



SEM0324 FABRICAÇÃO DE PRECISÃO

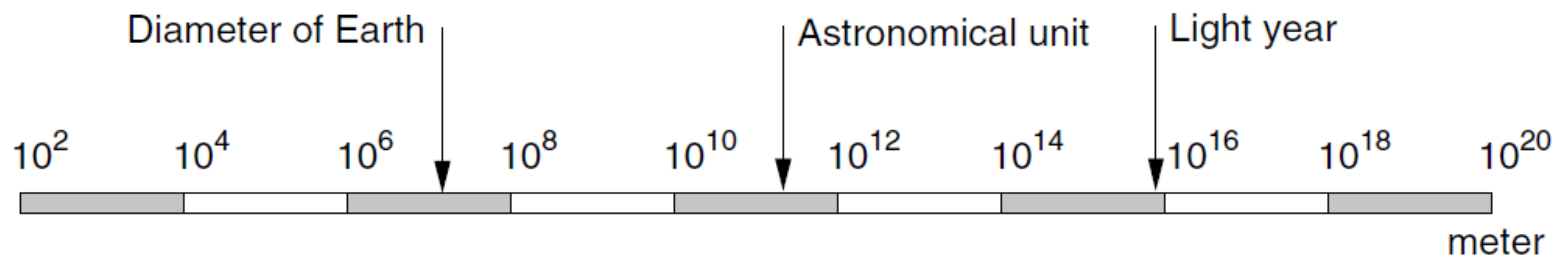
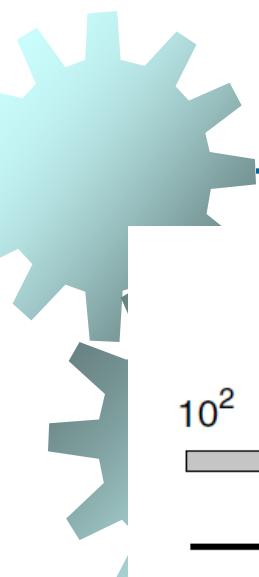
Mário Luiz Tronco
Renato Goulart Jazinevicius

Tecnologias de Microfabricação-Microeletrônica

MEMS

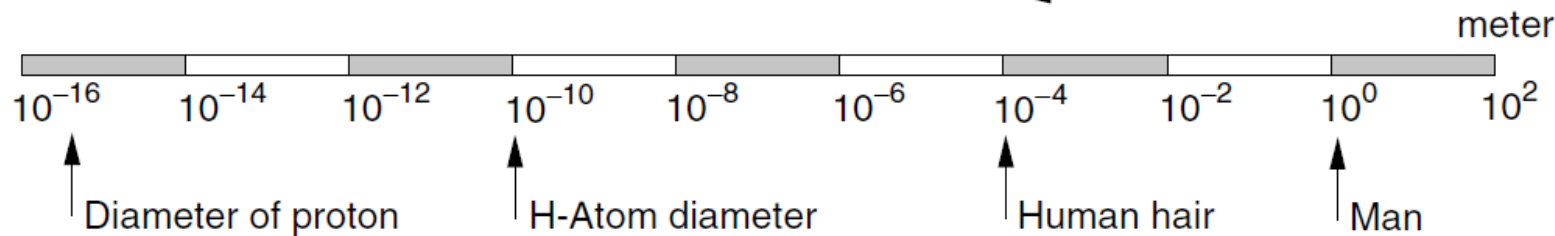
Micro-electromechanical systems





Voyage to Brobdingnag

Voyage to Lilliput

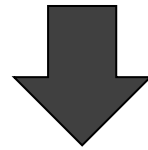


Nanodevices Microdevices Typical man-made devices



Sistemas Micro-eleto-mecânicos (MEMs)

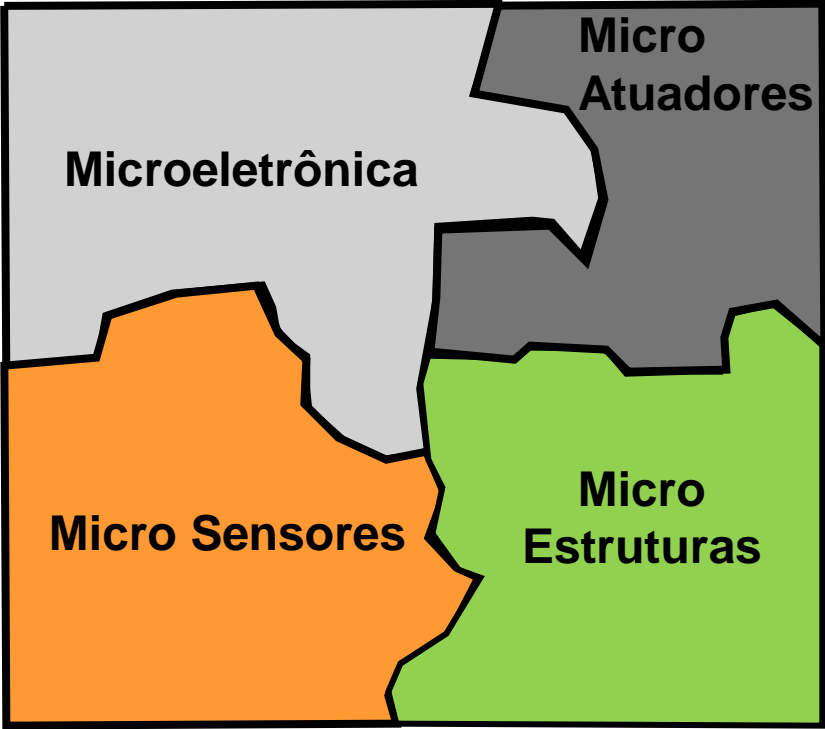
Dispositivos que tem tamanho menor que 1mm e maior que 1 μ m, que combinam componentes eletrônicos e mecânicos, e que são fabricados usando técnicas de produção de circuitos integrados.




Representam a integração de elementos mecânicos, sensores e atuadores (de diferentes domínios) e dispositivos eletrônicos em um substrato comum através da utilização da tecnologia de microfabricação.



MEMS





Componentes eletrônicos são fabricados usando técnicas de integração de circuitos (CI – Circuito Integrado), **MEMs** são fabricados por manipulações sofisticadas do silício e outros substratos, usando processos de microusinagem.

Estes processos removem seletivamente partes do silício e adicionam camadas estruturais para construir componentes mecânicos e eletromecânicos.

Circuitos integrados exploram **propriedades elétricas** do silício. **MEMs** exploram outras propriedades do silício (**mecânicas, elétricas ou ambas**).

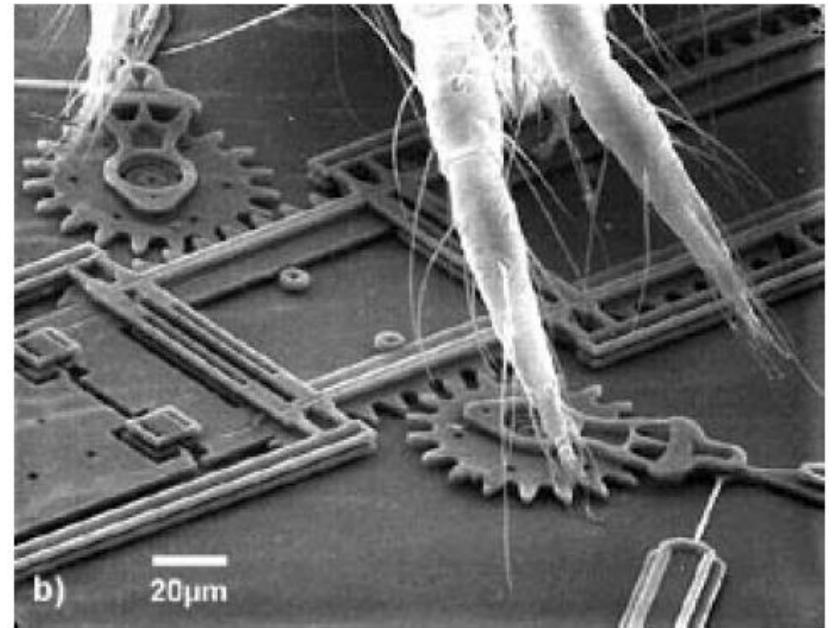
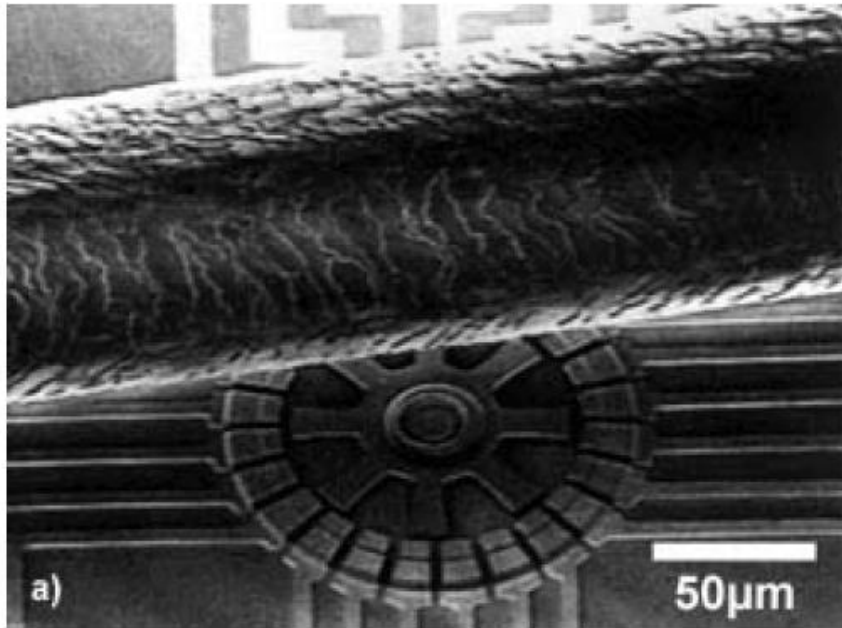
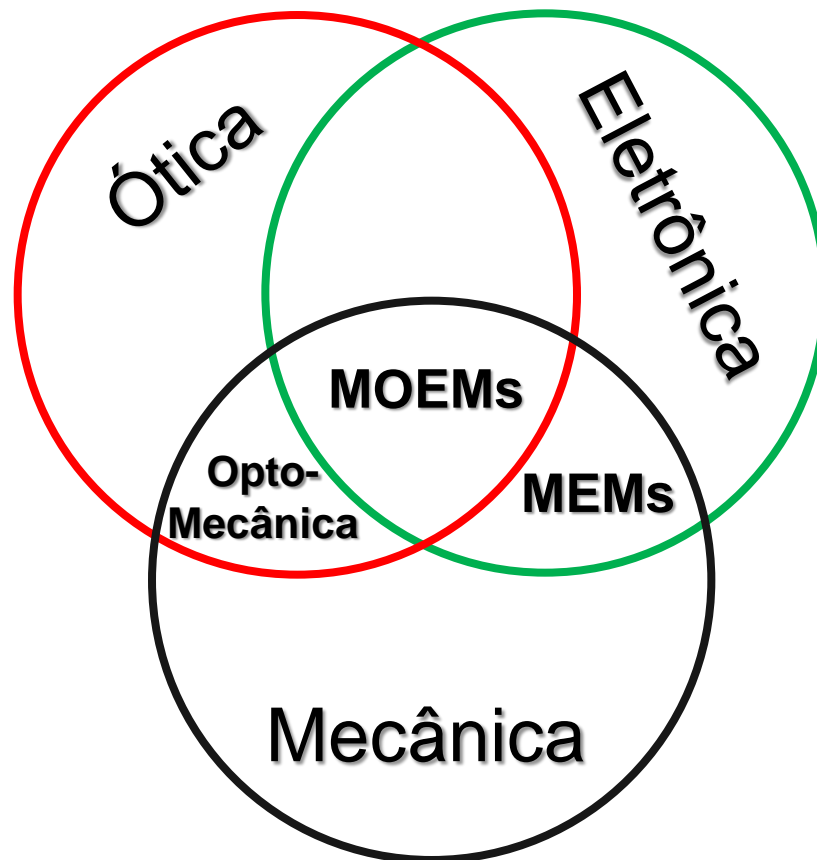


Figure (a) A MEMS silicon motor together with a strand of human hair [1], and (b) the legs of a spider mite standing on gears from a micro-engine [2 - Sandia National Labs, SUMMiT *Technology, <http://mems.sandia.gov>].



Transdutor

Um transdutor é um dispositivo que transforma uma forma de energia em outra. O termo transdutor pode ser usado para incluir sensores e atuadores e é o mais utilizado em termos de MEMs.

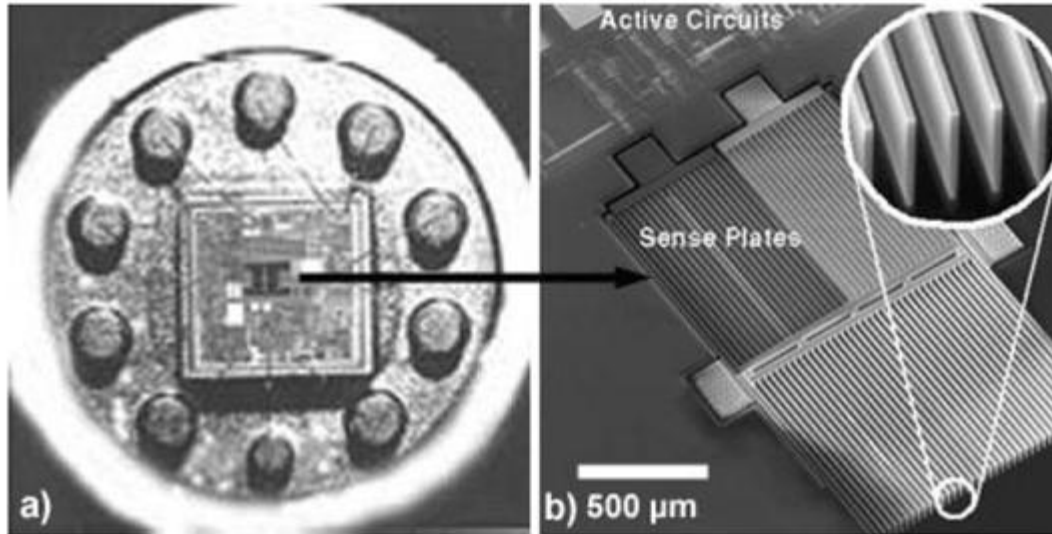
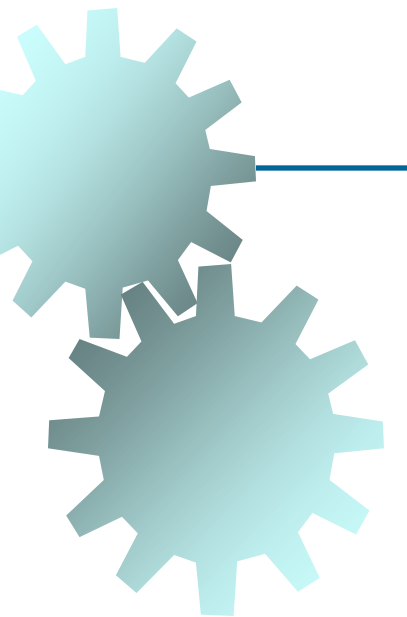
Sensor

Um sensor é um dispositivo que mede informação de um determinado ambiente e provê um sinal elétrico de saída em resposta ao parâmetro sob medida. O tipo de energia inclui:

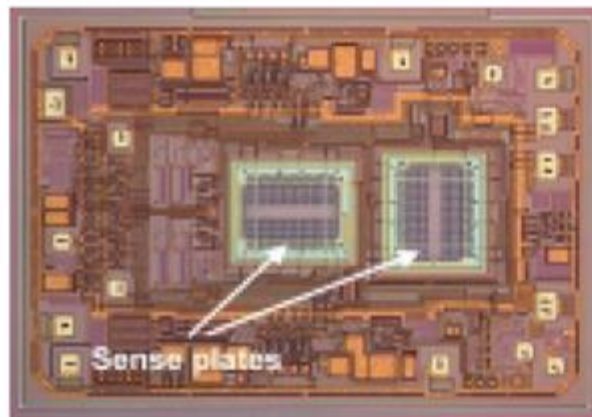
- Mecânica: força, pressão, velocidade, aceleração, posição;
- Térmica: temperature, entropia, calor, fluxo de calor;
- Química: concentração, composição, taxa de reação;
- Radiante: intensidade de onda eletromagnética, fase, comprimento de onda, índice de refletância, etc;
- Magnética: intensidade de campo, densidade de fluxo, momento magnético, permeabilidade;
- Elétrica: tensão, corrente, carga, resistência, capacitância.

