



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-16671-RPQ/848

GIROSCÓPIOS MEMS

Neisy Amparo Escobar Forhan

Relatório técnico-científico de pesquisa supervisionado por Paulo Giácomo Milani e
José Roberto Sbragia Senna.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/01.25.18.42>](http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/01.25.18.42)

INPE
São José dos Campos
2010

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivêca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-16671-RPQ/848

GIROSCÓPIOS MEMS

Neisy Amparo Escobar Forhan

Relatório técnico-científico de pesquisa supervisionado por Paulo Giácomo Milani e
José Roberto Sbragia Senna.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/01.25.18.42>](http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/01.25.18.42)

INPE
São José dos Campos
2010

RESUMO

Este trabalho discute diferentes tipos de giroscópios que utilizam a tecnologia de sistemas microeletromecânicos (MEMS) para sua fabricação. Esta tecnologia vem sendo usada nos últimos anos para a fabricação de sensores e atuadores em diversos nichos de aplicação no mercado de consumo de dispositivos portáteis, de componentes, e de sistemas robóticos; assim como no setor automotivo terrestre, aquaviário e aeroespacial, este último, assunto específico de nosso interesse. Todos os tipos de giroscópios MEMS discutidos aqui são baseados em excitar (atuar) um movimento periódico em um corpo de prova e detectar os deslocamentos causados pela aceleração de Coriolis agindo sobre essa massa de prova. São apresentadas as equações que descrevem o movimento da estrutura, assim como as equações relacionadas aos mecanismos de atuação eletrostática e de detecção capacitiva do deslocamento produzido pelo efeito de Coriolis. Apontam-se os principais efeitos secundários associados a estes mecanismos e é feita a estimativa do amortecimento, que é um parâmetro importante para a análise da dinâmica da estrutura. São discutidos os materiais e técnicas de fabricação mais utilizadas para a fabricação de giroscópios MEMS, tomando como ponto de partida os métodos e parâmetros disponíveis na literatura e oferecidos em especificações tanto de algumas empresas que comercializam equipamentos de corrosão quanto das envolvidas em pesquisas de materiais e microfabricação. É analisado o estado da arte das tecnologias disponíveis para o desenvolvimento de sensores inerciais MEMS, e as necessidades para a obtenção de sensores com desempenho adequado para aplicações espaciais. Discute-se o uso de silício monocristalino e da corrosão profunda por plasma como os materiais e processos mais promissores para essas aplicações.

ABSTRACT

This report discusses different types of gyroscopes made using microelectromechanical systems (MEMS) technology. This technology has been used in the last years for the fabrication of sensors and actuators in many application niches within the portable devices market, in components, in robotic systems, and in the ground, water and aerospace transportation sectors, this last one being our specific interest. All MEMS gyroscopes discussed here are based in exciting periodic motion in a proof mass and detecting the displacements caused by the Coriolis acceleration acting on this proof mass. Equations are presented describing the motion of the structure, as well as those pertaining to the electrostatic actuation and capacitive detection of the displacement caused by the Coriolis effect. The main second-order effects associated with those mechanisms are pointed out, and the estimate of damping is made, this being an important parameter for dynamical analysis of these structures. The materials and fabrications techniques most commonly used for the fabrication of MEMS gyroscopes are discussed, starting from the methods and parameters available in the literature and data both from companies selling etching equipment and from those involved in materials research and microfabrication. The state-of-the-art of the fabrication technologies available for the development of MEMS inertial sensors, and the requirements for obtaining sensors with adequate performance for space applications are analyzed. The use of monocrystalline silicon and deep reactive ion etching as the most promising material and process for these applications is discussed.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

1	Introdução	11
2	MEMS, definição	17
3	Giroscópios MEMS	19
3.1	Tipos de giroscópios MEMS	27
4	Fabricação.	33
4.1	Tecnologias e técnicas de microfabricação	34
4.2	Tecnologia de processos específicos	34
4.3	Tecnologia de processos compatíveis com a fabricação de circuitos integrados.....	35
5	Material	39
6	DRIE, especificações	43
7	Estrutura	47
8	Ruído termo-mecânico	55
9	Mecanismos de atuação e detecção	57
9.1	Atuação	58
9.2	Detecção	59
10	Atuação eletrostática	61
11	Detecção capacitiva.....	69
12	Estimativa do amortecimento.....	71
13	Conclusão.....	75
14	Referências.....	77

LISTA DE FIGURAS

3.1 - Oscilador mecânico representado como um sistema massa-mola-atrito com dois graus de liberdade.....	20
3.2 - Representação esquemática de um oscilador mecânico.	24
3.3 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura de um protótipo de giroscópio diapásão, com atuação do tipo <i>comb drive</i> fabricado em silício cristalino pelo processo de dissolução da lâmina de silício.....	28
3.4 - Giroscópio roda oscilante com sensores capacitivos para detectar rotações em dois planos axiais.	29
3.5 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura de um giroscópio tipo pêndulo de Foucault (<i>Clower leaf</i>).	30
3.6 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura de um giroscópio tipo anel ressonante.....	31
3.7 - Giroscópios de estruturas ressonantes.	32
7.1 - Sistemas de suspensão: a), b), d), e d) estruturas de apenas uma massa (massa inercial); e e) e f) estruturas com uma massa inercial e massas independentes para a atuação e a detecção.	51
7.2 - a) Desenho do giroscópio de estrutura simétrica e desacoplada, b) Imagem de microscopia eletrônica de varredura desta estrutura fabricada, mostrando sistema de detecção e suspensões.....	52
7.3 - Barra de flexão fixa em um extremo e “guiada” no outro.....	53
10.1 - Vista lateral de um atuador de placas paralelas com tensão controlada, onde x_0 é a separação entre as placas para uma tensão aplicada igual a zero e A é a área de cada placa.....	61
10.2 - Atuador tipo “pente” com controle de tensão. Espaçamento inicial x_0 para um V nulo.	64
11.1 - Detecção capacitiva diferencial em um oscilador.	69
12.1 - a) Amortecimento por fluxo de Couette (<i>Couette flow damping</i>), quando as duas placas se deslocam uma em relação à outra em paralelo. b) Amortecimento por compressão de filmes (<i>squeeze film damping</i>), quando as duas placas se aproximam uma da outra.	71

1 Introdução

Durante muitos anos o setor automotivo tem sido um mercado de crescimento para os sensores inerciais. No entanto, tanto este setor quanto toda a indústria aplicada ao consumo de equipamentos eletroeletrônicos, que também emprega estes dispositivos, continuam a mudar e a defrontar novas oportunidades e desafios. Por outro lado, todas as atividades espaciais e de transportes em geral, incluindo o lançamento em órbita de satélites artificiais e a sua operação, o sensoriamento sísmico de alta resolução, o transporte de bens e valores, e a capacidade militar de defesa, dependem de navegação confiável e precisa. Isto tanto para a navegação de veículos aeroespaciais quanto para terrestres e aquaviários.

A implementação de sistemas de navegação inercial depende fundamentalmente de dois tipos de sensores inerciais: o acelerômetro e o giroscópio. Acelerômetros determinam as acelerações do centro de massa do veículo, através das quais se obtém as forças específicas que agem sobre o mesmo; os giroscópios determinam as velocidades angulares do corpo ao qual estão fixados e, por conseguinte, a orientação do veículo em relação à sua trajetória. Com estes dados e as equações de movimento dadas pelas leis de Newton, é possível computar a trajetória do veículo em tempo real, saber sua posição e atitude, e efetuar as correções pertinentes.

Dispositivos como estes são também amplamente usados em sistemas mecânicos robóticos, e automobilísticos. Outro importante nicho de aplicação consta no mercado de consumo de dispositivos portáteis: GPS (*Global Positioning System*), estabilizadores em câmaras digitais e telefones celulares, periféricos de computadores, PDAs, notebooks; e de componentes como: controles remotos, controladores de jogo, ferramentas para a indústria biomédica, etc. [1]. As aplicações médicas de unidades inerciais para aplicações ao movimento humano e para a estimulação elétrica funcional dos membros superiores, já estão sendo implementadas [2].

São vários os princípios físicos utilizados ao longo dos anos para a fabricação de dispositivos inerciais. A fabricação de giroscópios, dispositivo em que este estudo estará centrado, está fundamentalmente baseada em princípios ópticos, onde se inclui o giroscópio a fibra ótica (*Fiber-Optic Gyro - FOG*) e o RLG (*Ring Laser Gyro*); e em princípios mecânicos e eletromecânicos, que incluem os giroscópios ressonantes de quartzo e os DTG (*Dynamically Tuned Gyros*).

Os giroscópios eletromecânicos de precisão dependem de uma tecnologia de mecânica fina quase artesanal, pois exigem um sistema com eixo central com algum tipo de rolamento e sistema de suspensão com barras de torção que permitam o movimento de rotação e o movimento em duas direções ortogonais. A aquisição destes dispositivos de alta precisão é controlada comercialmente pelos países que detêm a tecnologia. Os dispositivos com princípios ópticos têm sido desenvolvidos no Brasil, para as aplicações que requerem de alta precisão, como uma maneira de contornar as dificuldades na aquisição de dispositivos eletromecânicos. O FOG tem tido especial destaque para aplicações táticas de baixo e médio desempenho, além das aplicações comerciais, em virtude de suas características físicas, faixa dinâmica, e custo.

Porém, medir a rotação de um corpo rígido ou de um veículo é uma arte que depende diretamente da incerteza máxima permitida no resultado da medida. Quanto menor for este erro, maior o grau de desempenho do giroscópio e, portanto, maior será o grau de sofisticação tecnológica do instrumento. Assim, para aplicações de navegação de veículos aeroespaciais e estratégicas em geral, os requerimentos de desempenho encontram-se entre $0,01^\circ/\text{h}$ e $0,001^\circ/\text{h}$ [3, 64, 66], o que envolve tecnologias e princípios eletromecânicos avançados.

Ao mesmo tempo, um dos desafios das pesquisas espaciais é a redução da massa dos satélites para diminuir os custos do seu lançamento, mas sem comprometer a qualidade e resistência da estrutura. Como os custos quase sempre são proporcionais ao peso, precisa-se de materiais e componentes mais leves e resistentes. As novas tecnologias têm um papel

fundamental, não somente na redução do peso e tamanho, senão também na redução do consumo de energia de pequenos satélites, particularmente quando se trata da fabricação de nano e pico satélites, constelações de pequenos satélites (nanosatélite de 1 a 10Kg e picosatélite de 0,1 – 1Kg), e de satélite em um chip (menor que 100g). A razão para se fabricar satélites miniaturizados é a enorme redução do custo do lançamento. Estes podem ser lançados em um grande número ou podem, inclusive, pegar carona em veículos lançadores de grande porte. As micro e nanotecnologias apresentam-se, portanto, como possíveis soluções para viabilizá-los.

Desde este ponto de vista, os giroscópios com princípios ópticos empregam circuitos ópticos e eletrônicos que podem ser integrados num mesmo substrato e anexados a uma bobina de fibra óptica que representa o elemento sensor, como no caso dos FOGs. Porém, o efeito Sagnac, utilizados nestes dispositivos, depende do comprimento e do diâmetro do caminho percorrido pela luz na bobina; a redução das dimensões do dispositivo como um todo estará limitada e dispositivos muito pequenos terão o seu desempenho comprometido.

Neste contexto, a tecnologia microeletromecânica, doravante chamada apenas de MEMS, mostra-se como um desafio para o desenvolvimento de dispositivos eletromecânicos inerciais de alta precisão. Dispositivos inerciais fabricados com tecnologia MEMS têm razoáveis vantagens em relação aos dispositivos convencionais (não MEMS). Isto é o resultado de uma combinação do baixo custo de fabricação (para grandes escalas de produção), tamanho compacto, pouco peso, baixo consumo, alta confiabilidade, e inteligência aumentada.

Desde que foi divulgado o primeiro giroscópio MEMS em 1991 pelo Draper Lab. [4], são muitas as pesquisas realizadas com o fim de desenvolver dispositivos inerciais com base à tecnologia MEMS. Os acelerômetros foram os primeiros a serem desenvolvidos e atualmente são comercializados em grande escala. Espera-se que os giroscópios em MEMS obtenham o mesmo sucesso. Por outro lado, a dinâmica de um giroscópio microeletromecânico é muito mais complexa que a de um acelerômetro. Este último pode

ser representado por um sistema linear de um grau de liberdade enquanto que o giroscópio precisa ser modelado por um sistema de equações diferenciais acopladas de múltiplos graus de liberdade.

Esta tecnologia aplicada a giroscópios é relativamente nova, provavelmente a inserção deste dispositivo no micromundo represente um dos seus maiores desafios. Em muitos laboratórios, as pesquisas relacionadas a este tema encontram-se em desenvolvimento, e a comercialização de resultados ainda não ocorre em grande escala, especialmente giroscópios de alto desempenho que possam ser empregados em aplicações tácticas de grau inercial. Dispositivos com desempenho adequado para seu uso em aplicações espaciais ainda não são comercializados nem constam na literatura publicada não-controlada. Muito tem a ver com o caráter interdisciplinar do assunto, que envolve conhecimentos de vários campos da física: mecânica de materiais, osciladores mecânicos, mecânica de fluídos, transferência de calor, eletromagnetismo; e outras disciplinas como engenharia química, engenharia mecânica, engenharia elétrica, e engenharia de encapsulamento. Também, a aplicação espacial exige que o projeto leve em consideração conhecimentos específicos do meio onde o dispositivo atuará e das condições às quais é submetido até entrar neste meio. Outro aspecto a citar é que os equipamentos e processos disponíveis, para o desenvolvimento deste tipo de dispositivo, têm sofrido necessárias evoluções para satisfazer às necessidades que as pesquisas vão impondo como exigências, relacionadas aos processos tecnológicos que visam melhoras no desempenho do dispositivo em questão.

Em uma análise sobre produtos MEMS e microsistemas em geral, considerando os anos entre 2005 e 2009, a NEXUS publicou um crescimento no mercado de produtos MEMS de 16% ao ano. Neste período os equipamentos eletroeletrônicos passariam pelo maior crescimento de mercado e superariam a indústria automotiva. Identificou também os sensores inerciais entre os impulsionadores de MEMS na indústria de eletroeletrônicos com aplicações promissoras para acelerômetros e giroscópios [5]. Outras estimativas mostram que até 2011 o mercado de aplicação de dispositivos MEMS experimentará uma taxa de crescimento anual composta por volta de 7%, e que permanecerá assim num futuro

previsível. As principais aplicações são, pela ordem, sensores de pressão, giroscópios, acelerômetros e sensores de fluxo [6].

As pesquisas em micro e nanotecnologia no INPE estão sendo realizadas na divisão de Coordenação de Laboratórios Associados (CTE), especialmente no Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS), e envolvem várias atividades em pesquisa de materiais e dispositivos. Como parte delas e junto à Divisão de Mecânica Espacial e Controle (DMC), este estudo teórico propõe dar início a projetos de desenvolvimento de giroscópios MEMS no INPE.

2 MEMS, definição

De maneira geral, uma estrutura MEMS pode ser entendida como um sistema eletromecânico projetado em escala micrométrica, formada por três partes fundamentais: o sensor (e/ou atuador), a interface analógica para a aquisição, transmissão e amplificação do sinal vindo do sensor (e/ou atuador), e a parte de controle digital e processamento numérico. Uma vez que os circuitos eletrônicos, tanto digitais quanto analógicos, encontram-se em um estágio de desenvolvimento bastante avançado, o principal desafio está na miniaturização e na integração dos sensores (e/ou atuadores) com a eletrônica, assim como em tornar versátil sua arquitetura para poder empregá-la em diversas áreas de aplicação. O microsistema final pode ser apresentado de forma híbrida ou monolítica. Chamamos de híbrida quando a eletrônica está separada, em outro chip, da parte que contém o sensor (e/ou atuador), e de monolítica, quando todas as partes do sistema encontram-se integradas num mesmo chip. Os sistemas monolíticos apresentam maior desempenho, pois com a integração pode ser evitado o problema de interface entre os circuitos, aumentando o rendimento também na fabricação em grandes escalas de produção.

