substrato, baixa tensão residual, baixa densidade de poros, boa resistência mecânica e química (Madou, 1997).

Os parâmetros dos processos de fabricação utilizados para obter os filmes finos produzem uma forte influência em suas propriedades. Como foi observado por Lucas (Lucas, 1996) para o caso dos filmes de silício policristalino, as tensões residuais são influenciadas pela:

- técnica de deposição;
- pressão e temperatura de deposição;
- agentes dopantes;
- técnica de dopagem.

Além disso, as propriedades dos materiais quando na forma de um filme são bem diferentes das propriedades de volume dos mesmos. Pois os tamanhos de grão quando na forma de filme fino tendem ser menores e a alta relação superfície volume faz com que as propriedades de superfícies influenciem fortemente o comportamento do material (Madou, 1997).

Além dos fatores já discutidos, muitos dos filmes finos que estão sendo aplicados para fabricar microssistemas são tradicionalmente utilizados na microeletrônica e portanto não havia muitos estudos sobre suas propriedades mecânicas

(Yi, 1999), no entanto como estas propriedades são importantes para o projeto de dispositivos MEMS é necessário estudá-las.

O método de nanoindentação é o mais utilizado para se medir o módulo de elasticidade em filmes finos e consiste em penetrar uma ponta (indentador) no filme e analisar como varia a carga em função da profundidade de penetração. Com este método é possível medir outras propriedades como, tensão de escoamento e tensões residuais (Suresh, 1998). Na Figura 2.1 é possível observar um diagrama esquemático do equipamento de nanoindentação. Entre as desvantagens de se utilizar a técnica de nanoindentação para caracterização de filmes finos está a forte influência que o substrato pode ter nos valores medidos (Gupta, 1974).

Após o desenvolvimento dos dispositivos MEMS, vem surgindo novas técnicas para medir o módulo de elasticidade. Estes métodos se dividem em dinâmicos e estáticos. Os métodos estáticos são baseados na análise da deformação de um microdispositivo (uma viga ou membrana) em função do carregamento aplicado.

A técnica estática de flexão de microviga (beam bending technique) constitui-se em aplicar um carregamento por meio de um nanoindentador em uma microviga como esquematizado na Figura 2.2. Este método produz resultados precisos apenas quando os filmes não são muito finos e quando a tensão residual é muito baixa (Obermeier, 1996).

A técnica do carregamento da membrana (bulge test) é feita ao se aplicar uma pressão em uma das faces da membrana formada pelo filme e medindo a deformação por um sistema interferométrico. Na Figura 2.3 pode-se observar um esquema da instrumentação necessária para o ensaio. A maior vantagem desta técnica é a determinação no mesmo ensaio do módulo de elasticidade e tensão residual.

Figura 2.1: Esquema de um equipamento de nanoindentação.

Figura 2.2: Diagrama descrevendo o ensaio de flexão de microviga por meio de um nanoindentador.

Figura 2.3: Diagrama descrevendo o ensaio de carregamento da membrana.

Os métodos dinâmicos são realizados por meio do estudo das frequências de ressonância do microdispositivo, medidas pela excitação do sistema com algum carregamento dinâmico. Para estas técnicas são construídas estruturas ressonantes, como a apresentada na Figura 2.4. No caso apresentado o carregamento dinâmico aplicados são resultantes da força eletrostática oriunda da diferença de potencial elétrico alternado. A frequência de ressonância é medida utilizando um laser para detectar a vibração (Obermeier, 1996).

Apesar dos ensaios já descritos serem capazes de produzir muitos dados fundamentais para o estudo dos filmes finos, ainda não são capazes de realizar medidas acuradas (Yi, 1999). Portanto é necessário aprimorá-los e até mesmo desenvolver novos ensaios.

A medida do coeficiente de dilatação térmica pode ser realizada analisando a deformação causada pela diferença de dilatação térmica de dois filmes finos (similar a um par bimetalico) causada ao se aquecer o sistema. Para medir a condutividade

térmica tem-se utilizado a integração de sensores de temperatura para medir a temperatura (como exemplo, os termistores) e resistores para aquecer o filme. Analisando o gradiente de temperatura é possível calcular a condutividade térmica (Obermeier, 1996). A Figura 2.5 apresenta um diagrama esquemático da montagem do equipamento de medição de dilatação térmica enquanto que na Figura 2.6 apresenta o de medição de condutividade térmica.

Como apresentado, existe uma necessidade de se caracterizar de forma adequada as propriedades termomecânicas de filmes finos para aplica-los na fabricação de dispositivos MEMS. As principais questões a serem respondidas para realizar esta caracterização é como fazer uma “microamostra” para os ensaios e como realizar os ensaios de forma que seus resultados representem as condições que de fato os dispositivos MEMS são submetidos quando em operação (Yi, 1999).

Figura 2.4: Diagrama descrevendo o ensaio dinâmico para caracterização do módulo de elasticidade.

Figura 2.5: Diagrama descrevendo o ensaio para caracterização da dilatação térmica.

Figura 2.6: Diagrama descrevendo o ensaio para caracterização da condutividade térmica.

2.2–Microfabricação

Os processos de microfabricação originaram-se das tecnologias empregadas na indústria de microeletrônica (Sze, 1994). De forma geral, pode-se dizer que as etapas constituem-se em depositar filmes finos sobre algum substrato, realizar a litografia e em seguida, grava-los.

A deposição dos filmes pode ser realizada por meio de deposição física ou química. As principais técnicas de deposição física são a evaporação e a deposição anódica (Morimoto, 1999). A evaporação consiste em colocar o substrato e o material a ser depositado em uma câmara de vácuo. Aquecer o material para que ele evapore e assim, ocorra a sublimação sobre o substrato, formando o filme.

A deposição anódica (sputtering) consiste na formação de um plasma entre o substrato disposto no ânodo e o material disposto no cátodo. Assim, os íons que formam o plasma são acelerados em direção ao cátodo. Ao atingir o material a ser depositado, este libera os seus átomos que vão se depositar sobre o substrato.

A deposição química a vapor (CVD) consiste na formação de um filme fino sólido, não volátil, sobre um substrato por meio da reação química de gases na fase vapor que contém os elementos constituintes do material a ser depositado (Morimoto, 1999). Esta técnica pode ser classificada em CVD em pressão atmosférica (APCVD) e CVD em baixa pressão (LPCVD).

As técnicas de LPCVD se destacam por produzirem filmes de silício policristalino com baixa tensão residual, amplamente utilizados na fabricação de MEMS (Mehregany, 2001). Uma técnica de LPCVD importante é o CVD potencializado por plasma (PECVD). No PECVD é utilizado um sinal de rádio-frequência (RF) para criar um plasma na câmara de deposição. Este plasma transfere

energia aos gases reagentes, catalisando a reação química de formação do filme e permitindo que substrato se mantenha em uma temperatura baixa. Na Figura 2.7 observa-se um diagrama esquemático do reator PECVD.

A litografia é o nome dado para as técnicas de impressão de uma imagem (padrão) para alguma superfície de um material sólido, como placas de metal, plástico, mármore ou neste caso lâminas de silício. A técnica de litografia mais empregada na fabricação de dispositivos MEMS é fotolitografia (Madou, 1997).

A técnica fotolitográfica consiste de maneira geral, em depositar um filme fotossensível sobre a superfície a ser litografada (este filme é conhecido como fotoresiste e geralmente é um polímero). Depois é aplicado a radiação em algumas áreas selecionadas da superfície, de acordo com o padrão que se quer transferir. Utilizando a projeção do feixe através de uma máscara ou realizando a varredura de um feixe pontual sobre a superfície. A radiação pode ser luz ultra-violeta (UV), raios X ou feixe de elétrons.

Depois da incidência da radiação, dependendo da natureza do fotoresiste, este pode sofrer polimerização (fotoreste negativo) ou quebra da polimerização na região incidida (fotoreste positivo). O filme polimerizado permanece sobre o substrato enquanto que o não polimerizado é removido. Desta forma é transferido o padrão para o substrato, definido pelo fotoresiste depositado. A Figura 2.8 mostra um esquema da técnica de fotolitografia.

A evolução da técnica de litografia é responsável pelo desenvolvimento da microfabricação pois tornou possível gerar padrões em escalas micrométricas e submicrométricas (Panepucci, 1999).

A gravação consiste na remoção do filme (ou substrato) nas regiões não protegidas por uma máscara (normalmente o fotoresiste). As técnicas de gravação são

classificadas em corrosão úmida ou seca. Podendo ser isotrópicas ou anisotrópicas.

As corrosões úmidas são aquelas realizadas a partir da imersão da lâmina em uma solução corrosiva (ácida ou básica). Desta forma, as regiões não protegidas pelo fotoresiste (ou por outro filme protetor) são atacadas, transferindo-se o padrão do filme protetor para o atacado. As soluções de HF são muito utilizadas para corroer filmes de silício policristalino e o KOH para as lâminas de silício.

As corrosões secas são realizadas utilizando-se plasma. Este tipo de corrosão ocorre por meio da formação de partículas reativas dentro do plasma. Tais partículas são difundidas na superfície a ser corroída e em seguida são adsorvidas. Depois ocorre a quimissorção das partículas reativas com os átomos a serem removidos. Há a formação de moléculas voláteis e a dessorção destas moléculas da superfície. Por fim, as moléculas são removidas pelo sistema de bombeamento (Verdonck, 1999).

As corrosões podem ser isotrópicas ou anisotrópicas. A corrosão isotrópica se caracteriza por uma taxa de corrosão independente da direção de ataque, a cavidade formada durante a reação é circular. As corrosões úmidas isotrópicas são difíceis de controlar e sua taxa é muito dependente da agitação e da temperatura (Madou, 1997).

As corrosões anisotrópicas se caracterizam por haver uma direção preferencial tal que a taxa de corrosão é maior. A cavidade aberta durante a reação são paredes planas com uma inclinação paralela a direção preferencial. A Figura 2.9 apresenta a geometria característica da cavidade de acordo com tipo de corrosão (isotrópica ou anisotrópica).

Figura 2.7: Diagrama de um reator PECVD.