Atuador

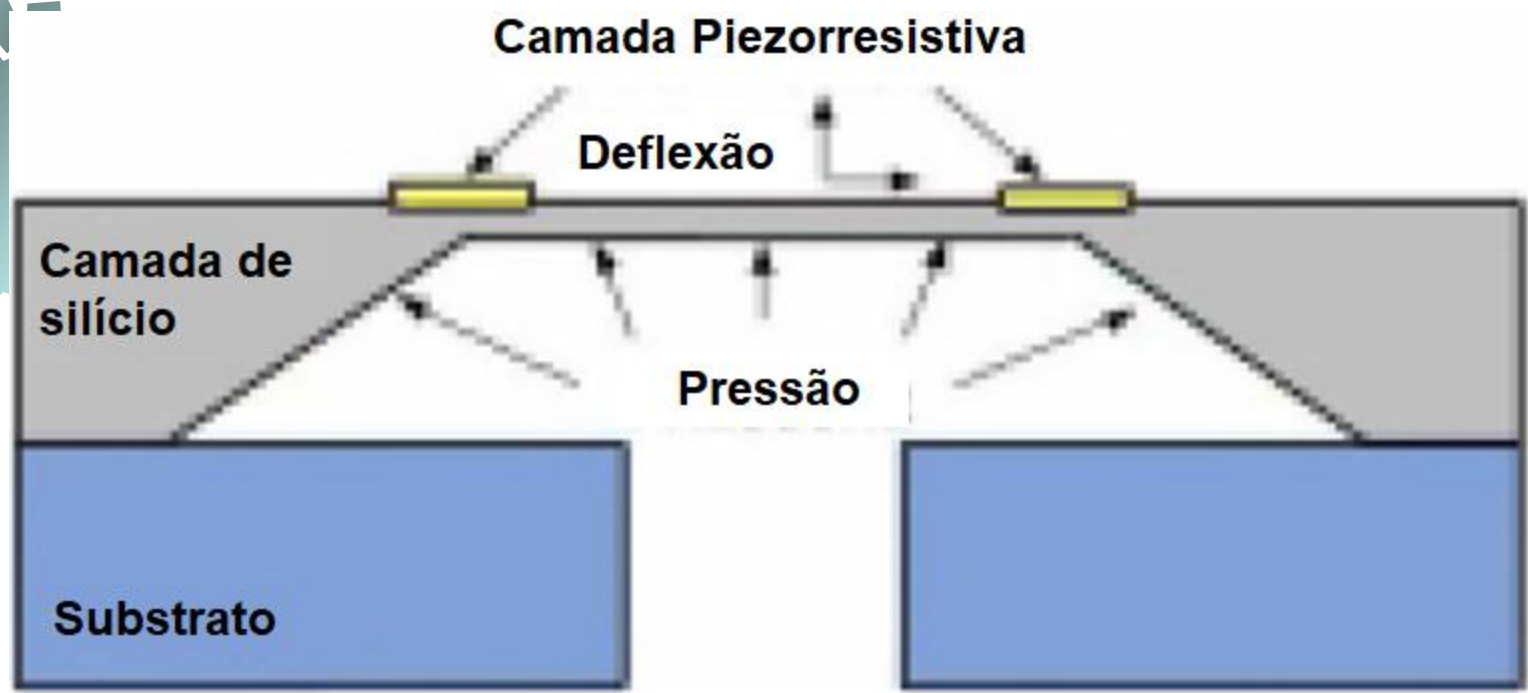
Um atuador é um dispositivo que converte um sinal elétrico em uma ação.

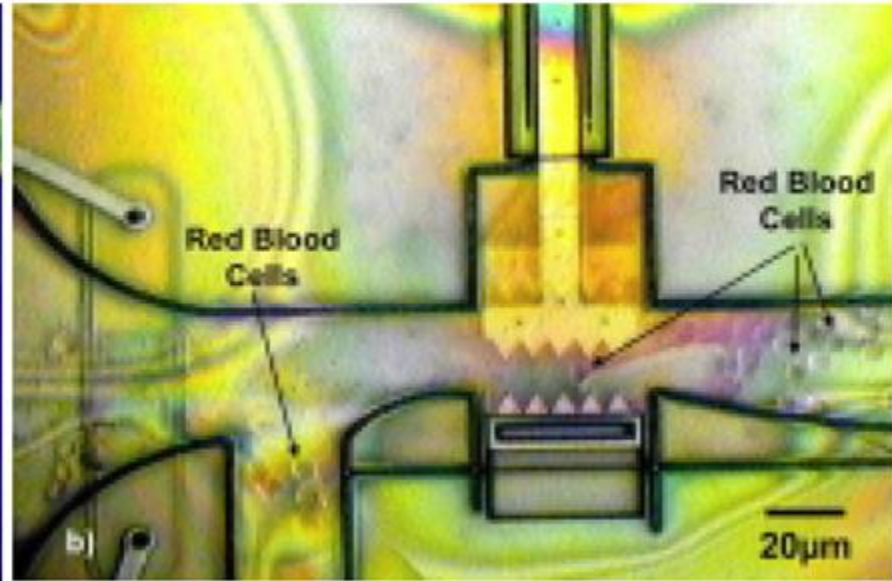
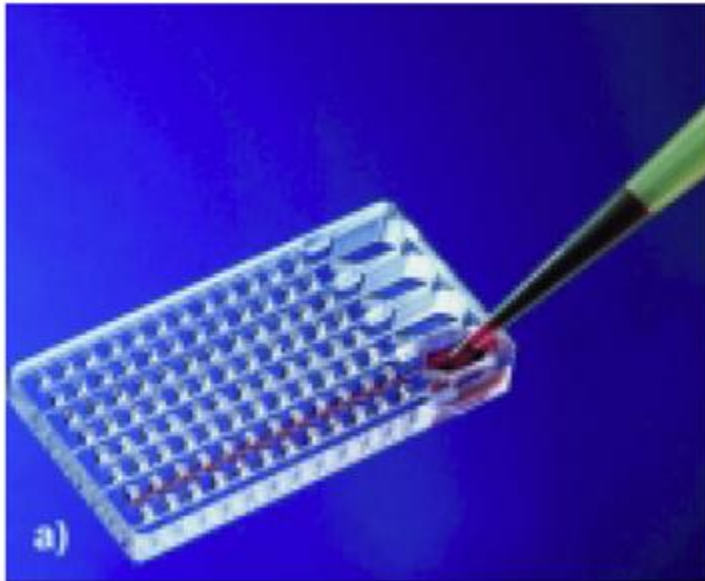


(a) The first commercial accelerometer from Analog Devices (1990); its size is less than 1 cm² (left) and (b) capacitive sense plates, 60 microns deep (right)

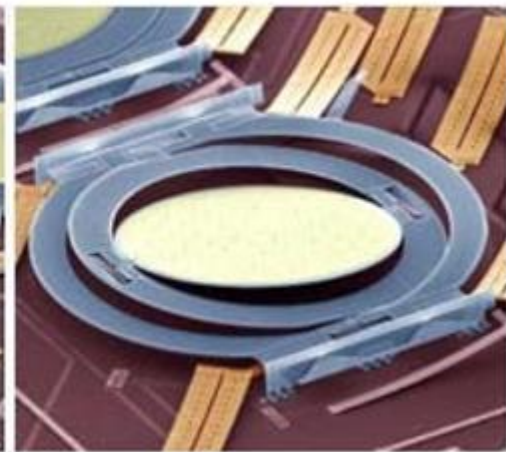
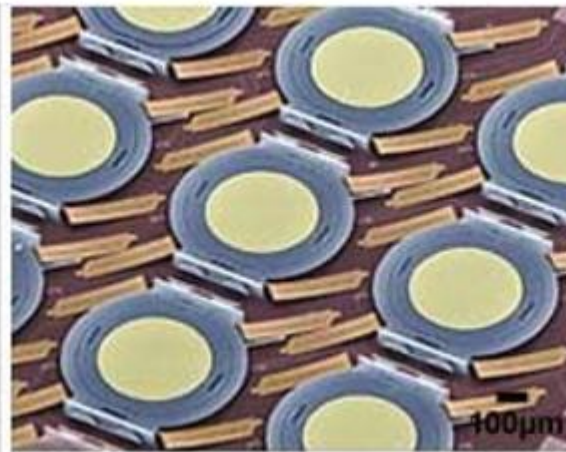
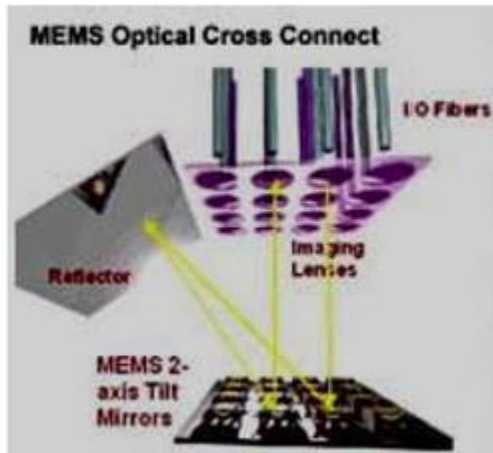


Modern day MEMS accelerometer (left), and the fully packaged device (right)





(a) Microplaca de Titulação microusinada com 96 cavidades preenchidas por força capilar e (b) dispositivo BioMEMs que atua como "microdentes" para capturar, segurar e devolver glóbulos vermelhos. As pequenas esferas nos canais são glóbulos vermelhos.



Cross Connect Ótico MEM composto por um arranjo de espelhos microscópios. Cada um do tamanho de uma cabeça de alfinete e capaz de se inclinar em várias direções.

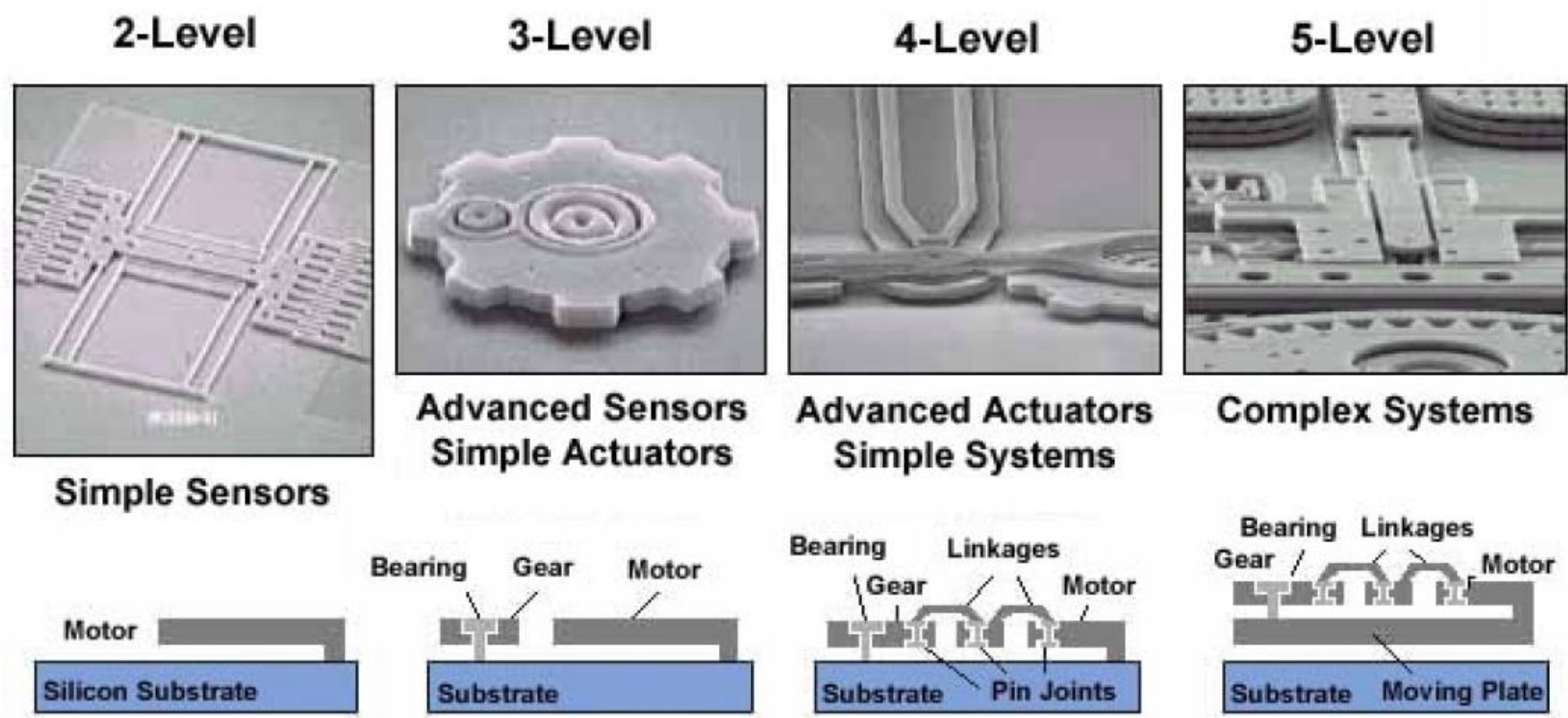


Figure 16. MEMS device complexity by structural layers [2].




Fotolitografia

Técnica fotográfica para transferir cópias de um padrão mestre, normalmente um layout de circuito elétrico, sobre um substrato de algum material (normalmente silício).

O substrato é coberto com um filme fino de algum material, normalmente dióxido de silício (SiO_2) no caso de pastilhas (wafers) de silício, no qual um padrão será formado.

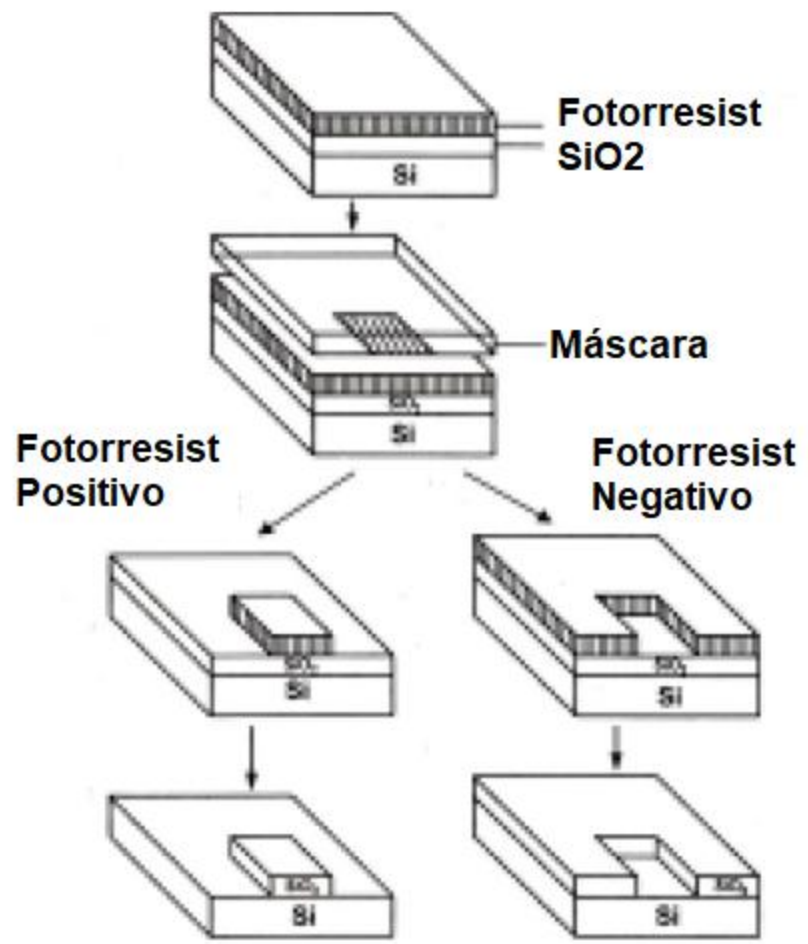
Uma camada fina de polímero orgânico, o qual é sensível à radiação ultravioleta, é então depositado na camada de óxido; este material é denominado fotoresist.



Uma **fotomáscara**, consistindo de uma placa transparente, coberta com um padrão opaco é colocada em contato com a superfície coberta com o fotoresist.

A pastilha de silício é exposta à radiação ultravioleta transferindo o padrão da máscara para o fotoresist. A radiação causa uma reação química nas áreas expostas do fotoresist.

Uma solução de lavagem remove as áreas não expostas do fotoresist deixando um padrão de óxido nú e fotoresist na superfície do silício. O padrão resultante no fotoresist é a imagem positiva ou negativa do padrão original da fotomáscara.



Padrões de Fotorresist e dióxido formados por litografia

Um produto químico (normalmente ácido clorídrico) é usado para atacar e remover o óxido das áreas não cobertas pelo fotoresist.

O fotoreisist remanescente é removido, normalmente com ácido sulfúrico, o qual ataca o fotoresist mas não a camada de óxido do silício, deixando um padrão de óxido na superfície do silício. O padrão final no óxido é uma cópia (negativa ou positiva) do padrão da fotomáscara e serve como padrão para passos de processamento subsequentes.