A opção por dispositivos eletromecânicos discretos é apropriada para a fabricação em pequena escala, o que permite diminuir o tempo de desenvolvimento, reduz a interdependência entre as etapas de fabricação da estrutura microsensora e do circuito eletrônico de processamento, e facilita a etapa de teste de avaliação da estrutura e do circuito. Também, possibilita a modificação de parâmetros de projeto conforme especificações para uma determinada aplicação ou mesmo modificações que possam resultar em melhoras no desempenho do dispositivo. O encapsulamento híbrido, contendo chips separados para a aquisição e processamento do sinal, é uma solução atualmente comercializada por grande parte das empresas que fabricam sistemas de navegação inercial para aeronáutica. No caso de giroscópios MEMS, a integração da eletrônica é feita somente por algumas empresas, e apenas a primeira etapa da eletrônica de aquisição é integrada. Ademais, pastilhas de circuitos eletrônicos para interfaceamento com vários métodos de

transdução, incluindo o capacitivo que pretendemos abordar neste trabalho, estão disponíveis comercialmente [7].

A total autonomia e domínio dos processos tecnológicos envolvidos na fabricação de dispositivos inerciais MEMS apresenta-se como uma necessidade nos dias atuais, para alcançar o maior índice possível de nacionalização do equipamento empregado nas diferentes aplicações aeroespaciais e de defesa aérea, onde o Brasil tem investido e demonstrado competência comprovada.

A seguir, apresentamos sucintamente alguns aspectos dos principais desenhos e princípios de operação utilizados para a fabricação de giroscópios MEMS, seguido das principais técnicas empregadas para seu desenvolvimento.

3 Giroscópios MEMS

Como já foi dito, um giroscópio é um dispositivo que permite medir a velocidade de rotação de um objeto em torno do centro de rotação; dito de outra forma, quão rápido o objeto gira em relação a um sistema de referência inercial, o que é conhecido como velocidade angular. A velocidade angular pode ser integrada em relação ao tempo para determinar a posição angular do objeto. Dependendo da orientação de montagem, a rotação é medida em relação a um dos três eixos principais do veículo: guinada, arfagem ou rolamento. A montagem de um sensor em determinada orientação permitirá escolher o eixo de medida, assim uma montagem múltipla de três estruturas permite analisar as medidas nos três eixos.

De maneira geral, todos os giroscópios fabricados com tecnologia MEMS favorecem-se do efeito de Coriolis, baseado na transferência de energia entre dois modos principais de oscilação pela combinação de um movimento oscilatório de uma massa e a rotação do sistema que, pelo efeito de Coriolis, imprime na massa um movimento em direção ortogonal à da rotação. Considere-se um objeto de massa m que se move a uma velocidade v com relação a um sistema de referência fixo (plataforma), se esta plataforma gira a uma velocidade angular Ω , o objeto experimentará uma força, denominada de força de Coriolis, e como consequência uma aceleração de Coriolis, iguais a:

$$F_c = 2mv \times \Omega \quad (3.1)$$

$$a_c = 2v \times \Omega \quad (3.2)$$

A medida da velocidade angular é feita utilizando a aceleração de Coriolis.

Embora exista uma extensa variedade de princípios de funcionamento e desenhos estruturais de giroscópios MEMS, a maioria dos publicados na literatura usa um elemento mecânico oscilante para detectar o efeito de Coriolis. Inúmeros trabalhos demonstram que o

conceito de utilizar um elemento oscilante para induzir e detectar o efeito de Coriolis pode ser efetivamente implementado e fabricado, ainda, por diferentes processos micromecânicos, como veremos ao longo deste trabalho.

O princípio de funcionamento radica na detecção do deslocamento provocado na massa oscilante, conhecida como massa inercial ou massa de prova, pela força de Coriolis ao ocorrer uma rotação ortogonal (para osciladores lineares) à oscilação. Tipicamente, a massa de prova suspensa acima do substrato por um sistema de molas formado por barras finas flexíveis é excitada por uma força eletrostática ou eletromagnética externa para oscilar no seu modo principal de vibração (modo de atuação) na frequência de ressonância, de forma a obter-se o máximo ganho e como consequência a máxima sensibilidade. Quando ocorre uma rotação, a massa oscilante experimentará a força de Coriolis que causa uma transferência de energia para um segundo modo de vibração (modo sensor) proporcional à velocidade angular da rotação. O deslocamento da estrutura nesta outra direção, correspondente ao segundo modo de vibração, pode ser detectado por diferentes métodos que serão apresentados mais adiante.

A estrutura pode ser representada de forma simplificada (idealmente) por um sistema massa-mola-atrito com dois graus de liberdade, como mostra a Figura 3.1.

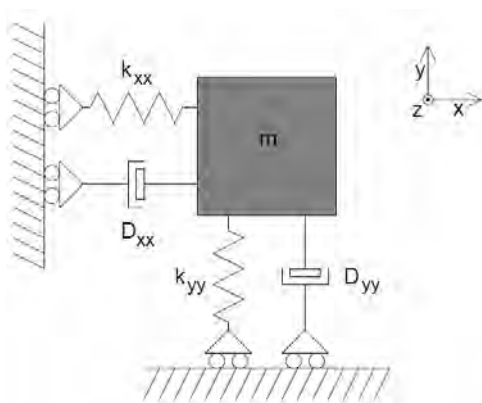


Figura 3.1 - Oscilador mecânico representado como um sistema massa-mola-atrito com dois graus de liberdade.

Idealmente, quando a massa m se movimenta na direção x , as constantes de mola k_{yy} e de atrito D_{yy} não exercem efeito sobre o movimento na direção y , e vice-versa, simbolizado na figura pelas rodinhas. Neste sistema assumimos que as molas não têm massa. A dinâmica do sistema pode ser representada por:

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + k \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = F \quad (3.3)$$

Onde m , D e k são as matrizes da massa, constante de atrito e constante de mola respectivamente; e F é o vetor de força de excitação para a oscilação do sistema. Os termos x e y denotam o deslocamento do oscilador nas direções x e y .

Considerando que a estrutura está composta por sistemas de atuação e detecção independentes (geralmente eletrodos com massas independentes) e que estruturas mais avançadas envolvem movimentos com mais de uma massa, porém, ainda dentro da idealidade, podemos escrever:

$$\begin{bmatrix} m_x & 0 \\ 0 & m_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{xx} & 0 \\ 0 & D_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 \\ 0 & k_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Aqui, F_x e F_y representam as componentes da força de excitação nas direções x e y respectivamente. Este sistema possui frequências de ressonância (ω_{ox} e ω_{oy}) e fatores de qualidade (Q_x e Q_y) independentes para cada direção.

Fazendo uma análise mais simplificada onde desprezamos acoplamentos entre os dois movimentos e atribuímos a cada direção uma dinâmica de apenas um grau de liberdade, teremos:

$$m \ddot{x} + D \dot{x} + k x = F \quad (3.5)$$

Aplicando a transformada de Laplace e reorganizando, obtemos a função de transferência da força para um deslocamento x :

$$H(s) = \frac{x}{F} = \frac{1}{m s^2 + D s + k} = \frac{1/m}{s^2 + (\omega_o/Q) s + \omega_o^2} \quad (3.6)$$

onde ω_o é a frequência de ressonância e Q é o fator de qualidade do oscilador, representados por:

$$\omega_o = \sqrt{k/m} \quad (3.7)$$

$$Q = \sqrt{k m}/D \quad (3.8)$$

Substituindo:

$$s = j\omega = j 2\pi f \quad (3.9)$$

pode ser determinada a magnitude e a fase da função de transferência como uma função da frequência:

$$|H(j\omega)| = \frac{1/m}{\sqrt{(\omega_o^2 - \omega^2)^2 + \omega_o^2 \omega^2 / Q^2}} \quad (3.10)$$

$$\angle H(j\omega) = -\arctan \frac{\omega_o \omega}{(\omega_o^2 - \omega^2) Q} \quad (3.11)$$

A representação gráfica da função de transferência revela uma curva cuja amplitude vai crescendo até atingir seu valor máximo num valor de frequência correspondente à frequência de ressonância. Esta curva representa as principais propriedades qualitativas da função de transferência, a frequência de ressonância e o fator de qualidade. Fazendo uma análise da curva, tomando a derivada da função de transferência, com respeito à frequência,

igualando a zero (valor máximo), podemos determinar a relação entre a frequência de ressonância e o fator de qualidade do oscilador, dado por:

$$\omega = \omega_o \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}} \quad (3.12)$$

assumindo que $Q > 1/\sqrt{2}$, o valor máximo da função de transferência será:

$$\left| H \left(j \omega_o \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}} \right) \right| = \frac{Q}{m \omega_o^2} \frac{2Q}{\sqrt{4Q^2 - 1}} \quad (3.13)$$

Nestas duas equações podemos ver que quando $Q \rightarrow \infty$, a frequência à qual o máximo valor é atingido se aproxima de ω_o e, ao mesmo tempo, o máximo se aproxima de $Q / (m \omega_o^2)$. Na prática, a razão entre o ganho máximo e o ganho em ω_o é muito próximo de um (1) e conseqüentemente a diferença pode ser desprezada.

Nesta análise podemos ver que se o oscilador é excitado na sua frequência de ressonância, mesmo com um fator de qualidade relativamente baixo, o deslocamento x alcançado com uma determinada força de excitação pode ser maximizado com bastante precisão. Neste caso, o deslocamento do oscilador está defasado 90° com respeito à força. E então, a velocidade v estará em fase com a força. Somente para um fator de qualidade muito baixo a diferença entre o máximo deslocamento e o deslocamento para uma frequência igual à de ressonância torna-se significativo.

A seguinte figura (Figura 3.2) mostra outro modo de representar um oscilador mecânico. Este tipo é mais usado, por exemplo, nos ambientes de simulação tais como o Matlab Simulink, ou em linguagens de modelagem de sistemas como é o caso do VHDL-AMS. VHDL é uma abreviação para *hardware description language for very high speed integrated circuit* (VHSIC) e AMS uma abreviação de *analog and mixed signal*. Escrevendo as equações para x do diagrama de bloco deste modo de representação pode-se conferir que as equações correspondem às descritas acima.

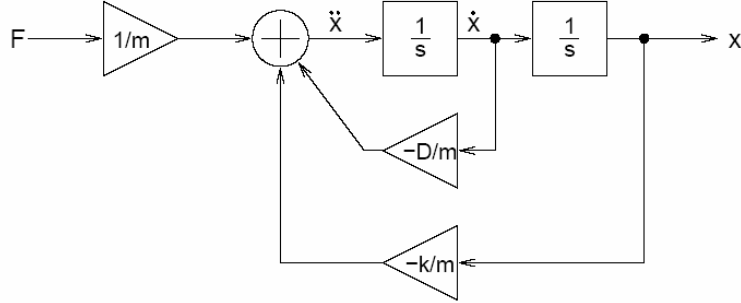


Figura 3.2 - Representação esquemática de um oscilador mecânico.

Veremos agora o efeito de Coriolis, desconsiderando outras forças também envolvidas no movimento, porém, com magnitude desprezível ao se comparar com a força de Coriolis. Se o sistema é submetido a uma rotação em torno ao eixo z , com uma velocidade angular Ω_z , as forças de Coriolis que atuam nas direções y e x do oscilador, respectivamente serão:

$$F_{C,y} = -2m_x \Omega_z v_x = -2m_x \Omega_z \dot{x} \quad (3.14)$$

$$F_{C,x} = 2m_y \Omega_z v_y = 2m_y \Omega_z \dot{y} \quad (3.15)$$

Considerando agora este efeito de Coriolis e outras duas importantes não idealidades de um sistema oscilador, a anisoeelasticidade e o amortecimento não proporcional, a Equação 3.4, que descreve a dinâmica do movimento do sistema, pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} m_x & 0 \\ 0 & m_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 2\Omega_z m_y \\ -2\Omega_z m_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.16)$$

O amortecimento não proporcional é um efeito por meio do qual a massa é exposta em certa direção a uma força proporcional à velocidade em outra direção. Considerando o amortecimento como amortecimento viscoso, o amortecimento não proporcional pode ser modelado adicionando os termos diagonais D_{xy} e D_{yx} na matriz do amortecimento D (Equação 3.3). Similarmente, a anisoeelasticidade representa a força elástica exercida sobre a massa numa determinada direção, que é proporcional ao deslocamento em outra direção. Este último efeito pode ser modelado considerando, na matriz k de constante de mola (elasticidade), os termos diagonais k_{xy} e k_{yx} (Equação 3.3).

Como falamos anteriormente, considerando o sistema ideal podemos aproximá-lo a dois osciladores, cada um com um grau de liberdade, e com frequências de ressonância e fatores de qualidade próprios. O sistema que oscila na direção x é chamado de oscilador primário ou oscilador de atuação, enquanto que na direção y é chamado de oscilador secundário ou oscilador de detecção.

O princípio de funcionamento de um giroscópio que usa um elemento oscilante pode ser entendido da seguinte maneira; o oscilador de atuação é normalmente excitado na sua frequência de ressonância (ω_{ox}) por uma força externa F_x , a amplitude de oscilação A_x é mantida constante por meio de um sistema de controle; então, a posição do oscilador pode ser escrita como:

$$x(t) = A_x \sin(\omega_{ox} t) \quad (3.17)$$

onde t é o tempo.

O oscilador de detecção, assumindo que a força externa F_y é zero, situação que corresponde à malha aberta, e tomando como base as duas equações anteriores (Equação 3.16 e Equação 3.17) pode descrever-se como:

$$m_y \ddot{y} + D_{yy} \dot{y} + k_{yy} y = - \left\{ A_x \omega_{ox} \left[2 m_x \Omega_z + D_{yx} \right] \cos(\omega_{ox} t) + k_{yx} A_x \sin(\omega_{ox} t) \right\} \quad (3.18)$$

Simplificando, para k_{yx} e D_{yx} iguais a zero,

$$m_y \ddot{y} + D_{yy} \dot{y} + k_{yy} y = - 2 A_x \omega_{ox} m_x \Omega_z \cos(\omega_{ox} t) \quad (3.19)$$

O deslocamento do oscilador secundário, oscilador de detecção, com ajuda da equação para a magnitude da função de transferência (Equação 3.10), pode ser escrito como:

$$y(t) = - \frac{2 A_x m_x \Omega_z}{\omega_{ox} m_y \sqrt{(\kappa^2 - 1)^2 + \kappa^2 / Q_y^2}} \cos(\omega_{ox} t + \phi) \quad (3.20)$$

onde ϕ é a defasagem da função de transferência do oscilador de detecção na frequência de ressonância também conhecida como frequência de operação (ω_{ox}). E κ é a relação entre as frequências de ressonância do oscilador de detecção e o de atuação, um importante parâmetro para descrever a operação do giroscópio:

$$\kappa = \frac{\omega_{oy}}{\omega_{ox}} \quad (3.21)$$

Substituindo κ na Equação 3.11 para a defasagem, teremos:

$$\phi = \arctan \frac{\kappa}{(1 - \kappa^2) Q_y} \quad (3.22)$$

O amortecimento não proporcional causa um sinal adicional na saída correspondente à velocidade angular dado por:

$$\Omega_{z, D_{yx}} = \frac{D_{yx}}{2 m_x} \quad (3.23)$$

o qual está em fase com o sinal de Coriolis; enquanto que a anisoeelasticidade causa um sinal correspondente à velocidade angular dado por:

$$\Omega_{z,kyx} = \frac{k_{yx}}{2\omega_{ox} m_x} \quad (3.24)$$

deslocado 90° em relação ao sinal de Coriolis, chamado de sinal de quadratura mecânica.