Figura 2.8: Técnica de fotolitografia A) utilizando máscara óptica, B) utilizando feixe direcionado. Resultado C) no fotoresiste positivo D) e no fotoresiste negativo.

Figura 2.9: Cavidades típicas formadas na gravação: A) corrosão anisotrópica; B) corrosão isotrópica.

2.3–Microusinagem de superfície

A microusinagem de superfície é um dos processos empregados para se fabricar dispositivos MEMS. Com a microusinagem de superfície é possível construir camadas suspensas mediante a remoção de uma camada de sacrifício, o que torna possível a construção de dispositivos complexos como micromotores. A Figura 2.10 apresenta um exemplo de como seria o procedimento para se fabricar uma microengrenagem.

Este processo é compatível com a fabricação de circuitos microeletrônicos. Sua desvantagem é a produção de estruturas com baixa razão de aspecto, isto é, estruturas cujas relações de altura e largura são pequenas, limitando as possibilidades de fabricação de microestruturas.

Figura 2.10: Fabricação de uma estrutura móvel (microengrenagem), a partir da retirada da camada de sacrifício, consiste das seguintes etapas: a) a partir de um substrato; b) deposita-se o material de sacrifício; c) grava-se os apoios da engrenagem; d) grava-se o ponto de fixação do eixo no substrato; e) deposita-se o material estrutural da engrenagem; f) grava-se a engrenagem; g) deposita-se uma segunda camada de sacrifício; h) deposita-se o material estrutural do eixo; i) grava-se o eixo; j) remove-se o material de sacrifício finalizando o processo.

2.4–Microusinagem de substrato

O processo de microusinagem de substrato fundamenta-se na corrosão do substrato para deixar as estruturas suspensas ou para construir sulcos que podem ser utilizados como canais por fluidos. Este processo é muito utilizado para construir sensores de pressão e acelerômetros.

As etapas de processamento constituem em depositar um filme (na qual se construirá a estrutura suspensa e/ou servirá de máscara para a corrosão do substrato), depois o filme é gravado (definindo a estrutura suspensa ou canais) por fim é realizado uma gravação do substrato com um ataque seletivo em relação ao filme. A Figura 2.11 apresenta as etapas do processo.

Figura 2.11: Fabricação de por microusinagem de substrato: A) deposição do filme; B) gravação; C) corrosão do substrato.

Quando a corrosão do substrato é anisotrópica deve-se verificar as dimensões da janela pois pode ocorrer que as paredes formadas pelo ataque da solução, a medida que a corrosão avance, converjam para um ponto. Definindo uma pirâmide invertida. Estas paredes, devido a anisotropia do processo, são planos tal que as suas normais são

perpendiculares a direção de menor velocidade de corrosão.

Portanto, quando se forma a pirâmide, o processo, fica impedido de continuar na direção de maior velocidade (perpendicular a direção de menor velocidade), alterando drasticamente a velocidade da corrosão, tornando o processo mais lento, praticamente o interrompendo. A Figura 2.12 ilustra a interrupção da corrosão causado pelo encontro das superfícies corroídas.

Figura 2.12: No caso da janela B, em razão das suas pequenas dimensões as paredes formadas pela corrosão se encontram, praticamente interrompendo o processo.

2.5–Processo LIGA

O processo de fabricação LIGA (Lithographie, Galvanoformung, Abformung) se caracteriza por utilizar moldes produzidos por litografia profunda de raio X para se

construir as microestruturas (Sze, 1994; El-Kholi, 1999; Ferreira, 1999). As principais etapas do processo são a litografia, na qual é preparado o molde, eletroformação, em que se cresce um filme metálico sobre o fotoresiste e moldagem, na qual o padrão da microestrutura é transferida para um outro material. A Figura 2.13 apresenta um diagrama esquemático do processo.

Figura 2.13: Etapas de fabricação do LIGA. (a) Resiste plástico depositado sobre substrato metálico (b) litografia (c) microestrutura em plástico (d) eletroformação (e) retirada do resiste (f) moldagem.

A tecnologia LIGA tem como vantagem a construção de dispositivos com alta razão de aspecto, porém devido a necessidade de radiação síncrotron possui um custo inicial elevado.

3–Materiais e métodos

3.1–Oxinitreto de Silício

Um trabalho recente (Lopes, 2000) mostra a utilização de filmes de oxinitreto de silício (SiO_xN_y) produzidos por PECVD em baixas temperaturas para fabricação de membranas suspensas. Estes filmes são amorfos e apresentam uma alta taxa de deposição (na ordem de $2\mu\text{m/h}$) e baixa tensão residual, sendo possível obter filmes com espessuras de até $10\mu\text{m}$ (Alayo, 1998). Neste trabalho foi utilizada a técnica de microusinagem em substrato para fabricar estas membranas suspensas, desenvolvida pelo Grupo de Novos Materiais e Dispositivos (GNMD) no Laboratório de Microeletrônica (LME) da Escola Politécnica da USP.

Os filmes de SiO_xN_y são fabricados utilizando a técnica de PECVD a partir da mistura apropriada de Silana (SiH_4) e Óxido Nitroso (N_2O) ambos de grau eletrônico (99.999% de pureza) em um reator acoplado capacitivamente. O plasma é ativado por um gerador de RF de 13.56MHz, com uma densidade de energia de 500mW/cm^2 . A temperatura do substrato durante a deposição é de 320°C . O filme é depositado em lâminas quadradas com 25mm de lado e $300\mu\text{m}$ de espessura, monocristalinas de silício (Si), tipo P, dopadas com Boro, com orientação cristalina $\langle 100 \rangle$ e resistividade entre 7 e $13\Omega\text{cm}$. A tensão residual tende a zero quando a relação entre o fluxo de N_2O e SiH_4 tende a 2.5:1 com uma vazão de $15\text{ cm}^3/\text{min}$ de silana (Alayo, 1998).

Na construção do dispositivo, para que o filme de oxinitreto de silício se mantivesse aderido ao substrato durante a etapa de corrosão do silício, é necessário utilizar lâminas polidas nas duas faces. As etapas de fabricação usadas foram as

seguintes:

- deposição de SiO_xN_y por PECVD na face superior;
- deposição de SiO_xN_y por PECVD na face inferior;
- gravação do oxinitreto da face superior em solução de HF;
- gravação do oxinitreto da face inferior em solução de HF;
- corrosão do substrato utilizando solução de KOH.

A Figura 3.1 apresenta um esquema do processo de fabricação desenvolvido no trabalho de Lopes.

Figura 3.1: Processo de fabricação empregado para construir estruturas suspensas apresentado por Lopes.

Deve-se destacar que a estrutura suspensa foi utilizada como máscara para corrosão do substrato, ou seja, não foi necessário acrescentar mais uma etapa para a

deposição de uma camada de proteção para o SiO_xN_y , pois as membranas feitas com SiO_xN_y resistem ao processo de microusinagem quando submersas em uma solução de KOH de 40% a 80°C por 7 horas, mostrando que o SiO_xN_y tem uma alta seletividade com o Si na corrosão com KOH. Têm-se construído estruturas suspensas com dimensões superiores a 2000 μm utilizando este material (Lopes, 2000).

3.2–Caracterização elétrica

Algumas caracterizações elétricas foram realizadas utilizando-se o microprovador e o gerador de pulsos “HP – 3.3 GBPS”, disponíveis no LME e apresentados na Figura 3.2. O microprovador possui pontas de prova que podem ser manipuladas através de parafusos micrométricos e assim, posicionadas sobre os contatos elétricos dos dispositivos. O gerador de pulsos permite aplicar pulsos de corrente elétrica e monitorar a corrente e a voltagem sobre o dispositivo MEMS.

Outros ensaios, no entanto, foram realizados com a montagem experimental que está representada na Figura 3.3. Aplicou-se nos microdispositivos uma diferença de potencial elétrico através de uma fonte variável e mediu-se a voltagem e a corrente (foi utilizado multímetros e osciloscópios). O que permitia calcular a curva característica do comportamento elétrico do dispositivo MEMS.

Em alguns ensaios fez-se esta montagem utilizando o microprovador. Em outros utilizou-se o microscópio do Laboratório de Fenômenos de Superfície da Escola Politécnica da USP (LFS). Para isto, foi construído um porta amostra especial, as Figuras 3.4, 3.5 e 3.6 apresentam a disposição do aparato experimental no LFS.

a)

b)

Figura 3.2: a) Vista do microprovador e gerador de pulsos. b) Detalhe das micropontas e objetivas e objetivas.

Figura 3.3: Diagrama do aparato experimental para caracterização elétrica.

Figura 3.4: Aparato experimental para caracterização elétrica com multímetro, osciloscópio, fonte de alimentação e microscópio com analisador de imagens.

Figura 3.5: Detalhe da montagem da amostra para observação.

Figura 3.6: Porta amostra.

3.3–Métodos de microscopia

Para observar e caracterizar os efeitos devido a atuação dos dispositivos MEMS foram utilizadas as técnicas de microscopia óptica (MO), microscopia de contraste de fase interferencial diferencial Nomarski (CID) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A técnica Nomarski é descrita a seguir por ser de uso menos freqüente que as demais.

A microscopia CID foi inventada na década de 50 por Georges Nomarski (Davidson, 2001). É muito utilizada para aumentar o contraste em imagens de amostras vivas, para análises biológicas, que em geral produzem imagens de baixo contraste quando iluminadas com luz branca.

O princípio da microscopia CID se baseia na interferência causada por dois

feixes de luz originados da divisão de um outro ao atravessar um prisma de Wollaston. Em razão de terem a mesma origem os dois feixes que se interferem são coerentes entre si.

O prisma de Wollaston constitui-se da união de dois prismas feitos de material birrefringente (material cujo índice de refração depende da polarização da luz), polarizados perpendicularmente (ver Figura 3.7). Ao atravessar o prisma, um feixe de luz polarizada em 45° sofrerá desvios diferentes em cada componente devido a birrefringência do material (relativo as direções do prisma), fazendo com que o feixe se divida.

Figura 3.7: Apresenta como o feixe é dividido pelo prisma.

