

# Microssistemas Integrados (MEMS)

**Renato P. Ribas**

Instituto de Informática – UFRGS

E-mail: rpribas@inf.ufrgs.br

*O crescente interesse de pesquisadores e industriais sobre os microssistemas, nesses últimos anos, é facilmente justificado pelos inúmeros dispositivos e aplicações potenciais nas mais diversas áreas emergentes de telecomunicações, automobilística, médica e biomédica. O desenvolvimento de técnicas de fabricação de micro-estruturas suspensas têm motivado a construção de sensores e atuadores miniaturizados, muitas vezes fabricados sobre pastilhas de circuitos integrados. Dessa forma, torna-se possível a obtenção de microssistemas monolíticos, onde partes não-eletrônicas (sensores e atuadores), interface analógica e controle digital são construídas no mesmo chip. O interesse nessa nova área de desenvolvimento é o mesmo que motivou a evolução dos CIs digitais nas últimas décadas, ou seja, redução de tamanho (peso), melhor desempenho, menor consumo, maior flexibilidade de projeto, além dos menores custos de fabricação para grande escala de produção. Neste capítulo será apresentada de forma simples, clara e ordenada uma visão geral sobre as técnicas de fabricação de microssistemas e sobre alguns dispositivos promissores associados a esta nova linha de desenvolvimento tecnológico, além de uma breve discussão sobre modelagem e ferramentas de CAD para MEMS.*

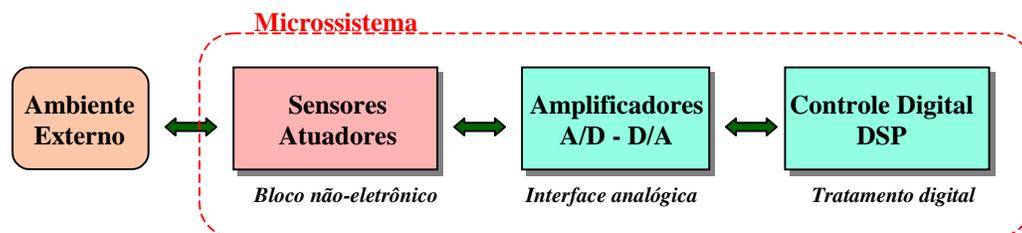
## 1. Introdução

Após o sucesso dos circuitos integrados (CIs) digitais na década de 80, com a extraordinária evolução da capacidade de integração, confiabilidade e desempenho, tudo isso associado à redução dos custos de fabricação, a década de 90 foi marcada principalmente pelo interesse nos microssistemas e nas micro-máquinas. O avanço nos processos de fabricação de CIs permite hoje a construção de micro-estruturas mecânicas (suspensas), móveis ou não, que podem ser exploradas como sensores e/ou atuadores em sistemas miniaturizados. Certamente inúmeras são as áreas de interesse e aplicações potenciais para essas micro-estruturas. A indústria automobilística, as telecomunicações, os sistemas médicos e biomédicos representam o mercado principal, embora as áreas de instrumentação, controle de processos, aeronáutica e certamente a automação industrial vêm nesses micro-mecanismos mecânicos uma forma de desenvolver sensores e atuadores para aplicações antes limitadas pelo tamanho dos dispositivos. O mercado mundial de microssistemas, representava 12 bilhões de dólares e 1,3 bilhões de unidades em 1996, e deverá passar para 34 bilhões de dólares e 5,4 bilhões de unidades até o ano 2002. Hoje o crescimento dos mercados de sensores de pressão e acelerômetros (1 eixo) é de 18% e 15%, respectivamente.

Embora os microssistemas não sejam realmente novos (sensores de pressão miniaturizados datam da década de 60), a nomenclatura utilizada ainda não está padronizada. O termo **‘micro-máquinas’** (*micromachines*) é muito usado na Ásia, enquanto que os europeus preferem o termo **‘microssistemas’** (*microsystems*). Nos EUA a sigla **‘MEMS’** (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) permanece o termo dominante para referenciar não apenas dispositivos eletro-mecânicos mas também estruturas micro-usinadas de forma geral. O

termo 'MOEMS' (*Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems*) pode também ser encontrado quando componentes óticos estão envolvidos. Talvez o termo mais abrangente seja 'MST' (*Microsystems Technology*), embora ainda pouco encontrado. O termo 'micromachining', por sua vez, refere-se às técnicas ou ao processo de micro-usinagem propriamente dito.

Os microssistemas poderiam ser definidos como sistemas miniaturizados compostos por três blocos fundamentais, ilustrados na Figura 1: o bloco de comunicação com o meio exterior que age como sensor e/ou atuador; o bloco de interface analógica para aquisição/transmissão e amplificação dos sinais dos sensores/atuadores; e o bloco de controle e tratamento numérico.



**Figura 1: Blocos funcionais dos microssistemas integrados.**

O principal esforço mundial hoje está na miniaturização e na integração dos sensores e atuadores, uma vez que o desenvolvimento dos circuitos eletrônicos, tanto digitais quanto analógicos, apresentam-se bastante avançados. Além disso, o microssistema final pode ser implementado de forma híbrida ou monolítica. Híbrida quando este é composto por mais de um chip, geralmente quando a eletrônica é separada das estruturas micro-usinadas (mecânicas). Monolítica no caso da integração do sistema completo dentro de um único chip. A possibilidade de fazer algo monolítico é geralmente preferencial devido à redução dos problemas de interface entre os chips (confiabilidade e desempenho) e aumento do rendimento de fabricação em grande escala de produção.

Por fim, assim como ocorre nos CIs eletrônicos, o silício é o material mais usado para a construção dos microssistemas integrados principalmente pelo seu custo e pelo avançado estado de desenvolvimento das tecnologias disponíveis [PET82]. Por outro lado, materiais alternativos como o AsGa, InP e o quartz têm sido considerados para aplicações onde o silício não se apresenta apropriado (opto-eletrônica, piezoeletricidade, altas temperaturas,...) [HJO94][LEC98].

## 2. Processos de Fabricação

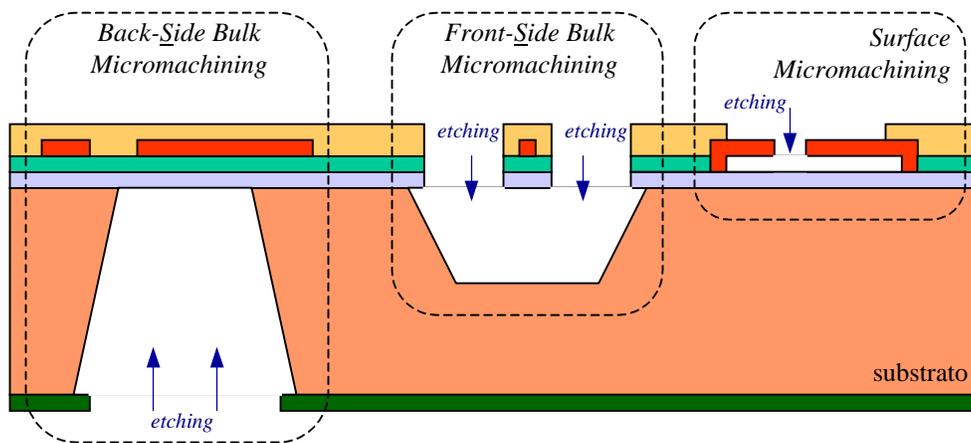
Portanto, o grande desafio consiste em fabricar micro-sensores e micro-atuadores sobre um substrato antes utilizado apenas para a construção de componentes eletrônicos (transistores, diodos, resistores,...). Estes dispositivos têm sido construídos principalmente através do uso de micro-estruturas suspensas ou micro-usinadas. As estruturas comumente

encontradas são pontes, vigas e membranas, embora outras geometrias podem também ser realizadas para as mais diversas aplicações.

É possível dividir as técnicas de fabricação de micro-estruturas em dois grandes grupos: **processos específicos para microssistemas** e **processos compatíveis com a microeletrônica**. Os processos específicos para a construção de microssistemas, como por exemplo o LIGA e o SCREAM, geralmente comprometem a integração da eletrônica e, por consequência, apenas microssistemas híbridos podem ser realizados [EHR88][SHA94]. As técnicas compatíveis com os processos de fabricação de circuitos integrados (microeletrônica), por sua vez, poderiam ainda ser classificadas segundo as regiões ou camadas que são removidas (corroídas) para a liberação das estruturas suspensas, conforme visto na Figura 2 :

- remoção do substrato pela face anterior ou frontal (*front-side bulk micromachining*);
- remoção do substrato pelo face posterior (*back-side bulk micromachining*); e
- remoção de camadas sacrificiais da superfície do substrato (*surface micromachining*).

A construção de tais estruturas é geralmente feita após a fabricação dos circuitos eletrônicos devido à complexidade dos processos de microeletrônica, enquanto que muitas vezes uma simples etapa de corrosão é suficiente para a liberação das estruturas suspensas. Os termos 'gravação', 'ataque' e 'usinagem' serão utilizados aqui indistintamente para se referir ao ato ou etapa de corrosão do material (*etching*).



**Figura 2:** Formas básicas de micro-usinagem para a construção de estruturas suspensas.

## 2.1. Usinagem em Volume (*Bulk Micromachining*)

Micro-estruturas suspensas são facilmente construídas a partir da corrosão da face anterior e/ou posterior do substrato (micro-usinagem em volume), *front-* e *back-side etching*, respectivamente. As diferenças entre essas duas técnicas de micro-usinagem são bastante acentuadas tanto no processo de fabricação quanto no tipo de estrutura desejada.

No caso da **usinagem pela face anterior**, a suspensão da estrutura deve-se principalmente ao processo de corrosão lateral (*underetching*). Neste caso o alinhamento da máscara para a etapa de gravação é muito simples (convencional dos processos de microeletrônica), permitindo a obtenção de estruturas menores e refinadas. A geometria da estrutura é determinada pelo posicionamento das aberturas na máscara previstas para a corrosão do substrato.

Um exemplo desta técnica consiste em preparar a exposição da superfície do substrato durante a fabricação do circuito integrado através da superposição de vias, contatos e aberturas na passivação (camadas convencionais de um processo de microeletrônica). Após a conclusão do CI os chips são então expostos a uma solução química que ataca o material do substrato sem atacar de forma significativa as camadas presentes na superfície deste, ou seja, a metalização dos *pads* para contato externo e a passivação do circuito que protege os componentes eletrônicos [MOS90]. Esta técnica é eficiente em termos de custos e tempo de fabricação assim como em relação à compatibilidade com a eletrônica. Porém, a quase inexistente liberdade de alteração das etapas do processo e as características das camadas existentes (espessura, resistividade, dopagem,...) comprometem a flexibilidade do projeto e limitam as aplicações alvejadas. Em outras palavras, nesta abordagem os dispositivos e aplicações devem ser cuidadosamente identificados para cada processo de fabricação utilizado. Serviços de fabricação de protótipos de microssistemas como MOSIS (EUA) e CMP (França) oferecem este tipo de abordagem [TOM88][COU97].