Vejamos agora os principais tipos de estruturas utilizadas em giroscópios MEMS. Seguidamente, faremos uma análise das tecnologias atualmente utilizadas para a fabricação de sistemas MEMS.

3.1 Tipos de giroscópios MEMS

A literatura mostra vários tipos de giroscópios MEMS, classificando-os fundamentalmente nas categorias: giroscópios tipo diapasão (*tuning fork*) (constituído por dois giroscópios do tipo massa oscilante), rodas oscilantes (*spinning or vibrating wheels*), pêndulos de Foucault, e giroscópios hemisféricos ressonantes que englobam: o copo de vinho ressonante (*wine glass resonators*) o cilindro ressonante e o anel ressonante, com princípios de funcionamento similares.

O Giroscópio tipo diapasão (*tuning fork*) é constituído por duas massas de prova que oscilam com igual amplitude, na mesma direção e sentidos opostos. Quando acontece a rotação, a força de Coriolis cria uma vibração ortogonal ao movimento de cada massa de prova, a amplitude do movimento nesta direção pode ser medida por vários mecanismos. A conjugação de dois giroscópios atuando na mesma direção e em sentidos opostos permite uma maior precisão na medida. Por outro lado, ambas as massas são também submetidas à aceleração linear, que terá o mesmo efeito em ambas; com a detecção diferencial da posição este efeito pode ser cancelado [61, 62]. Um estudo feito em [8] analisa dois tipos desta mesma estrutura, conhecida por rejeitar efeitos de modo-comum e por ser relativamente imune aos efeitos de vibrações externas, devido a sua operação diferencial; a

análise verifica como cada estrutura é influenciada por diferentes vibrações espúrias considerando ainda os efeitos de assimetria e não linearidade.

A Figura 3.3 mostra uma estrutura tipo *comb drive* como atuador de um giroscópio diapasão [9]. Neste caso o mecanismo sensor é do tipo capacitivo, utilizando um CMOS ASIC.

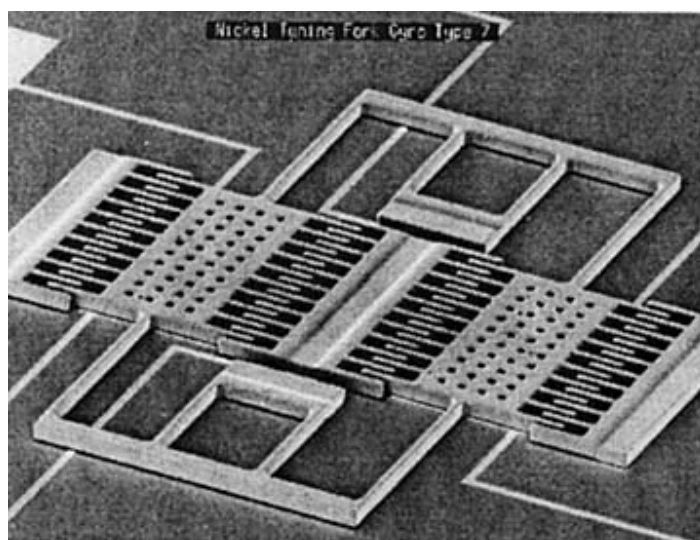


Figura 3.3 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura de um protótipo de giroscópio diapasão, com atuação do tipo *comb drive* fabricado em silício cristalino pelo processo de dissolução da lâmina de silício.

Fonte: Baseada em [9] Draper Lab. (1993).

Em um giroscópio tipo roda oscilante (*spinning or vibrating wheel*) a roda é atuada para vibrar no seu eixo axial de simetria; ao ocorrer uma rotação em torno do plano axial a roda sofre uma inclinação fora do plano. Esta mudança pode ser detectada por eletrodos capacitivos colocados embaixo da roda (vide Figura 3.4). Este tipo de giroscópio permite

detectar rotações em dois eixos com apenas uma roda oscilante. Diversos desenhos e sistemas de excitação têm sido publicados [10, 11].

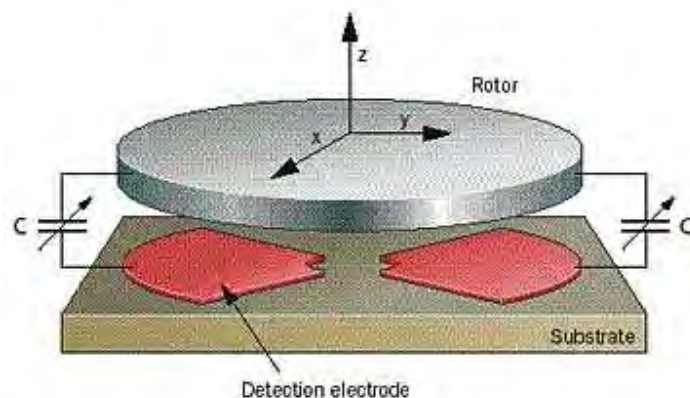


Figura 3.4 - Giroscópio roda oscilante com sensores capacitivos para detectar rotações em dois planos axiais.

Fonte: Baseada em [12] da Bosch Corp. (1997).

O giroscópio tipo roda oscilante (*spinning or vibrating wheel*) e o giroscópio pêndulo de Foucault estão baseados na oscilação de uma estrutura com haste tipicamente orientada fora do plano da estrutura. A fabricação deste tipo de giroscópio é muito complexa com instrumentos de fabricação planar, mas os recentes avanços da tecnologia MEMS permitiram a sua fabricação sem a necessidade de acoplamento manual da haste. A Figura 3.5 mostra uma imagem de microscopia eletrônica de varredura de um giroscópio MEMS de este tipo, fabricado em silício com a haste central acoplada [13].

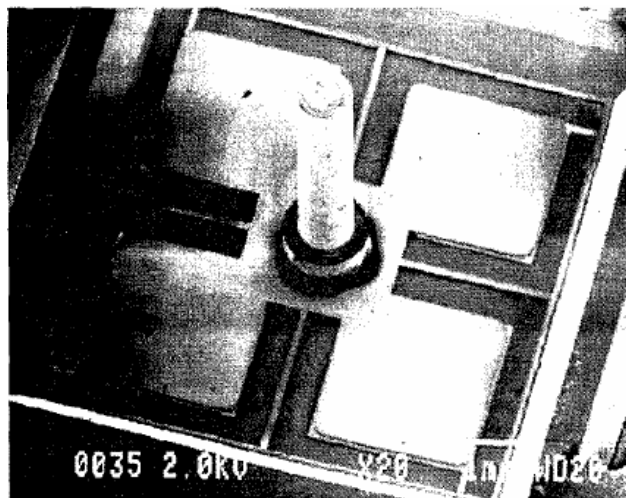


Figura 3.5 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura de um giroscópio tipo pêndulo de Foucault (*Clover leaf*).

Fonte: Baseada em [13] do Jet Propulsion Laboratory (1997).

O giroscópio hemisférico ressonante consiste basicamente em um anel ou cilindro suspensos por molas atuado para vibrar na ressonância no seu primeiro modo de vibração. O movimento oscilatório da borda descreve um formato elíptico. Na presença de uma rotação perpendicular ao plano de vibração do anel, pelo efeito de Coriolis, ocorre uma transferência de energia para o segundo modo de vibração que neste tipo de estrutura está localizado no plano a 45° do primeiro modo, o anel descreve então um movimento elíptico nesta outra direção. Os modos de entrada e saída são nominalmente degenerados, mas é necessária uma sintonia devido às imperfeições dos mecanismos. O sinal referente às imperfeições é subtraído da velocidade angular total na saída, anulando este efeito parasitário. O giroscópio conhecido como “copo de vinho ressonante” opera com este mesmo princípio.

A Figura 3.6 mostra uma imagem de microscopia eletrônica de varredura de um giroscópio tipo anel ressonante atuado e sentido eletromagneticamente, com um ímã permanente situado acima da estrutura (não mostrados na figura). Na presença de um campo magnético, a corrente que passa pelas trilhas condutoras nas molas e seções do anel cria uma força que

leva o anel a vibrar na ressonância. O movimento resultante da rotação (força de Coriolis) pode ser detectado pela tensão induzida quando as molas condutoras localizadas a 45° do primeiro modo, cortam o campo magnético.

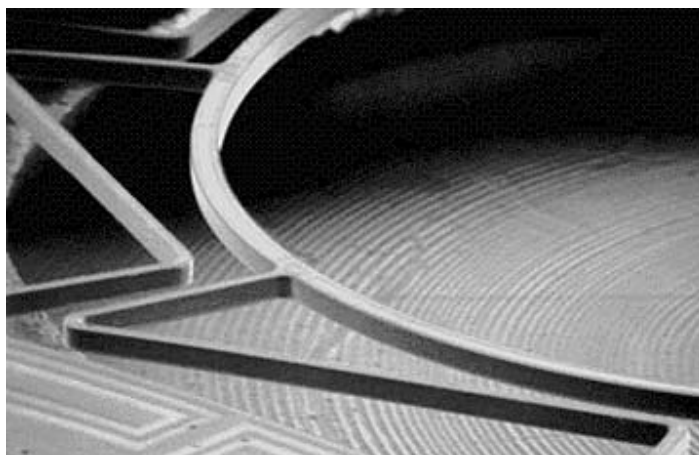


Figura 3.6 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura de um giroscópio tipo anel ressonante.

Fonte: Baseada em [14] da Silicon Sensing Systems (1998).

Na Figura 3.7 podemos ver as fotos dos giroscópios hemisféricos ressonantes com diferentes tipos de estruturas, da Silicon Sensing Systems. A primeira, com formato de copo ou cilindro, e outras três estruturas com formato de anel. Elas mostram a evolução no material, formato de estrutura e sistemas de atuação e detecção utilizados. Destas quatro estruturas, a primeira é fabricada em cerâmica, a segunda em metal, e as duas últimas em silício. Na figura, o giroscópio VSG-3 é do tipo da estrutura mostrada na Figura 3.6, com um ímã permanente para a atuação e detecção. Já o giroscópio VSG-4 utiliza métodos capacitivos para a atuação e a detecção [15].



Figura 3.7 - Giroscópios de estruturas ressonantes.

Fonte: Baseada em [15] da Silicon Sensing Systems (2008).

4 Fabricação.

As etapas de fabricação de giroscópio MEMS envolvem processos bem conhecidos na construção de dispositivos microeletrônicos. Elas combinam basicamente as seguintes técnicas: litografia (gravação de máscaras), corrosão, limpeza e ativação de superfícies para solda direta e/ou anódica para a união de lâminas com estruturas demarcadas, recozimentos térmicos, metalização e soldagem de contatos, etc. Tomaremos como ponto de partida os métodos e parâmetros sugeridos na literatura e oferecidos em especificações de algumas empresas, que utilizam ou comercializam equipamentos de corrosão profunda, também envolvidas em pesquisas de materiais e microfabricação.

É bem conhecido que a maior fonte de erros em estruturas oscilantes é o erro de quadratura produzido por imperfeições e assimetrias que alteram o movimento ideal da estrutura [16]. Mesmo em giroscópios que trabalham com os modos de atuação e detecção desacoplados mecanicamente, a não idealidade decorrente do processo de fabricação causa um desbalanceamento no movimento ideal linear do sistema que altera a resposta do sensor. Isto é produto de assimetrias na massa da estrutura oscilante, variações no valor das constantes de mola por imperfeições e assimetria, e acoplamentos indesejados entre o movimento da parte atuadora e a sensora. A escolha do material, do processo de fabricação, e do desenho da estrutura e sistemas de suspensão, deve ser feita de forma que esta fonte de erros seja tão mínima quanto possível.

De maneira geral, não existem técnicas ou equipamentos que permitam construir peças e dispositivos em escala micro ou nanométrica com alta produtividade. Esta é uma das principais razões pelas quais tanto os MEMS quanto os sistemas nanoeletromecânicos (NEMS) têm preços tão elevados e não chegaram ainda a ser comercializados na mesma escala que os microeletrônicos. Existe a capacidade de fazer estes dispositivos, no entanto, o desenvolvimento de métodos sistemáticos para um projeto MEMS e a modelagem destes exigem tempo e muitas práticas experimentais. A adaptação de um processo de fabricação de MEMS, tendo atingido um nível de maturidade com as tecnologias e os processos

envolvidos, resulta relativamente fácil de construir; assim, em pouco tempo novos dispositivos poderão ser fabricados.

4.1 Tecnologias e técnicas de microfabricação

As tecnologias empregadas para a microfabricação podem ser classificadas em dois grupos, um deles utiliza processos específicos para microsistemas e o outro, processos compatíveis com a microeletrônica. Os processos específicos para a construção de microsistemas geralmente comprometem a integração da eletrônica e, por consequência, apenas microsistemas híbridos podem ser realizados. As técnicas compatíveis com os processos de fabricação de circuitos integrados, por sua vez, são várias e sua classificação está relacionada às regiões ou camadas que são removidas para a liberação das estruturas suspensas, seja por remoção do substrato pela face anterior ou a posterior ou pela corrosão e/ou remoção de camadas sacrificiais previamente depositadas ou crescidas na superfície do substrato. A seguir serão descritas estas técnicas, iniciando por aquelas que envolvem processos específicos e seguidamente aquelas que usam processos compatíveis com a microeletrônica.

4.2 Tecnologia de processos específicos

São bastante utilizadas em diversas aplicações as técnicas que utilizam moldes para a criação de microestruturas. Os moldes mais comuns são padrões feitos em polímeros fotosensíveis ou em silício corroído por corrosão profunda, técnica que explicaremos mais adiante. A microestrutura é fabricada mediante o preenchimento do molde elaborado com o formato específico da microestrutura desejada. O material para o preenchimento também deve responder à aplicação à qual se destina; são utilizados com frequência materiais como polisilício, carbetos de silício, e plásticos. Um processo de corrosão posterior separa a microestrutura do molde. Os moldes também podem ser preenchidos por metais depositados eletro-quimicamente. Neste último caso encontramos a técnica LIGA, da sigla em alemão para *Lithografie Galvanoformung Abformung*. Esta técnica envolve a litografia

profunda por raios X suaves (*synchrotron*) ou ultravioleta em filmes muito espessos de fotoresiste, e a eletroformação (metalização) do padrão formado como molde. Esta estrutura em metal pode ser o produto final, contudo é comum produzir um molde de metal que poderá então ser preenchido com outro material. Esta técnica possibilita a fabricação de microestruturas com razoável razão de aspecto [17]. A razão de aspecto de uma configuração determinada, uma trincheira (*trench*), por exemplo, define-se como a relação entre a profundidade e a largura da trincheira. Diversas etapas da tecnologia LIGA já foram desenvolvidas no Brasil no LNLS (Laboratório Nacional de Luz Síncrotron), podendo-se apresentar exemplos de dispositivos de interesse para as áreas de química, bioquímica, biomédica e mecânica. Vários trabalhos relacionados à fabricação de giroscópios de níquel utilizando esta técnica têm sido publicados, porém o desempenho dos dispositivos mostrados não atinge níveis que permitam seu uso em aplicações aeroespaciais ou de alta precisão, isto devido às propriedades mecânicas deste material, de elevada dissipação interna e baixo fator de qualidade [9, 18, 19].

4.3 Tecnologia de processos compatíveis com a fabricação de circuitos integrados

Entre as tecnologias de microfabricação que utilizam processos compatíveis com a fabricação de circuitos integrados e que, por tanto, permitem a integração da microestrutura com outros dispositivos e circuitos microeletrônicos, encontramos a “microusinagem em volume” (*bulk micromachining*) e a “microusinagem de superfície” (*surface micromachining*). Esta última refere-se aos processos de fabricação de microestruturas a partir da corrosão e/ou remoção de camadas presentes na superfície do substrato. As camadas removidas para a liberação da microestrutura, que podem ser tanto dielétricos quanto metais, são denominadas camadas sacrificiais. O óxido de silício e o alumínio são bastante utilizados com esta finalidade. A “microusinagem em volume” consiste na corrosão do silício (*bulk*) para formar a estrutura micromecânica desejada.