Como apresentado na Figura 3.8, o feixe de luz sai da fonte, é polarizado em 45° . Então, o feixe segue para o prisma de Wollaston, sendo dividido. Assim, passam pela objetiva, refletindo na amostra. A distância entre os dois feixes ao incidir na amostra é menor que a resolução óptica do microscópio. Ao atravessar novamente o

prisma, os feixes são justapostos. Finalmente no segundo polarizador, chamado de analisador, ocorre a interferência dos feixes. Esta técnica de microscopia permite realçar mudanças topográficas na superfície pela formação de franjas na imagem (Haynes, 1984).

Figura 3.8: Apresenta um esquema do sistema Nomarski.

4–Modelagem

4.1–Dispositivo

A caracterização das propriedades termofísicas do material pode ser realizada com um dispositivo como representado na Figura 4.1. Esse dispositivo é constituído de uma microviga suspensa, engastada pelas extremidades. Ao se aplicar uma diferença de potencial elétrico, ocorrerão dilatações na viga em razão do calor gerado.

Figura 4.1: Microdispositivo a ser estudado.

Pode-se calcular as propriedades do dispositivo, mediante a análise das

deformações. Adotaram-se como hipóteses iniciais: o comportamento elétrico do material segue a lei de Ohm; o material é termoelástico linear; suas deformações são descritas pela teoria da flambagem de colunas e toda energia gerada pela potência elétrica aplicada (efeito Joule), é dissipado por condução térmica através do dispositivo.

Ao se aplicar uma diferença de potencial, conforme a lei de Ohm, tem-se a seguinte distribuição de voltagem no dispositivo:

$$U = \frac{-(U_A - U_B)}{L}x + U_A \quad (4.i)$$

Sem perda da generalidade:

$$\begin{aligned} U_A - U_B &= \Delta U \\ U_B &= 0 \\ U &= \Delta U - \frac{(\Delta U)}{L}x \end{aligned} \quad (4.ia)$$

Sabe-se que a potência elétrica gerada por unidade de volume é dada por (efeito Joule):

$$Q = \frac{J^2}{s} \Rightarrow Q = s(-\nabla U)^2 \quad (4.ii)$$

Considere o fluxo unidimensional do calor por condução através do dispositivo (Lei de Fourier), então:

$$q = k \nabla \vartheta \quad (4.iii)$$

$$s(-\nabla U)^2 + k \nabla^2 \vartheta = 0$$

Se o material é termoelástico linear, então a tensão é dada por:

$$\sigma = E(\varepsilon - \alpha \Delta \vartheta) \quad (4.iv)$$

Considere o dispositivo como uma coluna em equilíbrio estático (veja Figura 4.2). Pela conservação do momento da quantidade de movimento verifica-se que:

Figura 4.2: Modelo de estrutura que representa a viga.

$$EI \frac{d^2 v}{dx^2} + V_B (L - x) + P v + M_B = 0 \quad (4.v)$$

Deriva-se duas vezes em relação a x obtendo-se:

$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} + P \frac{d^2 v}{dx^2} = 0 \quad (4.va)$$

A equação (4.v) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{d^4 v}{dx^4} + c_a^2 \frac{d^2 v}{dx^2} = 0 \quad (4.vi)$$

Tal que:

$$c_a^2 = \frac{P}{EI} \quad (4.via)$$

Aplicando a condição de contorno em (4.iii):

$$\vartheta(0) = \vartheta(L) = \vartheta_B \quad (4.vii)$$

A solução será:

$$\vartheta = -\frac{s \Delta U^2}{2kL^2} x^2 + \frac{s \Delta U^2}{2kL} x + \vartheta_B \quad (4.viii)$$

A temperatura média no dispositivo será dada por:

$$\begin{aligned} \vartheta_m &= \frac{1}{L} \int_0^L \vartheta dL \\ \vartheta_m &= \left(\frac{s \Delta U^2}{12k} + \vartheta_B \right) \end{aligned} \quad (4.ix)$$

Considere a equação (4.vi) e o engastamento nas duas extremidades como condição de contorno:

$$v(0) = \frac{dv(0)}{dx} = v(L) = \frac{dv(L)}{dx} = 0 \quad (4.x)$$

Para satisfazer esta equação a solução é da forma:

$$v = A_1 \sin(c_a x) + A_2 \cos(c_a x) + A_3 x + A_4 \quad (4.xi)$$

Aplicando a condição de contorno (4.x) resulta no seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} A_2 + A_4 &= 0 & (4.xii) \\ A_1 c_a + A_3 &= 0 \\ A_1 \sin(c_a L) + A_2 \cos(c_a L) + A_3 L + A_4 &= 0 \\ A_1 c_a \cos(c_a L) - A_2 c_a \sin(c_a L) + A_3 &= 0 \end{aligned}$$

Para que o sistema tenha soluções diferentes da trivial $(A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = 0)$, tem-se a seguinte condição:

$$c_a^2 = 4n^2 \frac{\pi^2}{L^2} \quad n = 1, 2, \dots \quad (4.xii)$$

Isto implica em dizer que a flambagem ocorrerá para determinados valores de força P , chamados de força crítica de flambagem, P_{crit} . Para o caso em que $n=1$ tem-se o primeiro modo de flambagem, obtendo-se (Kumar, 1985):

$$P_{crit} = 4n^2 \pi^2 \frac{EI}{L^2} \quad n=1 \quad (4.xiii)$$

$$v = A_2 \left(\cos\left(2\pi \frac{x}{L}\right) - 1 \right)$$

A partir do modelo apresentado é possível realizar uma experiência com o intuito de medir as propriedades coeficiente de dilatação térmica e condutividade térmica. O procedimento para medir essas propriedades é o seguinte:

- Considera-se duas vigas (viga 1 e viga 2) com parâmetros geométricos diferentes. Medir a mínima voltagem na qual ocorre a flambagem (U_{f1} e U_{f2}) em cada viga.
- Na condição acima, medir a temperatura nas extremidades (ϑ_1 e ϑ_2).
- Sabe-se que $P_{crit} = 4\pi^2 \frac{EI}{L^2} = E\alpha(\Delta\vartheta_m)A_a \Leftrightarrow 4\pi^2 \frac{I}{L^2} = \alpha(\Delta\vartheta_m)A_a$

e que $\vartheta_m = \left(\frac{s\Delta U^2}{12k} + \vartheta_B \right)$, deve-se montar um sistema de equações

utilizando as equações acima para duas vigas diferentes, tal que α e k sejam incógnitas.

4.2–Temperatura no contorno do dispositivo

Para a caracterização das propriedades do material é necessário conhecer a

temperatura no contorno. Uma forma para isso, é por meio da modelagem da região de contorno, que neste caso serão admitidas como aletas infinitas.

Parte-se da equação (4.ii), integrando-a no volume. Tem-se a potência total dissipada pela viga:

$$Q = s(-\nabla U)^2 \Rightarrow Pot = \int_V Q dV \quad (4.xiv)$$

$$\Rightarrow Pot = A \int_x s(-\nabla U)^2 dx$$

$$Pot = A s \int_x \left(\frac{dU}{dx}\right)^2 dx \quad (4.xv)$$

A partir da equação (4.xiv) e (4.xv) tem-se que a potência dissipada da viga para o contorno dada por:

$$Pot = A s \int_x \frac{(U_A - U_B)^2}{L^2} dx \Rightarrow \quad (4.xvi)$$

$$Pot = A s \frac{(U_A - U_B)^2}{L}$$

Por simetria, assume-se que cada extremidade dissipará metade da energia, ou seja, o fluxo de calor dado por:

$$q_v = \frac{1}{2} s \frac{(U_A - U_B)^2}{L} \quad (4.xvii)$$

Como os contornos são aletas infinitas, calor é dissipado para o substrato por condução térmica e para o ambiente por convecção. Considerando a perda de energia para o ambiente como um sorvedouro por unidade de volume do filme, então a equação para condução de calor em regime permanente é dada por:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{Q_c}{k_f} = 0 \quad (4.xviii)$$

Caso a energia dissipada por unidade de volume seja considerada proporcional a diferença de temperatura entre o contorno do dispositivo e a temperatura no ambiente,

tem-se:

$$Q_c = -\frac{h}{b}(\Theta - \Theta_\infty) \quad (4.xix)$$

Desta forma a equação de transferência de calor torna-se:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} - \frac{h(\Theta - \Theta_\infty)}{k_f b} = 0 \quad (4.xx)$$

Utilizando:

$$\begin{aligned} \vartheta_c &= (\Theta - \Theta_\infty) \\ m &= \frac{h}{k_f b} \end{aligned} \quad (4.xxi)$$

A equação torna-se:

$$\frac{\partial^2 \vartheta_c}{\partial x^2} - m \vartheta_c = 0 \quad (4.xxii)$$

Cuja solução é dada por:

$$\vartheta_c = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \quad (4.xxiii)$$

Aplica-se a condição de contorno como a de uma aleta infinita:

$$\begin{aligned} \vartheta_c(0) &= \vartheta_b = (\Theta_b - \Theta_\infty) \\ \vartheta_c(\infty) &= 0 \end{aligned} \quad (4.xxiv)$$

Tem-se como solução:

$$\vartheta_c(0) = \vartheta_b e^{-mx} \quad (4.xxv)$$

Iguala-se o fluxo de calor na extremidade da viga com o fluxo de calor sobre o contorno:

$$\begin{aligned}
 q_v &= \frac{1}{2} s \frac{(U_A - U_B)^2}{L} = k_f \frac{\partial \Theta}{\partial x}_{x=0} \Rightarrow & (4.xxvi) \\
 q_v &= \frac{1}{2} s \frac{(U_A - U_B)^2}{L} = k_f \frac{\partial \vartheta_c}{\partial x}_{x=0} \Rightarrow \\
 \frac{1}{2} s \frac{(U_A - U_B)^2}{L} &= k_f \vartheta_b m e^{-mx}_{x=0} \Rightarrow \\
 \frac{1}{2} s \frac{(U_A - U_B)^2}{L} &= k_f m \vartheta_b \Rightarrow \\
 \vartheta_b &= \frac{1}{2} \frac{s}{k_f m} \frac{(U_A - U_B)^2}{L}
 \end{aligned}$$

Conclui-se que a temperatura na extremidade da viga é proporcional a potência dissipada:

$$\Theta_b = C \frac{b}{L} (U_A - U_B)^2 + \Theta_\infty \quad (4.xxvii)$$

Desta forma é possível determinar a temperatura dos dispositivos projetados com a equação (4.xxvii), pois agora a temperatura do contorno ϑ_b está em função de C , que é mais uma variável no sistema de equações. Para tornar o sistema determinável pode-se acrescentar mais uma equação ao realizar o experimento descrito com mais uma viga de geometria diferente.