A **usinagem pela face posterior** do substrato, por sua vez, é bastante utilizada para a realização de membranas. O objetivo principal é a realização de uma corrosão profunda e praticamente sem corrosão lateral significativa. Porém, neste caso, o alinhamento da máscara posterior geralmente representa uma dificuldade, assim como o controle da profundidade da corrosão, resultando conseqüentemente em estruturas maiores e mais grosseiras.

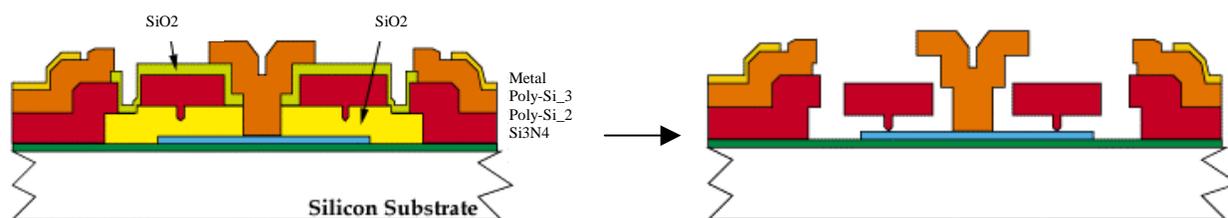
As soluções químicas utilizadas na corrosão do substrato podem ser tanto úmidas (líquidas) quanto secas (gases, plasmas). Elas apresentam propriedades bastante particulares que fogem porém do escopo deste texto. As soluções úmidas têm sido preferidas por sua simplicidade e facilidade de aplicação. Características importantes da gravura úmida são a sua **anisotropia**, quando as direções de ataque do material são preferenciais segundo a disposição dos seus planos cristalográficos, e a **seletividade** do ataque entre diferentes materiais, onde o princípio é remover um material, chamado de camada sacrificial, sem atacar outros, denominados como camadas de parada de ataque (*etch stop layers*) [SEI84][WIL96][COL97].

## 2.2. Usinagem de Superfície (*Surface Micromachining*)

O termo em inglês '*surface micromachining*', ou seja, a micro-usinagem de superfície refere-se exatamente aos processos de construção de micro-estruturas suspensas a partir da remoção ou corrosão de camadas presentes na superfície do substrato [LIN92]. Estas camadas podem ser tanto dielétricos quanto metais que quando utilizadas para tal fim são denominadas de camadas sacrificiais. Portanto, após a fabricação do CI, uma certa camada que esteja

acessível externamente pode ser removida através de um ataque seletivo. O óxido de silício e o alumínio são bastante utilizados como camadas sacrificiais em processos de silício.

Um processo comercial para a construção de micro-estruturas na superfície do substrato é oferecido pela organização MCNC MEMS Technology Applications Center, onde a remoção da camada sacrificial de óxido de silício permite a suspensão de espessas camadas de polissilício, conforme ilustrado na Figura 3 [KOE96]. Esta tecnologia não permite a integração de componentes eletrônicos, sendo usada exclusivamente para a construção de estruturas mecânicas sobre o substrato de silício.



**Figura 3: Fabricação de estruturas suspensas na superfície do substrato.**

Um problema que merece muita atenção durante a construção das estruturas é a colagem das camadas suspensas (*stiction effects*) devido às forças de capilaridade presentes nas soluções de corrosão líquidas (úmidas).

### 3. Dispositivos Micro-Usinados e Aplicações

As estruturas suspensas ou micro-usinadas têm sido utilizadas principalmente para a construção de sensores e atuadores miniaturizados. Diversos fenômenos ou efeitos físicos e químicos podem ser considerados como estímulos externos para a realização de uma determinada tarefa, tanto de sensação quanto de atuação [GAR94][SZE94].

Além de deformações mecânicas, geralmente observadas em sensores e atuadores móveis, a isolamento térmica para a obtenção de um aquecimento diferenciado de determinadas regiões em relação ao substrato também têm sido bastante considerada na utilização de micro-estruturas. Partes suspensas apresentam menor área de dissipação térmica por condução (principal forma de condução de calor) e portanto maior resistência térmica. Por consequência, estas partes aquecem mais do que o restante do chip quando expostos às fontes de calor. A seguir serão apresentados alguns tipos de dispositivos micro-usinados e aplicações ou sistemas em que eles possam ser eficientemente usados.

Para uma melhor exposição do assunto, os dispositivos foram divididos nos seguintes grupos :

- dispositivos térmicos;
- dispositivos óticos;

- dispositivos mecânicos;
- dispositivos para RF e microondas.

Observa-se que a classificação adotada neste texto não inclui todos os dispositivos micro-usinados possíveis ou existentes. Sensores químicos ISFET, sensores acústicos SAW, sensores magnéticos Hall são alguns exemplos de dispositivos que podem também tirar proveito de técnicas de micro-fabricação para melhorar o seu desempenho. Além disso, alguns dispositivos poderiam ser apresentados em dois ou mais grupos, como no caso de espelhos móveis (mecânicos) para aplicações óticas, ou atuadores térmicos para chaveamento mecânico.

### 3.1. Dispositivos Térmicos

O fato de criar regiões no chip onde não há contato, ou melhor, onde a área de contato com o substrato é bastante reduzida, permite um aquecimento desproporcional e mais elevado destas regiões em relação ao restante do chip. Isto porque a dissipação térmica da estrutura fica limitada à condutividade dos pontos de apoio (braços) e ao transporte de calor por convecção e radiação [MEI94]. Se o substrato do chip é tomado como temperatura de referência, a temperatura mais elevada obtida nas estruturas pode ser usada como parâmetro de observação e medida de fenômenos que provoquem aquecimento como, por exemplo, a absorção de luz infra-vermelha.

Talvez o elemento mais simples e de fácil compreensão é o **resistor suspenso**. O resistor pode ser representado tanto por um semiconductor quanto por um metal. Este, quando posicionado sobre uma ponte ou membrana aquecida, apresentará uma variação do seu valor de resistência proporcional à elevação da temperatura, representado pelo coeficiente TCR (*temperature coefficient of resistivity*) do material (ver Figura 4a). O uso de um segundo resistor de referência sobre o substrato permite a avaliação da temperatura. A aplicação mais direta deste dispositivo é o bolometro para detecção de irradiação infra-vermelha [SHI96]. Além disso, a resistência suspensa é muito usada na geração de calor (*heaters*) e detecção da dissipação térmica sobre as estruturas suspensas. Por outro lado, **componentes eletrônicos ativos (diodos e transistores) suspensos** apresentam também aplicações interessantes como a construção de conversores RMS (*root mean square*) e controle de temperatura em circuitos analógicos [KLA97].

Os **termopares**, por sua vez, apresentam várias propriedades interessantes quando comparados a outros sensores usados para medidas de diferença de temperaturas. Os termopares são baseados no efeito Seebeck, que consiste na geração de uma diferença de potencial a partir da diferença de temperatura entre as extremidades [HER86][MEI94]. Para o aproveitamento deste efeito é necessário o uso de materiais com coeficientes Seebeck ( $\alpha$ ) diferentes a fim de que a tensão gerada seja recuperada em uma mesma temperatura e de forma que os coeficientes Seebeck não se anulem (no caso do uso de dois materiais iguais). Com isso, a diferença de potencial ou tensão (V) nos terminais 'frios', por exemplo, é dada pela diferença dos coeficientes Seebeck ( $\alpha_{ab}$ ) multiplicado pela diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) entre as junções 'frias' e 'quentes':

$$V = \alpha_{ab} \cdot \Delta T$$

Como resultado, os termopares não necessitam de tensão ou corrente de polarização para seu funcionamento e, portanto, não há consumo. Além disso, não há *offset* no sinal de saída pois não pode haver sinal de saída sem um estímulo de entrada; a leitura do sensor é simplificada sendo necessário apenas um voltímetro para tal finalidade; e praticamente não há interferência causada pela variação dos parâmetros do processo de fabricação.

No caso dos termopares integrados as junções ou pontos ‘quentes’ são posicionadas sobre a porção da micro-estrutura mais distante do substrato, onde são colocados os pontos ‘frios’, a fim de aumentar a diferença de temperatura entre os mesmos [HER89]. Pode se pensar ainda na conexão em série de termopares formando termopilhas que resulta na adição das tensões geradas. Mas cabe observar que um maior número de termopares em série resulta em maior área de condutividade térmica e conseqüentemente em menor diferença de temperatura entre as junções. Este compromisso é essencial para o projeto de termopilhas.

Na escolha dos materiais para a construção dos termopares deve-se verificar principalmente seu coeficiente Seebeck e sua condutividade térmica. Alguns filmes finos como SbTe e BiSbTe têm se apresentado bastante eficientes para tal propósito. Porém, têm havido muito esforço para o desenvolvimento de termopares utilizando camadas existentes em processos convencionais de microeletrônica de forma a simplificar a integração da eletrônica juntamente com a termopilha. Neste caso, o polissilício tem mostrado bons resultados em processos CMOS, enquanto que em processos III-V camadas de AsGa e AlGaAs podem ainda se apresentar mais eficientes para este tipo de dispositivo, principalmente por causa do seus elevados coeficientes Seebeck (300-600  $\mu\text{V/K}$ ).

Em termos de aplicações, os sensores de raios infra-vermelhos são eficientemente construídos, como no caso de uma câmera estática da Terra para ser colocada em um satélite, onde os fatores de tamanho e consumo de energia são extremamente importantes (ver Figura 4b) [LEN93][SCH95]. O uso de camadas absorventes de luz sobre as junções suspensas (‘quentes’), chamadas de ‘camadas pretas’ (*black layers*), podem aumentar significativamente o desempenho do dispositivo.