Como já foi colocado, não existe um fluxograma único de processos que possa ser utilizado para a fabricação de todas as estruturas MEMS. A escolha da tecnologia dependerá das

características específicas do projeto, das dimensões das estruturas, e da tolerância entre as etapas de processamento e dos equipamentos utilizados para a fabricação. Estruturas com espessura maior que 10µm usualmente utilizam a “microusinagem em volume”, enquanto estruturas com espessuras inferiores a 10µm geralmente usam a “microusinagem de superfície” [20].

Para a “microusinagem de superfície” são normalmente necessários processos de deposição ou crescimento de materiais por LPCVD (*Low-pressure Chemical Vapor Deposition*), que funcionarão como: camada de isolamento das estruturas (dispositivos) do substrato; camadas sacrificiais que serão removidas para liberar as estruturas e que funcionam como espaçadores, isoladores ou suporte mecânico durante as etapas de processamento; e camadas estruturais utilizadas para a fabricação das estruturas MEMS. O silício policristalino, por ter propriedades mecânicas relativamente similares às do silício monocristalino, é muito utilizado como camada estrutural. O óxido de silício e o nitreto de silício, por sua vez, são comumente usados como camada para isolamento elétrico das estruturas com relação ao substrato. Para a microusinagem pode ser usada tanto a corrosão úmida, em um banho químico, quanto a corrosão seca, utilizando um equipamento de corrosão iônica reativa por plasma de placas paralelas (*Reactive Ion Etching* - RIE), ou a combinação de ambas as técnicas.

A corrosão úmida é bastante usada quando se deseja a corrosão de pouca espessura, mas é difícil o controle do ângulo de corrosão e da qualidade das paredes. As soluções anisotrópicas mais utilizadas para a corrosão do silício são: KOH (hidróxido de potássio), EDP (etileno diamina pirocatecol) e TMAH (hidróxido de tetrametil amônio), que corroem o silício preferencialmente ao longo das direções cristalográficas $\langle 100 \rangle$ e $\langle 110 \rangle$ e com uma taxa de algumas ordens de magnitude inferior para a direção $\langle 111 \rangle$. Pela natureza alcalina destas soluções não é usado o convencional fotoresiste como máscara para a corrosão; no seu lugar são empregadas máscaras de óxido de silício ou nitreto de silício. Para um maior controle da corrosão é possível utilizar uma camada de parada (*etch stop*) normalmente obtida pela dopagem por difusão ou implantação no silício. Um problema que

merece muita atenção durante a construção das microestruturas na etapa de liberação da estrutura é a colagem das camadas suspensas ao substrato ou entre elas mesmas (*stiction effects*) devido às forças de capilaridade presentes nas soluções de corrosão úmidas.

A técnica de corrosão de um material por plasma (corrosão seca), incluindo a corrosão profunda que explicaremos mais adiante, envolve a exposição da superfície, coberta por uma máscara nos locais onde não se deseja a corrosão, a um plasma contendo espécies reativas. Elementos halógenos (flúor, cloro, bromo, etc.) podem ser usados para a corrosão de muitos materiais; o cloro e o flúor, em particular, atacam quase todos os materiais. O alumínio é uma importante exceção, pois não é atacado pelo flúor, pelo que pode ser usado como máscara e permitir a corrosão após etapas de metalização por alumínio. Os gases mais comumente usados são: SF_6 e Fluorocarbonos (CF_4 , CHF_3 , C_4F_8 , etc.). Quando se deseja a passivação das paredes durante o processo de corrosão são utilizados gases contêm carbono para formar CO ou CO_2 , que são muito estáveis e são liberados sem se dissociar. É possível adicionar oxigênio à mistura, o oxigênio substitui ao flúor nos compostos CF ou SF, liberando maior quantidade de flúor que ficará disponível para a corrosão [21, 22, 23].

Estas duas técnicas de corrosão úmida e seca têm sido muito usadas para a fabricação de giroscópios para aplicações comerciais, utilizando silício policristalino como material estrutural, o que tem facilitado a integração com a eletrônica de processamento. Porém, pelas propriedades do material e das estruturas possíveis de serem fabricadas com estas técnicas, o desempenho não atinge o valor desejado para aplicações de grau inercial ou que exijam melhores desempenhos.

Para a “microusinagem em volume” se utiliza uma técnica mais avançada de corrosão profunda seca conhecida como DRIE (*Deep Reactive Ion Etching*), que emprega um reator de plasma com acoplamento indutivo. O DRIE é um equipamento versátil que amplia grandemente as possibilidades da microfabricação. Quando comparado com a corrosão úmida e por RIE, o DRIE proporciona a corrosão vertical do silício com um perfil de corrosão altamente anisotrópico, boa seletividade dos materiais empregados como

máscaras, elevada taxa de corrosão, bom controle do perfil, e paredes com baixa rugosidade; garantindo uma elevada razão de aspecto como a necessária para a fabricação de dispositivos com movimento preferencial no plano do chip.

5 Material

Assim como para circuitos eletrônicos, o silício cristalino é ainda o material mais usado para a construção de MEMS, principalmente pelas boas propriedades mecânicas, pelo seu custo e pelo avançado estado de desenvolvimento das tecnologias de processamento deste material que abrem oportunidades para a integração das estruturas micromecânicas e a eletrônica de processamento.

Este material monocristalino, de baixa dissipação interna quando comparado com outros materiais utilizados para a fabricação de giroscópios MEMS como o polisilício, materiais piezoelétricos, e metais (níquel, cobre), é também de grande interesse em aplicações espaciais, onde os satélites em órbita enfrentam altos níveis de radiação, variações extremas de temperatura e precisam ter resistência mecânica para suportar o lançamento e a reentrada na atmosfera, e principalmente, durabilidade e estabilidade das propriedades, pois a substituição de peças é economicamente inviável.

Um número razoável de trabalhos publicados nos três últimos anos (2006-2009) encaminha-se para o desenvolvimento de giroscópios com estruturas de silício cristalino. Estruturas metálicas (níquel, cobre), formadas pela técnica de eletrodeposição, foram também alvo de muitas pesquisas, pela relativa facilidade e baixo custo da técnica de fabricação, mas ficou demonstrado que este material tem propriedades mecânicas muito inferiores às do silício que acabam comprometendo o desempenho do dispositivo fabricado nele [18, 19, 24]. Estruturas em materiais piezoelétricos (quartzo) têm demonstrado bom desempenho, mas - por tratar-se de materiais diferentes dos utilizados para a eletrônica de excitação e detecção - manifestam-se os problemas de interfaceamento na integração com a eletrônica. Por outro lado, alguns processos convencionais (para silício) precisam ser adaptados a este material. O uso de estruturas de polisilício tem trazido bons resultados em giroscópios para aplicações comerciais que não exigem alto desempenho. Isto se deve à compatibilidade do processo de fabricação com os processos já disponíveis para a microeletrônica, que garantem um custo razoável e permitem a boa integração com a

eletrônica, tal é o caso dos giroscópios comercializados pela Analog Devices fabricados com parte da eletrônica de processamento integrada no mesmo chip do sensor [25]. Porém, o fato da estrutura (massa de prova) ser formada por um filme depositado por LPCVD com espessura limitada pela própria natureza do processo, a espessura da massa também estará limitada e por tanto, o desempenho do dispositivo. É sabido que o desempenho do dispositivo depende diretamente da massa (dimensões) da estrutura utilizada como massa de prova oscilante, uma massa maior garante uma melhor relação sinal/ruído [26, 27, 28, 29, 30, 31, 47, 50].

O emprego de silício como material estrutural também se beneficia da possibilidade de integrar os acelerômetros, inclusive no mesmo processo de fabricação do giroscópio, o que permite ter na mesma plataforma os dois tipos de sensores inerciais: o acelerômetro e o giroscópio, que formam as plataformas IMU (*Inertial Measurement Unit*). É conveniente o uso de IMUs em diversos tipos de aplicações. Tendo ambos os dispositivos na mesma plataforma resulta menos complexa a correção de erros nas medidas pelo fato de ambos estar submetidos aos mesmos efeitos. Também há a possibilidade de utilizar a medida da aceleração linear dada pelo acelerômetro para a correção da medida dada pelo giroscópio que também sofre o efeito da aceleração linear.

Atendendo à necessidade de alto desempenho e robustez, com uma extensa análise da bibliografia publicada sobre giroscópios, podemos dizer que as estruturas mais promissoras para finalidades espaciais - que exigem uma eletrônica de controle e compensação menos complexa - são estruturas do tipo TFG (*tuning fork gyros*) de massas oscilantes com modos de atuação e detecção desacoplados mecanicamente (discutido mais adiante); fabricadas em substrato SOI com camada ativa de Si cristalino (111).

Dispositivos do tipo anel oscilante fabricados em silício *bulk* (100) e em silício *bulk* (111) também têm sido amplamente explorados, porém as exigências de eletrônica de controle e compensação de erros de quadratura são maiores e mais complexas, para garantir o

movimento oscilatório ideal [32]. O giroscópio tipo roda oscilante apresenta uma fabricação mais complexa, mas ainda existem vários trabalhos publicados sobre o assunto [10].

A utilização de um substrato SOI como material de partida para a fabricação deste tipo de dispositivo permite obter massas inerciais grandes, isolamento elétrico, e estrutura oscilante suspensa encima de uma cavidade vazia de grande volume; melhorando deste modo os problemas de dissipação mecânica, instabilidade elétrica, térmica e radioativa, acoplamento mecânico, surgimento de componentes elétricos parasitas, etc. Dispositivos fabricados neste tipo de substrato têm mostrado desempenhos cada vez melhores [31, 33, 34, 35, 36, 46, 47, 48].

O Si cristalino garante uma maior estabilidade mecânica e às variações de temperatura. Mesmo havendo poucos trabalhos publicados que utilizem o Si (111), sabe-se que este apresenta propriedades mecânicas isotrópicas, com relação a movimentos elásticos de deflexão e torção; entre elas o módulo de Young, parâmetro considerado para o cálculo da constante de mola que define uma das principais forças que governam o movimento oscilatório de uma estrutura deste tipo [32, 37, 64]. Esta característica do Si (111) garante a fabricação de molas com propriedades elásticas homogêneas em qualquer direção da superfície da camada ativa da lâmina SOI e, por tanto, permite fabricar estruturas simétricas sem exigir cuidados excessivos na orientação da lâmina.

Para atingir as especificações de alto desempenho do dispositivo giroscópico, atendendo às exigências de dimensões (em altura) dentro da tecnologia MEMS, de suspender a estrutura acima de uma cavidade vazia de grande volume, e de utilizar silício cristalino (e lâminas SOI) como material estrutural; a fabricação a partir deste material necessariamente é feita por corrosão iônica profunda. A seguir, apresentamos alguns aspectos sobre o equipamento e os processos DRIE [12].

6 DRIE, especificações

Em termos de *hardware* a corrosão iônica reativa profunda em um reator de plasma com acoplamento indutivo, próprias de um equipamento DRIE, diferencia-se principalmente dos equipamentos convencionais de corrosão por plasma nas seguintes características:

- plasma de alta densidade (usando tipicamente acoplamento indutivo ao plasma);
- separação física da lâmina do plasma principal;
- baixa pressão e alto fluxo de gases (usando bombas turbomoleculares e projeto cuidadoso das linhas de vácuo, e controladores de fluxo de massa de resposta rápida), que permitem dividir os processos em etapas combinadas de corrosão e passivação de paredes;
- temperatura baixa, uniforme e bem controlada do substrato (usando sistemas sofisticados para fixar o substrato ao eletrodo com bom contato térmico e refrigeração do eletrodo).

A combinação destas características de *hardware* permite resultados como os citados anteriormente relativos à alta taxa de corrosão, a elevada razão de aspecto, muito boa qualidade das paredes, alta seletividade, etc.

O processo DRIE mais ‘popular’ para a fabricação de MEMS em silício é conhecido como “processo Bosch” e está baseado em etapas alternadas de corrosão e passivação. O SF_6 é usado para a corrosão do silício, enquanto o C_4F_8 para a passivação das superfícies, garantindo desta maneira a anisotropia na corrosão do silício. Com este método é possível atingir taxas de corrosão superiores aos $10\mu\text{m}/\text{min}$ em silício usando fotoreziste como máscara [21]. Em um relatório referente ao “processo Bosch”, publicado pelo NASA's Jet Propulsion Laboratory, descrevem-se os resultados de paredes verticais ‘lisas’ em lâminas de silício, consideradas apropriadas como superfícies de solda para guias de ondas em dispositivos fotônicos e optoeletrônicos [22].

O projeto e a manufatura dos equipamentos, além de visar à miniaturização de cada vez mais tipos de dispositivos, têm se encaminhado de maneira a atender as exigências na

procura de melhoras no desempenho dos dispositivos, no que se refere à sensibilidade para a detecção e atuação de estruturas tipo “pente” (*comb*), cuja fabricação exige corrosões de elevada razão de aspecto. Atualmente os processos de corrosão para estes fins combinam etapas de corrosão e passivação, e processos criogênicos. Este último com o fim de solucionar os problemas decorrentes do superaquecimento em corrosões muito profundas que podem levar à perda da passivação das paredes e, por conseguinte, a problemas para conseguir corrosões estritamente anisotrópicas que garantem paredes verticais e evitem defeitos como o *undercut* perto da máscara e *notching* na corrosão de substratos SOI [21, 38, 39, 40, 41, 42, 43].

Em 2002, as empresas Alcatel, Bosch e PerkinElmer desenvolveram o projeto conjunto “*I-SPEEDER*” que resultou em novas tecnologias que proporcionaram a maior taxa de corrosão do silício no mercado. Entre os dados publicados encontramos taxas de corrosão do silício superiores a 13µm/min, perfis verticais, uniformidade da corrosão de $\pm 3\%$ e seletividade com relação à máscara de resiste maior que 150:1. Nas condições descritas, a seletividade para o óxido térmico é acima de 450:1. Um projeto posterior, “*I-Productivity*”, trouxe ainda melhoras na taxa de corrosão, que agora excede os 50µm/min com excelente uniformidade em profundidade [39, 40].

A criação da infra-estrutura de pesquisa de micro e nanotecnologia é um desafio comum para as nações industrialmente avançadas e para os países em desenvolvimento. Muitos países têm promulgado leis e programas para estimular o desenvolvimento das micro e nanotecnologias e têm dado apoio ao estabelecimento de instalações públicas de micro e nanofabricação.

Hoje em dia, já existem algumas empresas que produzem e comercializam giroscópios MEMS tanto em materiais piezoelétricos quanto em silício. Porém, ainda há muito por aprender e desenvolver quando se quer atender aos requerimentos de alto desempenho e miniaturização deste tipo de dispositivo. Assim, atualmente são muitos os centros acadêmicos e empresas envolvidas em pesquisas com esta finalidade.

Discutiremos a seguir alguns aspectos e parâmetros que devem ser considerados para a escolha de um determinado tipo de estrutura, com o fim de obter um dispositivo giroscópio de alto desempenho para aplicações espaciais.

7 Estrutura

Como já vimos, o princípio de funcionamento da maioria dos giroscópios MEMS têm suas bases no sensoramento do efeito de Coriolis, o grande problema na utilização deste efeito em sistemas MEMS radica na medida de valores tão pequenos (de ordem subatômica a poucos micro-metros) do deslocamento na direção do segundo modo de oscilação devido a este efeito. Estes deslocamentos produzem variações de capacitâncias, para a detecção capacitiva, da ordem de pico-Faradays, o que exige um valor muito baixo de ruído (relativo à estrutura e à eletrônica de processamento) para considerar a medida útil.