5–Desenvolvimento do processo de fabricação

Para o desenvolvimento do trabalho, as seguintes etapas de fabricação foram propostas inicialmente (como está esquematizado na Figura 5.1):

- deposição de oxinitreto de silício na superfície frontal da lâmina;
- deposição de oxinitreto de silício na superfície dorsal da lâmina;
- gravação do oxinitreto na superfície frontal da lâmina;
- gravação do oxinitreto na superfície dorsal da lâmina;
- corrosão úmida do substrato;
- deposição do alumínio;
- gravação do alumínio.

Figura 5.1: Etapas de fabricação inicialmente propostas para serem empregadas no LME.

A partir disso, foram construídas três máscaras, utilizando-se de fotolitos convencionais para artes gráficas, apresentados na Figura 5.2:

Figura 5.2: Primeiras máscaras feitas para o LME. a) Máscaras para gravação do oxinitreto dorsal. b) Máscaras para gravação do oxinitreto frontal. c) Máscara para gravação do Alumínio.

Com as máscaras foram construídas alguns microdispositivos de oxinitreto de silício depositados nas condições apresentadas no capítulo 4. As Figuras 5.3 a 5.11 apresentam várias imagens dos microdispositivos antes da etapa de deposição de alumínio. As vigas dos dispositivos apresentaram uma largura inferior às larguras desenhadas nas máscaras, bem como uma borda irregular como se pode observar em detalhe nas Figuras 5.6 e 5.7. Estas alterações na viga se devem a qualidade das máscaras feitas com fotolitos que não são suficientemente opacas, ocorrendo uma sobre exposição. Observa-se em algumas membranas a formação de blocos de silício em sua superfície posterior (costas) como apresentado nas Figuras 5.10 e 5.11, devido a existência de direções preferenciais de corrosão. O que evidencia a necessidade de se encontrar uma combinação adequada de temperatura, composição da solução de gravação e tempo de processo, pois em uma condição ótima poderia-se eliminar os blocos.

Além das microvigas, também foram construídas outros tipos de estruturas suspensas. Com isto, poderia-se verificar a possibilidade de fabricação de outras geometrias e fazer uma contra-prova dos resultados experimentais obtidos com as microvigas.

Figura 5.3: Microvigas fabricadas por microusinagem em substrato, vistas pelas costas da lâmina (microscopia eletrônica).

Figura 5.4: Uma das microvigas vista pela frente da lâmina (microscopia eletrônica).

Figura 5.5: Um dos microdispositivos visto pelas costas da lâmina (microscopia eletrônica).

Figura 5.6: Detalhe de uma viga pertencente a um dos microdispositivos (microscopia eletrônica).

Figura 5.7: Detalhe de um dos microdispositivos na qual se observa irregularidades na geometria devido a baixa qualidade da máscara (microscopia eletrônica).

Figura 5.8: Vista em perspectiva das vigas que formam um dos dispositivos (microscopia eletrônica).

Figura 5.9: Vista em perspectiva da extremidade de uma das vigas pela frente (microscopia eletrônica).

Figura 5.10: Vista em perspectiva da extremidade de uma das vigas pelas costas (microscopia eletrônica).

Figura 5.11: Vista em perspectiva de um bloco de silício remanescente após o processo de microusinagem do substrato nas costas de uma membrana, evidenciando a anisotropia do processo (microscopia eletrônica).

Foi observado também, que algumas estruturas não resistiram ao processo de fabricação, isto provavelmente ocorre devido as suas grandes dimensões que fazem com que as forças de capilaridade e as tensões residuais atuantes sobre as estruturas sejam muito elevadas.

Nas etapas seguintes do trabalho foram realizadas a metalização e gravação do alumínio. Na gravação do alumínio ocorreu um problema: o fotoresiste, utilizado para proteger as áreas que não seriam corroídas, não se fixava próximo as bordas do microdispositivo, impedindo a formação do circuito elétrico de forma adequada (Figuras 5.12 e 5.13). Para solucioná-lo, resolveu-se alterar as etapas de fabricação como apresentado no esquema da Figura 5.14:

- deposição de oxinitreto de silício na superfície frontal da lâmina;
- deposição de oxinitreto de silício na superfície dorsal da lâmina;
- gravação do oxinitreto na superfície dorsal da lâmina;
- corrosão úmida do substrato;
- deposição do alumínio;
- gravação do alumínio;
- gravação do oxinitreto.

Ao realizar o processo de corrosão do substrato através da exposição por apenas uma das faces foi necessário aumentar o tempo de operação para que a estrutura se torne suspensa, o que levou a uma degradação do filme de SiO_xN_y .

Como não se conseguiu desenvolver um método eficaz para proteger a face frontal da lâmina alterou-se novamente o processo de fabricação, para que fosse realizado a gravação do alumínio por lift-off. A utilização do lift-off produziu um resultado satisfatório, como pode ser visto na Figura 5.15.

Figura 5.12: Observa-se nesta imagem a não fixação do fotoresiste próximo a borda do microdispositivo (microscopia óptica).

Figura 5.13: Observa-se nesta imagem a não fixação do fotoresiste nas vigas (microscopia óptica).

Figura 5.14: Alterações propostas para o processo de fabricação do LME.

Figura 5.15: Gravação do alumínio sobre as membranas suspensas (microscopia óptica).

O processo de fabricação elaborado, permite fabricar microssistemas eletromecânicos suspensos atuados termicamente a um custo baixo, por utilizar fotolitos na confecção de máscaras e filmes que não exigem um controle de contaminação muito elevado.

5.1–Primeiro experimento

A partir dos resultados satisfatórios dos processo de fabricação desenvolvido, uma das lâminas foi selecionada para se realizar os primeiros ensaios, com o objetivo de observar se de fato o fenômeno de flambagem ocorre nas microvigas. Além disto, pretendia-se verificar a possibilidade deste fenômeno ser visto em um microscópio óptico.

Os sinais elétricos em forma de rampa foram aplicados na viga utilizando o gerador de pulsos “HP – 3.3 GBPS” e o microprovador, com valores máximos 10mA,

50mA e 100mA, respectivamente. Observou-se que a viga flambou quando foi aplicada 100mA. Durante o ensaio realizou-se uma aquisição de imagem que foram armazenadas em um computador. Na Figura 5.16 é possível verificar as mudanças de cor na microviga devido a sua deformação.

a)

b)

Figura 5.16: Imagens do primeiro experimento. Comparando a imagem a) com a imagem b) nota-se uma mudança de cor nas extremidades da microviga devido a deformação.

Com este experimento, pode-se concluir que de fato a viga sofre uma flexão quando submetida ao esforço de compressão, sendo possível observar esta deformação por meio de um microscópio óptico.

5.2–Desenvolvimento da segunda série de máscaras

Como consequência da utilização de fotolitos convencionais a um custo baixo para fabricar dispositivos, desenvolveram-se novas máscaras com a finalidade de maximizar o número de dispositivos na lâmina, aumentar o rendimento do processo e

integrar diodos para medição de temperaturas.

Como foi observado, os dispositivos fabricados no primeiro conjunto de máscaras apresentaram muitas irregularidades geométricas (Figura 5.6), para resolver este problema, a segunda série de máscaras foi feita em fotolitos com uma ampliação de 10 vezes. Estas ampliações foram reduzidas em um processo de microfilmagem sobre lâminas de vidro com 2x2 polegadas. A implementação deste processo aumentou a resolução na fabricação das máscaras dando-lhes um acabamento melhor.

A Figura 5.17 apresenta os padrões presentes nas fotomáscaras. A idéia inicial seria modificar o processo de fabricação para acrescentar as etapas de gravação e implantação iônica dos diodos, como sugerido por Peres e outros (Peres, 2000). Porém, não foi possível fabricar os diodos, pois não descobriu-se uma maneira de protegê-los no processo de corrosão por KOH. Algumas possíveis sugestões são a utilização de polímeros a base de teflon (com nome comercial CYTOP) ou uma metalização com ouro, como máscara de proteção durante o processamento. No entanto estas soluções não foram testadas.

Figura 5.17: Padrões presentes no segundo conjunto de máscaras.

Apesar de não se ter fabricado os diodos, o conjunto de máscaras foi utilizado para fabricar dispositivos (utilizando as máscaras dos trilhas de alumínio, das estruturas e das janelas). Durante a fabricação ocorreram erros na metalização (o operador da evaporadora depositou uma camada de espessura superior a $0.5\mu\text{m}$), desta forma o alumínio não foi retirado durante no lift-off. Necessitou-se remover todo alumínio e realizar um novo reprocessamento, o que danificou muitas estruturas.

Uma lâmina foi levada ao microscópio eletrônico antes de ser reprocessada, obtendo-se as Figuras 5.18 a 5.21. Nas imagens obtidas pode-se observar que nem todas as vigas ficaram suspensas e muitas janelas não foram totalmente abertas. Isto ocorreu por serem muito pequenas as dimensões da viga (com dimensões características na ordem de $300\mu\text{m}$). É possível notar uma melhor qualidade no acabamento das bordas da viga, quando comparadas com a Figura 5.6.

5.2.1–Oxidação térmica

Tem-se observado que as lâminas que sofrem oxidação térmica antes da deposição de SiO_xN_y tem uma resistência maior ao ataque de KOH. Isso é devido a proteção do óxido contra a corrosão na lateral da lâmina. Na Figura 5.22 é possível observar a diferença de acabamento devido a utilização do óxido térmico. Desta forma as etapas de processo foram alteradas para que seja incluída a oxidação térmica da lâmina antes de depositar o oxinitreto de silício.

Figura 5.18: Vista em perspectiva dos restos de uma estrutura que não resistiu ao processamento (microscopia eletrônica).