Outra aplicação interessante é o conversor eletro-térmico (ETC - *Electro-Thermal Converter*) [JAE92][WOJ97]. Este consiste no uso de um resistor suspenso próximo as junções ‘quentes’: a corrente que circula no resistor é convertida em calor (efeito Joule) que, por sua vez, é transmitido a estas junções ‘quentes’ gerando a tensão Seebeck no termopar ou na termopilha (conversão do calor em sinal elétrico). Este conversor pode ser usado, por exemplo, como sensor de potência em circuitos microondas (*microwave power sensor*). Outras aplicações baseadas na estrutura do ETC são os sensores de pressão, vácuo, fluxo de líquidos e gases onde a dissipação por convecção é o elemento que permite tais avaliações. Os dispositivos são calibrados nas condições normais de trabalho, e as alterações na pressão do ar ou na velocidade de passagem de gases alteram as dissipações térmicas por convecção, alterando a diferença de temperatura.

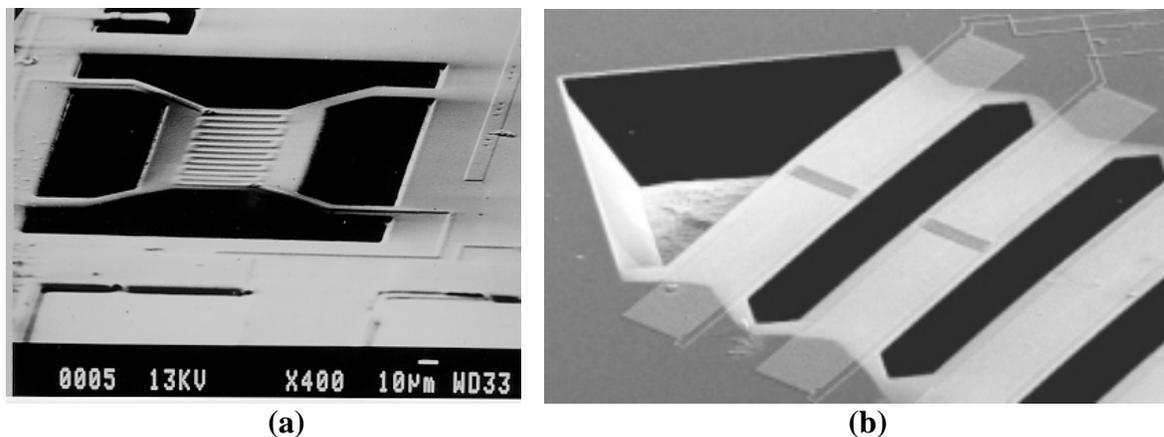


Figura 4: Sensores infra-vermelhos CMOS - (a) bolometro e (b) termopilha [©TIMA].

No último exemplo de dispositivo térmico micro-usinado a ser discutido, a flexão mecânica causada pela **dilatação térmica** de materiais pode ser usada para a construção de micro-atuadores ou para a elevação e movimento de estruturas. No caso de uma viga pode-se imaginar elevá-la a ângulos bem controlados de forma que esta viga sirva de antena de radiação variável ou micro-espelho para a reflexão de sinais óticos. A passagem de uma corrente elevada através de uma linha metálica posicionada sobre a viga provoca seu aquecimento e consequentemente a sua flexão devido aos diferentes coeficientes de dilatação térmica apresentados pelas camadas suspensas. No caso de técnicas de micro-usinagem em superfície, um movimento horizontal pode ser obtido usando duas vigas de mesmo material mas de larguras diferentes unidas na extremidade, conforme visto na Figura 5. A passagem de corrente irá causar um aquecimento diferenciado dessas duas vigas provocando a sua flexão para um dos lados. Chaveamentos mecânicos e micro-pinças podem ser pensados usando este dispositivo.

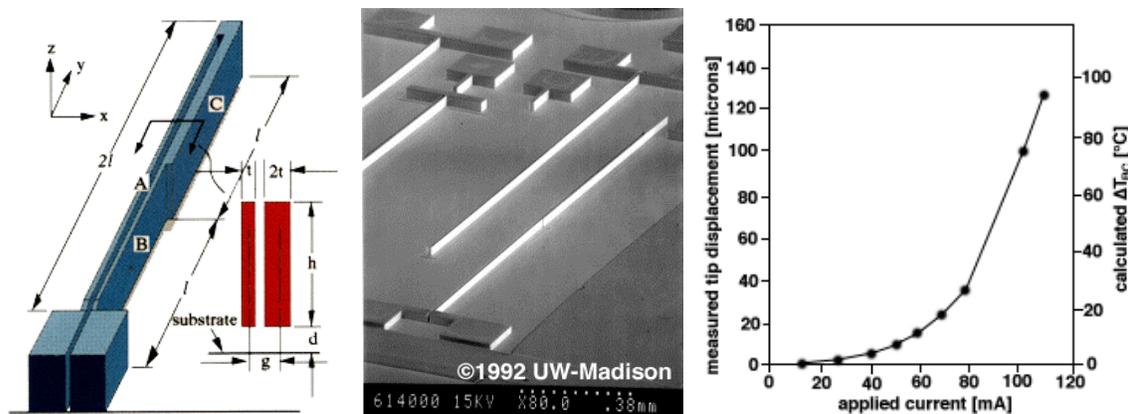


Figura 5: Atuador mecânico de dilatação térmica diferenciada [©UW-Madison].

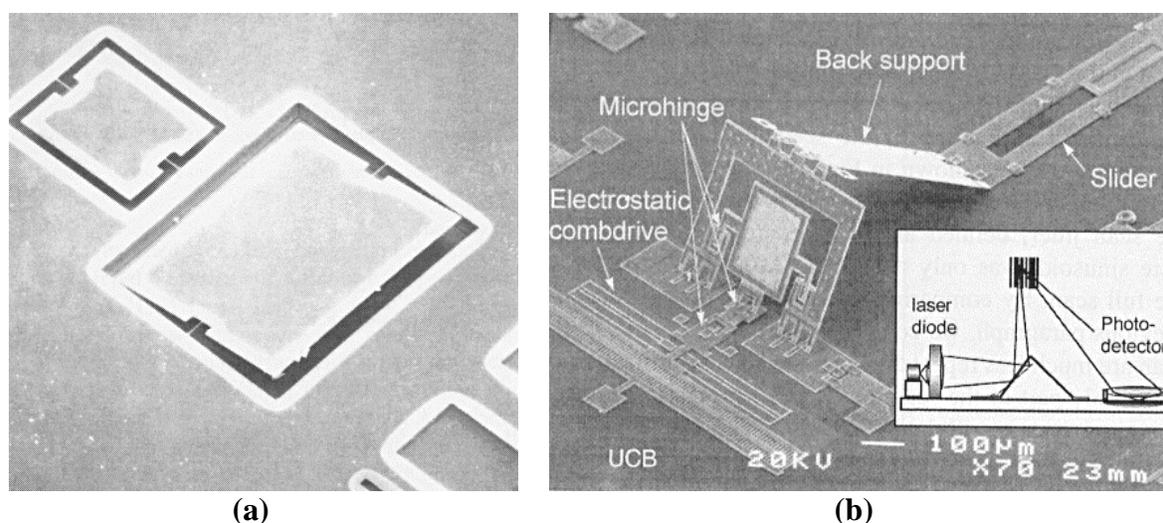
### 3.2. Dispositivos Óticos

A utilização de estruturas micro-mecânicas ou micro-estruturas tri-dimensionais (3D) podem ser aproveitadas em circuitos óticos e opto-eletrônicos. A denominação MOEMS refere-se exatamente ao uso de estruturas micro-usinadas (geralmente móveis) para a produção de alterações ou efeitos em sinais óticos, muitas vezes detectados ou monitorados com o auxílio de circuitos elétricos. O interesse nesta linha de desenvolvimento representa uma extensa lista de aplicações que vão desde impressoras a laser, *scanners*, leitores de código de barras, até sistemas de projeção de imagens.

A primeira e talvez a mais evidente utilização de estruturas micro-usinadas para a área da opto-eletrônica é a construção de **micro-espelhos** para a reflexão de sinais luminosos. Os espelhos podem se apresentar tanto verticais quanto horizontais, e tanto fixos quanto móveis. Um espelho vertical fixo pode ser exemplificado por uma parede refletora com orientação de 45° em guias de ondas para a mudança de direção de 90° na propagação do sinal [DEI91].

Espelhos horizontais móveis eletrostáticos, ou de torção, por sua vez, correspondem basicamente a largas membranas refletoras sustentadas por estreitos eixos flexíveis, conforme mostrado na Figura 6a [BUH97][DIC98]. O movimento ou posicionamento de tais membranas horizontais é feito com o uso de eletrodos colocados dentro da cavidade (sobre o substrato) e abaixo da estrutura. Este tipo de espelho é bastante promissor para a construção de conjuntos ou *arrays* de pixels.

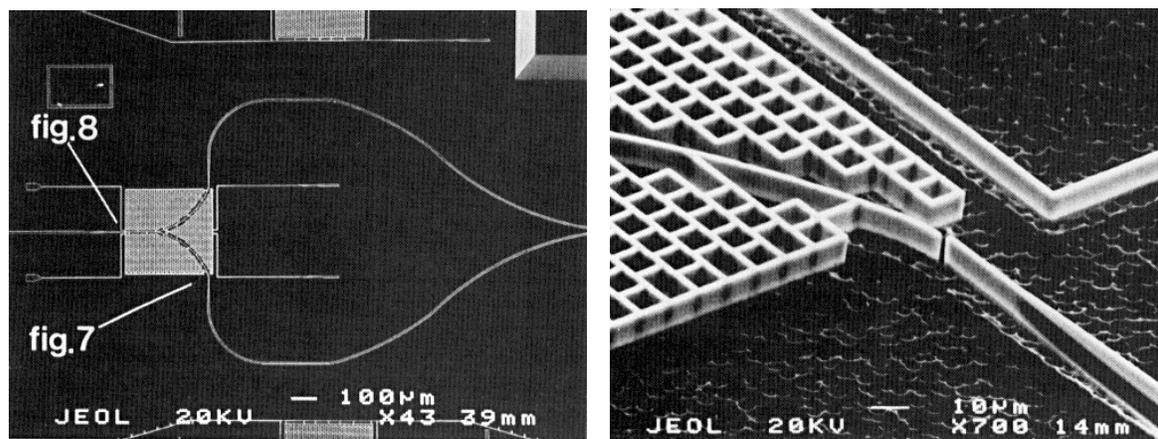
Um terceiro tipo estrutura, e certamente o mais complexo, corresponde aos espelhos verticais móveis, normalmente construídos com processos de usinagem da superfície (com o uso de camadas sacrificiais). Observa-se na Figura 6b que uma estrutura mecânica contendo várias partes móveis e dobradiças permite elevar uma placa metálica refletora (espelho) a ângulos de inclinação controlados [KIA98]. Algumas estruturas permitem ainda o movimento do espelho em torno do seu eixo vertical.