Neste ponto MEMs divergem do processo tradicional de fabricação de Circuitos Integrados.

- **Em circuitos integrados**, o padrão de óxido atua como máscara no processo de dopagem do silício com impurezas, necessário para a produção de dispositivos microeletrônicos.
- **Em MEMs**, o óxido atua como máscara suporte para outras corrosões químicas que resultarão em novas camadas, que servirão para construir estruturas 3D no dispositivo.

Materiais para Microfabricação

Substratos

O silício é o material mais comumente usado, por diversas razões:

- É abundante, barato e pode ser processado com alto grau de pureza;
- Pode ser oxidado para formar uma superfície de SiO₂ quimicamente inerte e eletricamente isolada;
- A facilidade de uso de filmes finos é bastante interessante para MEMs;
- A alta definição e reprodução de formas em dispositivos de silício usando fotolitografia é perfeita para MEMs com altos níveis de precisão;
- Possibilidade de fabricação em lotes (centenas de peças idênticas por pastilha – wafer).

Filmes Aditivos

O conjunto de filmes aditivos e materiais para dispositivos MEMs é muito maior que os tipos de possíveis substratos, incluindo condutores, semicondutores e isoladores, tais como:

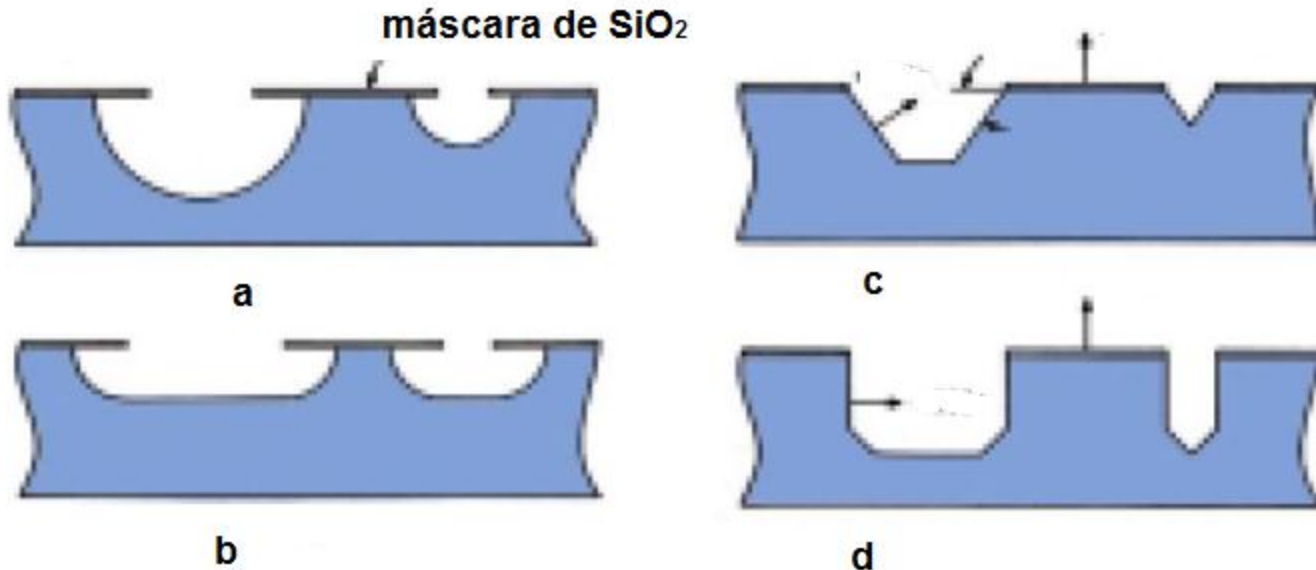
- Silício – cristal, policristalino e amorfo;
- Compostos de silício (Si_2N_3 , SiO_2 , SiC , etc.);
- Metais e compostos de metais (Au, Cu, Al, ZnO, GaAs, IrO_x , CdS);
- Cerâmicas (Al_2O_3 e compostos complexos de cerâmica);
- Orgânicos (diamante, polímeros, enzimas, DNA, etc.).

Micro-usinagem

Remoção do substrato. Processo subtrativo que usa corrosão úmida anisotrópica ou corrosão seca (por feixe de íons, por exemplo) para criar cavidades, ranhuras e canais.

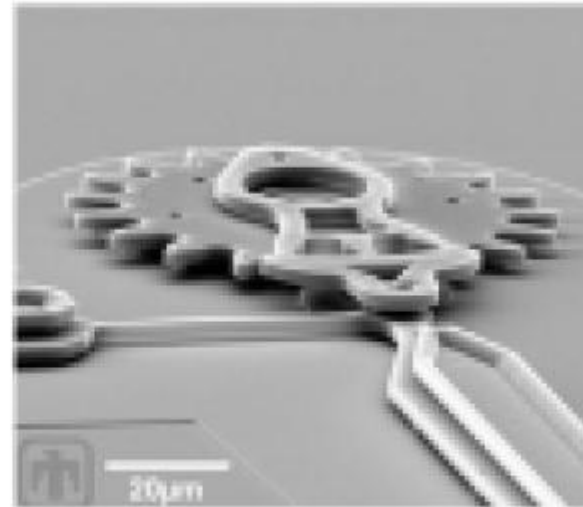
Os materiais normalmente usados na corrosão úmida incluem silício e quartzo, enquanto na corrosão a seco incluem silício, metais, plásticos e cerâmicas.

Corrosão úmida

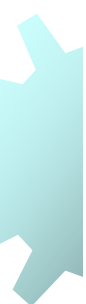


Corrosão Isotrópica com (a) e sem (b) agitação e corrosão Anisotrópica (c) e (d).

Corrosão a seco



Corrosão Profunda a seco usando feixe de íons

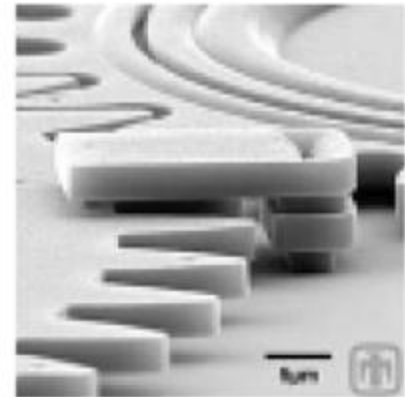
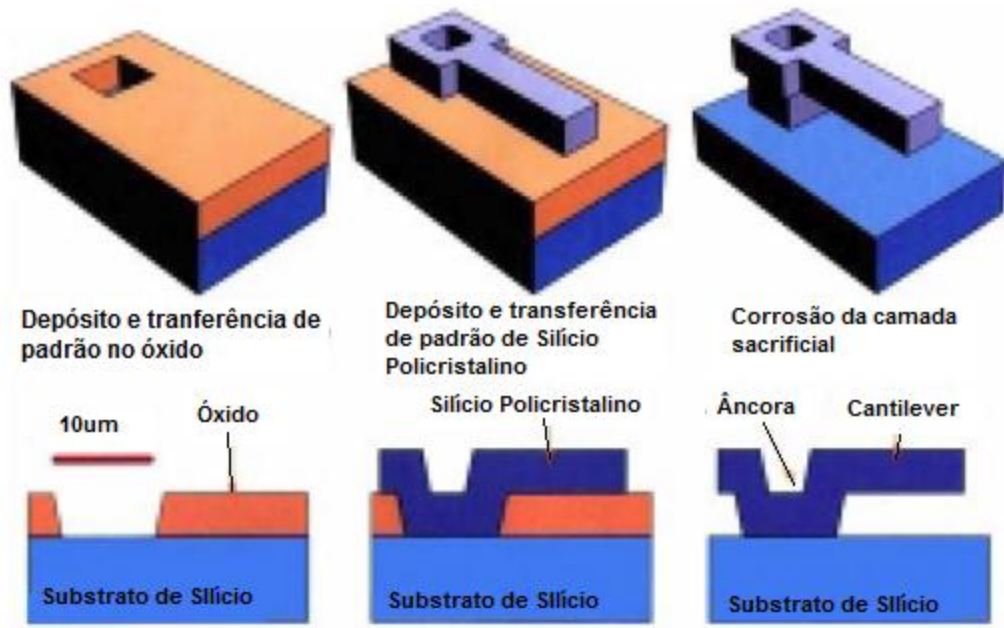


A micro-usinagem de superfície envolve o processamento sobre o substrato, usando-o como base de construção. Foi iniciada nos anos 80 e é tecnologia de produção de MEMs.

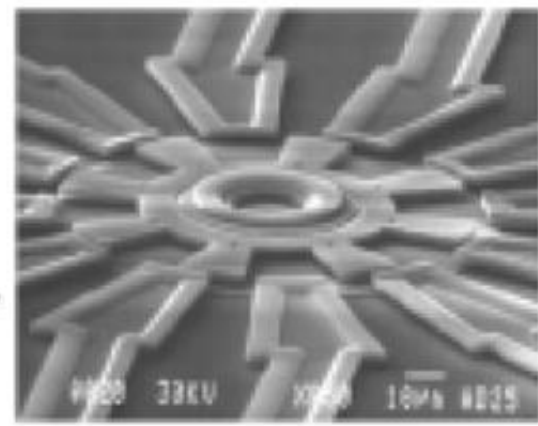
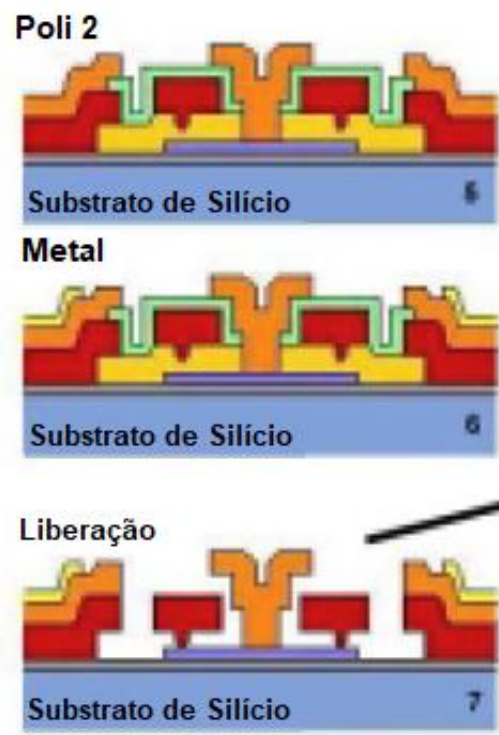
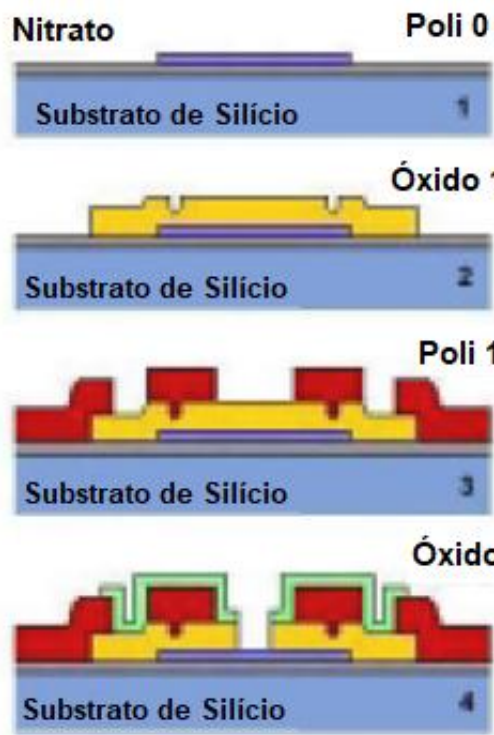
◀ O material é adicionado ao substrato na forma de camadas de filmes finos na superfície do substrato (normalmente uma pastilha de silício).

◀ Essas camadas podem atuar como camadas estruturais ou como espaçadores, sendo posteriormente eliminadas (neste caso conhecidas como **camadas sacrificiais**).

O processo geralmente envolve filmes de dois materiais diferentes: um **material estrutural** do qual é feita a estrutura autônoma (geralmente silício ou polissilício policristalino, nitreto de silício e alumínio) e um **material de sacrifício**.

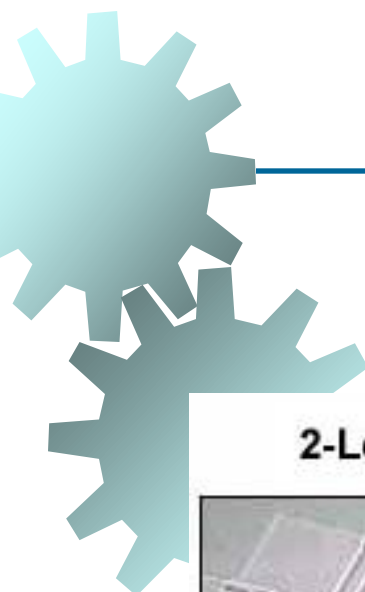


Micro-usinagem de Superfície de viga cantilever usando camada sacrificial



Motor rotacional Eletrostático MEM

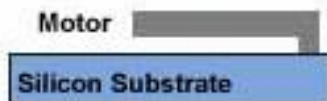
Usinagem de Superfície de um micromotor MEMs



2-Level



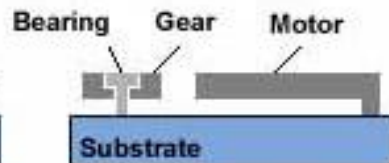
Simple Sensors



3-Level



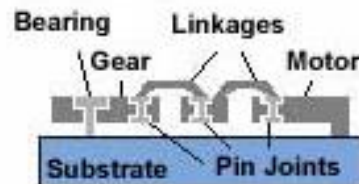
**Advanced Sensors
Simple Actuators**



4-Level



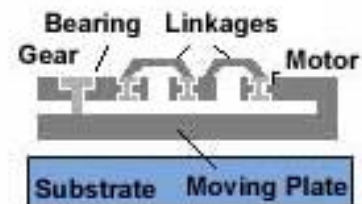
**Advanced Actuators
Simple Systems**



5-Level



Complex Systems

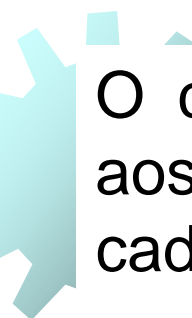


União por fusão

Para obter estruturas MEMs mais complexas e maiores, wafers de silício podem ser unidas a outros materiais em um processo conhecido por **União por Fusão**.

Técnica que permite a integração praticamente perfeita de várias camadas e depende da criação de ligações atômicas entre cada camada:

- **diretamente** (com aquecimento e pressão no caso de ligação vidro-wafer)
- através de uma **fina película de dióxido de silício** .

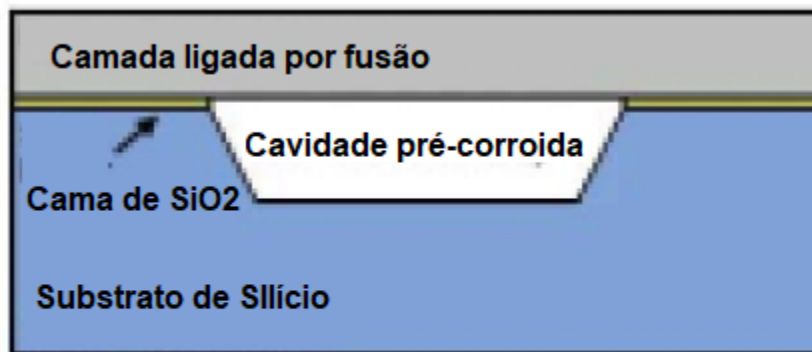


O composto tem uma tensão residual muito baixa devido aos coeficientes correspondentes de expansão térmica de cada camada.

Além disso, a resistência mecânica da ligação é comparável à das camadas adjacentes, resultando em uma técnica de fabricação de sólida para cavidades e canais fechados.

As camadas estruturais de alta proporção de aspecto também podem ser ligadas a substratos de silício de maneira semelhante.

O fotorresist e o polimetilmetacrilato (PMMA) são usados como meio de união por de MEMs e se mostram apropriados para união de poliamida.