Figura 5.19: Detalhe da microviga fabricada com o segundo conjunto de máscaras (microscopia eletrônica).

Figura 5.20: Corrosão interrompida devido as pequenas dimensões das janelas (microscopia eletrônica).

Figura 5.21: Corrosão interrompida devido as pequenas dimensões das janelas (microscopia eletrônica).

Figura 5.22: a)Borda da lâmina quando não foi oxidada b)Borda da lâmina quando oxidada.

5.3–Desenvolvimento da terceira série de máscaras

A partir da experiência adquirida na fabricação utilizando a série de máscaras anteriores, decidiu-se projetar um novo conjunto. Houve alterações em decorrência das considerações sobre as dimensões mínimas das janelas (neste caso foi adotado $500\mu\text{m}$ como dimensão característica). Tem-se observado nas fabricações que as estruturas mais resistentes são as vigas biengastadas, portanto neste projeto desenvolveram-se dois conjuntos de máscaras: um conjunto somente com vigas e outro com estruturas de diferentes geometrias, com o objetivo de aumentar o rendimento do processo (a relação entre quantidade de microdispositivos fabricados sem defeitos com a quantidade que se pretende fabricar). Neste novo conjunto foi abandonada a idéia de se medir a temperatura com os diodos.

Em razão da anisotropia do processo de corrosão com KOH, as estruturas alinhadas na diagonal com relação as direções cristalinas principais em uma lâmina de

silício <100> podem ficar suspensas sem a necessidade de se realizar a corrosão pelas costas (Hubbard, 1995). Para observar este fenômeno também foram projetadas estruturas dispostas em diagonal e com dimensões característica das janelas inferiores a 500 μ m.

Na Figura 5.23 e 5.24 estão apresentados os dois conjuntos de máscara.

Figura 5.23: Conjunto de máscaras das vigas.

Figura 5.24: Conjunto de máscaras dos dispositivos.

A partir dos resultados, foi estabelecido as seguintes etapas de fabricação para a construção dos microdispositivos esquematizadas na Figura 5.25:

- oxidação térmica da lâmina;
- deposição de oxinitreto de silício na superfície frontal da lâmina;
- deposição de oxinitreto de silício na superfície dorsal da lâmina;
- gravação do oxinitreto na superfície frontal da lâmina;
- gravação do oxinitreto na superfície dorsal da lâmina;
- corrosão úmida do substrato;
- deposição do fotoresiste;
- gravação do fotoresiste;
- deposição do alumínio;
- lift-off do alumínio.

Figura 5.25: Etapas de fabricação estabelecidas.

6–Caracterização elétrica dos dispositivos

Com objetivo de estudar o comportamento elétrico dos dispositivos e definir a faixa de trabalho de voltagem e corrente, foram realizados novos ensaios utilizando os dispositivos do terceiro conjunto de máscaras. Os ensaios foram realizados no LFS, com montagem de bancada no microscópio óptico e no LME, com microprovador.

Os dispositivos analisados são vigas biengastadas com as dimensões descritas na Tabela 6.1. Nas Figuras 6.1 a 6.7 é possível observar nos gráficos, que as curvas não são linhas retas, o que sugere em uma primeira abordagem, que a temperatura e a deformação da estrutura estão afetando a sua resistência elétrica.

Tabela 6.1: Características geométricas das vigas ensaiadas

<i>Denominação</i>	<i>Largura $W(\mu m)$</i>	<i>Comprimento $L(\mu m)$</i>
<i>Viga 1</i>	<i>11.5</i>	<i>1255</i>
<i>Viga 2</i>	<i>13</i>	<i>506</i>
<i>Viga 3</i>	<i>11</i>	<i>960</i>
<i>Viga 4</i>	<i>11.5</i>	<i>1010</i>
<i>Viga 5</i>	<i>11.5</i>	<i>1255</i>
<i>Viga 6</i>	<i>68.5</i>	<i>1060</i>
<i>Viga 7</i>	<i>88.5</i>	<i>1057</i>

Observa-se para as vigas 1, 2, 5, 6 e 7 que em baixas correntes elétricas pode ser aproximado por uma reta. Resultado confirmado para as vigas 3 e 4 que foram submetidas a uma corrente apenas na região linear.

Com intuito de se realizar uma primeira, fez-se uma comparação da resposta experimental do dispositivo com o modelo de resistência elétrica dado pela equação

(6.i) que assume uma variação linear da resistência com a temperatura:

$$R = \frac{\rho L}{A_a} (1 + \alpha_R \Delta \vartheta) \quad (6.i)$$

Sabe-se que:

$$V = Ri \Rightarrow V = \frac{\rho L}{A_a} (1 + \alpha_R \Delta \vartheta) i \quad (6.ii)$$

No dispositivo, a diferença de temperatura depende do efeito Joule, então em analogia aos modelos já descritos (ver equações (4.ix) e (4.xxvii)), onde $\Delta \vartheta$ é uma função linear da potência dissipada, tem-se:

$$\Delta \vartheta \propto Q_{\vartheta} \Rightarrow \Delta \vartheta \propto i^2 \quad (6.iii)$$

Portanto:

$$V = \frac{\rho L}{A_a} (1 + \alpha_R q_R i^2) i \quad (6.iv)$$

Nesta condição seria razoável fazer uma aproximação da curva Vxi por uma equação da forma:

$$V = ai^3 + b_i i \quad (6.v)$$

Como é possível verificar nas Figuras 6.16 a 6.22, no entanto tal modelo foi adequado somente para primeira viga, ocorrendo uma divergência entre os valores medidos e o modelo, a medida que se aumenta a corrente.

Figura 6.1: Gráfico Vxi para viga 1.

Figura 6.2: Gráfico Vxi para viga 2.

Figura 6.3: Gráfico Vxi para viga 3.

Figura 6.4: Gráfico Vxi para viga 4.

Figura 6.5: Gráfico Vxi para viga 5.

Figura 6.6: Gráfico Vxi para viga 6.

Figura 6.7: Gráfico Vxi para viga 7.

Nos ensaios os dispositivos Viga 2, Viga 6, Viga 7, foram submetidos a esforços até a sua falha. As Figuras 6.8 a 6.11 apresentam as imagens dos mesmos após a falha. Observa-se por essas imagens que ocorreram alterações na superfície do material próximas a uma das extremidades da viga e que se caracteriza por haver uma linha transversal interrompendo o circuito.

Nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11 nota-se na região da falha a presença de manchas escuras e bolhas. As manchas aumentam de diâmetro a medida que se afastam da linha transversal escura em direção as bolhas. No caso apresentado na Figura 6.11, em uma distância de aproximadamente 258 μ m, as bolhas de maior diâmetro surgem, formando uma outra linha transversal.

Figura 6.8: Linha transversal característica da falha na Viga 2.

Figura 6.9: Região característica da falha na Viga 6, detalhe superior.

Figura 6.10: Região característica da falha na Viga 6, detalhe inferior.

Figura 6.11: Região característica da falha na Viga 7.

O principal objetivo deste ensaio foi estudar como o material se comporta quando submetido a uma diferença de potencial elétrico. Podendo desta forma estimar as faixas de voltagem que se deve aplicar nos experimentos futuros. Os resultados apresentados aqui, ainda possuem várias imprecisões, por exemplo, devido a mau contato nas micropontas, efeitos de histerese por se carregar e descarregar a amostra,

entre outros fatores ainda desconhecidos. Conclui-se que a faixa de voltagem a ser aplicada nos dispositivos está entre 0V e 2V onde se produzirá uma corrente de 0mA a 50mA dependendo da geometria do dispositivo.

É necessário estudar que fatores estão influenciando a variação da resistência elétrica. Sabe-se que a temperatura é uma fator importante na caracterização da resistividade do material. Porém neste caso, indiretamente a forma como ocorre a transferência de calor e como a estrutura se deforma podem ser determinantes no comportamento elétrico do dispositivo, pois estes fatores influenciam na temperatura alcançada devido ao efeito Joule.

7–Observando a deformação

A imagem na microscopia Nomarski (CID) é formada pela interferência de dois feixes de luz originados no prisma de Wollaston. A diferença de caminho óptico entre os dois raios se deve as propriedades dos pontos de reflexão da luz na amostra.

Suponha uma amostra que tenha uma superfície plana especular. Caso o ângulo de reflexão dos feixes seja 90° , não haverá diferença de caminho óptico entre eles. Independente do comprimento de onda, uma interferência construtiva ocorre entre os raios. No entanto, para um ângulo de reflexão $\beta \neq 90^\circ$, um dos feixes terá uma defasagem em relação ao outro dado por (como pode ser visto na Figura 7.1):

$$\Delta = 2\varepsilon_d \cot(\beta) \quad (7.i)$$

Que pode ser escrito como:

$$\Delta = 2\varepsilon_d \tan(\gamma) \quad (7.ii)$$

Figura 7.1: Diagrama apresentando a influência da inclinação de uma superfície especular na defasagem entre os feixes de luz.

Caso a distância ε_d tenda a zero, pode-se afirmar que a defasagem entre os feixes é dada por:

$$\Lambda = 2\varepsilon_d \frac{\partial F}{\partial \vec{u}} \quad (7.iii)$$

Ou seja, a defasagem é proporcional a derivada da função F , que descreve a superfície especular da amostra, na direção definida pelas projeções dos pontos de reflexão na amostra (ver Figura 7.1):

$$\Lambda \propto \frac{\partial F}{\partial \vec{u}} \quad (7.iv)$$

Caso o feixe seja de luz branca, dependendo da defasagem, ocorrerá interferência construtiva da luz para alguns comprimentos de onda, enquanto que outras sofrerão interferência destrutiva. Pode-se calcular os comprimentos de onda que sofrerão interferência construtiva, sabendo-se que o ângulo de defasagem entre os sinais deve satisfazer a relação:

$$2\pi \frac{\Lambda}{\lambda} = 2\kappa\pi \quad (7.v)$$

para $\kappa = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$

Desta forma, a imagem da microscopia Nomarski, utilizando luz branca, de uma superfície especular será colorida, tal que as linhas isocromáticas coincidirão com as

curvas de nível da derivada da superfície na direção $\vec{u}$. Além disso, quanto maior for o comprimento de onda maior será o módulo da derivada.