**Figura 6: Espelhos micro-usinados : (a) horizontal e (b) vertical [BUH97][KIA98].**

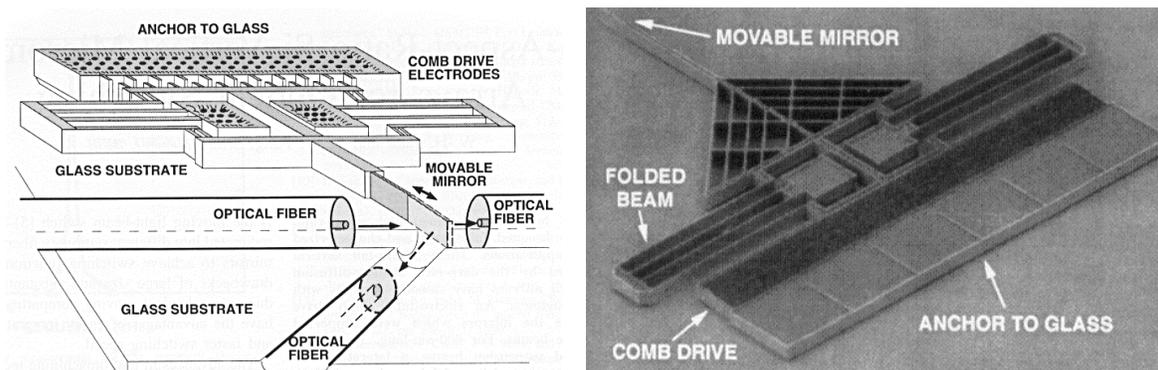
Além disso, técnicas de micro-usinagem são bastante úteis para a construção de sensores baseados em **guias de ondas suspensos** ou mesmo para a preparação de guias de

ondas fixas. Guias de ondas colocados sobre membranas podem servir como sensores de pressão e de força [BEN95]. Por outro lado, guias de ondas formados por camadas suspensas na superfície do substrato, apresentado na Figura 7, são interessantes como sensores de deslocamento baseado na modulação de sinais óticos [HAR98]. Esta estrutura em particular apresenta o grau de liberdade de movimento no próprio plano de propagação dos sinais óticos, permitindo com isso o uso na detecção de estímulos acústicos, mecânicos (acelerômetro) e fluxo de líquidos e gases.



**Figura 7: Guias de ondas suspensos para a detecção de movimento [HAR98].**

Estruturas 3D móveis também podem ser aproveitadas para o **chaveamento ótico**, conforme mostrado na Figura 8 [JUA98]. O desvio ou suspensão de um sinal luminoso é realizado através do uso de um espelho vertical que se coloca no caminho do sinal. A estrutura mecânica utilizada para movimentar este espelho pode trabalhar de forma 'quase' estática para o simples desvio do sinal, ou em uma frequência de ressonância (vibração) para a modulação do sinal, nesse caso com o auxílio de um *comb-drive* (a ser discutido mais adiante) para estímulo. Outras formas mais simplificadas de chaveamento ótico podem ser desenvolvidas através do simples desvio de guias de ondas em pontos de descontinuidade.



**Figura 8: Chaveamento ótico através do uso de espelho vertical móvel [JUA98].**

Existem ainda diversas outras estruturas que são construídas através de técnicas de micro-usinagem para o seu uso em circuitos opto-eletrônicos, como cavidades ou espelhos de

Bragg, dispositivos Mach-Zehnder e cavidades ressonantes Fabry-Perot para a filtragem, seleção e modulação de sinais óticos [LEC98].

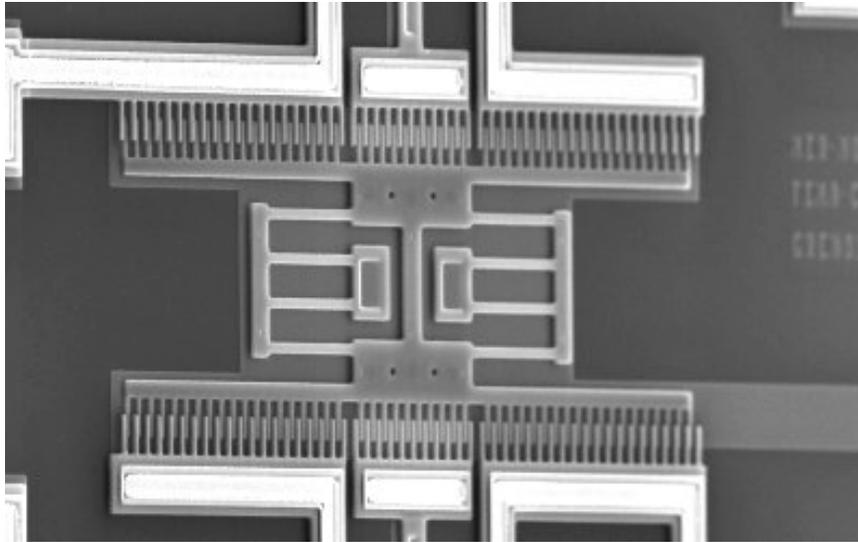
### 3.3. Dispositivos Mecânicos

No contexto deste trabalho entende-se por dispositivo mecânico toda estrutura micro-usinada que realiza um movimento ou sofre uma deformação mecânica para sensação de estímulos externos ou atuação sobre determinadas tarefas. Observe que alguns atuadores térmicos (baseados na dilatação térmica) e óticos (micro-espelhos) já apresentados representam dispositivos mecânicos.

Inicialmente, no caso de **sensores de pressão/força e aceleração** é importante compreender a diferença básica entre esses dispositivos, pois ambos poderiam ser pensados como sendo idênticos por sentirem o movimento de uma micro-estrutura. Os sensores de pressão ou de força são geralmente construídos utilizando-se finas membranas: quanto menor a espessura da membrana maior a sensibilidade do dispositivo. O acelerômetro, por sua vez, necessita de uma massa de prova suspensa que irá sentir um movimento brusco ou sofrer o efeito da aceleração: quanto maior a massa suspensa maior será sua sensibilidade.

Há pelo menos quatro formas de se traduzir essas deformações mecânicas em sinais elétricos, são elas: utilizando-se capacitores variáveis, por efeito piezo-resistivo, por efeito piezo-elétrico, ou por interferência em sinais óticos (discutido anteriormente).

Os dispositivos baseados em **efeito capacitivo** são os mais usados para a detecção de deslocamentos, sejam estes decorrentes de pressões ou acelerações submetidas ao dispositivo. A compreensão do seu funcionamento é simples: a variação na distância entre duas placas metálicas (que caracteriza um capacitor), sendo uma fixa e a outra móvel, provoca uma variação da própria capacitância entre essas placas, sendo facilmente detectada através de um circuito elétrico. Estes capacitores variáveis podem estar tanto dispostos horizontalmente quanto verticalmente, como no caso do *comb-drive* (estrutura em pente). No *comb-drive* os 'dentes' formam capacitores, onde um grupo de 'dentes' está fixado ao substrato enquanto que o outro grupo encontra-se posicionado sobre uma massa móvel (ver Figura 9). Este dispositivo é bastante usado em acelerômetros comerciais. Os dispositivos com capacitores horizontais, por sua vez, são usados normalmente como sensores de pressão. Uma desvantagem dos sensores capacitivos é o consumo de energia associado aos mesmos.



**Figura 9: Estrutura *comb-drive* para o uso em acelerômetros [©TIMA].**

Os dispositivos que utilizam o **efeito piezo-resistivo** de materiais têm sido considerados em sensores fabricados com processos estandares de circuitos integrados. No caso de processos CMOS, camadas de polissilício são bastante eficientes como componentes piezo-resistivos, e são geralmente posicionados nas regiões de maior estresse em vigas, pontes e membranas. É fácil imaginar um circuito elétrico simples que permita monitorar uma resistência variável, porém, da mesma forma que o dispositivo capacitivo, é praticamente inevitável o consumo de potência associado.

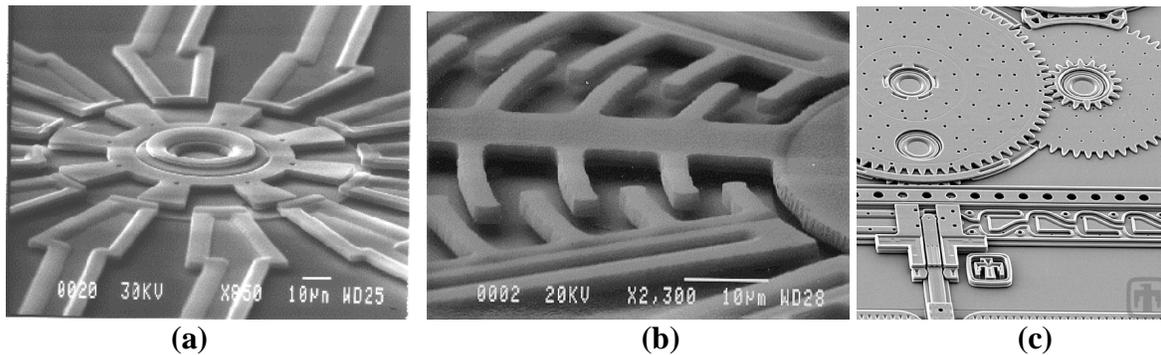
Uma forma de evitar a dissipação de potência do sensor, muitas vezes indesejável para aplicações onde o consumo de energia representa um fator crítico, é a utilização do **efeito piezo-elétrico** para a sensação de movimentos. Porém, nem todo material apresenta a piezo-eletricidade, como no caso o silício que é piezo-resistivo mas não é piezo-elétrico. Para a construção de sensores deste tipo em processos CMOS deposita-se ZnO na superfície do mesmo, juntamente com eletrodos metálicos. O AsGa, por sua vez, é piezo-elétrico e por isso permite uma fácil integração de sensores com módulos elétrico/eletrônicos em seus processos. A principal vantagem deste tipo de componente é justamente a ausência de consumo, pois o próprio efeito piezo-elétrico gera cargas elétricas durante um estresse mecânico.

Por outro lado, no caso de **atuadores mecânicos**, duas forças principais podem ser utilizadas para movimentar as estruturas, são elas as forças eletrostáticas geradas por fortes campos elétricos e a piezo-eletricidade. Pode-se pensar também em movimentos lineares ou vibratórios (dispositivos ressonantes). O uso de forças eletrostáticas exige normalmente tensões elevadas e não permitem grandes deslocamentos. Por outro lado, conforme visto anteriormente, nem todo material é piezo-elétrico, e além disso o direcionamento cristalográfico do material deve ser cuidadosamente escolhido para a exploração deste efeito.