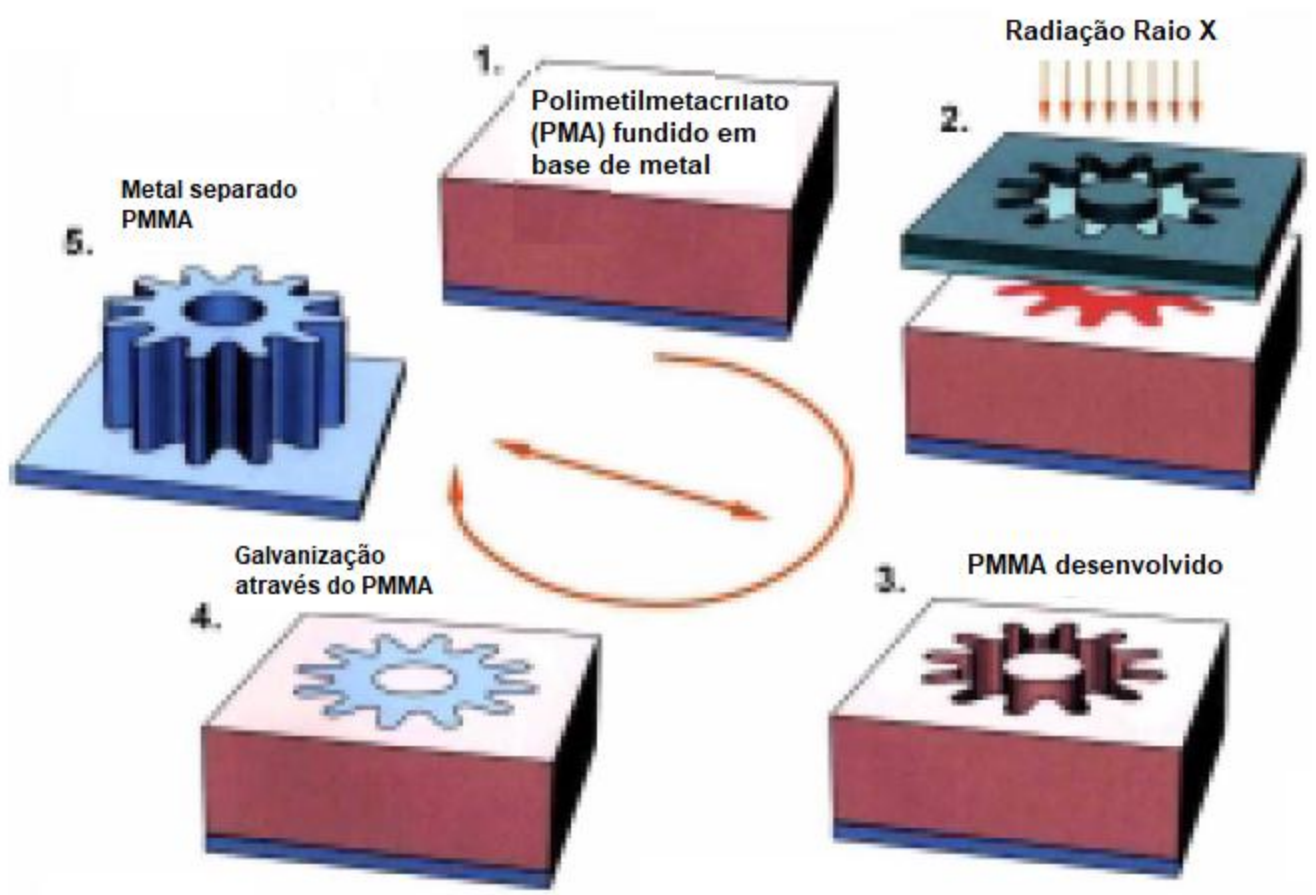
Formação de cavidade selada usando união por fusão

Microusinagem de alta proporção de aspecto

A micro-usinagem de alta proporção de aspecto é um processo que envolve a micro-usinagem como uma etapa seguida de moldagem por injeção ou estampagem e, se necessário, por eletroformação para replicar microestruturas em metal de peças moldadas.

É uma das tecnologias mais atraentes para replicar microestruturas inclui técnicas conhecidas como LIGA. Os produtos micro-usinados com essa técnica incluem estruturas como placas de bicos moldados para impressão a jato de tinta e placas de microcanal para microtitulação descartáveis em aplicações de diagnóstico médico.

Os materiais que podem ser utilizados são metais e plásticos eletroformados, incluindo acrilato, policarbonato e estireno.



Processo LIGA



Microusinagem a laser



Transdutores Mecânicos

- **Sensores Mecânicos**

- Existe uma grande variedade de sensores mecânicos que vem sendo ou que podem ser microusinados, de acordo com seus mecanismos de sensoriamento (piezorresistivos, piezoelétricos ou capacitivos) e de seus parâmetros (tensão, força e deslocamento)

- ✓ **Sensor Piezorresistivo**

Como resultado do efeito piezorresistivo (mudança na resistividade em função de tensão aplicada), mudanças dimensionais resultam em proporcionais mudanças na resistência no sensor. O efeito piezorresistivo em semicondutores é consideravelmente maior do que em metais, o que torna o silício um excelente sensor.

Piezorresistores MEMs são facilmente produzidos usando silício dopado com impurezas p ou n.



Transdutores Mecânicos

- **Sensores Mecânicos**

- ✓ **Sensor Piezoelétrico**

Usam o efeito Piezoelétrico, no qual uma força aplicada em um cristal piezoelétrico resulta em uma diferença de potencial. Similarmente, se o cristal for submetido a uma diferença de potencial, um deslocamento é produzido.

O efeito pode ser usado para sensoriar stress mecânico (deslocamento) e como um mecanismo de atuação,

Materiais piezoelétricos comumente utilizados em aplicações MEMs incluem quartzo, Óxido de Zinco, polyvinylidene fluoreto (PVDF), entre outros.

O silício não tem comportamento piezoelétrico; desta forma, um filme fino de material adequado tem que ser depositado nos dispositivos.



Transdutores Mecânicos

- **Sensores Mecânicos**

- ✓ **Sensor Capacitivo**

Representam os mais importantes (e mais largamente utilizados) mecanismos sensores de precisão e incluem uma ou mais placas condutoras fixas com uma ou mais placas condutoras móveis.

Sensores capacitivos baseiam-se na equação básica do capacitor de placas planas: a capacitância é inversamente proporcional à distância entre as placas – desta forma o sensoreamento de deslocamento muito pequenos é extremamente preciso.

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$

ϵ_0 = Permissividade no espaço livre = $8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$

ϵ_r = Permissividade relativa do material entre placas

A = Área de sobreposição

d = Separação entre placas (m)



Transdutores Mecânicos

- **Sensores Mecânicos**

- ✓ **Sensor Ressonante**

Sensores MEMs ressonantes consistem em vigas ou pontes micro-usinadas que são acionadas para vibrar em sua frequência de ressonância.

Podem ser acoplados a membranas ou projetados para aderirem a um determinado substrato. O movimento da membrana ou acúmulo da substância de união afetará a frequência de ressonância e poderá ser monitorada usando piezorresistores implantados.



Transdutores Mecânicos

- **Tipos de Sensores Mecânicos**

- ✓ **Strain Gauges**

Strain gauge é um condutor ou semicondutor que é fabricado ou colado diretamente na superfície a ser medida.

Exemplo: Strain gauge MEM piezorresistivo de polissilício, implantável, para medir forças no coração e no cérebro.

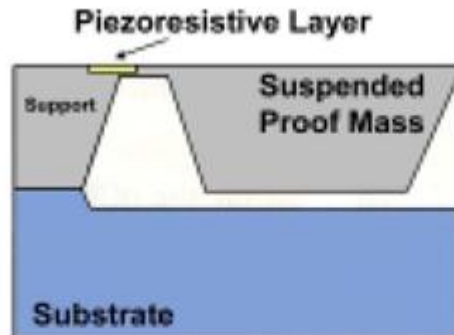
Transdutores Mecânicos

- **Tipos de Sensores Mecânicos**

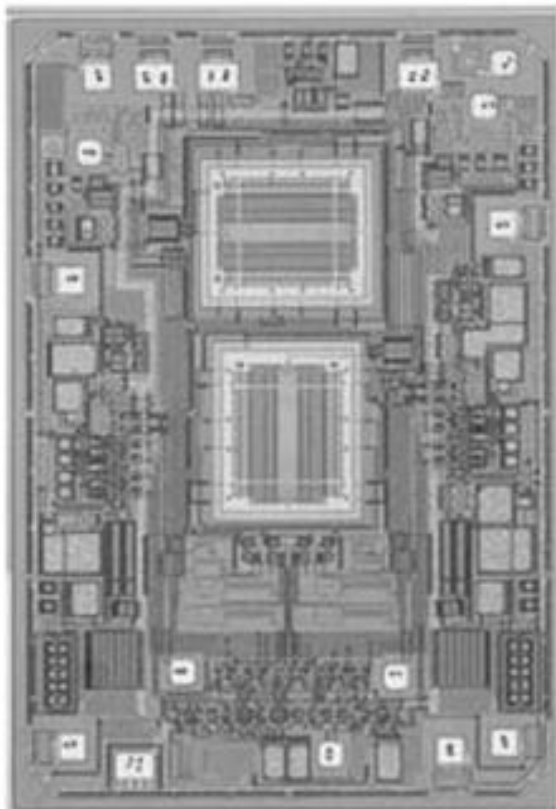
- ✓ **Acelerômetros**

- Academically, accelerometers measure acceleration using a suspended proof mass to which an external acceleration can be applied.

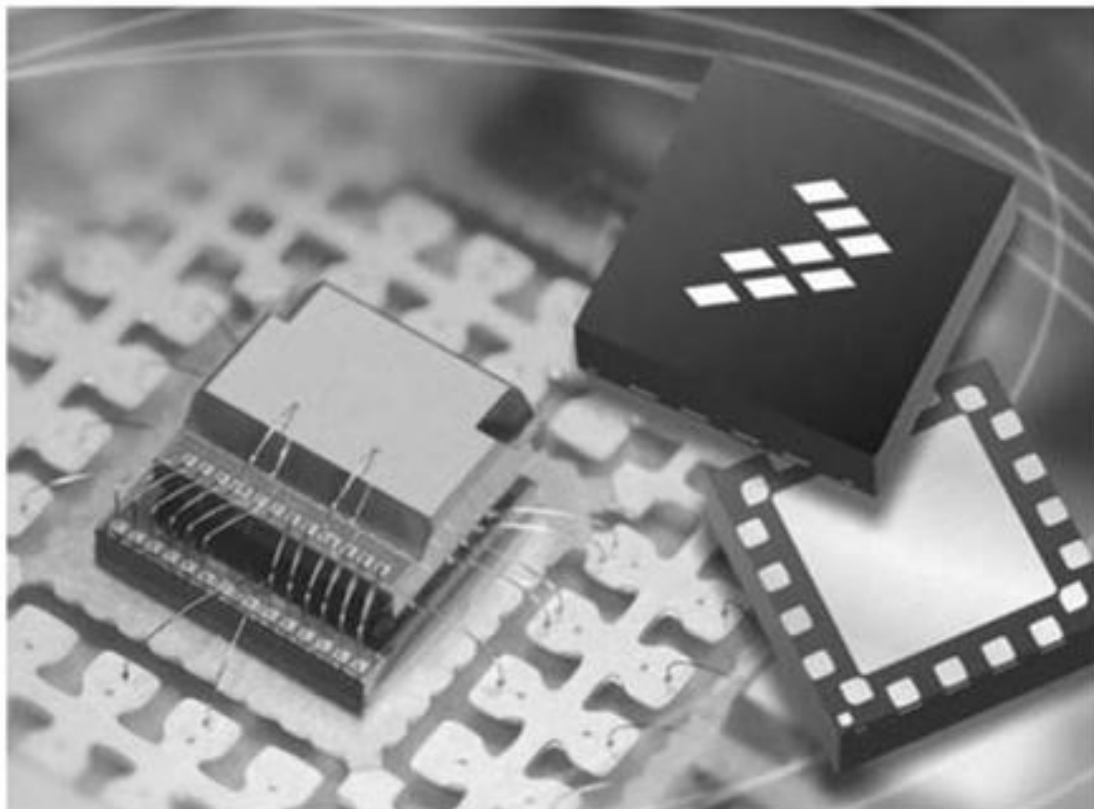
Sob aceleração (ou desaceleração), uma força ($f=ma$) é gerada na massa de prova, resultando em deslocamento. A força ou o deslocamento é normalmente medida usando sensores piezorresistivos ou capacitivos.



Suspended proof mass in a piezoresistive accelerometer (not to scale).



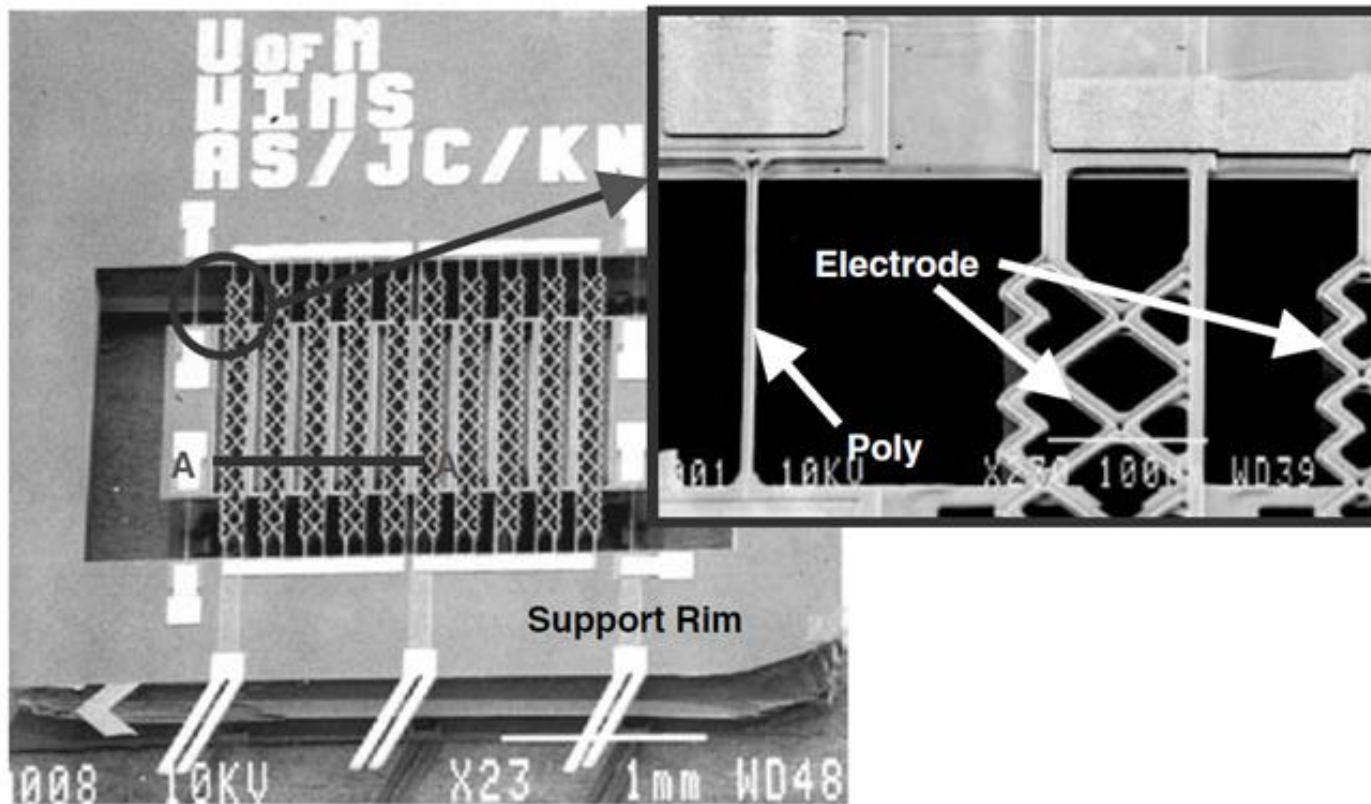
(a)



(b)

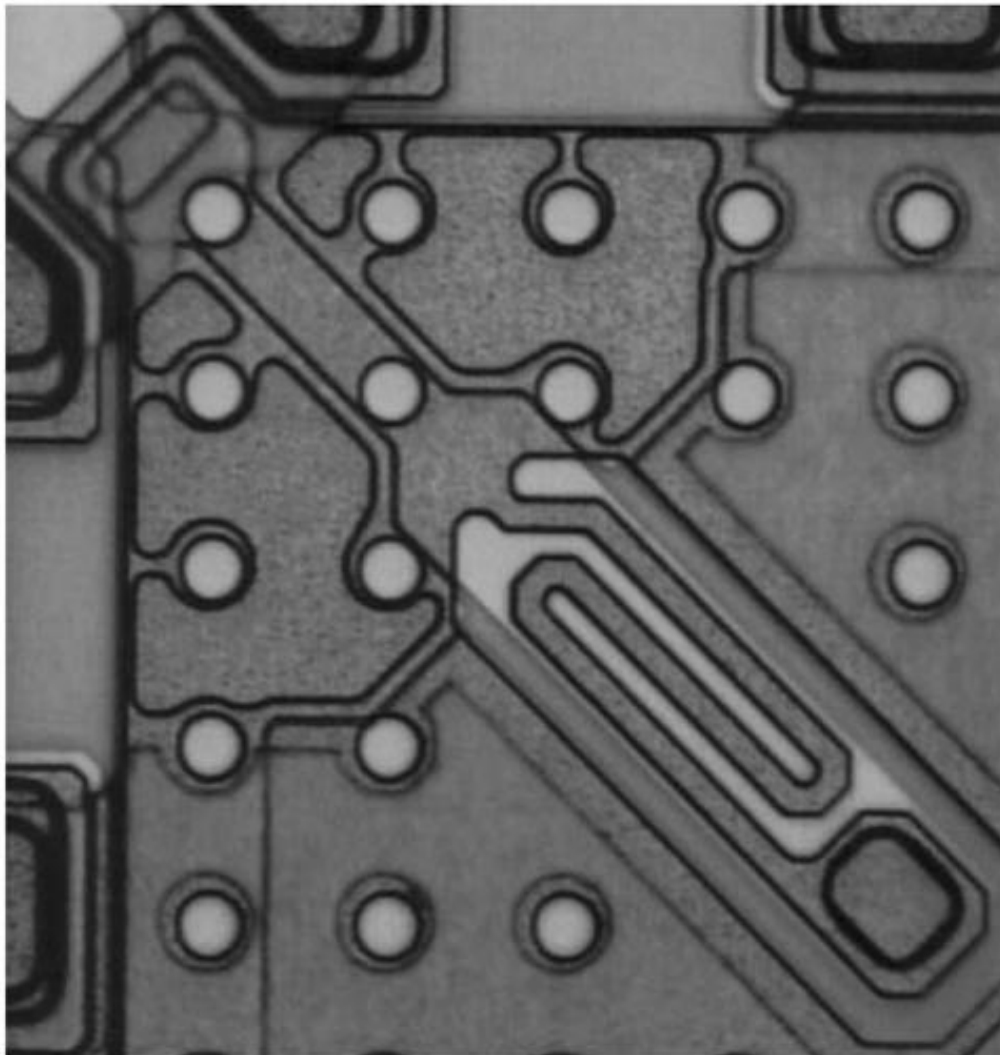
Dois acelerômetros. (a) Microfotografia de topo do acelerômetro de dois eixos ADXL250 da Analog Devices, Inc. (b) é uma vista em perspectiva do acelerômetro da Freescale Semiconductor, Inc.