Como uma maneira de aumentar o desempenho dos giroscópios que utilizam a detecção do deslocamento de uma estrutura como medida da rotação sofrida pelo sistema, frequentemente têm sido utilizadas estruturas com sistemas de suspensão simétricos para a atuação e detecção. O que visa operar na condição de modos de atuação e de detecção “casados” (igual frequência de ressonância) ou próximos disso. Com ambos os modos funcionando na ressonância, teremos uma maior amplitude da oscilação, a força de Coriolis será maior quanto maior for a amplitude da oscilação do modo atuador. E por outro lado, a resolução do giroscópio se amplifica com o fator de qualidade do modo sensor na ressonância [49, 50].

Assim, o parâmetro κ (Equação 3.20 e Equação 3.21) é importante para descrever a operação de um determinado giroscópio como foi comentado anteriormente, já que ele define a separação dos modos e, desta forma, o ganho na ressonância do dispositivo. Considerando-se somente a sensibilidade e a resolução do sistema, será vantajoso usar um κ tão próximo da unidade quanto possível. No entanto, na prática existem vários outros parâmetros que afetam o valor de κ , e que precisam ser levados em consideração. Um deles é a sensibilidade do ganho na ressonância às variações dos parâmetros do sistema. Outro aspecto que deve ser considerado é a possível instabilidade de fase do sinal de Coriolis e o sinal de quadratura mecânica, a qual pode causar instabilidade no ganho e no *offset*, e a sensibilidade a choques e vibrações espúrias que atuam sobre o dispositivo.

Na terminologia utilizada na literatura referente aos giroscópios, giroscópios com um único sistema de suspensão para a atuação e a detecção são chamados de acoplados, enquanto os que possuem sistemas de suspensão independentes para a atuação e a detecção são chamados de desacoplados, devido ao desacoplamento mecânico que os sistemas de suspensão independentes garantem entre o movimento oscilatório provocado pela força de excitação e o movimento resultante do efeito de Coriolis. Nos sistemas acoplados é relativamente fácil conseguir o “casamento” entre as frequências de ressonância dos movimentos nas direções x e y . Porém, a alternativa de usar modos desacoplados garante maior robustez ao dispositivo.

Diversos arranjos de estruturas e sistemas de suspensão com massas independentes para a atuação e para a detecção têm sido propostos, visando diminuir o acoplamento mecânico entre o modo atuador e o sensor [10, 15, 25, 28, 34, 44, 45, 47, 49, 50]. Pela própria natureza do sistema de suspensão, quanto menor for a diferença entre os valores das frequências de ressonância de ambos os modos, maior será o acoplamento mecânico entre eles, causando instabilidade na operação do dispositivo e introduzindo erros na resposta do sensor. Assim sendo, o movimento oscilatório deverá ser controlado eletronicamente. Não obstante, acompanhando os trabalhos publicados por diversos autores durante os anos transcorridos desde que o primeiro giroscópio MEMS foi proposto pela Draper Lab em 1991 [4] até os dias atuais, nas pesquisas que procuram melhoras no desempenho do dispositivo que visam seu uso em aplicações que requerem grau inercial, podemos reparar a evolução nos desenhos tanto da estrutura quanto dos sistemas de suspensão, para sistemas simétricos, com o fim de “casar” os valores das frequências de ressonância dos modos atuador e sensor, e, como consequência, aumentar a sensibilidade (relação entre as amplitudes de oscilação do modo sensor e atuador) e garantir maior estabilidade térmica.

Existe uma tendência evidente a utilizar mais de uma massa, separando as massas encarregadas da atuação e da detecção, interligadas por barras flexíveis a apenas um movimento mediante uma massa acopladora, que pode ser ou não a massa inercial (massa de prova), sendo extremamente rígidas para o movimento em outra direção. As massas,

com exceção das massas utilizadas para acoplar os sistemas de atuação e detecção, devem ser ancoradas ao substrato para se conseguir o desacoplamento mecânico entre ambos os modos. A simetria da estrutura deve ser preservada para garantir o máximo “casamento” entre as frequências de ressonância. Os movimentos, do sistema atuador e sensor, devem ser mantidos independentes, por sistemas de suspensão independentes, para evitar os acoplamentos indesejados entre ambas as direções de movimento.

Por outro lado, os giroscópios que trabalham com modos “casados” ou próximos são extremamente sensíveis a variações nos parâmetros do sistema. Devido à não idealidade dos processos de fabricação, a perfeita simetria não existe e mesmo nas estruturas mais avançadas é necessária a sintonia eletrônica das frequências de ressonância dos dois modos. Mas quanto menor for a diferença geométrica, menores serão os requerimentos eletrônicos necessários para a sintonia. As imperfeições decorrentes do processo de fabricação, seja qual for o processo utilizado dos atualmente disponíveis para microfabricação, acabam determinando assimetrias na estrutura; tais como: assimetria na distribuição de massa, defeitos, diferença nas constantes de mola, etc. Tudo isto faz com que as frequências de ressonância de ambos os modos não coincidam, e, como consequência, o segundo modo de vibração aparece numa direção diferente da esperada. Isto provoca uma alteração no movimento idealmente linear da oscilação descrevendo, na prática, um movimento elíptico conhecido como erro de quadratura [16, 47]. A escolha do perfeito “casamento” entre os dois modos de vibração principais da estrutura também limita a largura de banda da velocidade angular a ser medida em pouco mais do que algumas unidades de Hertz, o que é uma limitante para muitas aplicações. O emprego de controle de malha fechada tem sido usado como uma maneira de contornar estes problemas e estender a largura de banda sem degradar significativamente a resolução. Mas a implementação de um sistema de controle exige enfrentar outros desafios, pois a eletrônica é uma considerável fonte de ruídos na detecção de deslocamentos tão pequenos, mantendo a estabilidade de um sistema com mais de um grau de liberdade. Deste modo, os componentes envolvidos nos circuitos associados ao funcionamento de um giroscópio devem ser cuidadosamente escolhidos para garantir o

menor ruído possível. Por outro lado, já existem comercialmente circuitos eletrônicos deste tipo, e um grande número de pesquisas destinadas a fornecer melhoras no interfaceamento destes circuitos com o dispositivo em questão, assim como pesquisas destinadas à integração no processo de fabricação do dispositivo e, até os dias atuais, de parte da eletrônica envolvida no processamento.

Uma alternativa promissora parece ser [10, 46, 47, 48, 49, 50, 51] o uso de osciladores com múltiplos graus de liberdade. Usando um oscilador primário com múltiplos graus de liberdade a largura de banda do modo atuador poderá ser aumentada. Com um projeto apropriado, o oscilador primário, em princípio, sempre poderá ser atuado na frequência de ressonância do segundo oscilador, assegurando a possibilidade de trabalhar em modos “casados” independentemente das variações ambientais ou de processos. Por sua vez, se é usado um oscilador secundário com múltiplos graus de liberdade, pode ser reduzida a sensibilidade do ganho na ressonância às variações na separação dos modos. Apesar destas vantagens, não tem sido totalmente adotada esta alternativa, pois implica um grande aumento da complexidade do projeto e da análise em geral.

Os tipos de suspensões utilizados têm sido também amplamente estudados nestes trabalhos. O sistema de suspensão por molas mais promissor é aquele que dentro da simetria garante o movimento da parte atuadora da estrutura em uma única direção, direção de atuação, independente da parte sensora que também terá movimento apenas em uma direção, a direção sensora.

Entre os sistemas de suspensão que se destacam para o movimento oscilatório linear, encontramos o sistema formado por barras finas flexíveis fabricadas na mesma camada estrutural de Si da massa suspensa. Frequentemente se utilizam barras flexíveis concatenadas que permitem a oscilação da massa inercial com grande amplitude em duas direções ortogonais. Em outros casos, as barras concatenadas permitem o movimento apenas em uma direção [10, 47, 48]. A Figura 7.1 mostra alguns destes sistemas de suspensão: a), b), d), e d) são estruturas de apenas uma massa (massa inercial) e o e) e f)

são estruturas com uma massa inercial e massas independentes para a atuação e a detecção. O sistema em forma de “U” tem oferecido melhores resultados desde o ponto de vista de permitir desacoplamento mecânico entre os modos sensor e atuador, e quanto a se obter menor erro de quadratura devido à anisoelelasticidade da suspensão [47, 52, 53, 54, 55, 56, 57]. Variações deste tipo de sistema em forma de “U” têm sido utilizadas com sucesso em estruturas formadas por uma massa inercial suspensa de duas massas, uma que forma o sistema atuador e a outra, o de detecção [10, 47, 48, 58].

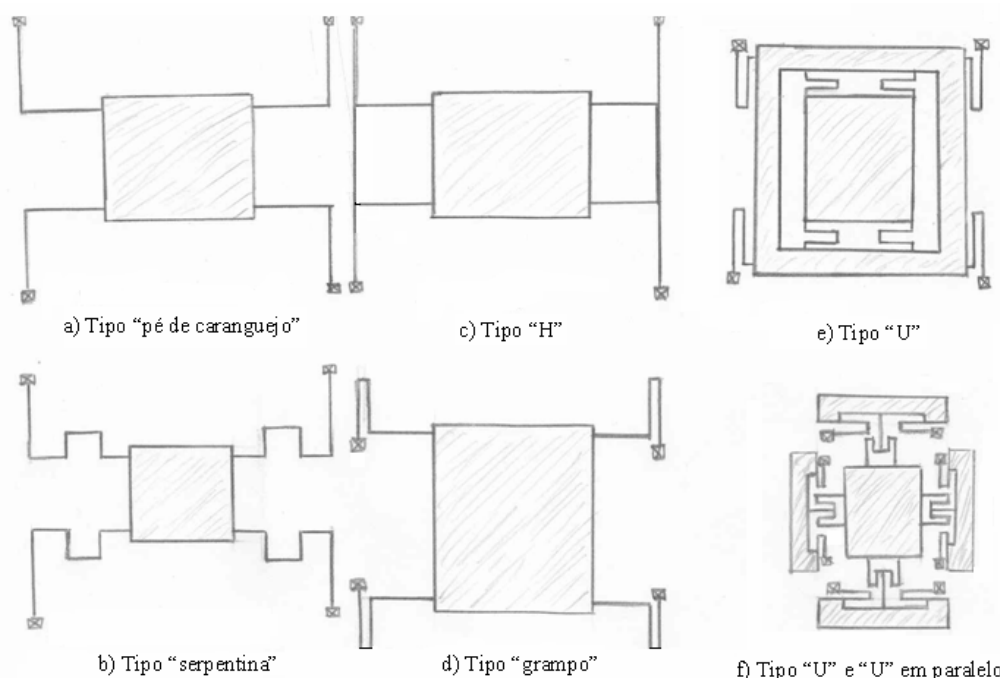


Figura 7.1 - Sistemas de suspensão: a), b), d), e d) estruturas de apenas uma massa (massa inercial); e e) e f) estruturas com uma massa inercial e massas independentes para a atuação e a detecção.

Em [48], por exemplo, um sistema de suspensão composto de duas molas com formato de “U” em paralelo, permite que a massa atuadora e a sensora, mesmo ancoradas ao substrato, possam se movimentar em uma única direção, a direção de atuação e a de detecção respectiva (vide Figura 7.2). Aqui a massa inercial encontra-se suspensa por quatro sistemas de suspensão que lhe permitem movimento tanto na direção atuadora quanto na

sensora, carregando junto à massa correspondente ao sistema de atuação e de detecção respectivamente em cada um dos dois movimentos ortogonais. A suspensão é formada de três barras que deformam em série e que estão em paralelo com mais outras três, que também se deformam em série (vide Figura 7.2 b)). Este sistema demonstrou ser bem flexível para o movimento ortogonal e extremamente rígido para o movimento longitudinal. Este desenho estrutural mostrou resultados promissores com relação ao desempenho do dispositivo.

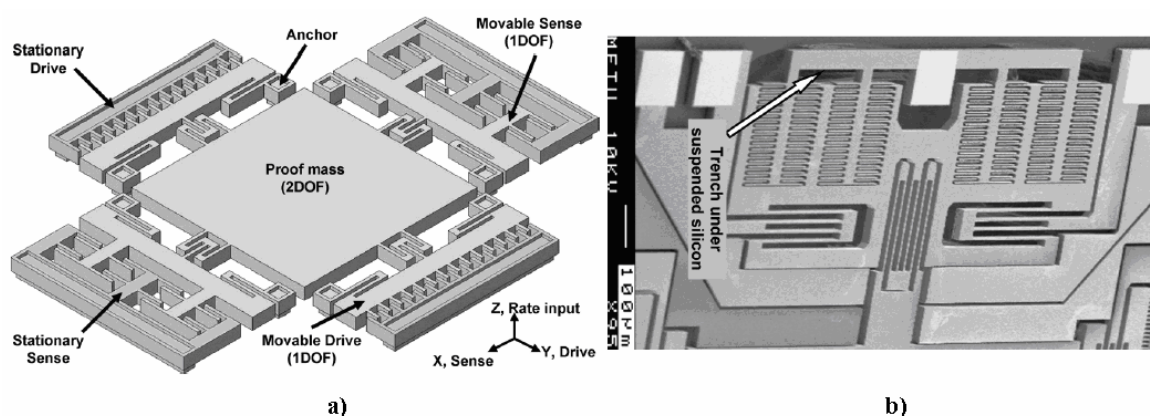


Figura 7.2 - a) Desenho do giroscópio de estrutura simétrica e desacoplada, b) Imagem de microscopia eletrônica de varredura desta estrutura fabricada, mostrando sistema de detecção e suspensões.

Fonte: Baseada em ALPER et al. [48] (2007).

Em todos estes casos, cada uma das barras de flexão pode ser modelada como uma barra fixa em um extremo e “guiada” no outro (vide Figura 7.3).

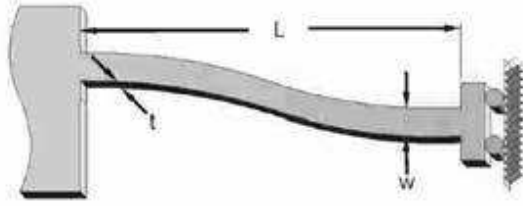


Figura 7.3 - Barra de flexão fixa em um extremo e “guiada” no outro.

A constante de mola para o movimento ortogonal à direção do eixo da barra, que corresponde ao movimento do oscilador é:

$$k = \frac{12EI}{L^3} = \frac{Et\varpi^3}{L^3} \quad (7.1)$$

onde E é o Módulo de Young, I é o segundo momento de inércia, e L , t e ϖ são o comprimento, a espessura e a largura da barra, respectivamente.

$$I = \frac{t\varpi^3}{12} \quad (7.2)$$

A constante de mola axial, dada pela seguinte expressão,

$$k_{axial} = \frac{Et\varpi}{L} \quad (7.3)$$

é quatro ordens de magnitude maior que a constante de mola para o movimento ortogonal ao eixo da barra (L^2/ϖ^2), e, portanto, a barra pode ser considerada rígida para o movimento axial.

8 Ruído termo-mecânico

Em um giroscópio MEMS são muitos os elementos que contribuem com o ruído: a eletrônica de processamento, o próprio elemento sensor, a dissipação interna (ou mecânica), imperfeições, e todos os efeitos parasitas que se manifestam comportando-se como componentes eletrônicos (resistências elétricas, capacitores, etc.) quando a estrutura está eletricamente alimentada. Como os sensores MEMS são tão pequenos, tanto o ruído térmico quanto o ruído Johnson da resistência mecânica do dispositivo devem ser considerados, o que é normalmente ignorado para sensores grandes.

A densidade espectral para a força produto do ruído térmico, em N^2/Hz , pode-se expressar por:

$$F_n^2 = 4k_B T D \quad (8.1)$$

onde k_B é a constante de Boltzmann, T é a temperatura absoluta, e D é o coeficiente de atrito. Analogamente, para o ruído Johnson pode ser usada esta expressão substituindo o D por R (resistência); ambas as formas de ruído têm a mesma base física [26, 50].