Movimentos lineares podem ser exemplificados por relés, pinças, ou mesmo atuadores por dilatação térmica. No caso de movimentos vibratórios, os atuadores ressonantes têm sido muito usados. Os tipos de vibrações apresentados pelas estruturas assim como as frequências

de ressonância estão diretamente associadas às geometrias das mesmas [TAY98]. Em se tratando de dispositivos micro-usinados, o silício e o quartz apresentam um alto fator de qualidade ( $Q$ -factor) e outras propriedades mecânicas que os torna os melhores candidatos para tal propósito [STE91]. O AsGa pode também ser eficientemente usado em atuadores ressonantes pela presença da piezo-eletricidade [SOD94]. Aplicações interessante para esses componentes são a construção de filtros e conversores eletro-mecânicos [LIN98].

Os **micro-motores** representam talvez o mais impressionante avanço nesta área de micro-fabricação. Há diversas maneiras de implementação dos motores, e estes podem apresentar as mais variadas formas de movimento. Conforme mostrado na Figura 10a, forças eletrostáticas podem movimentar um rotor. Outro tipo de motor, visto na Figura 10b, é excitado por braços capacitivos, da mesma forma que a estrutura *comb-drive*, para movimentos circulares vibratórios. Estruturas mais complexas como micro-engrenagens também são factíveis e permitem um excelente grau de liberdade de movimentos (ver Figura 10c). Os micro-motores e micro-engrenagens têm sido utilizados para o chaveamento de sinais elétricos e para o movimento de micro-estruturas mecânicas tais como espelhos e pinças.



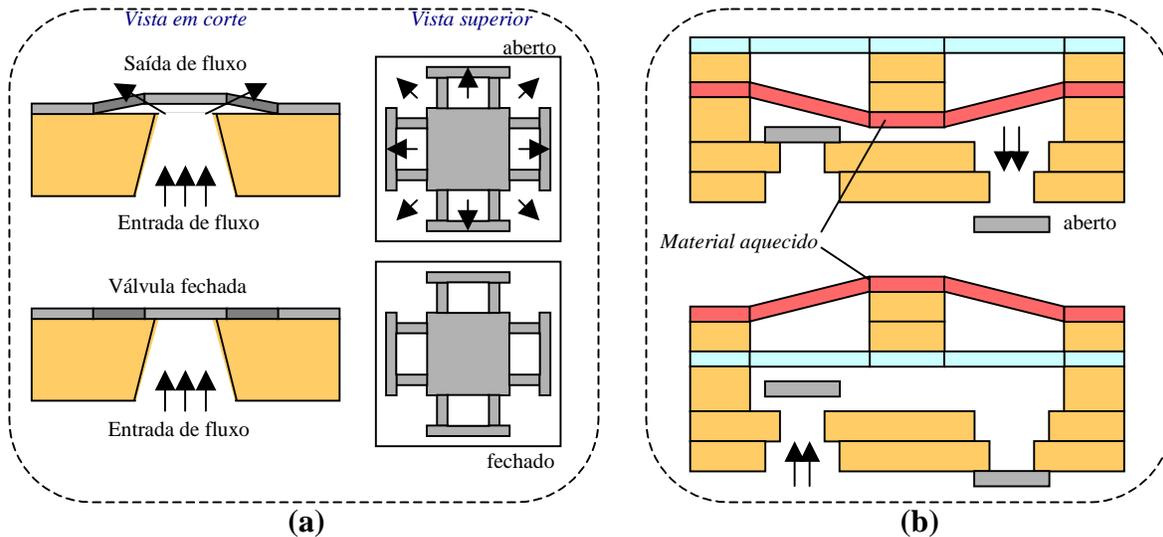
**Figura 10: Micro-motores e micro-engrenagens [©MCNC][©Sandia].**

As técnicas de micro-fabricação têm sido bastante aproveitadas para o controle do fluxo de fluídos (micro-fluídica). As áreas da medicina, análises químicas e automotiva são os maiores interessados no desenvolvimento desses dispositivos para aplicações onde pequenas quantidades de um certo líquido devam ser precisamente bombeados ou controlados, como por exemplo, sistemas de reações bioquímicas, dosagem de remédios em seres humanos e animais, mistura e injeção de combustíveis.

**Micro-válvulas** são facilmente construídas combinando-se técnicas de usinagem do substrato e da superfície, conforme ilustrado na Figura 11a [VAN98]. As válvulas podem funcionar livremente, sem partes atuadoras para controle, deixando o líquido passar em um sentido e não no outro. Ou elas podem ser controladas por eletrodos que permitem o seu fechamento quando tensões opostas são aplicadas (forças eletrostáticas). Isso é necessário quando o fluxo do líquido é unidirecional e deseja-se controlar a quantidade do mesmo.

**Bombas de propulsão** são muito úteis para este tipo de aplicação, e sua construção se mostra um pouco mais complexa. Na realidade as bombas de propulsão fazem uso das micro-válvulas justamente para controlar a direção do fluxo. Na ilustração da Figura 11b é mostrada uma micro-bomba construída de forma híbrida, ou seja, utilizando vários substratos

sobrepostos e apropriadamente usinados [BER98]. A parte superior representa a parte de atuação propriamente dita. O aquecimento, para dilatação térmica, e o esfriamento de um determinado material permitem o movimento. Este material é colocado em ambos os lados do atuador e excitado de forma complementar: quando um lado aquece e se dilata, o outro esfria e retorna ao seu tamanho original, sugando ou bombeando o líquido através da cavidade central.



**Figura 11: Micro-fluídica: (a) micro-válvula e (b) micro-bomba [VAN98][BER98].**

### 3.4 Componentes para RF e Microondas

Além do uso de técnicas de micro-usinagem para a fabricação de sensores e atuadores, estas podem também ser eficientemente usadas para melhorar o desempenho de dispositivos eletrônicos em altas frequências (RF e microondas). Isto porque muitas vezes em tais frequências de funcionamento o comportamento dos componentes são influenciados por elementos parasitas como capacitâncias e perdas resistivas.

Idealmente, uma linha de transmissão deveria representar um curto-circuito. Porém é inevitável a influência da resistividade do material da linha. Por outro lado, capacitâncias e condutâncias parasitas associadas ao substrato, assim como o efeito indutivo desta apresentam grande influência na transmissão dos sinais. Verificou-se que o fato de suspender linhas de transmissão eliminam as condutividades intrínsecas do substrato e reduzem consideravelmente as capacitâncias parasitas em relação ao plano de massa (substrato ou camada metálica dedicada). Com isso, o fator de qualidade e a frequência de ressonância da linha são claramente melhoradas.

Os indutores têm sido bastante investigados usando tais técnicas de fabricação. O interesse na integração de indutores planares é óbvia pela sua importância em circuitos como amplificadores de baixo-ruído (LNA - *Low-Noise Amplifiers*), osciladores controlados por tensão (VCO - *Voltage-Controlled Oscillator*), filtros, acopladores de impedância (*matching network*), misturadores (*mixers*), entre outros, circuitos estes essenciais para sistemas de

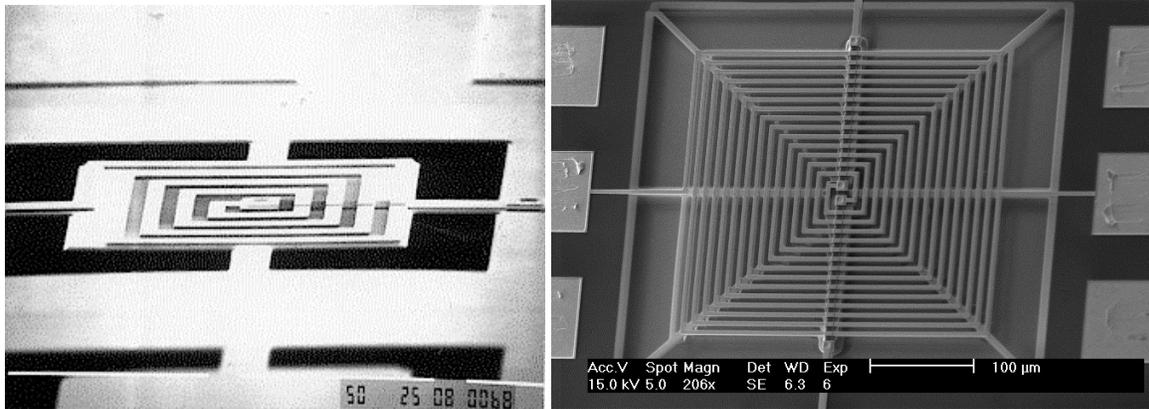
telecomunicações em RF e microondas. Embora alguns processos de fabricação baseados em AsGa, que é um material semi-isolante, estejam atualmente disponíveis para a construção de circuitos integrados monolíticos para microondas (MMIC - *Monolithic Microwave Integrated Circuits*), as capacitâncias parasitas em relação ao plano de massa na face posterior do chip são as principais responsáveis pela degradação do comportamento desses componentes [PUC81]. Em silício, este fenômeno é ainda agravado pela ausência de um plano de massa específico e pela condutividade parasita do substrato.

Excelentes resultados têm sido apresentados através da suspensão dos indutores em ambos materiais, silício e AsGa [CHA93][RIB98]. Estes estudos têm sido estendidos aos transformadores planares onde não apenas as capacitâncias para plano de massa são críticas mas também as capacitâncias entre os segmentos adjacentes das bobinas (ver Figura 12) [RIB98]. Note que o efeito indutivo desses elementos não são afetados pela micro-usinagem.

Conforme foi apresentado anteriormente, a micro-usinagem é utilizada para a criação de regiões de baixa condutividade térmica. No caso dos dispositivos suspensos para uso em microondas, este fator torna-se uma desvantagem em relação aos componentes estándares pois haverá um aquecimento maior das regiões suspensas e conseqüentemente um aumento da resistência da linha. Nos metais o TCR (coeficiente de temperatura da resistividade) é de aproximadamente  $5 \times 10^{-3}/K$ , o que representa, em outras palavras, um aumento de 50% no valor da resistividade para um aumento de 100 graus, sendo que esta elevação de temperatura facilmente obtida em estruturas suspensas com a passagem de correntes elevadas. Por isso, este fator deve ser cuidadosamente avaliado durante o projeto do circuito.