(Photos courtesy of Analog Devices, Inc. and Freescale Semiconductor, Inc.)



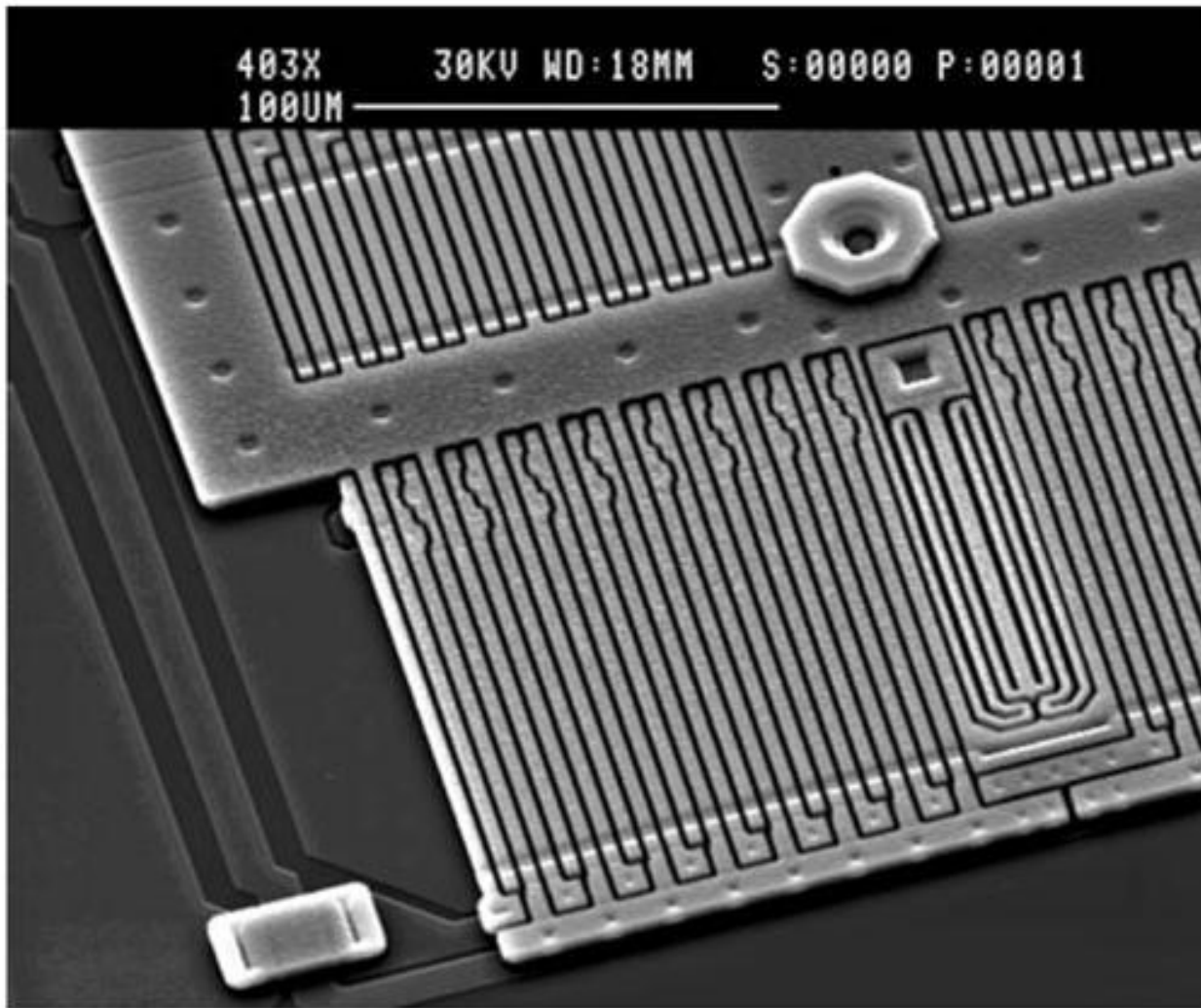
Microfotografia de um acelerômetro X-Lateral de ultra-alta resolução (resolução de μg).

(Photo courtesy of K. Najafi, University of Michigan.)

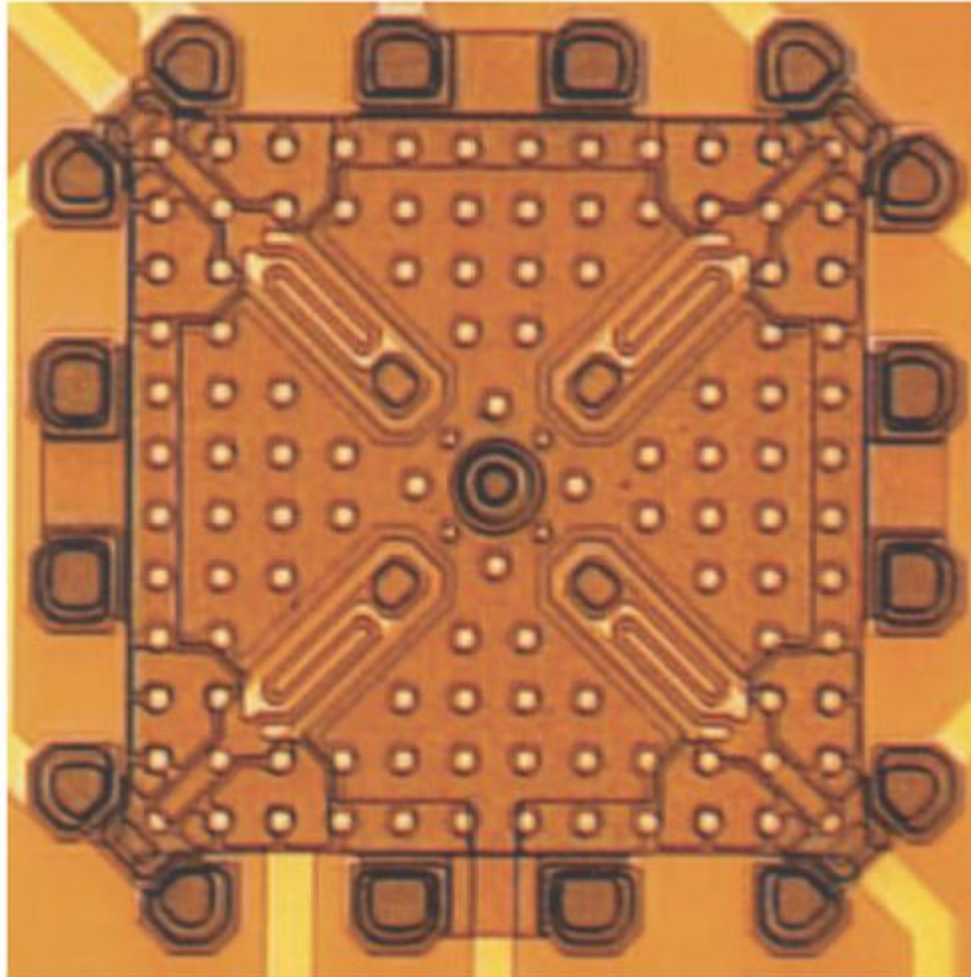


Microfotografia da vista de topo de um acelerômetro Z-axis mostrando a mola dobrada e orifícios de ataque (sacrificial) projetados na estrutura da massa de prova.

(Photo courtesy Freescale Semiconductor, Inc.)



Microfotografia de acelerômetro X-lateral mostrando o dispositivo diferencial capacitivo interdigital de medida, mola dobrada e a estrutura da massa de prova.



Microfotografia de vista de topo de acelerômetro Z-axis em três camadas de polissilício. O projeto permite alta sensibilidade inercial com baixa sensibilidade à temperatura.

(Photo courtesy Freescale Semiconductor, Inc.)

Transdutores Mecânicos

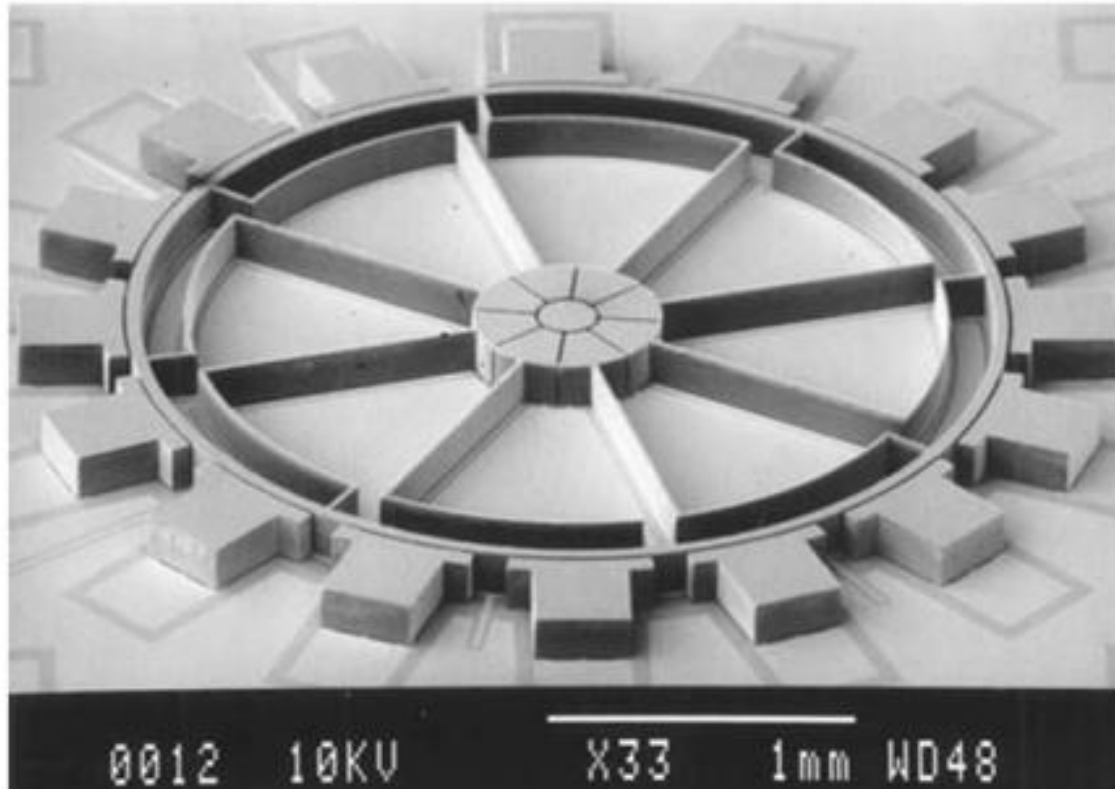
- **Tipos de Sensores Mecânicos**

- ✓ **Giroscópios**

Dispositivo que mede a taxa de rotação e detecta movimento angular inercial.

Usado em aplicações de navegação e guiagem.

Depende da medida da influência da força de Coriolis em um corpo em rotação. Os giroscópios MEMs geralmente usam estruturas vibratórias devido à dificuldade de microusinagem de peças rotacionais com massa útil suficiente.



**Microfotografia de vista em perspectiva de giroscópio de
anel giratório em silício Policristalino.**

(Photo courtesy K. Najafi, University of Michigan.)

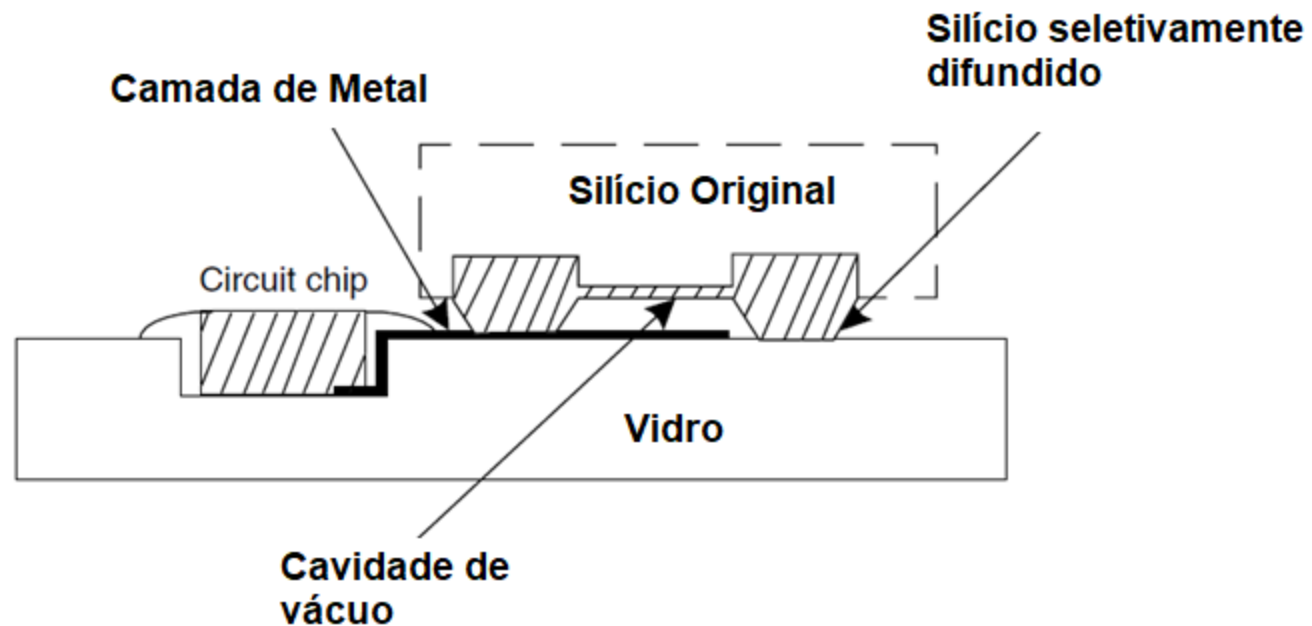
Transdutores Mecânicos

- **Tipos de Sensores Mecânicos**

- ✓ **Sensores de Pressão**

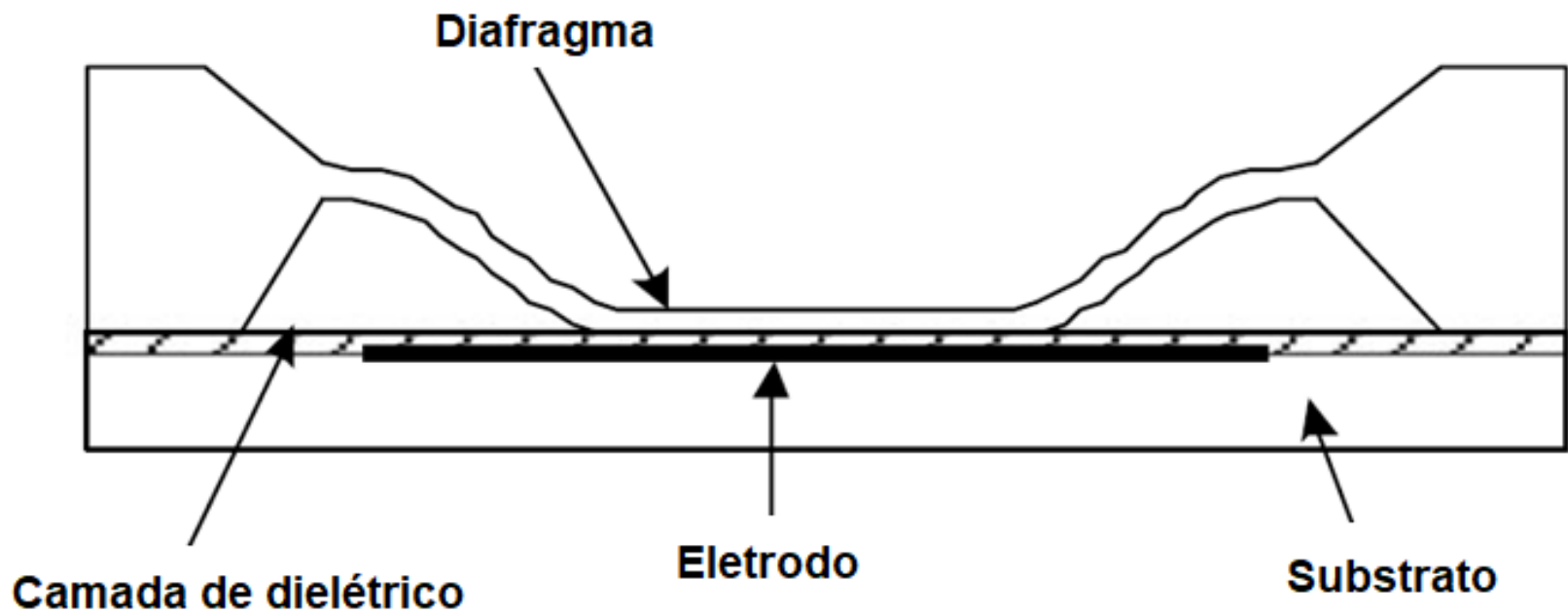
Sensores MEMs de pressão são normalmente baseados em membranas finas com cavidades seladas com gás ou vácuo de um lado da membrana e a pressão a ser medida do outro lado.