Para verificar este modelo de formação da imagem, foi realizado um experimento com uma superfície de referência para calibrar rugosímetros. Esta superfície é feita em aço polido, portanto é especular e possui uma região senoidal como pode ser observado no perfil mostrado na Figura 7.2.

Figura 7.2: Perfil do padrão para aferição de rugosímetros.

Assim, foram obtidas várias imagens da superfície rotacionando-a em relação ao eixo de observação. A Figura 7.3 apresentam as imagens. Em vista dos resultados é possível verificar que existe uma direção tal que a superfície se apresenta monocromática, indicando que a derivada ao longo de toda superfície é constante no caso das Figuras 7.3 c) e 7.3 f). O que de fato ocorre para esta superfície. No caso conclui-se que a direção $\vec{u}$ está a 46.13° da horizontal (ver Figura 7.4).

Figura 7.3: Micrografia Nomarski do padrão de rugosidade, rotacionado em relação ao eixo de observação.

Figura 7.4: Direção $\vec{u}$ de derivação da superfície.

7.1–Experimento com os microdispositivos

Em seguida está apresentado na Figura 7.5 (região onde a curva V_{xi} é linear) e na Figura 7.6 (região onde a curva V_{xi} é não-linear) as micrografias Nomarski da caracterização elétrica referente a Viga 7 da Tabela 6.1. É possível observar que a deformação do microdispositivo se inicia em uma das extremidades indicada pela coloração azul na Figura 7.5 b). Aumentando a voltagem aplicado no microdispositivo, vai se acentuando a deformação, até que em uma região central também começa a mudar de cor. Após a ruptura da corrente elétrica, verifica-se o acúmulo de deformação residual, como é visto na Figura 7.6 d).

a) Voltagem: 5mV

b) Voltagem: 220mV

c) Voltagem: 298mV

d) Voltagem: 500mV

Figura 7.5: Micrografias Nomarski do ensaio de caracterização elétrica da viga 7 (Região Linear).

Figura 7.6: Micrografias Nomarski do ensaio de caracterização elétrica da viga 7 (Região Não-Linear).

Com objetivo de se compreender o modo de deformar da viga, pode-se fazer uma análise qualitativa. A partir das curvas de nível apresentadas nas Figuras 7.5 e 7.6 é

possível aproximar $\frac{\partial F}{\partial \vec{u}}$ por uma função do tipo, como pode ser visto na Figura 7.7:

$$\frac{\partial F}{\partial \vec{u}} = \text{grad} F \cdot \vec{u} = D_1 d_1 \sin(d_1 x + \psi_1) + D_2 d_2 \sin(d_2 y + \psi_2) \quad (7.vi)$$

Sabendo que neste caso a direção de $\vec{u}$ é aproximadamente 45° da horizontal

(ver Figura 7.4). pode-se admitir:

$$\vec{u} \approx \frac{\sqrt{2}}{2} \hat{x} - \frac{\sqrt{2}}{2} \hat{y} \quad (7.vii)$$

ou

$$\vec{u} \approx \frac{-\sqrt{2}}{2} \hat{x} + \frac{\sqrt{2}}{2} \hat{y}$$

Desta forma:

$$F = -\sqrt{2} D_1 \cos(d_1 x + \psi_1) + \sqrt{2} D_2 \cos(d_2 y + \psi_2) \quad (7.viii)$$

ou

$$F = \sqrt{2} D_1 \cos(d_1 x + \psi_1) - \sqrt{2} D_2 \cos(d_2 y + \psi_2)$$

Para dar continuidade a análise qualitativa assume-se:

$$L = 1000 \quad (7.ix)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \vec{u}} = \frac{2\pi}{L} \sin\left(\frac{2\pi}{L} x\right) + \frac{2\pi}{L} \sin\left(\frac{2\pi}{L} y\right)$$

$$\vec{u} = \frac{\sqrt{2}}{2} \hat{x} - \frac{\sqrt{2}}{2} \hat{y}$$

Portanto:

$$F = -\sqrt{2} \cos\left(2\frac{\pi}{L} x\right) + \sqrt{2} \cos\left(2\frac{\pi}{L} y\right) \quad (7.ix)$$

Conclui-se que a microscopia Nomarski permite a visualização da deformação da microviga. Além disso, o modo de deformação da viga é compatível com as previsões teóricas do modelo apresentado no capítulo 4. A Figura 7.7 apresenta o

gráfico das funções F e $\frac{\partial F}{\partial \vec{u}}$, apesar de não ser um resultado quantitativo e não se

saber para que lado a microviga flamba.

a)

b)

c)

d)

Figura 7.7: Análise qualitativa da interferometria Nomarski: a) Imagem típica do experimento; b) Curvas de nível do modelo; c) Modelo da imagem interferométrica; d) Modo de deformar da microviga.

8–Discussão sobre o método de caracterização de propriedades termomecânicas

Nos capítulos anteriores foram apresentados o modelo na qual se baseia o método de medição das propriedades (capítulo 4), o processo de fabricação dos dispositivos MEMS (capítulo 5), de que forma poderiam ser realizadas as medidas elétricas (capítulo 6) e a verificação da ocorrência da flambagem na microviga (capítulo 7). Neste capítulo faz-se uma discussão de como o método pode ser aplicado.

8.1–Medição do coeficiente de dilatação térmica e condutividade térmica

Como apresentado no capítulo 4 é válido na condição de flambagem as seguintes equações:

$$4\pi^2 \frac{I}{L^2} = \alpha (\Delta \vartheta_m) A_a \quad (8.i)$$

$$\vartheta_m = \left(\frac{s \Delta U^2}{12k} + \vartheta_B \right) \quad (8.ii)$$

$$\vartheta_b = C \frac{b}{L} (U_A - U_B)^2 + \Theta_\infty \quad (8.iii)$$

Substituindo (8.i) e (8.ii) em (8.iii):

$$4\pi^2 \frac{I}{L^2} = \alpha \left(\frac{s \Delta U^2}{12k} + C \frac{b}{L} (U_A - U_B)^2 + \Theta_\infty - \Theta_{ref} \right) A_a \Rightarrow \quad (8.iv)$$

$$\frac{s \Delta U^2}{12} \left(\frac{\alpha}{k} \right) + \frac{b \Delta U^2}{L} (C \alpha) + (\Theta_\infty - \Theta_{ref}) \alpha = 4\pi^2 \frac{I}{A_a L^2}$$

Portanto para se determinar α , k e C necessita-se resolver o sistema de equações (8.v) utilizando as informações referentes ao primeiro modo de flambar de três microvigas com diferentes geometrias:

$$\begin{bmatrix} \frac{s \Delta U_1^2}{12} & \frac{b_1 \Delta U_1^2}{L_1} & (\Theta_{\infty 1} - \Theta_{ref1}) \\ \frac{s \Delta U_2^2}{12} & \frac{b_2 \Delta U_2^2}{L_2} & (\Theta_{\infty 2} - \Theta_{ref2}) \\ \frac{s \Delta U_3^2}{12} & \frac{b_3 \Delta U_3^2}{L_3} & (\Theta_{\infty 3} - \Theta_{ref3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left(\frac{\alpha}{k}\right) \\ (C\alpha) \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4\pi^2 \frac{I_1}{A_{a1} L_1^2} \\ 4\pi^2 \frac{I_2}{A_{a2} L_2^2} \\ 4\pi^2 \frac{I_3}{A_{a3} L_3^2} \end{bmatrix} \quad (8.v)$$

Conhecendo os valores de $\left(\frac{\alpha}{k}\right)$, $(C\alpha)$ e α então calcula-se:

$$k = \alpha \left(\frac{\alpha}{k}\right)^{-1} \text{ e } C = \frac{(C\alpha)}{\alpha} \quad (8.vi)$$

8.2–Medição do módulo de elasticidade

Para calcular o módulo de elasticidade as equações (4.vi) e (4.xiii) não são suficientes, pois estas são linearmente dependentes. Uma forma de se solucionar esta questão é aplicar no sistema uma força que não dependa do módulo de elasticidade.

Aplica-se esta força por meio de um carregamento cíclico $P=P(t)$. O que geraria uma força inercial na microviga que pode ser descrita pelo carregamento distribuído:

$$-\tilde{m} A_a \frac{\partial^4 v}{\partial t^2} \quad (8.vii)$$

Desta forma a equação diferencial da viga se torna:

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + P(t) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = -\tilde{m} A_a \frac{\partial^4 v}{\partial t^2} \Rightarrow EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + P(t) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \tilde{m} A_a \frac{\partial^4 v}{\partial t^2} = 0 \quad (8.viii)$$

Estudando (8.viii) para os casos em que a solução seja da forma:

$$v(x,t) = f_n(t) \sin(c_a x + \psi) \quad n=1,2,3,.. \quad (8.ix)$$

Substituindo (8.ix) em (8.viii) :

$$\left(\tilde{m} A_a \frac{d^2 f_n}{dt^2} + EI c_a^4 f_n - P(t) c_a^2 f_n \right) \sin(c_a x + \psi) = 0 \quad n=1,2,3,.. \quad (8.x)$$

Portanto:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 f_n}{dt^2} + \omega^2 \left(1 - \frac{P(t)}{P_{crit}} \right) f_n &= 0 \quad n=1,2,3,.. \quad (8.xi) \\ \omega &= c_a^2 \sqrt{\frac{EI}{\tilde{m} A_a}} \\ P_{crit} &= 4n^2 \pi^2 \frac{EI}{L^2} \end{aligned}$$

Considerando $P(t) = P_o + P_a \cos(Wt)$, a equação se torna:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 f_n}{dt^2} + \Omega^2 (1 - 2\mu \cos(Wt)) f_n &= 0 \quad n=1,2,3,.. \quad (8.xii) \\ \Omega &= \omega \sqrt{1 - \frac{P_o}{P_{crit}}} \\ \mu &= \frac{P_a}{2(P_{crit} - P_o)} \end{aligned}$$

A equação (8.xii) é conhecida como equação de Mathieu (Bolotin, 1964). Esta equação é comum nos problemas de vibração paramétrica, que se caracterizam por ter como uma excitação externa uma variação de um parâmetro do sistema (Cartmell, 1990). Nesta equação, a excitação externa não aparece como uma não-homogeneidade na equação diferencial (Soares, 1992).