Outro cuidado importante refere-se a robustez mecânica da estrutura. Em sensores e atuadores as partes micro-usinadas são em geral preparadas para o sua flexão ou movimento durante o funcionamento. Neste caso, onde as aplicações alvos são os sistemas de comunicação (telefones portáteis, satélites, sistemas automotivos e aeronáuticos) os dispositivos suspensos devem suportar possíveis choques, movimentos e acelerações sem danos na sua estrutura. Simulações realizadas com método de elementos finitos (FEM - *Finite Element Method*) mostraram uma boa rigidez mecânica dos indutores e transformadores, porém linhas de transmissão muito longas podem quebrar-se facilmente.

Indutores verticais e com núcleos magnéticos têm sido desenvolvidos com o uso de processos específicos de micro-usinagem. É importante lembrar que nesses processos a integração da eletrônica é geralmente comprometida [KIM97][YAM95].

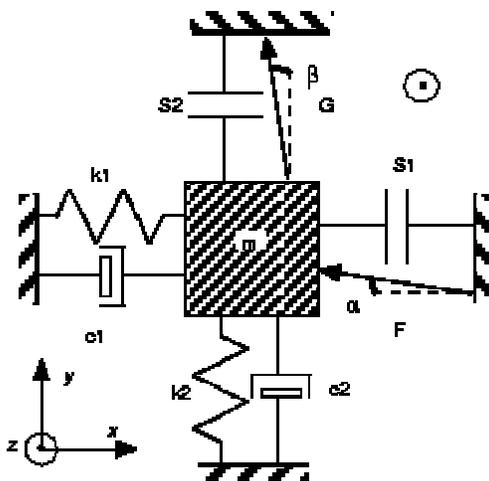


(a) (b)  
**Figura 12: Dispositivos para RF: (a) indutor e (b) transformador [RIB98].**

#### 4. Modelagem e Ferramentas de CAD

Da mesma forma que os processos de microeletrônica têm sido explorados para a construção de micro-estruturas mecânicas, há um grande esforço na adaptação de ambientes de projeto (CAD/CAE) já existentes para o desenvolvimento de tais estruturas [KAR97]. Inicialmente é importante perceber que há diversas formas de modelar um dispositivo não eletrônico e avaliá-lo juntamente com a eletrônica.

A análise inicial do funcionamento ou do comportamento de dispositivos ou sistemas é através do uso de expressões matemáticas, conforme ilustrado na Figura 13. Estas podem apresentar complexidade tal que a resolução manual é quase impraticável, exigindo o uso de ferramentas computacionais de matemática, como Matlab. Por vezes, de acordo com as características do dispositivo, várias considerações e aproximações devem ser realizadas a fim de simplificar as equações e permitir uma avaliação preliminar dos resultados esperados. Observa-se que o **método analítico** é geralmente usado em análises estáticas do comportamento, uma vez que os resultados obtidos são pontuais tendo as demais variáveis envolvidas pré-definidas.



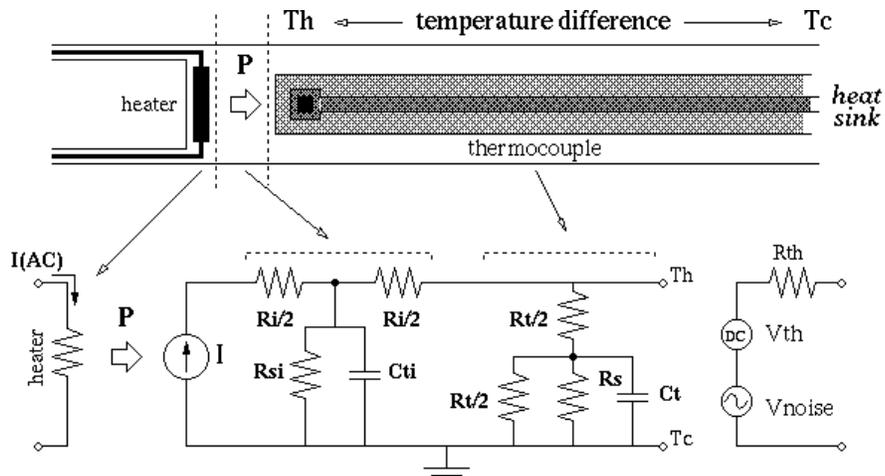
$$T = j \frac{d\Omega}{dt}$$

$$F \cos \alpha + G \sin \beta + 2m\Omega \frac{dy}{dt} = m \frac{d^2 x}{dt^2} + c_1 \frac{dx}{dt} + k_1 x$$

$$F \cos \alpha + G \sin \beta + 2m\Omega \frac{dx}{dt} = m \frac{d^2 y}{dt^2} + c_2 \frac{dy}{dt} + k_2 y$$

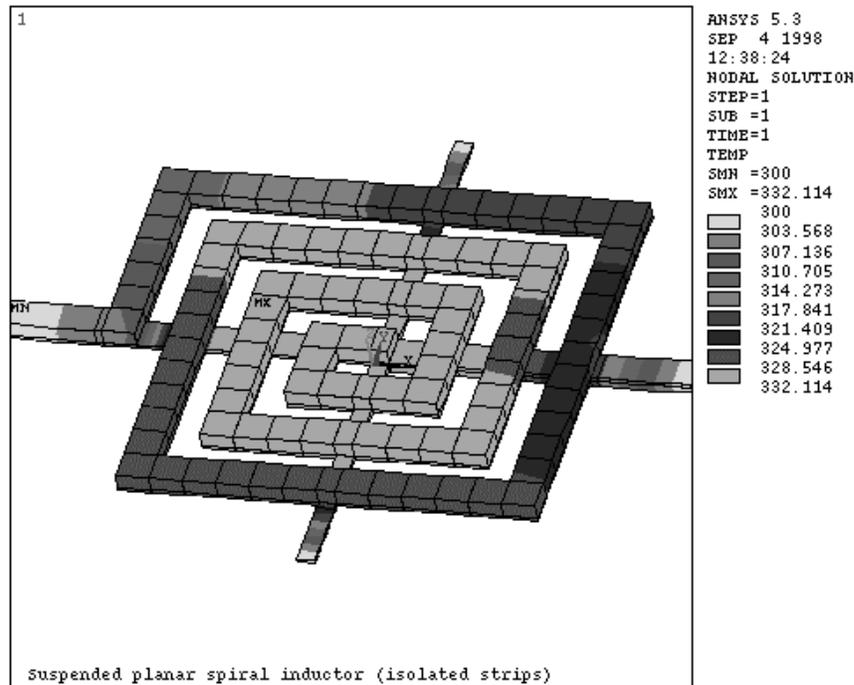
**Figura 13: Estrutura de um giroscópio e suas equações matemáticas.**

Outra forma de avaliar dispositivos não-elétricos é através de modelos ou **circuitos elétricos equivalentes**. Por exemplo, elementos encontrados nos comportamentos mecânicos e térmicos podem ser representados por equivalentes elétricos como resistências, indutâncias, capacitâncias, fontes de corrente e tensão (conforme ilustrado na Figura 14). Porém, isso é válido apenas para comportamentos unidirecionais de deslocamentos e propagação de calor. A vantagem deste método é o aproveitamento de simuladores elétricos como SPICE, hoje bastante conhecidos e utilizados na área da eletrônica. Outra característica interessante é a análise dinâmica do comportamento como constantes de tempo e observação de estabilização de comportamentos (oscilações, amortecimentos,...).



**Figura 14: Estrutura de um micro-relê (a) e seu circuito elétrico equivalente (b) [RIB98].**

Caso haja necessidade de uma estudo térmico, mecânico ou mesmo elétrico mais detalhado e preciso de estruturas tri-dimensionais pode-se fazer uso de ferramentas de **métodos de elementos finitos** como ANSYS (ver Figura 15). Este tipo de simulação é bastante mais complexa e trabalhosa de ser realizada, porém fornece resultados muito próximos do comportamento real do dispositivo. Por isso, ele é geralmente restrito à avaliação de dispositivos individuais, para então, a partir dos resultados obtidos, gerar-se modelos simplificados com os parâmetros desejados do comportamento dos mesmos [ROM98].



**Figura 15: Ilustrações de simulações com elementos finitos [RIB98].**

Uma forma de representar de maneira simplificada a funcionalidade de dispositivos e sistemas, a partir de uma pré-análise realizada com os demais métodos citados ou a partir de dados experimentais, é utilizar **linguagens de descrição de hardware analógicas** como HDL-A, Spectre-HDL e mais recentemente o VHDL-AMS (*VHDL Analog-Mixed Signal*), ilustrado na Figura 16. Estas linguagens permitem a descrição e a simulação funcional em alto nível de sistemas heterogêneos (elétricos, térmicos, mecânicos, fluídicos, ...).

```

ENTITY resistor IS
    GENERIC (resistance : real := 1.0);
    PORT (TERMINAL n1, n2 : electrical);
END ENTITY resistor;

ARCHITECTURE one OF resistor IS
    QUANTITY r_e across r_i through n1 to n2;
BEGIN
    r_i == r_e/resistance;
END one;

```

**Figura 16: Descrição de resistor em VHDL-AMS.**

Em relação as ferramentas de projeto para a elaboração do layout das estruturas micro-usinadas há vários pontos a serem considerados. Inicialmente, os mesmos editores de layout utilizados na microeletrônica são compatíveis com estas estruturas, assim como a verificação das regras de desenho (DRC). A síntese automática de layout, como ocorre com os circuitos digitais, não é evidente para os circuitos analógicos e não-eletrônicos. Uma forma de auxiliar a construção do circuito é através do uso de geradores de layout automáticos. A vantagem dos

geradores de layout em relação às bibliotecas de células fixas ou parametrizáveis é o grau de liberdade na definição do dispositivo final a ser construído [KAR96].

Ainda em relação à elaboração do layout surge a necessidade de simuladores ou verificadores da usinagem para o correto posicionamento e dimensionamento das máscaras de abertura referentes a esta etapa de pós-processamento [BUT96]. Além disso, visualizadores em corte e em três dimensões (3D) são úteis não apenas para ilustrar o processo utilizado, mas para verificar as regiões suspensas e suas espessuras. Algumas destas ferramentas já encontram-se disponíveis no ambiente de projeto da Mentor Graphics, conforme visto na Figura 17 [RIB98].