Técnicas de medida da deflexão da membrana usando sensores piezorresistivos ou capacitivos são normalmente utilizadas.

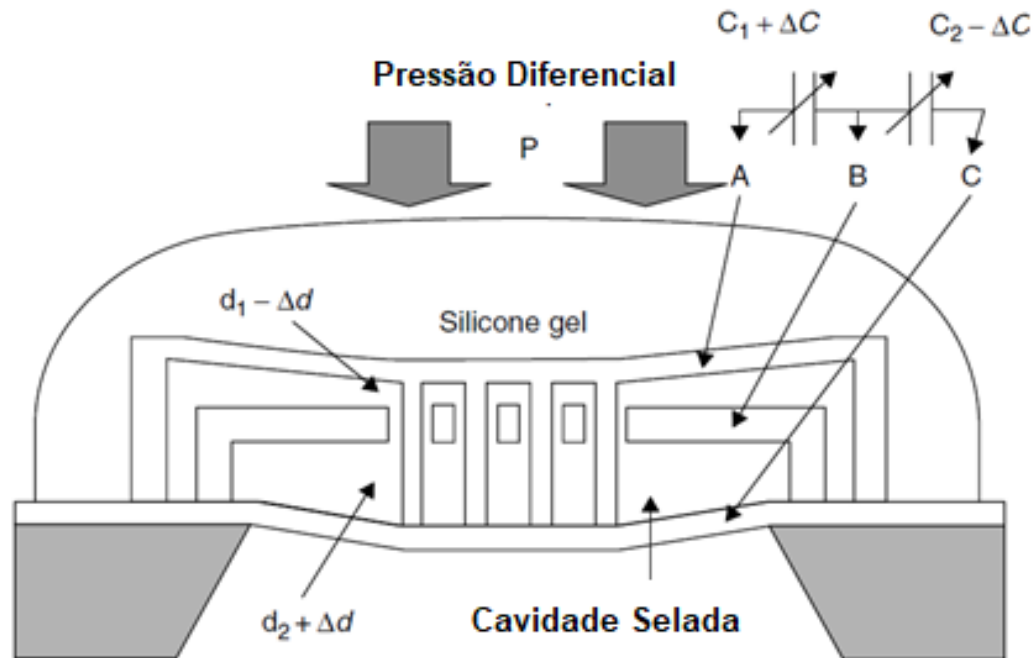


Esquemático de um sensor de pressão fabricado em substrato de vidro usando corrosão/dopante seletivo.

(Reprinted with permission from Chau, H., and Wise, K. [1988] "An Ultra-Miniature Solid-State Pressure Sensor for Cardiovascular Catheter," *IEEE Transactions on Electron Devices* 35(12), pp. 2355–2362.)

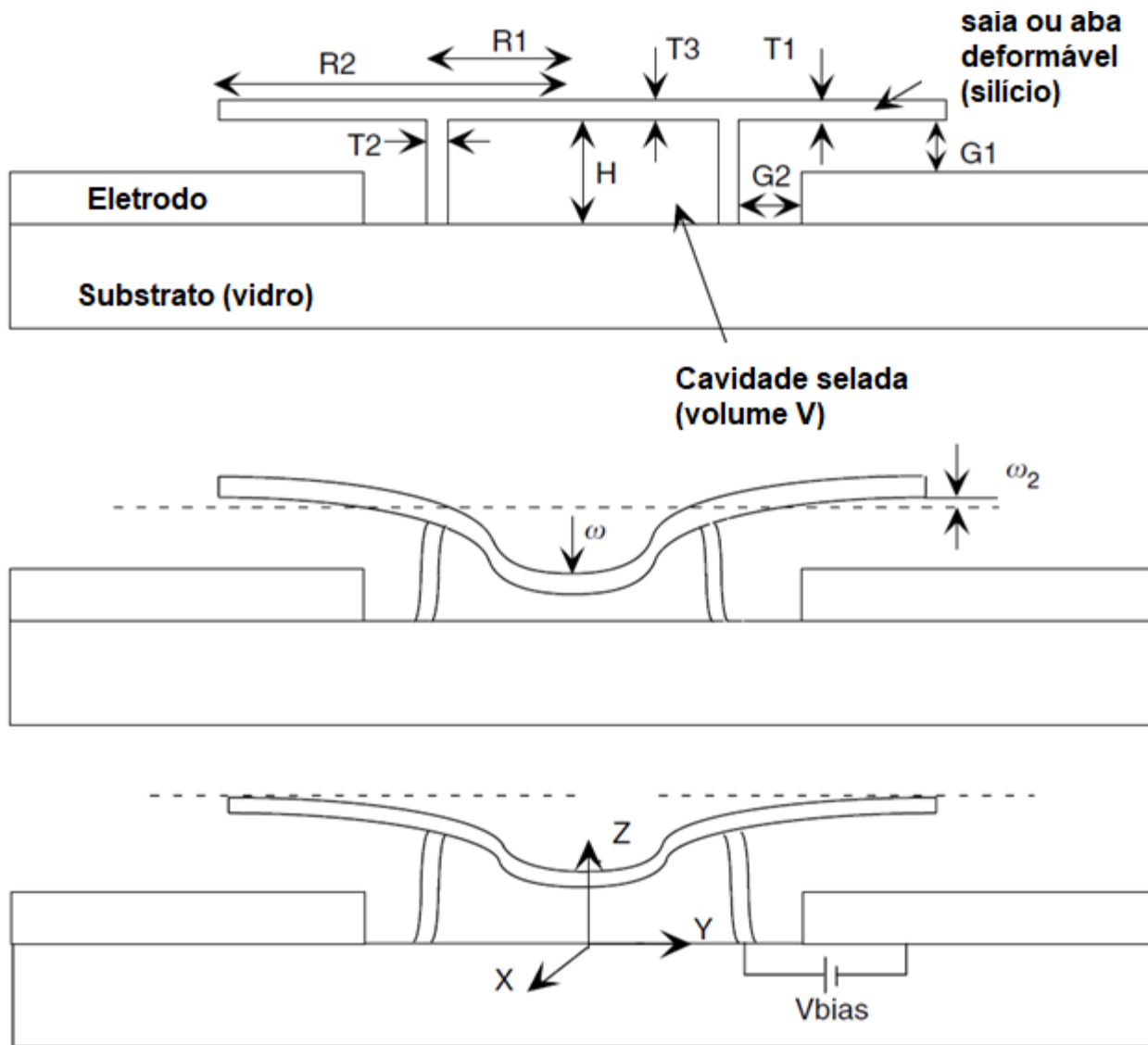


Um sensor de pressão capacitivo por toque.

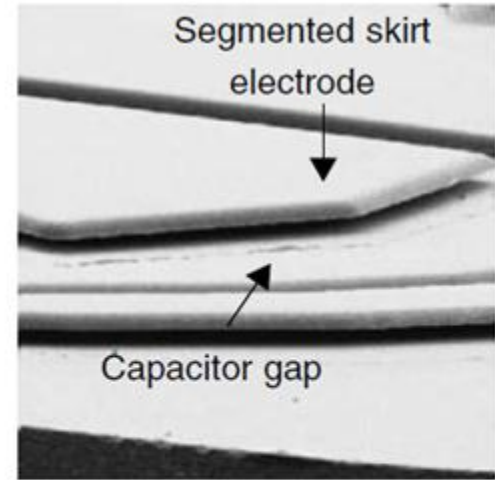
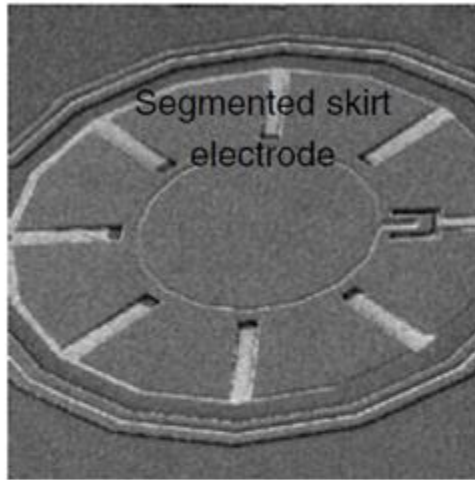
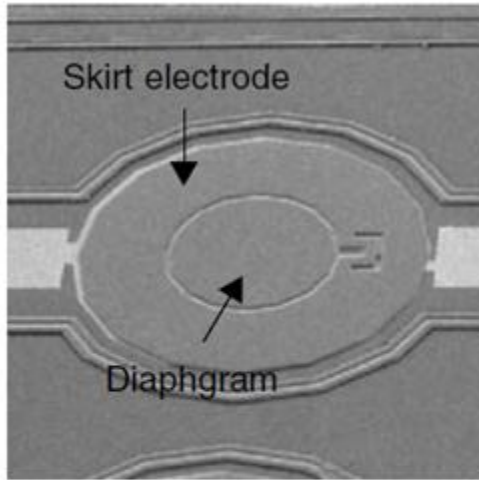


Sensor de Pressão capacitivo diferencial com diafragma dupla camada e eletrodo rígido embutido.

(Reprinted with permission from Wang, C.C., Gogoi, B.P., Monk, D.J., and Mastrangelo, C.H. [2000] "Contamination Insensitive Differential Capacitive Pressure Sensors," *Proc., IEEE International Conference on Microelectromechanical Systems*, pp. 551–555.)



Atração eletrostática entre o eletrodo e a saia se opõe à deflexão devido à pressão externa.



(a) Dispositivo com eletrodo saia contínuo. (b) Dispositivo com eletrodo saia segmentado (c) Gap entre eletrodo saia e o substrato.

Transdutores Mecânicos

- **Atuadores Mecânicos**

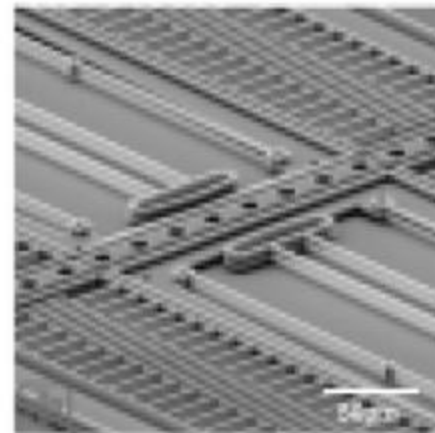
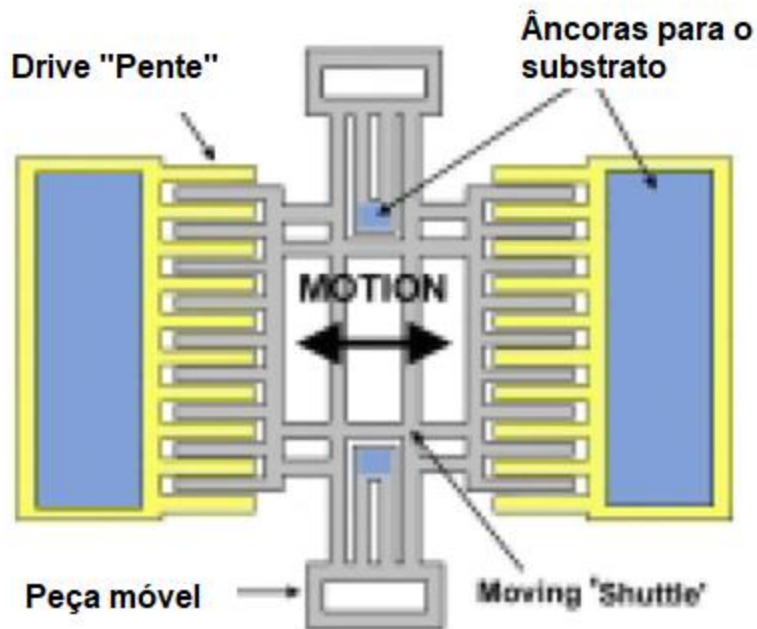
- ✓ **Atuação Eletrostática**

O princípio fundamental em atuadores eletrostáticos é a atração de duas placas carregadas com cargas opostas.


Seu uso é extensivo em dispositivos MEMs já que é relativamente simples fabricar pequenas lacunas com placas condutoras em lados opostos.

Atuadores do tipo Comb-Drive usam um grande número de hastes entrelaçadas que são ativadas aplicando uma tensão entre elas.

Como a capacitância é dependente da área, quanto maior o número de hastes, maior a força que pode ser gerada pelo atuador.




Ancorado ao substrato


Und Livre para se movimentar

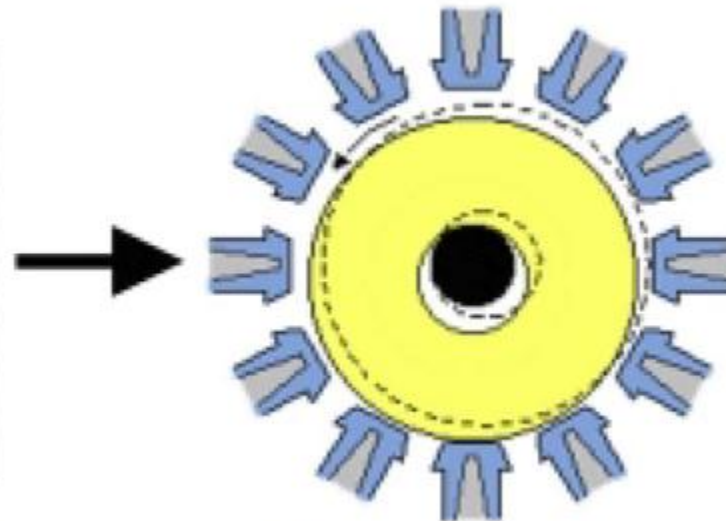
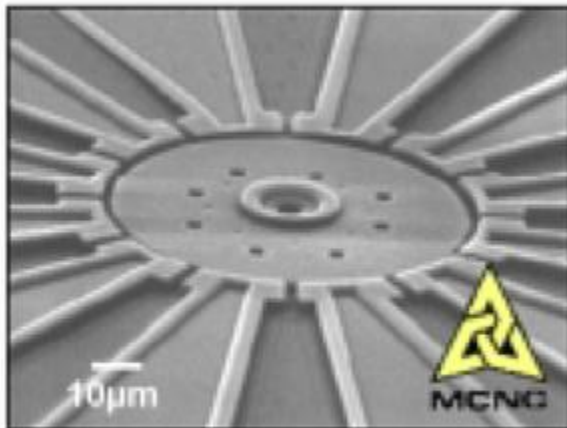
Atuador Eletrostático Comb-Drive (pente)

Transdutores Mecânicos

- Atuadores Mecânicos

- ✓ Motores rotacionais eletrostáticos

Rotor central de movimento livre circundado por placas capacitivas que podem ser acionadas em fase correta para girar o motor.