O movimento browniano também pode ser uma força grande para um diminuto componente MEMS. É importante considerar que existe uma relação inversa entre o ruído Browniano da estrutura e a frequência de ressonância, e é desejável manter este nível de ruído baixo. Também, existe uma relação de proporcionalidade inversa entre a sensibilidade e a frequência de ressonância. Portanto esta última deve ser cuidadosamente escolhida baixa para aumentar a sensibilidade e manter um nível baixo de ruído [27, 30, 59, 60, 61]. Porém, o valor deve ser mantido acima do valor da frequência do ruído ambiente para que o sensor seja imune às vibrações espúrias [18].

De maneira geral, a estrutura é projetada e sintonizada eletrostaticamente para que a frequência de ressonância do modo atuador coincida com a do modo sensor. Mas na

prática, a frequência de ressonância do modo sensor é escolhida ligeiramente acima daquela do modo atuador, com o fim de aumentar a robustez e a estabilidade térmica, enquanto o ganho e a sensibilidade são intencionalmente sacrificados. Os valores publicados encontram-se entre as unidades e as dezenas de kilo-Hertz.

Com uma análise relativamente simples das equações envolvidas no processo físico que governa os movimentos de um determinado dispositivo giroscópio, pode-se concluir que um baixo atrito (com o meio onde ocorre a oscilação), uma grande massa com baixa dissipação interna, assim como uma baixa frequência de ressonância, contribuem para se obter um baixo ruído de fundo [26, 27, 28, 30, 59, 60, 61]. Para conseguir grandes massas em um sensor micromecânico, tipicamente precisa-se de uma lâmina grossa como massa de prova em uma cavidade separada do chip sensor. Para um ruído mínimo absoluto, a constante de amortecimento deve ser reduzida suspendendo a massa de prova em vácuo por molas puramente elásticas.

9 Mecanismos de atuação e detecção

São vários os tipos de giroscópios MEMS oscilantes na literatura publicada, empregando uma ampla faixa de tipos de estruturas mecânicas, esquemas de atuação e detecção, e técnicas de fabricação. Porém, a detecção capacitiva e a atuação eletrostática têm provado oferecer maiores benefícios em relação aos esquemas de detecção piezoelétrica, piezoresistiva, de ressonância, óptica, e magnética; ou a atuação magnética e térmica; especialmente pela facilidade de implementação devido à simplicidade do elemento sensor contido nele que não requer materiais especiais, tem baixo consumo de potência e boa estabilidade com a temperatura.

O mecanismo atuador excita o sistema mediante a conversão de um sinal elétrico, seja de tensão ou de corrente, em uma força atuadora. Similarmente, para o mecanismo sensor precisa-se de um método para transformar a posição do elemento sensor em uma quantidade que possa ser medida com um circuito eletrônico. Idealmente, estes mecanismos não devem afetar o comportamento da estrutura oscilante nem a resposta do sensor. Na prática isto não ocorre e, portanto, a interface entre o domínio mecânico e o elétrico deve ser cuidadosamente considerada e a escolha dos métodos e parâmetros, tanto mecânicos quanto elétricos, deve ser feita levando em conta a interação entre ambos os domínios.

Existem vários mecanismos possíveis de serem usados para a geração da força atuadora, incluindo entre os mais empregados neste tipo de dispositivos, os eletrostáticos (capacitivos), piezoelétricos, e eletromagnéticos. Para a detecção são frequentemente empregados métodos capacitivos, piezoelétricos, e piezoresistivos. Este trabalho entrará em mais detalhes apenas na atuação eletrostática (capacitiva) e detecção capacitiva. Nos dois casos há dois eletrodos formando um capacitor de placas paralelas, um dos eletrodos é fixo e o outro se movimenta junto à massa oscilante na direção atuadora e sensora, respectivamente.

9.1 Atuação

Na excitação capacitiva, descrita em mais detalhes na seção 10, é gerada uma força eletrostática de atração entre os eletrodos aplicando uma diferença de tensão entre eles.

O método piezoelétrico utiliza-se da força (movimento) gerada no material piezoelétrico devido ao campo elétrico aplicado entre ele e o eletrodo enterrado no substrato que o suporta; a deformação sofrida pelo material é proporcional à magnitude da tensão aplicada. Entre os materiais piezoelétricos mais comuns estão: quartzo, óxido de zinco (ZnO), zirconato titanato de chumbo (PZT), e nitreto de alumínio (AlN) [62, 63]. A excitação piezoelétrica tem a vantagem de gerar grandes forças, mas precisa um substrato independente do material piezoelétrico, ou uma etapa especial de processamento onde se deposite o material piezoelétrico no substrato de silício. Este último caso tem como desvantagem adicional o fato de degradar o fator de qualidade e aumentar a dependência com a temperatura o que acaba afetando a resolução do dispositivo [64]. Ademais, precisa de valores elevados de tensão para produzir deslocamentos adequados para a atuação.

Para a atuação eletromagnética, é usado um ímã permanente para produzir um campo magnético que gere uma corrente em trilhas condutoras devidamente formadas; a magnitude da força produzida (força de Lorenz) pode ser descrita como $F_L = I L B$, e ocorre na direção perpendicular à corrente (I) e ao campo magnético (B); L é o comprimento do elemento condutor. A magnitude da força correspondente a esta corrente pode ser controlada por uma malha de corrente [50, 62, 65].

Por outro lado, a excitação magnética exige um ímã ou um material magnético capaz de gerar um campo magnético permanente, o que complica a manufatura do sensor e o encapsulamento do mesmo [66]. Especialmente em aplicações espaciais em satélites, por exemplo, onde a presença do ímã pode afetar o comportamento de outros dispositivos também contidos no veículo, precisando-se de esquemas de encapsulamento não convencionais. O ímã também é pesado e volumoso para aplicações onde se procura um mínimo de massa.

9.2 Detecção

Para a detecção capacitiva, os eletrodos formam um capacitor cuja capacitância depende da distância entre os dois eletrodos, medindo a variação da capacitância entre os eletrodos poderá ser resolvida a variação da posição do eletrodo móvel com relação ao fixo.

O método piezoelétrico também é utilizado para a detecção e, aqui a força aplicada ao material piezoelétrico causa uma variação de tensão que pode ser medida como uma maneira de resolver a deformação sofrida por ele [50].

Na detecção piezoresistiva, o deslocamento produz um estresse mecânico que faz com que a resistência do piezoresistor varie. Medindo esta variação da resistência teremos uma medida do estresse e por tanto do deslocamento. Em uma microestrutura de silício, o piezoresistor pode ser formado por uma dopagem N ou P em determinada área do semiconductor ou por uma estrutura de polisilício. As propriedades de um piezoresistores em silício cristalino dependem grandemente da temperatura e, assim, requiere-se de alguma forma de compensação. Esta dependência com a temperatura para um piezoresistores em silício policristalino é menor, porém, há uma grande sensibilidade das propriedades ao estresse no material [50, 64. 65].

Destes mecanismos, a excitação e detecção capacitiva, juntamente com a detecção piezoresistiva, são compatíveis com as tecnologias convencionais existentes para o silício.

Alem destes métodos, existem outros métodos de detecção mais exóticos. Por exemplo, a detecção óptica, onde a medida da intensidade da luz (emitida por um dispositivo) recepcionada por um fotodetector é proporcional ao deslocamento ocorrido na microestrutura. Por último, alguns trabalhos têm empregado detecção baseada no tunelamento. Na junção formada no pequeno espaço existente entre a estrutura móvel e a fixa, o deslocamento da parte móvel produz uma mudança neste espaçamento que altera a corrente de tunelamento. Como a corrente de tunelamento varia exponencialmente com o valor do espaçamento isto permite uma grande sensibilidade de detecção. Usualmente,

emprega-se a retroalimentação para manter constantes o espaçamento e o valor da corrente. Mas a detecção baseada neste princípio tem a grande desvantagem de ser muito sensível a variações de temperatura [50, 67].

Descreveremos, a seguir, alguns aspectos da atuação eletrostática (capacitiva).

10 Atuação eletrostática

Como já foi comentado, a atuação eletrostática baseia-se na força eletrostática atrativa gerada entre dois eletrodos pela aplicação de um campo elétrico. Como o sistema tem tendência a atingir um ponto de equilíbrio no qual a energia total é minimizada, a força em um sistema de um grau de liberdade (ideal) pode ser descrita como a derivada parcial da energia em relação ao deslocamento, ou seja:

$$F = - \frac{\partial E_{tot}}{\partial d} \quad (10.1)$$

onde E_{tot} e d são a energia total do sistema e o deslocamento, respectivamente. Se considerarmos o atuador como um capacitor de placas paralelas, como mostramos na Figura 10.1, formado por dois eletrodos de área A , um deles fixo e o outro móvel na direção x , a capacitância entre as placas é:

$$C = \frac{A \epsilon_o \epsilon_r}{x_o + x} \quad (10.2)$$

Onde ϵ_o é a permissividade do vácuo, igual a $8,85418 \cdot 10^{-12}$ F/m, ϵ_r é a permissividade relativa do isolante entre as placas (para o vácuo ou o ar $\epsilon_r = 1$), x_o é o espaçamento inicial entre as placas quando não está sendo aplicada diferença de potencial, e x é o deslocamento do eletrodo móvel.

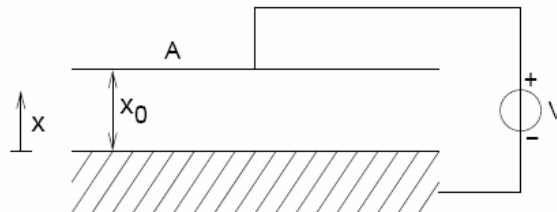


Figura 10.1 - Vista lateral de um atuador de placas paralelas com tensão controlada, onde x_o é a separação entre as placas para uma tensão aplicada igual a zero e A é a área de cada placa.

Quando aplicamos uma tensão constante V no capacitor, a energia armazenada nele (pela lei de conservação da energia a outra parte do sistema deverá compensar esta variação de energia) será:

$$E = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{A \epsilon_o \epsilon_r V^2}{2(x_o + x)} \quad (10.3)$$

Então a força eletrostática pode ser escrita como:

$$F_{es} = -\frac{A \epsilon_o \epsilon_r V^2}{2(x_o + x)^2} \quad (10.4)$$

Esta força atua ao longo da direção negativa x , e é uma força atrativa. Esta equação mostra que a força é uma função não linear da tensão V e do deslocamento x . Se assumirmos que o deslocamento é pequeno comparado com a separação inicial entre as placas x_o , a força pode ser linearizada tomando os dois primeiros termos da série de Taylor da equação anterior:

$$F_{es} \approx -\frac{A \epsilon_o \epsilon_r V^2}{2x_o^2} + \frac{A \epsilon_o \epsilon_r V^2}{x_o^3} x \quad (10.5)$$

O primeiro termo pode ser interpretado como uma força eletrostática atrativa independente do deslocamento, usada para a excitação do oscilador, enquanto que o segundo termo da série é uma força repulsiva linearmente dependente do deslocamento. Incluindo estas forças na equação que descreve a dinâmica do movimento de um oscilador de um grau de liberdade (Equação 3.5) e reagrupamos, teremos:

$$m \ddot{x} + D \dot{x} + \left(k - \frac{A \epsilon_o \epsilon_r V^2}{x_o^3} \right) x = -\frac{A \epsilon_o \epsilon_r V^2}{2x_o^2} + F \quad (10.6)$$

Podemos ver aqui que na excitação eletrostática de um sistema massa-mola-atrito, a força repulsiva atua como uma constante de mola (elástica) negativa k_{es} que reduz a constante de mola efetiva k_{ef} . Este fenômeno é conhecido como efeito de mola eletrostática (*electrostatic*

spring softening), e é um dos efeitos de contorno mais significativos tanto para a atuação quanto para a detecção capacitiva.

A constante de mola eletrostática pode ser escrita como:

$$k_{es} = - \frac{A \epsilon_o \epsilon_r V^2}{x_o^3} \quad (10.7)$$

e a constante de mola efetiva como:

$$k_{ef} = k + k_{es} = k - \frac{A \epsilon_o \epsilon_r V^2}{x_o^3} \quad (10.8)$$

Como resultado do efeito de mola eletrostática, a frequência de ressonância se reduz a:

$$\omega_o = \sqrt{\frac{k_{ef}}{m}} \quad (10.9)$$

Quando queremos gerar deslocamentos grandes (x/x_o), a não linearidade inerente à atuação eletrostática de placas paralelas limita sua aplicação; esta poderá ser usada com um controle de carga. Neste caso, a estrutura é alimentada com uma carga constante Q^3 . Deste modo, a energia armazenada no capacitor, e, por sua vez, a energia total do sistema é dada por:

$$E = \frac{Q^2}{2C} = \frac{(x_o + x) Q^2}{2A \epsilon_o \epsilon_r} \quad (10.10)$$

A força eletrostática será então:

$$F_{es} = - \frac{Q^2}{2A \epsilon_o \epsilon_r} \quad (10.11)$$

que é independente do deslocamento x .

Outro método de atuação eletrostática linear é o conhecido como atuador tipo “pente” (*comb-drive*) com controle de tensão. Este atuador é formado de duas estruturas tipo “pente” semi-encaixadas uma na outra, como mostra a Figura 10.2.

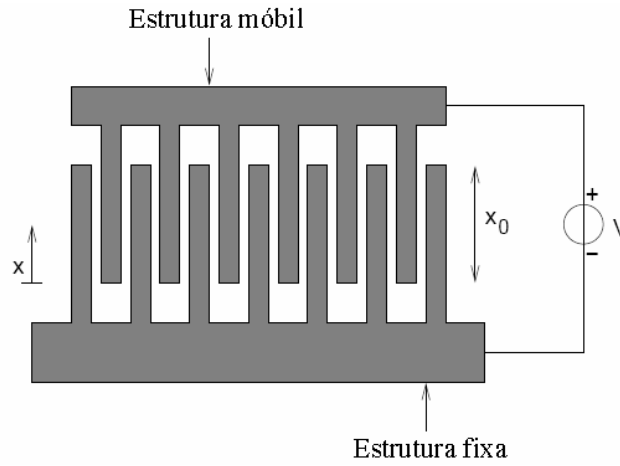


Figura 10.2 - Atuador tipo “pente” com controle de tensão. Espaçamento inicial x_0 para um V nulo.

Se os “dedos” do “pente” estão próximos e a distância horizontal entre eles é pequena, o capacitor de placas paralelas formado entre a ponta de cada “dedo” e o vizinho oposto pode ser ignorado, e a capacitância total entre o eletrodo fixo e o móvel pode-se assumir como uma função linear do deslocamento. Chamando de h a espessura (altura) da estrutura da figura anterior (espessura de cada “dedo”), à largura do espaçamento horizontal entre os “dedos” de g , e de n_{gap} ao número de espaçamentos (*gaps*) horizontais e, ainda, considerando apenas os capacitores horizontais formados entre cada um dos “dedos” de uma estrutura e o respectivo vizinho da outra, então a capacitância total é:

$$C = \frac{\epsilon_o \epsilon_r n_{gap} (x_o - x) h}{g} \quad (10.12)$$

Assim a energia armazenada será:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{\epsilon_o \epsilon_r n_{gap} (x_o - x) h V^2}{2g} \quad (10.13)$$

E a força eletrostática:

$$F_{es} = - \frac{\epsilon_o \epsilon_r n_{gap} h V^2}{2g} \quad (10.14)$$

Mais uma vez a força pode ser entendida como atrativa, porém, agora é independente do deslocamento x .