No caso dos problemas de estabilidade estrutural mecânica, a aplicação de uma excitação cíclica implica em uma variação da frequência de ressonância da estrutura em função da amplitude do carregamento $P(t)$ (Bolotin, 1964).

Bolotin (Bolotin, 1964) apresenta uma solução aproximada para determinar em que condições de excitação sobre o sistema em que ele se mantém estável. Utilizando-se amplitudes de carregamento para uma determinada frequência inferiores aos pertencentes a região principal de instabilidade tem-se um comportamento estável da estrutura. A região principal de instabilidade é determinada pelo seguinte sistema de inequações:

$$2\Omega \sqrt{1-\mu} \leq W_e \leq 2\Omega \sqrt{1+\mu} \quad (8.xiii)$$

Com valores de $\mu \leq \frac{1}{2}$, é possível utilizar a equação de Beliaev, para se calcular a fronteira da região principal de instabilidade:

$$W_e = 2\Omega \left(1 \pm \frac{\mu}{2} \right) \quad (8.xiv)$$

Pode-se concluir que a região principal de instabilidade é uma função do módulo de elasticidade do material e geometria do sistema. Portanto conhecendo a geometria do sistema e determinando a região principal de instabilidade é possível calcular o módulo de elasticidade.

Propõem-se, um experimento para medir o módulo de elasticidade. Utilizando-se do efeito Joule para se aplicar um carregamento, tem-se para os casos em que o período de excitação seja menor que o tempo de resposta térmico do sistema:

$$\begin{aligned} P(t) &= P_o + P_o \cos(Wt) \\ P_o &= E \alpha (\Delta \vartheta_m) A_a \end{aligned} \quad (8.xv)$$

Portanto:

$$\begin{aligned} \frac{P_o}{P_{crit}} &= \frac{\alpha (\Delta \vartheta_m) A_a}{c_a^2 I} \Rightarrow \\ \frac{P_o}{P_{crit}} &= \frac{\alpha \left(\frac{s \Delta U^2}{12k} + C \frac{b}{L} \Delta U^2 + \Theta_\infty - \Theta_{ref} \right) A_a}{c_a^2 I} \end{aligned} \quad (8.xvi)$$

Dessa forma, verificando por meio da microscopia Nomarski qual é a amplitude mínima, ΔU , para a ocorrência da primeira instabilidade (flambagem no primeiro modo, o que significa $n=1$) em função de um conjunto de frequências, $\frac{W}{2\pi}$, pode-se utilizar o método dos mínimos quadrados para encontrar uma função que

descreva $W_e = W_e \left(\frac{P_o}{P_{crit}} \right)$ baseado na equação (8.xvii), com o objetivo de se calcular

ω :

$$\begin{aligned}
 W_e &= 2\Omega \left(1 - \frac{\mu}{2}\right) & (8.xvii) \\
 \Omega &= \omega \sqrt{1 - \frac{P_o}{P_{crit}}} \\
 \mu &= \frac{P_o}{2(P_{crit} - P_o)} = \frac{\frac{P_o}{P_{crit}}}{2\left(1 - \frac{P_o}{P_{crit}}\right)}
 \end{aligned}$$

Sabendo que:

$$\begin{aligned}
 \omega &= c_a^2 \sqrt{\frac{EI}{\tilde{m} A_a}} = 4 \frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\tilde{m} A_a}} \Rightarrow & (8.xviii) \\
 E &= \frac{\tilde{m} A_a}{I} \left(\frac{\omega L^2}{4\pi^2} \right)^2
 \end{aligned}$$

Portanto, para se determinar o módulo de elasticidade, precisa-se apenas conhecer a densidade do filme, a geometria do sistema e as condições para a flambagem dinâmica. As conclusões desta análise indicam que a determinação do deslocamentos sugeridos no trabalho de Guimarães e outros (Guimarães, 2001) não são necessárias. Isto decorre do fato que o modelo de instabilidade dinâmica é uma generalização do modelo de flambagem.

9–Estudo das microvigas após a falha

Após a realização dos ensaios de caracterização elétrica e a análise da deformação pela técnica Nomarski, foram realizadas sessões de microscopia eletrônica com o objetivo de estudar as alterações superficiais causadas pelo aquecimento e deformação da microviga. Algumas formações se repetiram em muitas microvigas, como a presença de trincas, bolhas e esferas. As Figuras 9.1 a 9.11 apresentam um conjunto de imagens com as alterações superficiais das microvigas.

A maioria das alterações superficiais ocorrem em uma região a uma distância de aproximadamente $\frac{3}{4}$ do comprimento total de uma das extremidades da microviga, o que se nota nas Figuras 9.3 e 9.4. A Figura 9.2 apresenta uma imagem estereoscópica da Figura 9.1 (um anáglifo) que permite observar o relevo das bolhas e esferas. Em microvigas com larguras inferior a $20\mu\text{m}$ houve a formação de uma textura semelhante a uma pele se descascando, apresentado nas Figuras 9.4 e 9.5. Em alguns casos também ocorreram alterações semelhantes a erupções na região central da viga, como apresentado na Figura 9.11.

Figura 9.1: Detalhe das regiões mais danificadas após a falha da microviga. Nota-se na região I as trincas, observa-se pequenas esferas na região II e as bolhas na região III (MEV).

Figura 9.2: Análogo da Figura 9.1 o que possibilita verificar o relevo das bolhas e esferas (MEV).

Figura 9.3: Imagem apresentando a formação de bolhas (MEV).

Figura 9.4: Formação semelhante um “descascamento” da microviga (MEV).

Figura 9.5: Detalhe do “descascamento” da microviga (MEV).

Figura 9.6: Detalhe da formação das bolhas (MEV).

Figura 9.7: Formação de bolhas e esferas sobre a superfície.

Figura 9.8: Detalhe das esferas (MEV).

Figura 9.9: Detalhe da formação bolhas (MEV).

Figura 9.10: Detalhe de uma trinca (MEV).

Figura 9.11: Formação eruptiva presente no centro de algumas microvigas após a falha (MEV).

Dentre estas ocorrências analisa-se uma hipótese para formação de bolhas.

Sabe-se que o filme de oxinitreto utilizado neste trabalho contém Hidrogênio em uma concentração de aproximadamente 10% (Alayo,2002). O estudo de Beyer (Beyer, 1988) em Silício Amorfo mostra que o Hidrogênio presente neste tipo de material sofre um processo de efusão quando aquecido em temperaturas superiores a 300°C. Além disto este processo de efusão é intensificado quando o Silício Amorfo está ligado com Germânio, Carbono ou Nitrogênio (este é o caso do Oxinitreto de Silício).

Também é conhecido o fenômeno de fragilização que o Hidrogênio produz em metais (Wert, 1978) e que o este elemento tende a se concentrar em regiões com um campo de tensões de tração.

Baseado nestas informações, a hipótese proposta é que o aquecimento durante a atuação do sistema, provoca a efusão do Hidrogênio que se acumula na interface entre o Alumínio e o Oxinitreto de Silício e também se difunde através do Alumínio. Este fenômeno pode estar contribuindo para a formação de bolhas.

10–Últimas discussões, sugestões para futuros trabalhos e conclusões

Neste trabalho foram apresentados resultados referentes a modelagem, fabricação, caracterização e análise de falhas em microssistemas.

Apesar de não ter sido realizada nenhuma medida das propriedades termomecânicas (condutividade térmica, coeficiente de dilatação térmica e módulo de elasticidade), o trabalho apresenta as dificuldades e o potencial das ferramentas utilizadas para implementar o método.

A modelagem apresenta a ocorrência do fenômeno de instabilidade estrutural de uma microviga quando atuada termicamente. Também mostra como este fenômeno pode ser utilizado para caracterizar propriedades do material. Além disso, mostra como os efeitos dinâmicos podem influenciar no comportamento da microviga quanto a flambagem. É preciso verificar por meio de experimentos em que condições os modelos são válidos. Também é necessário desenvolver modelos que levem em consideração o fato do material ser compósito. Bem como, realizar simulações numéricas (elementos finitos) para uma melhor compreensão dos comportamento mecânico.

Em relação a fabricação, este trabalho contribui mostrando que os filmes de Oxinitreto de Silício podem ser utilizados como material estrutural na fabricação de dispositivos MEMS. No entanto ainda é preciso otimizar algumas etapas de processo como a corrosão e o lift-off. Uma sugestão é a substituição do Alumínio por Cromo coberto com Ouro, que por terem uma maior resistência ao KOH, permitiriam realizar a etapa de gravação do circuito elétrico antes da corrosão do Silício. Melhorando o rendimento do processo.

Na caracterização obteve-se algumas medidas preliminares que produziu algumas informações qualitativas sobre o comportamento elétrico. Pode se verificar que

a microscopia Nomarski indica o modo de deformação de uma microestrutura. Será necessário realizar medidas mais precisas para caracterização elétrica e melhorar a aplicação da microscopia Nomarski para uma identificação com maior resolução dos pontos em que se iniciam a flambagem.

Na análise de falhas observou-se a formação de alterações características na superfície da microviga (bolhas, esferas e trincas). Em trabalhos futuros será necessário compreender quais mecanismos estão presentes na formação da falha, se o Hidrogênio realmente produz algum efeito catalisador e quais são os efeitos da temperatura e da deformação.

Com esta etapa concluiu-se um ciclo clássico de projeto em engenharia mecânica iniciando-se na concepção (modelagem), construção, utilização, análise de falhas e retornando a modelagem (concepção) para dar continuidade a espiral de projeto.

O trabalho se mostrou frutífero por discutir questões cruciais para o desenvolvimento de projetos de dispositivos MEMS: comportamento mecânico e análise de falhas. Apresentando técnicas que poderiam ser utilizadas no estudo destas questões e fenômenos que podem ocorrer durante o funcionamento dos dispositivos.