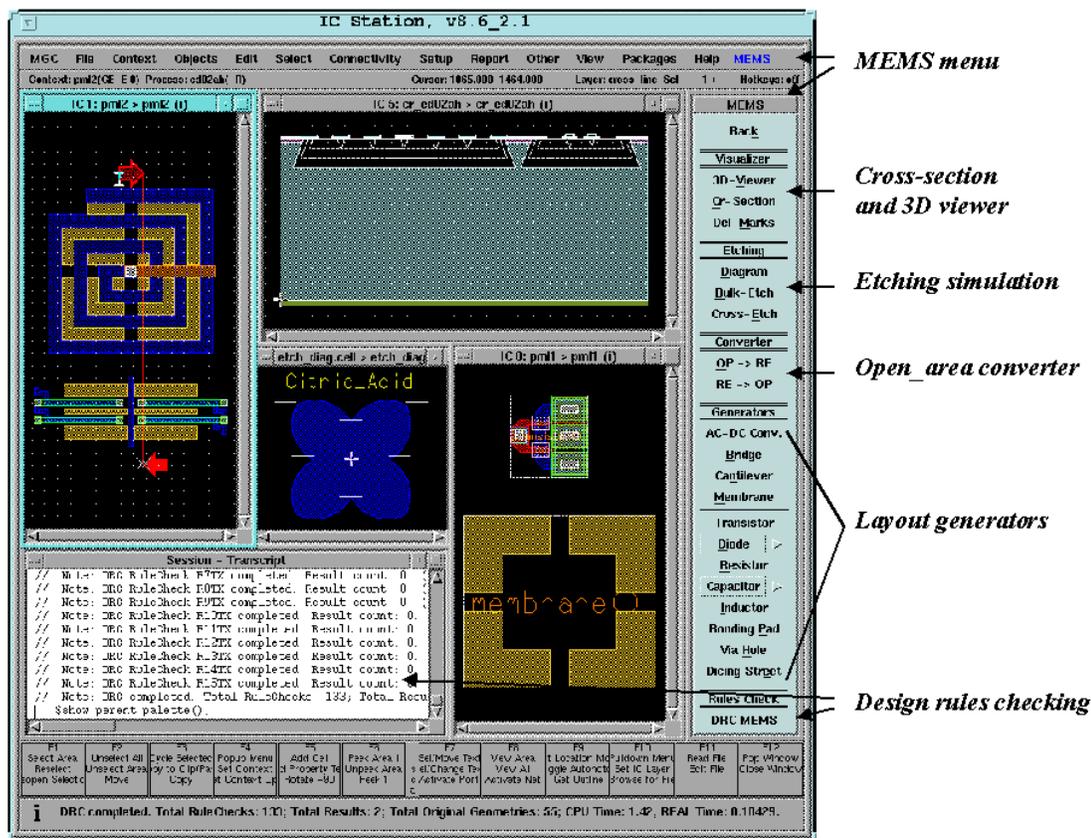


Figura 17: Ambiente Mentor Graphics para o desenvolvimento de microsistemas.

## 5. Conclusão e Perspectivas

A possibilidade de construção de micro-estruturas suspensas bem como sua utilização em micro-sensores não é algo novo que surgiu de uma revolução tecnológica na área de processo de fabricação de circuitos integrados. Pelo contrário, micro-sensores de pressão por exemplo datam da década de 60. O aumento no interesse sobre esta área de desenvolvimento deve-se principalmente à evolução e ao amadurecimento da microeletrônica, despertando o interesse de pesquisadores e industriais sobre a possibilidade colocar mais do que funções eletrônicas dentro de um único chip, ou seja, permitir a integração completa de microsistemas

formados por sensores e atuadores (eletrônicos ou não), interfaces analógicas e controles digitais inteligentes.

O real avanço desta nova linha de trabalho não deve-se apenas à evolução de técnicas de fabricação vindos da microeletrônica, mas principalmente à identificação de potenciais aplicações que despertem o interesse de industriais e áreas afins como as telecomunicações, medicina e automobilística. Tal visão das necessidades do mercado é essencial para a proposta, o desenvolvimento e o sucesso de uma nova técnica de micro-usinagem.

Sensores não-usinados (não-suspensos) mas que possam ser integrados ao chip também devem ser cuidadosamente tratados a fim de desenvolver sensores inteligentes multi-tarefas fabricados em um único CI. Um bom exemplo disso são os sensores magnéticos ou de efeito Hall. Outra questão que não deve ser esquecida é quanto ao encapsulamento dos microssistemas visto que as estruturas micro-usinadas podem ser facilmente danificadas nesta etapa de fabricação. Além disso, as ferramentas de auxílio a projeto CAD/CAE (*Computer-Aided Design/Engineering*) encontram-se bastante imaturas, da mesma forma que as metodologias para testabilidade e caracterização de tais dispositivos.

A década de 90 foi apenas o despertar da área dos microssistemas tanto a nível acadêmico quanto industrial. Na realidade, os processos de micro-usinagem utilizados para construir estruturas mecânicas são na grande maioria muito mais simples do que processos de microeletrônica por não envolverem etapas como implantações iônicas, dopagem de canal de transistor, problemas de junções P-N de semicondutores, etc. Logo, o que está sendo realizado hoje já era tecnologicamente viável a muitos anos. Mas certamente o principal fator que acelera o progresso de uma determinada tecnologia é o interesse industrial e o volume de investimentos envolvidos na área. E este crescente interesse do mercado mundial sobre os microssistemas ou MEMS tem sido ocasionado talvez pela 'saturação' na evolução dos circuitos digitais, que hoje apresentam capacidades de integração e desempenho fabulosos e que é preciso um esforço cada vez maior para obter-se pequenos avanços.

Por isso, passou-se a considerar a possibilidade de integrar sistemas completos dentro de um único chip incluindo, além da eletrônica, partes mecânicas, térmicas, químicas, magnéticas e entre outras. Observou-se nesta primeira década de trabalhos que há uma infinidade de aplicações potenciais nas mais diversas áreas emergentes como telecomunicações, automobilística, médica, biomédica, automação industrial,...

O que certamente se vivenciará nos próximos anos ou mesmo no próximo século será uma revolução tecnológica onde os circuitos integrados eletrônicos representarão apenas uma pequena parcela do desenvolvimento. Monitoramento dos sinais vitais humanos e animais; chips funcionando como minúsculas farmácias e atuando no funcionamento de organismos vivos; desenvolvimento de automóveis mais seguros e inteligentes monitorados pelos mais diversos sensores e atuadores; aperfeiçoamento de equipamentos eletrô-mecânicos como câmeras, microfones, bombas de propulsão e micro-válvulas; análises químicas e bioquímicas automatizadas; e inúmeras outras aplicações promissoras.

Em particular, as áreas onde esta nova tecnologia terá maior atuação serão a automobilística e a biomédica principalmente devido ao volume do mercado envolvido.

Porém, independente de uma aplicação específica, um fato que será cada vez mais evidente é o caráter multi-disciplinar dos microssistemas. Não haverá especialistas conhecedores de todos as questões que envolvem o projeto de MEMS, como é encontrado hoje na eletrônica, na mecânica ou na química. Mas serão necessárias equipes multi-disciplinares e uma linguagem comum de comunicação.

Esta questão da multi-disciplinaridade exigirá inicialmente um esforço mundial no desenvolvimento de ferramentas de projeto que atendam esta necessidade. A preparação destes ambientes de CAD multi-domínios será inevitável para o registro de verdadeiro início da Era dos Microssistemas. E eles deverão incluir pelo menos linguagens de descrição para sistemas heterogêneos, simuladores e verificadores funcionais, interfaces entre ferramentas particulares a cada domínio como simuladores elétricos e de processo, métodos de elementos finitos, analisadores matemáticos,...

Além disso, o estado atual desta área permite uma total liberdade de desenvolvimento onde a criatividade pode ser explorada ao máximo para a construção de novos sensores e atuadores miniaturizados. Futuramente, o próprio progresso do conhecimento definirá um conjunto de estruturas padronizadas com modelos associados que servirão de base para novos dispositivos, para então chegarmos ao que observamos hoje com os CIs digitais, ou seja, uma 'saturação' pela quantidade de profissionais e empresas envolvidas e pela dificuldade de se obter pequenos progressos.

## Referências Bibliográficas

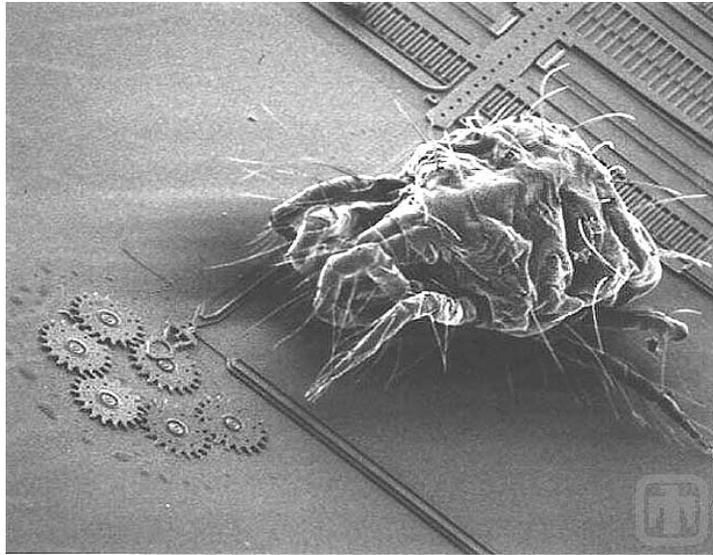
- [BEN95] Benaissa, K. & Nathan, A. **ARROW-based integrated optical pressure sensors**. Proc. SPIE - The Int. Soc. for Optical Eng. (Micromachined Devices and Components), Austin-Texas, 23-24 Oct., 1995, vol. 2642, pp. 250-255.
- [BER98] Bernard, W. L.; Kahn, H. H.; Heuer, A. & Huff, M. A. **Thin-film shape-memory alloy actuated micropumps**. Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 7, no. 2, June 1998, pp. 245-251.
- [BUH97] Bühler, J.; Funk, J.; Korvink, J. G.; Steiner, F.-P.; Sarro, P. M. & Baltes, H. **Electrostatic aluminum micromirrors using double-pass metallization**. Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 6, no. 2, June 1997, pp. 126-135.
- [BUT96] Büttgenbach, S. & Than, O. **SUZANA: A 3D CAD tool for anisotropically etched silicon microstructures**. Proceedings The European Design & Test Conference. Paris-France, 11-14 Mar., 1996, pp. 454-457.
- [CHA93] Chang, J. Y. -C., Abidi, A. A. & Gaitan, M. **Large suspended inductors on silicon and their use in a 2- $\mu$ m CMOS RF amplifier**, IEEE Electron Device Letters, vol. 14, no. 5, May 1993, pp. 246-248.
- [COL97] Collins, S. D. **Etch stop techniques for micromachining**. Journal of Electrochemical Society, vol. 144, no. 6, June 1997, pp. 2242-2262.
- [COU97] Courtois, B. **Access to microsystem technology: the MPC services solution**. Microelectronics Journal, vol. 28, no. 4, May 1997, pp. 407-417.
- [DEI91] Deimel, P. P. **Micromachining processes and structures in micro-optics and optoelectronics**. Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 1, 1991, pp. 199-222.
- [DIC98] Dickensheets, D. L. & Kino, G. S. **Silicon-micromachined scanning confocal optical microscope**. Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 7, no. 1, Mar. 1998, pp. 38-47.
- [EHR88] Ehrfeld, W.; Götz, F.; Münchmeyer, D.; Schelb, W. & Schmidt, D. **LIGA process: sensor construction techniques via X-ray lithography**. In: IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 1988, pp. 1-4.
- [GAR94] Gardner, J. W. **Microsensors: Principles and Applications**. John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [HAR98] Haronian, D. **Geometrical modulation-based interferometry for displacement sensing using**