Na prática outros fatores deverão ser considerados. Primeiramente, os n_{gap} capacitores formados também geram uma força que age na direção transversal ao movimento. Se todos os espaçamentos têm igual largura, a força transversal se cancela uma com a outra, mas continua causando o efeito de mola eletrostática e, por tanto, aumentará a flexibilidade da estrutura naquela direção. Se os espaçamentos não são iguais, a força eletrostática não se cancelará, e assim, forças adicionais continuarão agindo na direção transversal.

Outro aspecto a considerar seria que, se existe uma diferença de potencial entre o eletrodo móvel e o substrato, gerar-se-á uma força eletrostática vertical que puxa o eletrodo em direção ao substrato e, nos casos extremos, o conjunto colapsa. Como se forma um capacitor de placas paralelas, também haverá efeito de mola eletrostática na direção vertical. Uma maneira de contornar este problema é remover o substrato embaixo da estrutura móvel ou polarizando-o na mesma tensão que a estrutura móvel.

Por outro lado, o campo elétrico pode gerar uma força eletrostática que puxa a estrutura móvel para longe do substrato. Este fenômeno é conhecido como efeito de levitação eletrostática. Do mesmo modo que no caso anterior, pode-se evitar aplicando-se adequadamente as tensões no “pente” móvel e no substrato localizado abaixo da estrutura. Mas, isto reduz a força eletrostática na direção de interesse como consequência da redução do respectivo campo.

Tanto para a atuação feita por capacitores de placas paralelas quanto para o tipo “pente”, a força eletrostática gerada é proporcional ao quadrado da tensão. Tomando-se como a tensão de excitação a seguinte equação:

$$V_{exc}(t) = V_{DC} + V_{AC} \sin(\omega_{exc} t) \quad (10.15)$$

onde V_{DC} e V_{AC} são as componentes dc e ac da tensão de excitação, respectivamente, e ω_{exc} é a frequência à qual a excitação é feita, então a força resultante será proporcional a:

$$\begin{aligned} F_{es} &\sim [V_{DC} + V_{AC} \sin(\omega_{exc} t)]^2 \\ &= V_{DC}^2 + 2V_{DC} V_{AC} \sin(\omega_{exc} t) + V_{AC}^2 \sin^2(\omega_{exc} t) \\ &= V_{DC}^2 + \frac{V_{AC}^2}{2} + 2V_{DC} V_{AC} \sin(\omega_{exc} t) - \frac{V_{AC}^2}{2} \cos(2\omega_{exc} t) \end{aligned} \quad (10.16)$$

Nesta equação podemos ver que há forças geradas em três frequências diferentes: a dc, a ω_{exc} , e a $2\omega_{exc}$. Na excitação feita de um lado somente (*single-ended excitation*), a força gerada a dc causa um deslocamento estático do oscilador. As outras duas forças podem ser usadas para excitar o oscilador primário. Escolhendo a frequência de excitação igual à frequência de ressonância ω_{ox} , a componente da força resultante excitará o oscilador primário na sua frequência de ressonância:

$$F_{es} \sim 2V_{DC} V_{AC} \sin(\omega_{ox} t) \quad (10.17)$$

De outro modo, se a excitação é feita com uma frequência igual $\omega_{exc} = \omega_{ox}/2$, então a componente da força de excitação do oscilador primário será:

$$F_{es} \sim -\frac{V_{AC}^2}{2} \cos(\omega_{ox} t) \quad (10.18)$$

Isto significa que a excitação do oscilador pode ser feita na frequência de ressonância, no caso em que a força é proporcional ao produto das componentes dc e ac da tensão de excitação, ou à metade da frequência de ressonância, no caso em que a força é proporcional ao quadrado da componente ac.

Se o oscilador é excitado diferencialmente com uma tensão $\pm V_{exc}(t)/2$, a força dc e a em $2\omega_{0x}$ se cancelam. Neste caso, somente a força a ω_{0x} poderá ser usada para excitar o oscilador. Todavia é necessário levar em consideração que, embora o deslocamento estático seja cancelado a força a dc ainda causa o efeito de mola eletrostática no capacitor de placas paralelas, como foi comentado antes.

Enfatizamos que a análise anterior tem sua base assumindo que a força eletrostática usada para excitar o oscilador é independente do deslocamento x , o que é verdadeiro para o atuador tipo “pente” e de placas paralelas com carga controlada. Quando consideramos o atuador de placas paralelas com controle de tensão, devemos assumir que o deslocamento relativo x/x_0 é pequeno (menor que aproximadamente 1/10). Adicionalmente, destacamos que implicitamente consideramos como único efeito de não linearidade o efeito de mola eletrostática. Na prática, quando usamos um atuador de placas paralelas, a amplitude da oscilação frequentemente não é limitada pela área linear de operação. Isto se deve a que a amplitude de oscilação do oscilador primário deve ser maximizada para se maximizar também o movimento produzido pelo efeito de Coriolis no oscilador secundário. A amplitude da oscilação do modo atuador deve ser mantida menor do que 10% do valor do espaçamento (*gap*) de equilíbrio do eletrodo atuador, para evitar o efeito da não linearidade da força eletrostática.

Devido à forte não linearidade da expressão completa para F_{es} na Equação 10.4 com relação ao deslocamento x , para garantir o funcionamento adequado, precisa ser feita uma análise mais detalhada com uma tensão de excitação senoidal e uma variação do deslocamento senoidal. Convencionalmente esta análise é feita utilizando *softwares* para solucionar as expressões numéricas.

11 Detecção capacitiva

Como temos visto, a resposta de um giroscópio micromecânico envolve a conversão de uma informação de posição do oscilador primário e secundário em uma forma de detecção, que pode ser uma variação de tensão, de resistência ou uma variação de capacitância. Este último conhecido como método de detecção capacitiva. Este método tem como vantagens em relação aos outros; a facilidade de fabricação e integração, boa resposta dc e bom desempenho em relação ao ruído, alta sensibilidade, baixo *drift* e baixa sensibilidade à temperatura [47].

Semelhante à atuação capacitiva, a detecção por este método pode ser modelada como a combinação do movimento entre capacitores de placas paralelas. De maneira geral, a capacitância entre duas placas paralelas descreve-se como na Equação 10.2 e na Figura 10.1 da seção anterior. Na maioria dos casos é usada a detecção capacitiva diferencial com o fim de tornar linear a mudança da capacitância com relação ao deslocamento, conforme apresentado na Figura 11.1.

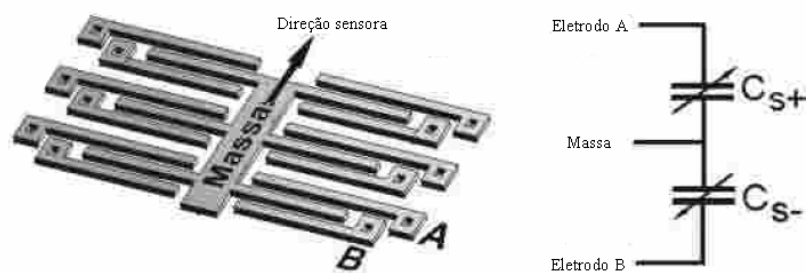


Figura 11.1 - Detecção capacitiva diferencial em um oscilador.

O deslocamento da estrutura nesta direção produz uma mudança nas capacitâncias. Para um deslocamento positivo, os eletrodos (“dedos”) conectados à massa aproximam-se aos eletrodos denotados com a letra A na Figura 11.1, aumentando a capacitância C_{s+} , e distanciam-se dos eletrodos B o que diminui a capacitância entre eles C_{s-} . Definindo como

y_o a separação inicial (*gap*) entre os eletrodos fixos e os móveis, l como o comprimento de cada eletrodo, e t a sua altura (espessura), a capacitância diferencial pode ser calculada como:

$$C_{s+} = N \frac{\epsilon_o t l}{y_o - y}, \quad C_{s-} = N \frac{\epsilon_o t l}{y_o + y}, \quad \Delta C = C_{s+} - C_{s-} = 2N \frac{\epsilon_o t l}{y_o^2} y \quad (11.1)$$

Como podemos ver a mudança da capacitância é inversamente proporcional ao quadrado do *gap* inicial entre os eletrodos. Disto podemos concluir que o desempenho do sensor (sensitividade, resolução e relação sinal/ruído) aumenta com a diminuição do *gap* entre os eletrodos, se desconsiderarmos outros fatores.

12 Estimativa do amortecimento

Na grande maioria das estruturas giroscópicas o mecanismo de amortecimento está concentrado principalmente no efeito do atrito viscoso com o ar na vizinhança da estrutura oscilante e com o ar confinado entre a massa de prova e as superfícies estacionárias. O atrito do material da estrutura (para silício) normalmente é algumas ordens de magnitude inferior ao atrito viscoso, e em geral é desprezado no cálculo. No sistema dinâmico o amortecimento está dominado pelo atrito interno do ar entre a massa de prova e o substrato, e entre os “dedos” do atuador tipo “pente” e dos capacitores de detecção. O atrito viscoso pode ser descrito pelos modelos: amortecimento por fluxo de Couette (*Couette flow damping*) e amortecimento por compressão de filmes (*squeeze film damping*).

O amortecimento por fluxo de Couette ocorre quando duas placas de área A , separadas por uma distância y_0 , se deslocam uma em relação à outra em paralelo (vide Figura 12.1, a)). Partindo do modelo de gás Newtoniano, o coeficiente de amortecimento por fluxo de Couette pode ser aproximado a:

$$c_{\text{Couette}} = \mu_p p \frac{A}{y_0} \quad (12.1)$$

onde $\mu_p = 3,710^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s Torr})$ é a constante de viscosidade do ar, p é a pressão do ar, A é a área de superposição das placas, e y_0 é a separação entre as placas.

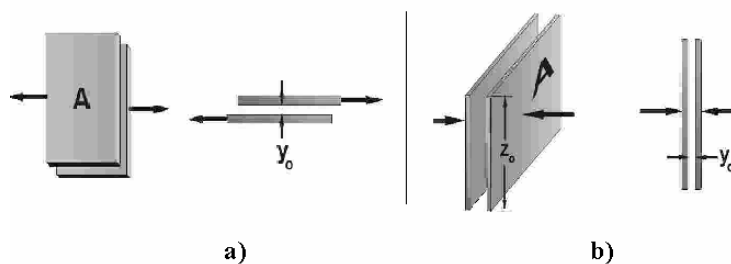


Figura 12.1 - a) Amortecimento por fluxo de Couette (*Couette flow damping*), quando as duas placas se deslocam uma em relação à outra em paralelo. b) Amortecimento por compressão de filmes (*squeeze film damping*), quando as duas placas se aproximam uma da outra.

O amortecimento por compressão de filmes ocorre quando duas placas se aproximam uma da outra comprimindo o filme do fluído que há entre elas (vide Figura 12.1, b)). Este tipo de amortecimento é mais complexo, a compressão do fluído pode mostrar o efeito de amortecimento (atrito) e o efeito de rigidez (*stiffness*). Utilizando a lei de Hagen-Poiseuille, este tipo de amortecimento pode ser modelado como:

$$c_{Squeeze} = \mu_p p \frac{7A z_o^2}{y_o^3} \quad (12.2)$$

onde z_o é a altura das placas de área A que se aproximam e y_o é a separação inicial entre elas.

Com estes modelos podemos estimar que o amortecimento total do modo atuador é a soma do amortecimento por fluxo de Couette entre a massa e o substrato e o amortecimento por fluxo de Couette entre os “dedos” do “pente”, dado por:

$$c_x = \mu_p p \frac{A}{z_o} + \mu_p p \frac{2N_{comb} l_{comb} t}{y_{comb}} \quad (12.3)$$

onde A é a área da superfície inferior da massa de prova, z_o é a distância que a separa do substrato, p é a pressão do ambiente dentro da cavidade onde o dispositivo está encapsulado, t é a espessura (altura) da estrutura, N_{comb} é o número de “dedos” do “pente” (*comb*), y_{comb} é a distância entre os “dedos”, e l_{comb} é o comprimento dos mesmos.

No modo sensor, o amortecimento total é a soma do amortecimento por fluxo de Couette entre a massa e o substrato e o amortecimento por compressão de filmes entre os “dedos” do “pente”, dado por:

$$c_y = \mu_p p \frac{A}{z_o} + \mu_p p \frac{7N_{comb} l_{comb} t^3}{y_{comb}^3} \quad (12.4)$$

Para maior precisão devem ser considerados outros efeitos como o de rarefação do gás a baixas pressões e *gaps* muito pequenos, a não linearidade dos efeitos de amortecimento por compressão de filmes, modelos que considerem a cinética dos gases e o movimento de placas dentro destes fluídos que, conjuntamente com simulações da dinâmica dos fluídos, permitam maior precisão na estimativa do amortecimento. Estudos mais aprofundados podem ser encontrados em [68, 69, 70].

13 Conclusão

Com este estudo foi dada uma visão geral dos giroscópios MEMS, e dos principais tipos de estruturas e princípios de funcionamento utilizados por estes. Foram destacadas particularidades das técnicas de fabricação, dos materiais envolvidos e de características do desenho da estrutura, que resultam promissoras para a obtenção de um dispositivo de alto desempenho, tendo em vista atender às demandas de desenvolvimento de sensores inerciais para aplicações espaciais no INPE.

Com esta pesquisa concluímos que a maior parte dos projetos promissores de giroscópios MEMS usa estruturas vibratórias com alto fator de qualidade mecânico. Concluímos também, que para a fabricação de giroscópios MEMS de alto desempenho é necessário utilizar processos avançados. Estes processos incluem a técnica de corrosão vertical profunda de silício (DRIE - *Deep Reactive Ion Etch*), viabilizada por um reator de corrosão por plasma capaz de operar a baixas pressões e altas densidades de plasma, e com chaveadores rápidos e de longa vida do fluxo de gases.

As análises feitas neste trabalho permitem inferir que o silício monocristalino é o material mais promissor para ser utilizado na fabricação da estrutura do giroscópio de alto desempenho, isto devido às propriedades mecânicas destes materiais, de menor dissipação interna e elevado fator de qualidade. Por ser o silício também o material mais utilizado em microeletrônica, seu uso para a fabricação de giroscópios permite a utilização de técnicas convencionais bem conhecidas e facilita a integração com a eletrônica de processamento do sinal do sensor.

Considerando a necessidade de giroscópios de alto desempenho e robustez para finalidades espaciais, concluímos que as estruturas mais promissoras são estruturas do tipo TFG (*tuning fork gyros*) de massas oscilantes com modos de atuação e detecção desacoplados mecanicamente fabricadas em substrato SOI com camada ativa de Si cristalino (111). Também, entendemos que a detecção capacitiva e a atuação eletrostática oferecem maiores benefícios em relação a outros esquemas de detecção e atuação, pela facilidade de

implementação, por não requerer materiais especiais, e por ter baixo consumo de potência e boa estabilidade com a temperatura.