Um motor MEMS eletrostático por oscilação



Transdutores Mecânicos

- **Atuadores Mecânicos**
- ✓ **Atuadores Piezoelétricos**





Transdutores de Radiação

- **Sensores de radiação**

Sensores de luz visível, IR e UV.

l Detectam ftons que resultam em sinal eletrônico


Fotodiodos, CCD (charge-coupled devices)



Transdutores de Radiação

- **Sensores Piroelétricos**

Normalmente capacitores cuja carga pode ser alterada por mudanças na iluminação ou temperatura.





Atuadores por Radiação

- Guias de onda para roteamento de energia ótica de uma região para outra;
- Acopladores de fibra ótica;
- Microespelhos





Transdutores Térmicos

- **Sensores Térmicos**

Utilizam o fato de que todo material tem um coeficiente de expansão térmica. Conseqüentemente, se dois materiais diferentes são montados juntos e submetidos a uma mudança de temperatura, um movimento no conjunto montado deve ocorrer. Esta é a base de sensores e atuadores bimetálicos.



Transdutores Térmicos

- **Sensores Térmorresistivos**

Utilizam o fato de que a resistividade (ρ) da maioria dos materiais muda com a temperatura.

A maioria dos materiais apresenta um aumento linear da resistência com a temperatura;

Certos materiais (carbono, cerâmicas e muitos semicondutores) apresentam diminuição da resistência com o aumento da temperatura.

Estes materiais são incorporados em MEMs para fabricação de sensores termorresistivos.



Transdutores Térmicos

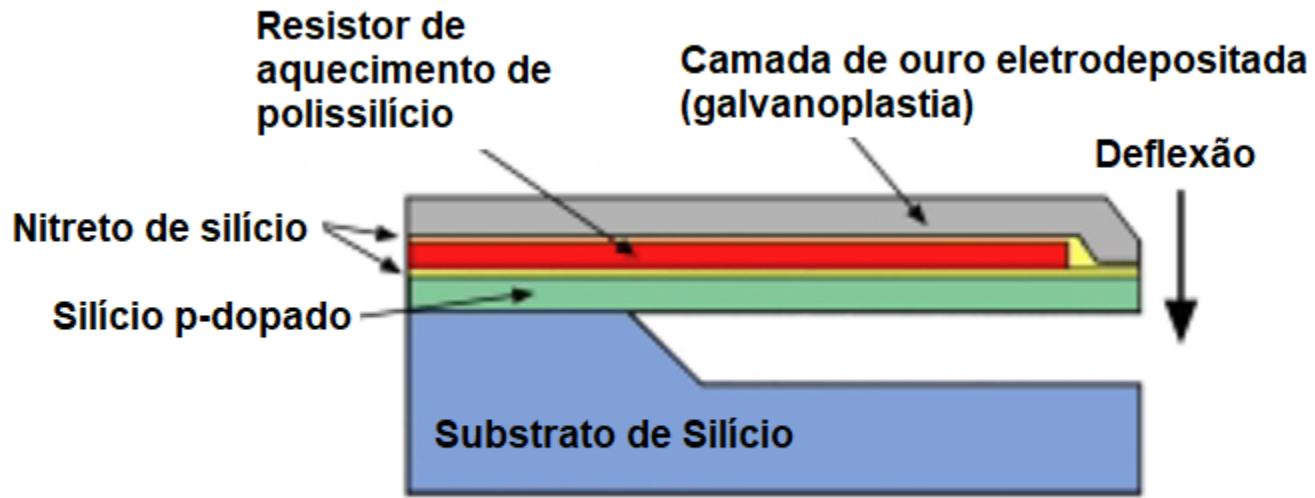
- **Termoacopladores**

Junção entre dois materiais diferentes que gera uma tensão elétrica que é função da temperatura.

Materiais semicondutores apresentam efeito termoelétrico maior que os metais.

Atuadores Térmicos

Atuadores térmicos em MEMs são normalmente implementados através de miniúsculos aquecedores ou resistores.



Atuador MEMs termal.



Transdutores Térmicos

- **Atuador com Liga de memória de forma**

Atuadores com liga de memória de forma exibem considerável mudança em seu comprimento (contração) quando aquecidas.

Ligas de titânio-níquel, as quais, uma vez mecanicamente deformadas, podem retornar ao seu estado original não-deformado quando aquecidos. Como são condutores, podem ser aquecidas pela passagem de corrente elétrica.



Transdutores Magnéticos

- **Sensores Magnéticos**

Baseados no Efeito Hall – produção de um campo elétrico através do material quando uma corrente elétrica flui pelo mesmo.

Ligas de titânio-níquel, as quais, uma vez mecanicamente deformadas, podem retornar ao seu estado original não-deformado quando aquecidos. Como são condutores, podem ser aquecidas pela passagem de corrente elétrica.



Transdutores Magnéticos

- **Atuadores Magnéticos**

Baseados no fato de que um condutor submetido a uma corrente elétrica gera um campo magnético.

Indutores difíceis de fabricar em estruturas 3D.

Transdutores Químicos e Biológicos

- **Sensores Químicos**

Dispositivos que interagem com sólidos, líquidos e gases de todos os tipos. Dependem de abertura nos dispositivos para interagir com os materiais.

Resistores_químicos: Medem a resistência de uma camada quimicamente sensível entre dois contatos elétricos. A sensibilidade pode ser aumentada usando eletrodos microusinados.

Capacitors_químicos: São similares a resistores químicos mas medem a capacitância da camada.

Sensores Químico_mecânicos: Baseados na tradução químico-mecânica (por exemplo a expansão de um filme fino de polímero na presença de uma determinada substância química).

Transdutores Químicos e Biológicos

- **Biossensores**

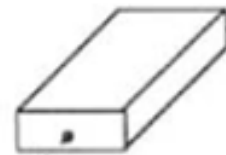
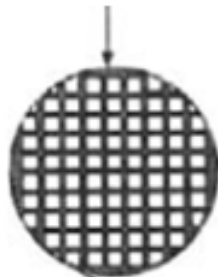
Dispositivos que utilizam uma reação bioquímica para determinar um composto específico.

Geralmente é um transdutor combinado com uma enzima ou célula para monitorar uma mudança específica no microambiente.

Arranjo de sensores microusinados

Ótica de expansão do feixe

Diodo Laser



Camera



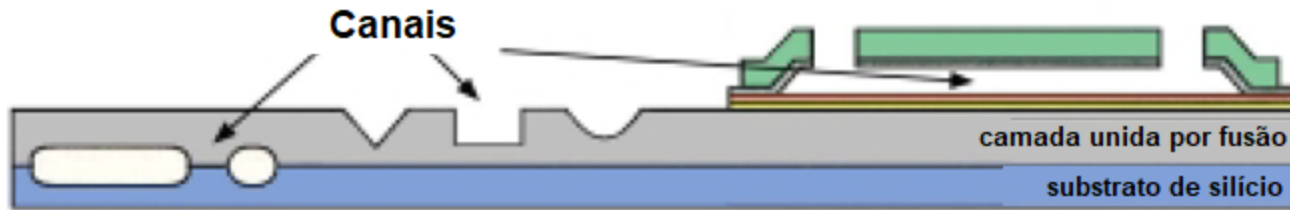
Image display

Escuro = Baixa Pressão
Claro = Alta Pressão

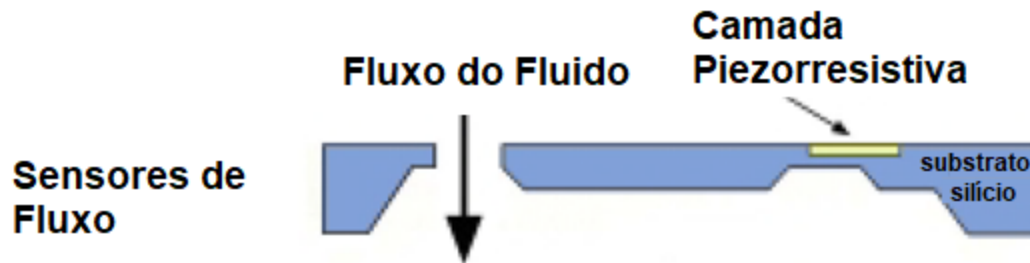
Medida ótica de pressão na superfície de uma asa usando dispositivos microusinados de interferometria.

Dispositivos Microfluidicos

Canais de fluxo



Canais MEMs para aplicações de microfluidos



Sensor de fluxo mecânico microusinado



Válvulas

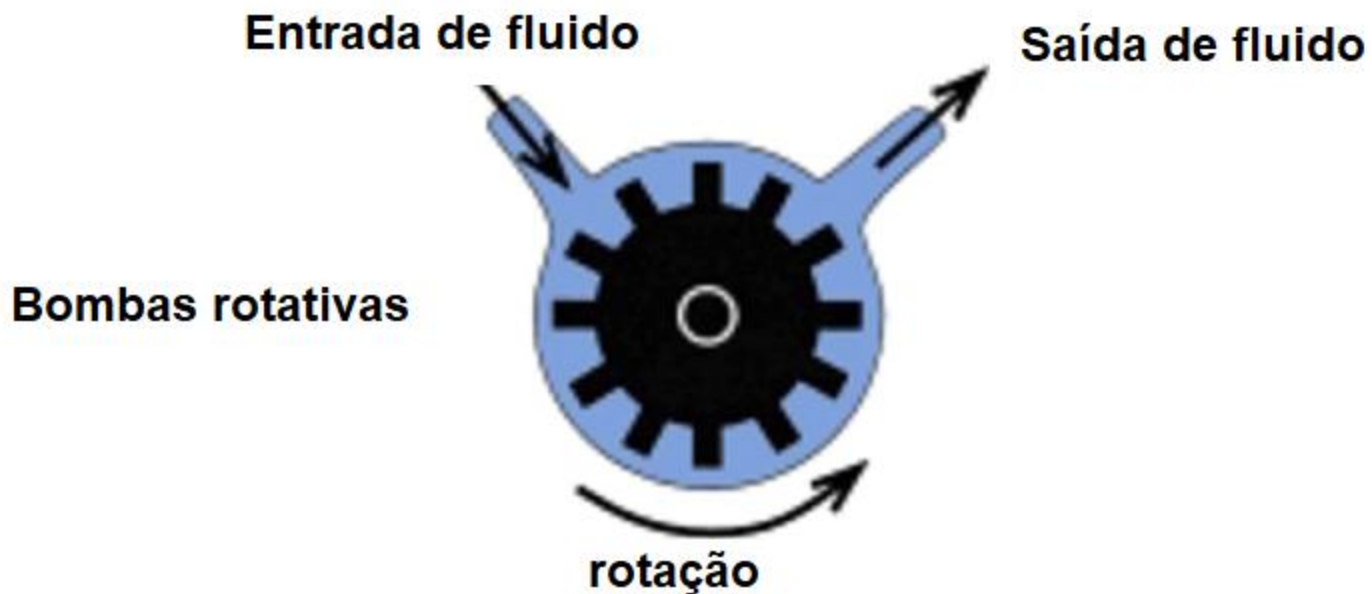
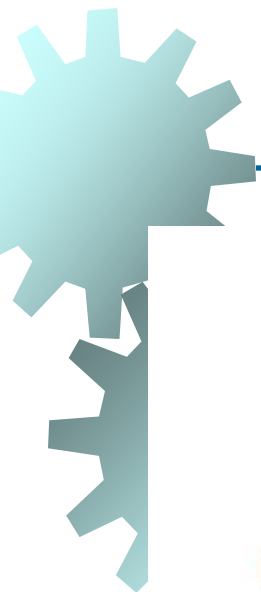


Pressão nesta direção fecha a válvula

Pressão nesta direção abre a válvula



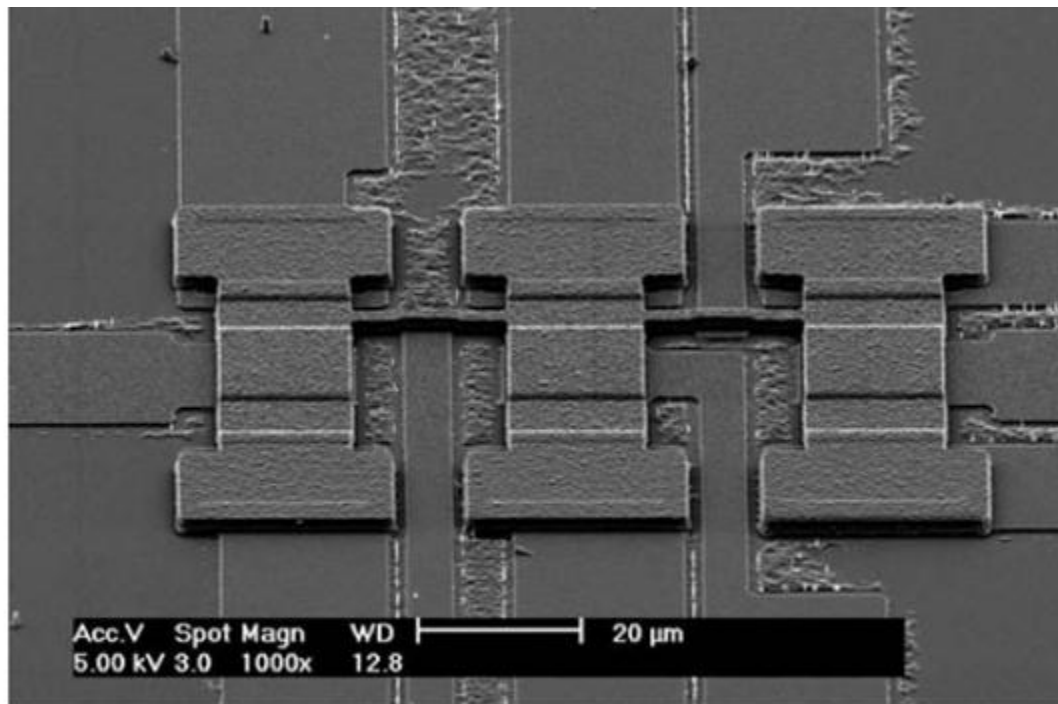
Conceito básico de válvula passiva de silício



Conceito básico de microbomba rotativa magnética.

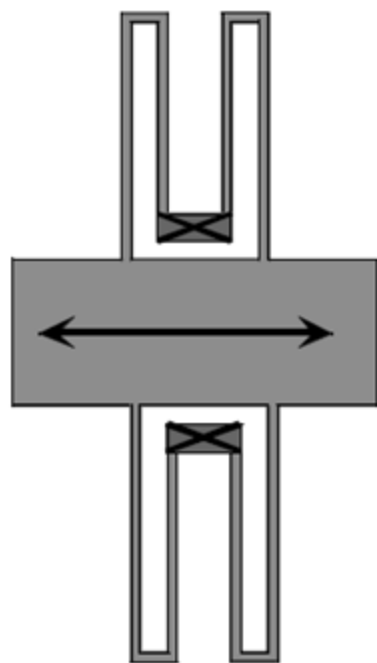


Surface Micromachined Devices

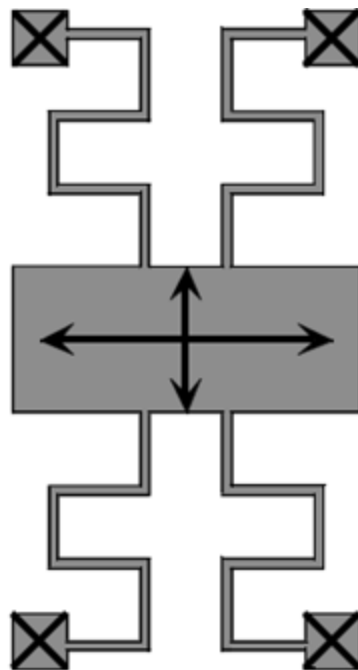


(Photograph courtesy of M. Abdelmoneum, University of Michigan.)