- optically coupled suspended waveguide.** Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 7, no. 3, Sep. 1998, pp. 309-314.
- [HER86] Herwaarden, A. W. & Sarro, P. M. **Thermal sensor based on the Seebeck effect.** Sensors and Actuators A, vol. 10, 1986, pp. 321-346.
- [HER89] Herwaarden, A. W.; Duyn, D. C.; Oudheusden, B. W. & Sarro, P. M. **Integrated thermopile sensor.** Sensors and Actuators A, vol. 21-23, 1989, pp. 621-630.
- [HJO94] Hjort, K.; Söderkvist, J. & Schweitz, J.-Å. **Gallium arsenide as a mechanical material.** Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 4, 1994, pp. 1-13.
- [JAE92] Jaeggi, D.; Baltès, H. & Moser, D. **Thermoelectric AC power sensor by CMOS technology.** IEEE Electron Device Letters, vol. 13, no. 7, July 1992, pp. 366-368.
- [JUA98] Juan, W.-H. & Pang, S. W. **High-aspect-ratio Si vertical micromirror arrays for optical switching.** Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 7, no. 2, June 1998, pp. 207-213.
- [KAR96] Karam, J. M. **Méthodes et outils pour la conception et la fabrication des microsystèmes.** Thèse de Doctorat. TIMA Laboratory, INPG-UJF-CNRS, Grenoble-France, 1996.
- [KAR97] Karam, J. M.; Courtois, B. & Boutamine, H. **CAD tools for bridging microsystems and foundrie.** IEEE Design & Test of Computers, Apr.-June 1997, pp. 34-39.
- [KIA98] Kiang, M.-H.; Solgaard, O.; Lau, K. Y. & Muller, R. S. **Electrostatic combdrive-actuated micromirrors for laser-beam scanning and positioning.** Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 7, no. 1, Mar. 1998, pp. 27-37.
- [KIM97] Kim, Y. -J. & Allen, M. G. **Surface micromachined solenoid inductors for high frequency applications.** International Symposium on Microelectronics, 1997, pp. 1-6.
- [KLA97] Klaassen, E. H.; Reay, R. J.; Storment, C. & Kovacs, G. T. A. **Micromachined thermally isolated circuits,** Sensors and Actuators A, vol. 58, 1997, pp. 43-50.
- [KOE96] Koester, D. A.; Mahadevan, R.; Shishkoff, A. & Markus, K. W. **SmartMUMPs design handbook including MUMPs introduction and design rules.** MEMS Technology Center - MCNC, Research Triangle Park, NC 27709, 1996.
- [LEC98] Leclercq, J. L.; Ribas, R. P.; Karam, J. M. & Viktorovitch, P. **III-V micromachined devices for microsystems.** Microelectronics Journal, vol. 29, 1998, pp. 613-619.
- [LEN93] Lenggenhager, R.; Baltès, H. & Elbel, T. **Thermoelectric infrared sensors in CMOS technology.** Sensors and Actuators A, vol. 37-38, 1993, pp. 216-220.
- [LIN92] Linder, C.; Paratte, L.; Grétilat, M.-A.; Jaecklin, V. P. & Rooij, N. F. **Surface micromachining.** Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 2, 1992, pp. 122-132.
- [LIN98] Lin, L.; Howe, R. T. & Pisano, A. P. **Microelectromechanical filters for signal processing.** Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 7, no. 3, Sep. 1998, pp. 286-294.
- [MEI94] Meijer, G. C. M. & Herwaarden, A. W. **Thermal Sensors.** Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, USA, 1994.
- [MOS90] Moser, D.; Parameswaran, M. & Baltès, H. **Field oxide microbridges, cantilever beams, coils and suspended membranes in SACMOS technology.** Proc. 5th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators - Eurosensors III, vol. 2, June 1990, pp. 1019-1022.
- [PET82] Petersen, K. E. **Silicon as a mechanical material.** Proceedings of the IEEE, vol. 70, no. 5, May 1982, pp. 420-457.
- [PUC81] Pucel, R. A. **Design considerations for monolithic microwave circuits,** IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-29, no. 6, June 1981, pp. 513-534.
- [RIB98] Ribas, R. P. **Maskless Front-Side Bulk Micromachining Using Standard GaAs Technologies.** Thèse de Doctorat. TIMA Laboratory, INPG-UJF-CNRS, Grenoble-France, 1998.
- [ROM98] Romanowicz, B. F. **Methodology for Modeling and Simulation of Microsystems.** Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [SCH95] Schieferdecker, J.; Quad, R.; Holzenkämpfer, E. & Schulze, M. **Infrared thermopile sensors with high sensitivity and very low temperature coefficient.** Sensors and Actuators A, vol.46-47, 1995, pp.422-427.
- [SEI84] Seidel, H.; Csepregi, L.; Heuberger, A. & Baumgärtel, H. **Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions.** Journal of Electrochemical Society, vol. 131, no. 1, Jan. 1984, pp. 126-130.
- [SHA94] Shaw, K. A.; Zhang, Z. L. & MacDonald, N. C. **SCREAM I : a single mask, single-crystal silicon reactive ion etching process for microelectromechanical structure.** Sensors and Actuators A, vol. 40, 1994, pp. 63-70.
- [SHI96] Shie, J.- S.; Chen, Y.- M.; Yang, M. O. & Chou, B. C. S. **Characterization and modeling of metal-**

- film microbolometer.** Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 5, no. 4, Dec. 1996, pp. 298-306.
- [SOD94] Söderkvist, J. & Hjort, K. **The piezoelectric effect of GaAs used for resonators and resonant sensors.** Journal of Micromechanics and Microengineering, no. 4, 1994, pp. 28-34.
- [STE91] Stemme, G. **Resonant silicon sensors.** Journal of Micromechanics and Microengineering, no. 1, 1991, pp. 113-125.
- [SZE94] Sze, S. M. **Semiconductor Sensors.** John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [TAY98] Taylor, W. P.; Brand, O. & Allen, M. G. **Fully integrated magnetically actuated micromachined relays.** Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 7, no. 2, June 1998, pp. 181-191.
- [TOM88] Tomovich, C. **MOSIS – A gateway to silicon.** IEEE Circuits and Devices Magazine, vol. 4, no. 2, Mar. 1988, pp. 22-23.
- [VAN98] Vandelli, N.; Wroblewski, D.; Velonis, M. & Bifano, T. **Development of a MEMS microvalve array for fluid control.** Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 7, no. 4, Dec. 1998, pp. 395-403.
- [WIL96] Williams, K. R. & Muller, R. S. **Etch rates for micromachining processing.** Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 5, no. 4, Dec. 1996, pp. 256-269.
- [WOJ97] Wójciak, W.; Orlikowski, M.; Zubert, M. & Napieralski, A. **The design and electro-thermal modeling of microdevices in CMOS compatible MEMS technology.** Proc. of 3rd Int. Workshop on Thermal Investigations of ICs and Microstructures, Cannes-France, 21-23 Sep., 1997, pp. 159-161.
- [YAM95] Yamada, N. Yokoyama, Y. & Tanaka, H. **Fabrication of wrapped micro coils wound around a magnetic core,** The 8th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX, Stockholm - Sweden, June 25-29, 1995, vol. 2, pp. 272-275.

## Páginas WWW

- **Sandia National Laboratories** - <http://www.mdl.sandia.gov/>
- **MCNC MEMS Technology Applications Center** - <http://mems.mcnc.org/>
- **MOSIS Service** - <http://www.mosis.org/New/Products/mems.html>
- **CMP Service** - <http://tima-cmp.imag.fr/cmp.html>
- **MEMS Clearinghouse** - <http://mems.isi.edu/>
- **MEMSCAP S.A.** - <http://memscap.e-sip.com/>
- **Microsystems Group** (Laboratoire TIMA - França) - <http://tima-cmp.imag.fr/tima/mcs/mcs.html>
- **Microelectromechanical Systems Laboratory** (Carnegie Mellon Univ.)- <http://www.ece.cmu.edu/~mems/>
- **Sensors, Actuators and Microsystems Laboratory** (Univ. Neuchâtel - Switzerland) – <http://www-samlab.unine.ch/>
- **Silicon Microstructures and Microsystems Integration** (Laboratoire LAAS - França) - <http://www.laas.fr/M2I/M2I-eng.html>
- **MIT Microsystems Technology Laboratories** (Massachusetts Institute of Technology) - <http://www-mtl.mit.edu/>
- **Berkeley Sensor & Actuator Center** - <http://bsac.eecs.berkeley.edu/>
- **University of Wisconsin - MEMS** (Madison) - <http://mems.engr.wisc.edu/>
- **Microfabrication Laboratory** (Northeastern University) - <http://www.ece.neu.edu/edsnu/zavracky/mfl/mfl.html>
- **Micromechanical Transducers Group** (Twente University) - <http://www.el.utwente.nl/tdm/mmd/>
- **Microsensor & Actuator Technology Center** (Technical University of Berlin) - <http://www-mat.ee.tu-berlin.de/index.html>
- **MEMS Exchange** - <http://www.mems-exchange.org/>
- **Darpa MEMS** - <http://www.darpa.mil/ETO/MEMS/>
- **Microelectromechanical Systems in Japan** (JTEC Report) - <http://itri.loyola.edu/mems/>
- **Microcosm** - <http://www.memcad.com/>
- **Intellisense Corporation** - <http://www.intellis.com/>
- **Tanner** - <http://www.tanner.com/>
- **ANSYS** - <http://www.ansys.com/>



[©Sandia National Laboratories]