11–Bibliografia

11.1–Referências bibliográficas

1. Alayo, M. I.; Pereyra, I.; Carreño, M. P. Thick SiO_xN_y and films obtained by PECVD technique at low temperatures. **Thin Solid Films**, n.332, p.40–45, 1998.
2. Alayo, M. I.; Pereyra, I.; Scopel, W. I.; Fantini, M. C. I. On the nitrogen and oxygen incorporation in plasma–enhanced chemical vapor deposition (PECVD) SiO_xN_y films. **Thin Solid Films**, n.402, p.154–161, 2002.
3. Beyer, W. Hydrogen Evolution a–Si:H and a–Si Alloys. In: **INSPEC Properties of Amorphous Silicon**. London, INSPEC, 1989. p.30–33. (EMIS Datareviews Series: No. 1)
4. Bolotin, V. V. **The Dynamic Estability of Elastic Systems**. San Francisco, Holden–Day, Inc., 1964. (Holden–Day Series in Mathematical Physics)
5. Cartmell, M. Introduction to Linear, **Parametric and Nonlinear Vibrations**. London, Chapman and Hall, 1990.
6. Conant, R. A.; Muller, R. S. Cyclic Fatigue Testing of Surface–Micromachined Thermal Actuators. In: 1998 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, CA , USA, 1998. **Anais**. Anaheim, ASME, v. 66, p.273–277.
7. Davidson, M. W.; Abramowitz, M. Optical Microscopy. / Trabalho obtido no endereço <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/opticalmicroscopy.html> , 2001/
8. El–Kholi, A. The Deep X–Ray Lithography Step of the Liga Process. In: V Escola Brasileira de Microeletrônica, LNLS, Brasil, 1999. **Anais**. SBMICRO, n.4.
9. Ferreira, L. O. S. Introdução à Tecnologia LIGA. In: V Escola Brasileira de Microeletrônica, LNLS, Brasil, 1999. **Anais**. SBMICRO n.3,
10. Guimarães, M. S.; Sinatora, A.; Alayo, M. I.; Pereyra, I.; Carreño, M. N. P.; Mechanical and thermophysical properties of PECVD oxynitride films measured by MEMS. **Thin Solid Films**, n.398–399, p.626–631, 2001.
11. Gupta, P. K.; Walowit, J. A. Contact Stresses Between an Elastic Cylinder and Layered Elastic Solid. **Trans. of the ASME– J. Of Lubrication Technol.**, n.96, p.250–257, 1974.

12. Haynes, R. **Optical Microscopy of Materials**. Glasgow, International Textbook Company, 1984.
13. Hubbard, T. J.; Antonsson, E. K. Emergent Faces in Crystal Etching. / Trabalho obtido no endereço <http://www.design.caltech.edu/Research/MEMS/uMachine.html>, 1995/
14. Komvopoulos, K.; Yan, W. A Fractal Analysis of Stiction in Microelectromechanical Systems. **Journal of Tribology**, n. 119, p.391–400, jul. 1997.
15. Kumar, A. **Stability of structures**. New Delhi, Tata MacGraw–Hill, 1985.
16. Lopes, A. T.; Alayo, M. I.; Carreño, M. N. P.; Pereyra, I. Fabrication of self-sustained membranes using PECVD SiO_xN_y Films. In: XV International Conference on Microelectronic and Packaging, Manaus, AM, Brasil, set. 2000. **Anais**. Manaus, SBMICRO, p.327–330.
17. Lucas, S. **Étude de Faisabilité de Micro–Interrupteurs en Silicium Polycristallin à Commande Électrostatique, Dédiés à des Dispositifs Micro–Ondes Planaires**. France, 1998. 158p. Tese (Doutorado) – Université de Rennes I.
18. Madou, M. **Fundamentals of Microfabrication**. Boca Raton, CRC Press, 1997.
19. Mehregany, M.; Zorman, C. A. Surface Micromachining: A Brief Introduction. **MRS Bulletin**, n.4, v.26, p.289–290, abr. 2001.
20. Morimoto, N. Deposição de Filmes Finos. In: V Escola Brasileira de Microeletrônica, LNLS, Brasil, 1999. **Anais**. SBMICRO n.8.
21. Obermeier, E. Mechanical and Thermophysical Properties of Thin Film Materials for MEMS: Techniques and Devices. In: Material for Mechanical and Optical Microsystems, Boston, USA, dez. 1996. **Anais**. Materials Research Society Symposium Proceedings n.444, p.39–57, 1997.
22. Panepucci, R. R. Litografia para Microfabricação. In: V Escola Brasileira de Microeletrônica, LNLS, Brasil, 1999. **Anais**. SBMICRO n.2.
23. Peres, H. E. M.; Peixoto, N. L. V.; Fernandez, F. J. R.; Localized Temperature Control in Silicon Microstructures for Neural Culture. In: XIV International Conference on Microelectronic and Packaging, Campinas, SP, Brasil, 1999. **Anais**. Campinas, SBMICRO, p.264–267.
24. Pimentel, M. B. C.; Eleutério Filho, S.; Pavani Filho, A. Metrologia de Microssistemas. In: V Escola Brasileira de Microeletrônica, LNLS, Brasil, 1999.

Anais. SBMICRO n.14.

25. Ribas, R. P. Microssistemas: Fabricação e Aplicações. In: V Escola Brasileira de Microeletrônica, LNLS, Brasil, 1999. **Anais.** SBMICRO n.5.
26. Soares, M. E. S. **Excitação paramétrica em sistemas com um grau de liberdade.** São Paulo, Brasil, 1992. 101p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
27. Suresh, S.; Giannakopoulos, A. E.; A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation. **Acta mater.**, v.46, n.16, p.8755–5767, 1998.
28. Sze, S. M. **Semiconductor Sensors.** New York, John Wiley, 1994.
29. Verdonck, P.; Mansano, R. D. Corrosão por Plasma para Aplicações em Micromecânica. In: V Escola Brasileira de Microeletrônica, LNLS, Brasil, 1999. **Anais.** SBMICRO n.6.
30. Wert, Ch. A. Trapping of Hydrogen in Metals. In: Alefeld, G.; Völkl, J. **Hydrogen in Metals Application, Oriented Properties.** New York, Springer Verlag, 1978. p.304–331.
31. Yi, T.; Kim, C. J. Measurement of Mechanical Properties for MEMS Materials. **Meas. Sci. Technol.**, n.10, p.706–716, 1999.

11.2–Bibliografia consultada

32. Abe, T.; Messner, W. C.; Reed, M. L. Effects of Elevated Temperature Treatments in Microstructure Release Procedures. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 4, n.2, p.66–74, jun. 1995.
33. Àssy, T. M. **Mecânica dos Fluidos.** São Paulo, Plêiade, 1996.
34. Burnham, N. A.; Behrend, O. P.; Oulevey, F.; Gremaud, G.; Gallo, P. J.; Gourdon, D.; Dupas, E.; Kulik, A. J.; Pollock, H. M.; Briggs, G. A. D. How does a tip tap? **Nanotechnology**, n.8, p.67–75, 1997.
35. Cottrell, A. H. **Introdução à Metalurgia.** Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1975.
36. Field, Leslie Ann **Fluid–Actuated Micromachined Rotors and Gears.** California, USA, 1991. 195p. Dissertação (Doutorado) – Graduate Division of the University

of California at Berkeley,

37. Furlan, R.; Simões, E. W. Introdução à Microfluídica. In: V Escola Brasileira de Microeletrônica, LNLS, Brasil, 1999. **Anais. SBMICRO** n.11.
38. Gane, N.; Skinner, J. The Friction and Scratch Deformation of Metals on a Micro Scale. **Wear**, n.24, p.207–217, 1973.
39. Gere, J. M.; Timoshenko, S. P. **Mechanics of Materials**. Boston, PWS Publishing Company, 1997.
40. Hayt Jr., W. H. **Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1983.
41. Hutchings, I. M. **Tribology Friction and Wear of Engineering Materials**. London, Edward Arnold, 1992.
42. Incropera, F. P.; de Witt, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1992.
43. Israelachvili, J. N. **Intermolecular and Surface Forces**. London, Academic Press, 1985.
44. Johnson, K. L. **Contact Mechanics**. Cambridge, Cambridge University Press, 1985.
45. Landman U.; Luedtke W. D.; Burnham N. A.; Colton R. J. Atomistic Mechanism and Dynamics of Adhesion, Nanoindentation, and Fracture. **Science**, n.248, p.454–461, 1990.
46. Lüth, H. **Surfaces and Interfaces of Solid Materials**. Berlin, Springer–Verlag, 1995.
47. Mastrangelo, C. H.; Hsu, C. H. Mechanical stability and adhesion of microstructures under capillary forces – Part I: Basic theory. **Journal of Microelectromechanical Systems**, n.1, v.2, p.33–43, mar. 1993.

48. Modin, H.; Modin, S. **Metallurgical Microscopy**. London, Butterworths, 1973.
49. Murarka, S. P.; Retajczyk Jr., T. F. Effect of phosphorous doping on stress in silicon and polycrystalline silicon. **J. Appl. Phys.**, v.54, n.4, p.2069–2072, abr. 1983.
50. Persson, B. N. J. **Sliding Friction: Physical Principles and Applications**. Heidelberg, Springer, 1998. (Series in Nanoscience and Technology)
51. Rodrigues, R. J. **Microsensor de Vazão Implementado em Silício**. São Paulo, Brasil, 1999. 95p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
52. Yang, Y.; Wang, X.; Ren, C.; Xie, J.; Lu, P.; Wang, W. Diamond Surface Micromachining Technology. **Diamond and Related Materials**, n.8, p.1834–1837, 1999.

11.3–Referências na WWW

53. <http://mems.cwru.edu/memsnet/index.html>
54. <http://qa-web.jpl.nasa.gov/quality/aip/mems.html-ssi#MEMS>
55. http://www.ccm.ecn.purdue.edu/database/thin_films/DLC.htm
56. <http://www.dbanks.demon.co.uk/ueng/what.html>
57. <http://www.ee.surrey.ac.uk/Personal/D.Banks/roughgui.html#def>
58. <http://www.opticsnotes.com>
59. <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/techniques/dic/dicintro.html>