Como consequência desta pesquisa, os trabalhos futuros estarão direcionados ao desenho e dimensionamento físico de um giroscópio tipo TFG de massas oscilantes com modos de atuação e detecção desacoplados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 PATZELT, J. Inertial sensor technology moves consumer electronics. **MINAPIM news**, 2007. Disponível em: <<http://www.suframa.gov.br/minapim/news/>>. Acesso em: fev.2008.
- 2 HODGINS, D.; LINK, T.; TRÄCHTLER, M. Inertial Sensors for Body Monitoring Applications. **MINAPIM news**, 2006. Disponível em: <<http://www.suframa.gov.br/minapim/news/>>. Acesso em: fev.2008.
- 3 BARBOUR, N.; SCHMIDT, G. Inertial sensor technology trends. **IEEE Sensors Journal**, v.1, n. 4, p. 332, 2001.
- 4 GREIFF, P.; BOXENHOM, B.; KING, T.; NILES, L. Silicon monolithic micromechanical gyroscope. In: TECH. DIG.INT. CONF. SOLID-STATE SENSORS AND ACTUATORS IEEE Transducers'91, 6., San Francisco. **Proceedings...** San Francisco: IEEE, 1991. 966p.
- 5 WITCH, H.; DE HAAN, S.; BOUCHAUD, J. NEXUS market analysis for MEMS and microsystems III 2005 - 2009. **MINAPIM news**. Disponível em: <<http://www.suframa.gov.br/minapim/news/>>. Acesso em: nov.2005.
- 6 DIXON, R.; BOUCHAUD, J. Prospects for MEMS in the automotive industry. **MINAPIM news**. Disponível em: <<http://www.suframa.gov.br/minapim/news/>>. Acesso em: dez.2007.
- 7 KOUREPENIS, A.; BORENSTEIN, J.; CONNELLY, J.; ELLIOTT, R.; WARD, P.; WEINBERG, M. Performance of MEMS inertial sensors. **Draper Lab. IEEE / PLANS**, 1998.
- 8 YOON, S. W.; LEE, S. W.; PERKINS, N. C.; . NAJAFI, K. Vibration sensitivity of MEMS tuning fork gyroscopes. IEEE SENSORS CONFERENCE, 2007, Atlanta, Georgia, USA. **Proceedings...** Atlanta: IEEE, 2007.
- 9 BERNSTEIN, J.; CHO, S.; KING, A. T.; KOUREPENIS, A.; MACIAL, P.; WEINBERG, M. A Micromachined comb-drive tuning fork rate gyroscope, Draper Lab. IEEE INT. CONF. MICRO ELECTROMECHANICAL SYSTEMS MEMS'93, 6., 1993, San Diego. **Proceedings...** San Diego: IEEE, 1993.
- 10 GEIGER, W.; BUTT, W.U.; GAISSER, A.; FRETCH, J.; BRAXMAIER, M.; LINK, T.; KOHNE, A.; NOMMENSEN, P.; SANDMAIRER, H.; LANG, W. Decoupled Microgyros and the Design Principle DAVED. **Sensors and Actuators**, v. A 95, p. 239, 2002.
- 11 LUTZ, M. et al. A precision yaw rate sensor in silicon micromachining. In: CONF SOLID STATE SENSORS AND ACTUATORS (TRANSDUCERS '97), 9., 1997, Chigado. **Proceedings...** Chicago: Tech. Dig. Int., 1997. p. 847.

-
- 12 SONG, C. Commercial vision of silicon based inertial sensors. CONF SOLID STATE SENSORS AND ACTUATORS (TRANSDUCERS '97), 9., 1997, Chigado. **Proceedings...** Chicago: Tech. Dig. Int., 1997.
- 13 TANG, T. K.; GUTIERREZ, R. C.; STELL, C. B.; VORPERIAN, V. G.; ARAKAKI, A.; RICE, J. T.; LI, W. J.; CHAKRABORTY, I.; SHCHEGLOV, K.; WILCOX, J. Z.; KAISER, W. J. **A packaged Silicon MEMS Vibratory Gyroscope for Microspacecraft**. Pasadena CA: NASA Tech Briefs, 1997.
- 14 BERNSTEIN, J. An Overview of MEMS Inertial Sensing Technology. **Sensors**, 2003. Disponível em: <www.sensorsmag.com>. Acesso em: jul.2008
- 15 Silicon Sensing Company. General Product. 2008. Catálogo.
- 16 SHKEL, A.; HOWE, R.T.; HOROWITZ, R. **Modeling and Simulation of Micromachined Gyroscopes in the Presence of Imperfections**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODELING AND SIMULATION OF MICROSYSTEMS, 1999, San Juan. **Proceedings...** San Juan: [s.n], 1999. P. 605.
- 17 FERREIRA, L. O. S. Introdução à Tecnologia LIGA. In: **Oficina de microfabricação: projeto e construção de CI's MOS**, Universidade Estadual de Campinas, 2006. cap. 15.
- 18 PUTTY, M. W.; NANAFI, K. A micromachined vibrating ring gyroscope. **Tech. Dig. Solid-State Sens. Actuator Workshop**, p. 213, 1994.
- 19 ALPER, S. E.; AKIN, T. Symmetrical and decoupled nickel microgyroscope on insulating substrate. **Sensors and Actuators**, v. A 115, p. 336, 2004.
- 20 FEDDER, G. K. MEMS fabrication. IEEE INTERNATIONAL TEST CONFERENCE (ITC), 2003, Charlotte. **Proceedings...** charlotte: IEEE, 2003.
- 21 JORGENSEN, A. M.; MOGENSEN, K. B. Silicon and Cleanroom Processing. **Microsystem Engineering of Lab-on-a-Chip Devices**. Disponível em: <<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/bookhome/107061803/>>. Acesso em: jul.2008. cap. 6. And In: Geschke, O.; Klank, H.; Telleman, P. (Ed.). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004.
- 22 WU, A.; VARGO, S.; TURNER, T. **Reactive-ion etching of smooth vertical walls in silicon**. NASA Tech Briefs, 2000.
- 23 FLAMM, A. L. Mechanisms of Silicon Etching in Fluorine- and Chlorine- containing Plasmas. **Pure & Appl. Chem.**, v. 64, n. 9, p. 1709, 1990.
- 24 ALPER, S. E.; OCAK, I. E.; AKIN, T. Ultrathick and High-Aspect-Ratio Nickel Microgyroscope Using EFAB Multilayer Additive Electroforming. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 16, n. 5, p. 1025, 2007.
- 25 Analog Devices. Disponível em: <<http://www.analogdevices.com>>. Acesso em: abr.2008.

-
- 26 GABRIELSON, T. B. Mechanical-Thermal Noise in Micromachined Acoustic and Vibration Sensors. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 40, n. 5, 1993.
- 27 AYAZI, F.; NAJAFI, K. Design and Fabrication of A High-Performance Polysilicon Vibrating Ring Gyroscope. In: IEEE/ASME / PROC. MEMS '98, 11., 1998, Heidelberg, Germany. **Proceedings...**Heidelberg, 1998.
- 28 AYAZI, F.; NAJAFI, K. High Aspect-Ratio Dry-Releas Poly-Silicon MEMS Technology For Inertial-Grade Microgyroscopes. **Proc. of the IEEE**, p. 304, 2000.
- 29 AYAZI, F.; CHEN, H. H.; KOCER, F.; HE, G.; NAJAFI, K. A High Aspect-Ratio Polysilicon Vibrating Ring Gyroscope. **Tech. Dig. Solid-State Sensor and Actuator Workshop**, p. 289, 2000.
- 30 AYAZI, F.; NAJAFI, K.; HARPSS, A. Polysilicon Vibrating Ring Gyroscope. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 10, n. 2, 2001.
- 31 BERSTEIN, J.; MILLER, R.; KELLEY, W.; WARD, P. Low-Noise MEMS Vibration Sensor for Geophysical Applications. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 8, n. 4, 1999.
- 32 HE, G.; NAJAFI, K. A Single-Crystal Silicon Vibrating Ring Gyroscope. IEEE INT. CONF. ON MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS (MEMS 2002), 15.,**Proceedings...** IEEE, p. 718, 2002.
- 33 ZAMAN, M.; SHARMA, A.; AMINI, B.; AYAZI, F. Towards Inertial Grade Vibratory Microgyros: A High-Q In-Plane Silicon-On-Insulator Tuning Fork Device. **Solid-State Sensor, Actuator and Microsystems Workshop**, 2004.
- 34 SHARMA, A.; ZAMAN, M.; AYAZI, F. A 0.2°/hr Micro-Gyroscope with Automatic CMOS Mode Matching. In: ISSCC(2007), 2007, [S.l.], **Proceedings...** [S.l.:s.n], 2007.
- 35 SAWYER, W. D.; PRINCE, M. S.; BROWN, G. J. SOI bonded wafer process for high precision MEMS inertial sensors. **J. Micromech. Microeng.**, n. 15, p. 1588, 2005.
- 36 ALPER, S. E.; AKIN, T. A Single-Crystal Silicon Symmetrical and Decoupled MEMS Gyroscope on an Insulating Substrate. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 14, n. 4, p. 707, 2005.
- 37 KIM, J.; CHO, D.; MULLER, R. S. Why is (111) Si a Better Mechanical Material for MEMS. **Digest Transducers '01**, p. 662, 2001.
- 38 MURAKAMI, K.; WAKABAYASHI, Y.; MINAMI, K.; ESASHI, M. Cryogenic dry etching for high aspect ratio microstructures. **IEEE / Proc. MEMS'93**, 1993.
- 39 PUECH, M.; THEVENOUD, J. M.; GRUFFAT, J. M.; LAUNAY, N.; GODINAT, P.; LE BARILLECY, O. Achievements & Perspectives of DRIE Technology for the Microsystems Market. **News from micralyne** (MEMS Foundry). Disponível em: http://www.micralyne.com/newslyne/edition16_alcatel.html. Acesso em: abr.2008.

-
- 40 SCHILP, A.; HAUSNER, M.; PUECH, M.; LAUNAY, N.; KARAGOEZOGLU, H.; LAERMER, F. Advanced Etch Tool for High Etch Rate Deep Reactive Ion Etching in Silicon Micromachining Production Environment. Disponível em: www.sea.rl.ac.uk/NewSEA/newpubs/i-speeder/MST2001.pdf. Acesso em: nov.2008.
- 41 WALKER, M. J. Comparison of Bosch and cryogenic processes for patterning high-aspect-ratio features in silicon. **Proc. SPIE**, v. 4407, p. 89, 2001.
- 42 AYÓN, A. A.; BAYT, R. L.; BREUER, K. S. Deep reactive ion etching: a promising technology for micro- and nanosatellites. **IOP Publishing Ltd. Smart Mater. Struct.** N. 10, p. 1135, 2001.
- 43 MARTY, F.; ROUSSEAU, L.; SAADANY, B.; MERCIAR, B.; FRANÇAIS, O.; MITA, Y.; BOUROUINA, T. Advanced etching of silicon based on deep reactive ion etching for silicon high aspect ratio microstructures and three-dimensional micro- and nanostructures. **Microelectronics Journal**, v. 36, p. 673, 2005.
- 44 MOCHIDA, Y.; TAMURA, M.; OHWADA, K. A Micromachined Vibrating Rate Gyroscope with Independent Beams for the Drive and Detection Modes. **Proc. MEMS'99**, p. 618, 1999.
- 45 YOON, S. W.; LEE, S. W.; PERKINS, N. C.; NAJAFI, K. Vibration Sensitivity of MEMS Tuning Fork Gyroscopes. **IEEE Sensors Conference**, p. 115, 2007.
- 46 ZAMAN, M.; SHARMA, A.; AYAZI, F. M.F. High Performance Matched-Mode Tuning Fork Gyroscope. **IEEE / Proc. MEMS'2006**, 2006.
- 47 ACAR, C. Robust Micromachined Vibratory Gyroscopes. **Tese (Ph.D. Thesis)** - Univ. California, 2004.
- 48 ALPER, S. E.; AZGIN, k.; AKIN, T. A high-performance silicon-on-insulator MEMS gyroscope operating at atmospheric pressure. **Sensors and Actuators**, v. A 135, p. 34, 2007.
- 49 ALPER, S. E.; AZGIN, k.; AKIN, T. A Symmetric Surface Micromachined Gyroscope with Decoupled Oscillation Modes. **Transducers '01 / Eurosensors XV**, 2001.
- 50 SAUKOSKI, M. **System and circuit design for a capacitive MEMS Gyroscope**. Dissertação (Ph.D. Dissertation) - Helsinki University of Technology, 2008.
- 51 KULYGIN, A.; SCHMID, U.; SEIDEL, H. Characterization of a novel micromachined gyroscope under varying ambient pressure conditions. **Sensors and Actuators**, v. A 145–146, p. 52, 2008.
- 52 GEEN, J. A.; SHERMAN, S. J.; . CHANG, J. F.; LEWIS, S. R. Single-Chip Surface Micromachined Integrated Gyroscope With 50 /h Allan Deviation. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 37, n. 12, 2002.
- 53 PARK, K. Y.; LEE, C. W.; OH, Y. S.; CHO, Y. H. Laterally oscillated and force

-
- balanced micro vibratory rate gyroscope supported by fish-hook shape springs. In: IEEE MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS WORKSHOP (MEMS97), 1997, **Proceedings...** 1997. p. 494.
- 54 XEI, H.; FEDDER, G. K. Integrated Microelectromechanical Gyroscopes. **Journal of Aerospace Engineering**, v. 16, n. 2, p 65, 2003.
- 55 LIU, G.; WANG, A.; JIANG, T.; JIAO, J.; JANG, J. B. A Novel Tuning Fork Vibratory Microgyroscope with Improved Spring Beams. IEEE INT. CONF. ON NANO/MICRO ENGINEERED AND MOLECULAR SYSTEMS, 3., 2008. **Proceedings...** 2008. p. 257.
- 56 JIANG, T.; WANG, A.; JIAO, J.; LIU, G. Detection capacitance analysis method for tuning fork micromachined gyroscope based on elastic body model. **Sensors and Actuators**, v. A 128, p. 52, 2006.
- 57 PARK, K. Y.; LEE, C. W.; OH, Y. S.; CHO, Y. H. Laterally oscillated and force-balanced micro vibratory rate gyroscope supported by fish-hook shape springs. IEEE MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS WORKSHOP (MEMS97), 1997., **Proceedings....** 1997. p. 494.
- 58 MOHITE, S.; PATIL, N.; PRATAP, R. Design, modelling and simulation of vibratory micromachined gyroscopes. International MEMS Conference. IOP Publishing Ltd. **Journal of Physics: Conference Series 34**, p. 757, 2006.
- 59 SHKEL, A. M.; HOROWITZ, R.; SESHIA, A. A.; PARK, S.; HOWE, R. T. Dynamics and Control of Micromachined Gyroscopes. In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 1999. **Proceedings...** 1999.
- 60 SAUKOSKI, M.; AALTONEN, L.; HALONEN, K. A. I. Zero-Rate Output and Quadrature Compensation in Vibratory MEMS Gyroscopes. **IEEE Sensors Journal**, v. 7, n. 12, p. 1639, 2007.
- 61 CLARK, T.; NGUYEN, C.; HOWE, R. T. CMOS Micromechanical Resonator Oscillator. **Proc. of IEEE IEDM 93**, p. 199, 1993.
- 62 BEEBY, S.; ENSELL, G.; KRAFT, M.; WHITE, N. **MEMS Mechanical Sensors**. Artech House, Inc. Microelectromechanical Systems Series, 2004.
- 63 CARBONARI, R. C. **Projeto de atuadores piezelétricos flexensionais usando o método de otimização topológica**. Dissertação - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.
- 64 YAZDI, N.; AYAZI, F.; NAJAFI, K. Micromachined Inertial Sensors. **Proc. of IEEE**, v. 86, n. 8, 1998.
- 65 PAOLETTI, F.; GRÉTILLAT, M. A.; ROOIJ, N. F. A Silicon Micromachined Vibrating Gyroscope with Piezoresistive Detection and Electromagnetic Excitation.

IEEE, p. 162, 1996.

- 66 NASIRI, S. A Critical Review of MEMS Gyroscopes Technology and Commercialization Status. **InvenSense Inc**, [200-].
- 67 RUBIO, W. M.; SILVA, E. C. N. Projeto de MEMS eletrotermomecânicos usando otimização topológica. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP** - Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. BT/PMR/0616) ISSN 1517-3526.
- 68 VEMURI, S. K. **Behavioral modeling of viscous damping in MEMS**. M. S. Thesis Report - Department of Electrical and Computer Engineering Carnegie Mellon University, 2000.
- 69 SCHRAG, G.; WACHUTKA, G. Physically based modeling of squeeze film damping by mixed-level system simulation. **Sensors and Actuators**, v. A 97-98, p. 193, 2002.
- 70 VEIJOLA, T.; TUROWSKI, M. Compact Damping Models for Laterally Moving Microstructures with Gas-Rarefaction Effects. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 10, n. 2, p. 263, 2001.