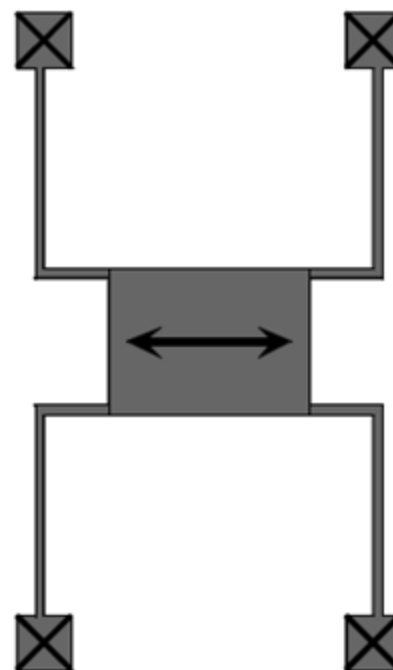
Filtro micromecânico baseado em vigas fixas.



dobrada



sinuosa



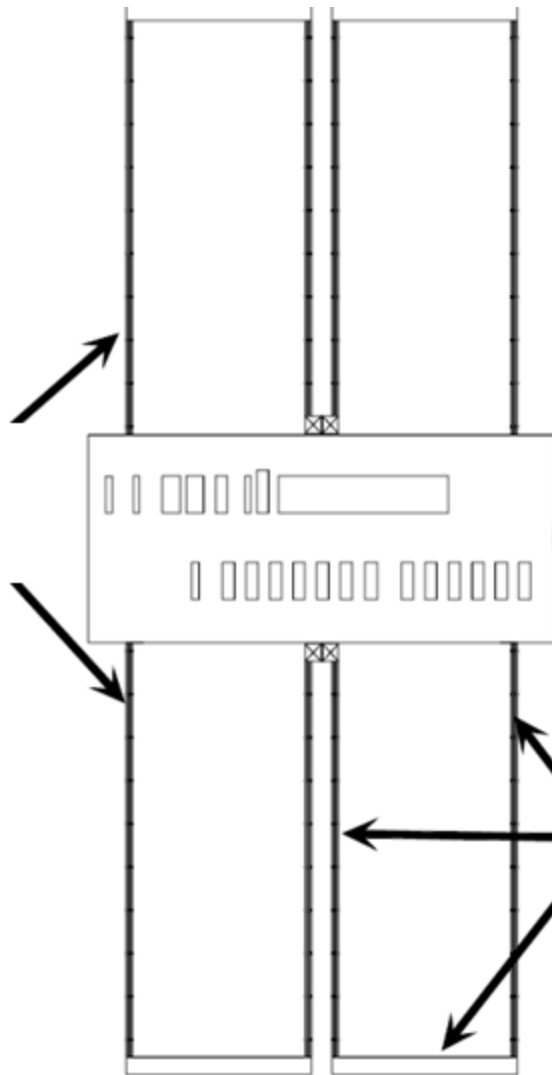
**perna de
carangueijo**

Três dispositivos flexíveis.



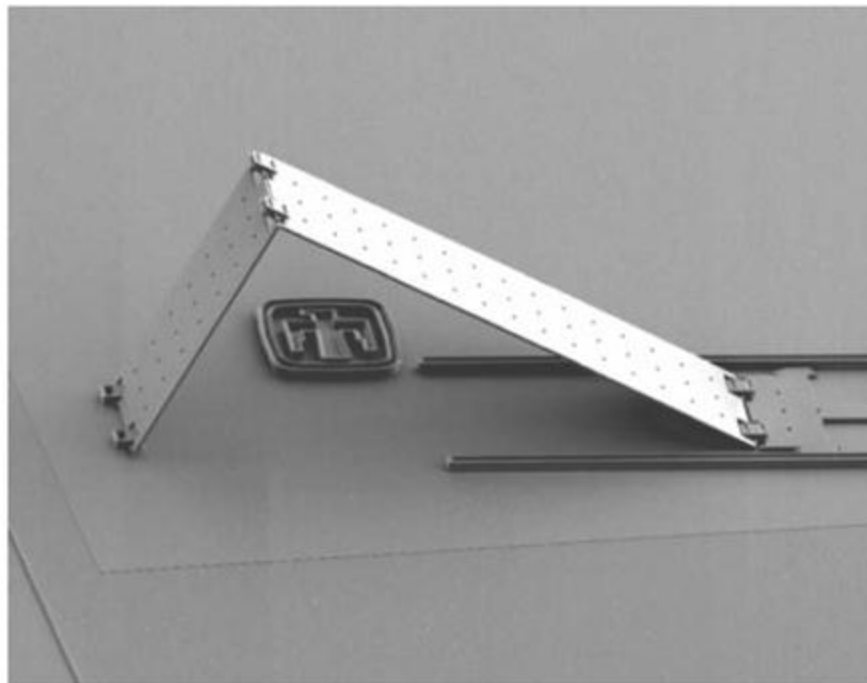


Molas em paralelo



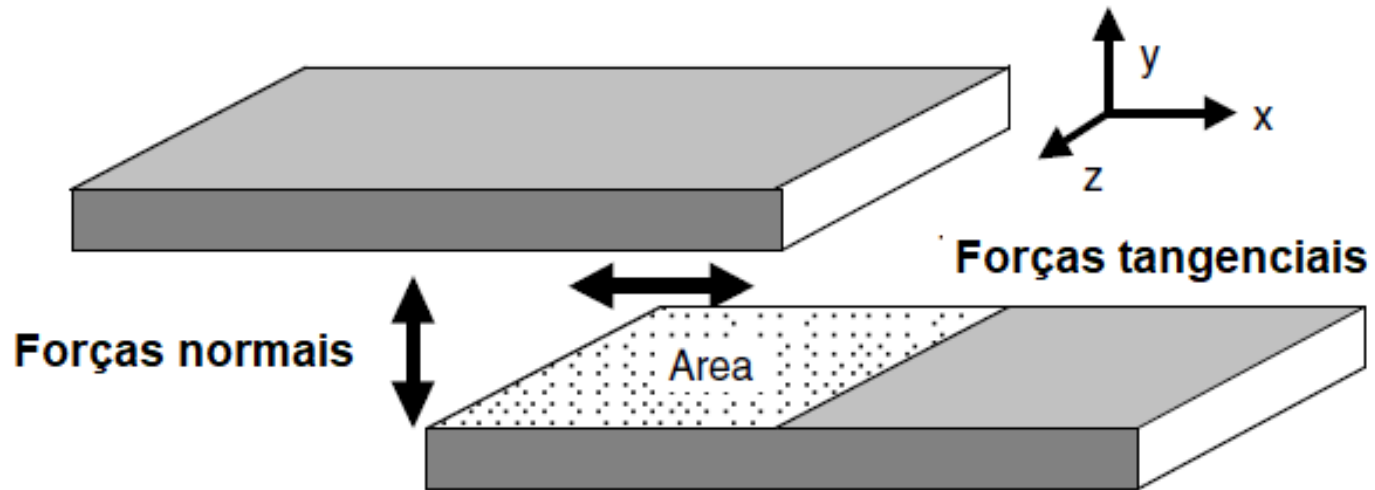
Molas em série

Mecanismo de oscilação suportado por molas

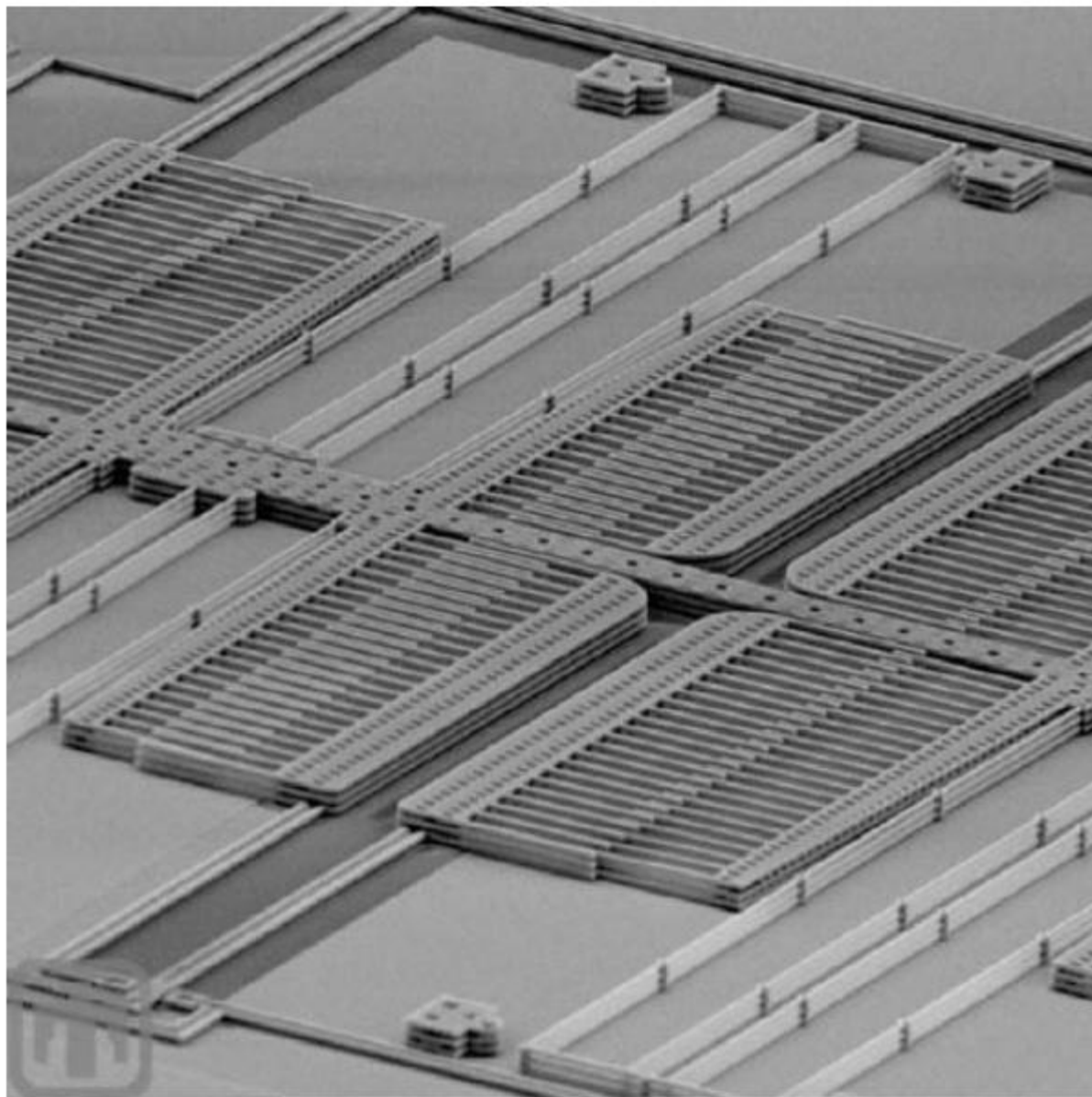


Microespelho articulado de polissilício

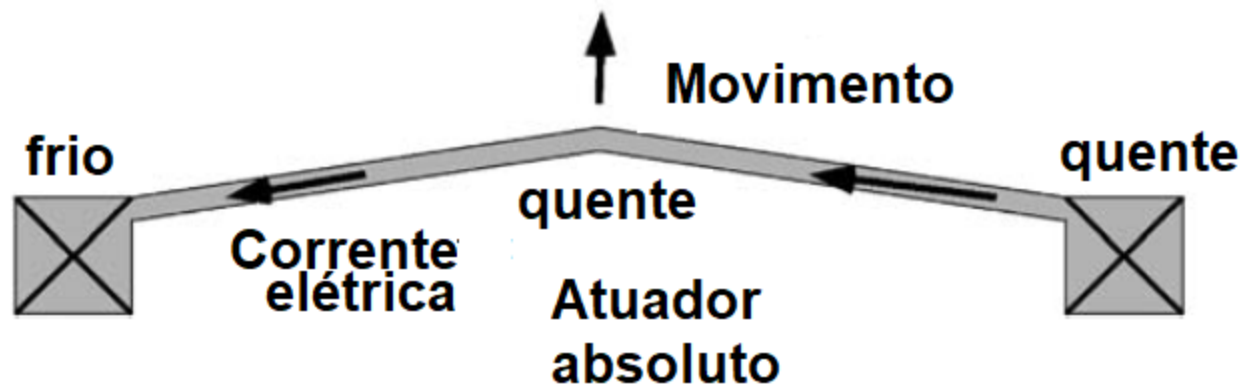
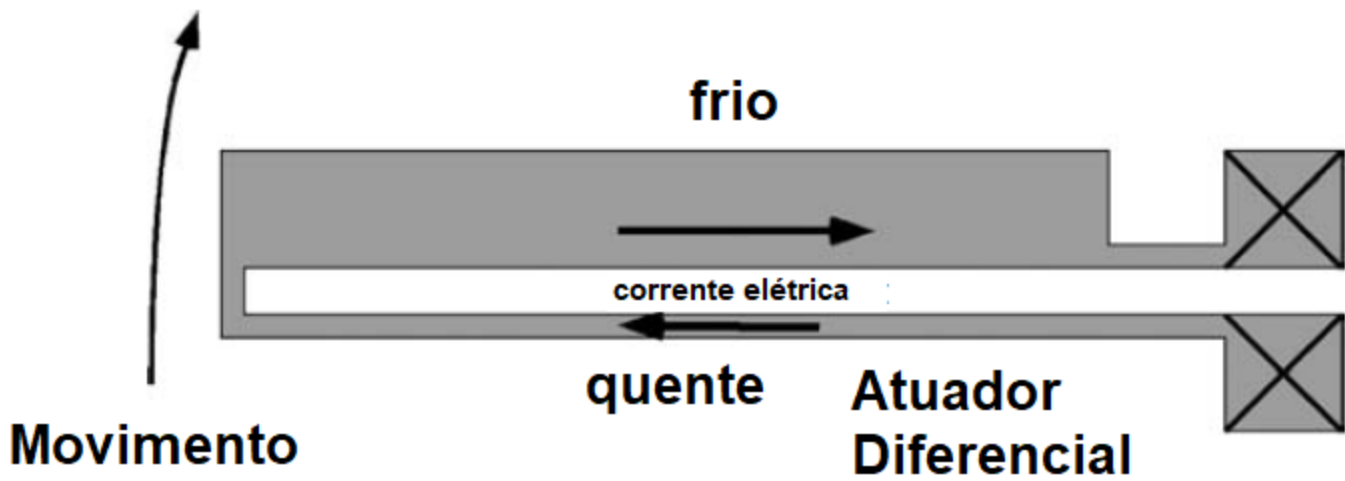
(Photograph courtesy of Sandia National Laboratories.)



Forças normais e tangenciais em um atuador eletrostático

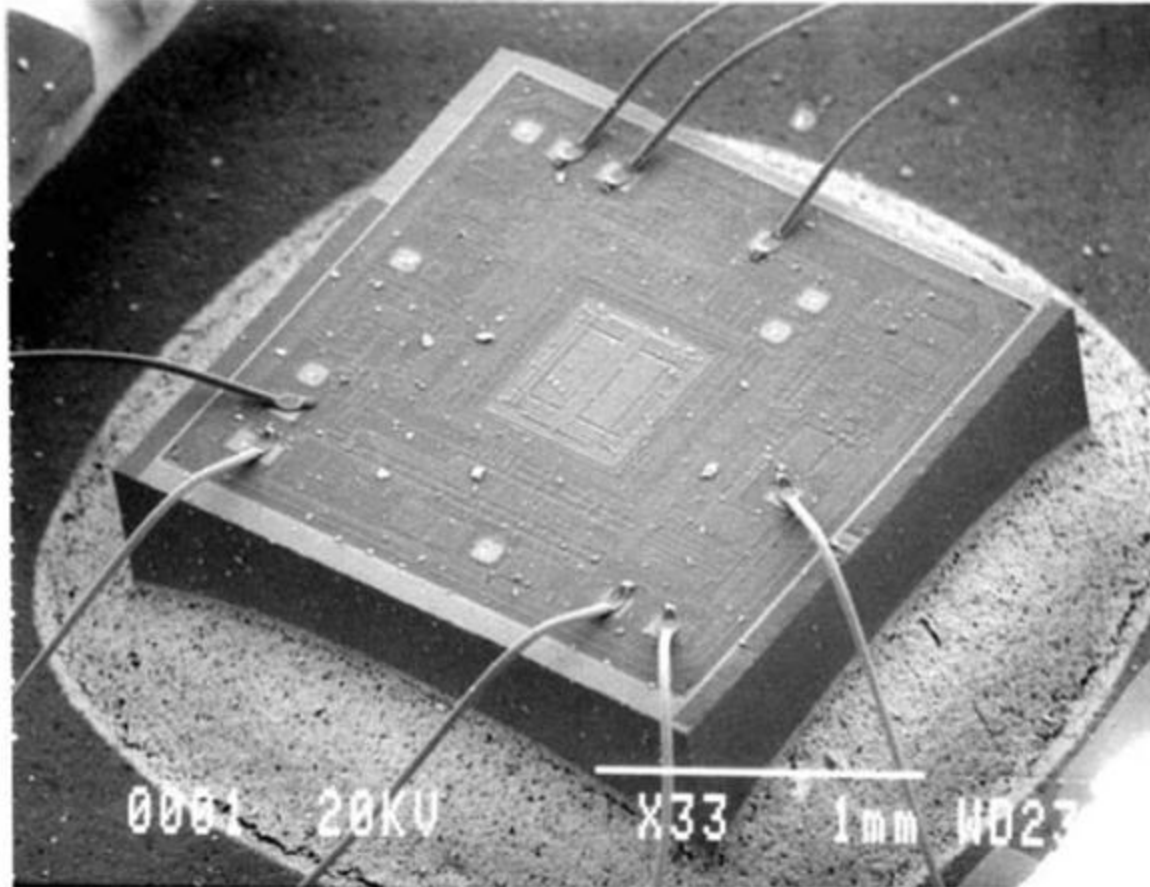


Atuador Comb-drive (pente)



Atuadores Absolutos e Diferenciais.

Encapsulamento (Packing)

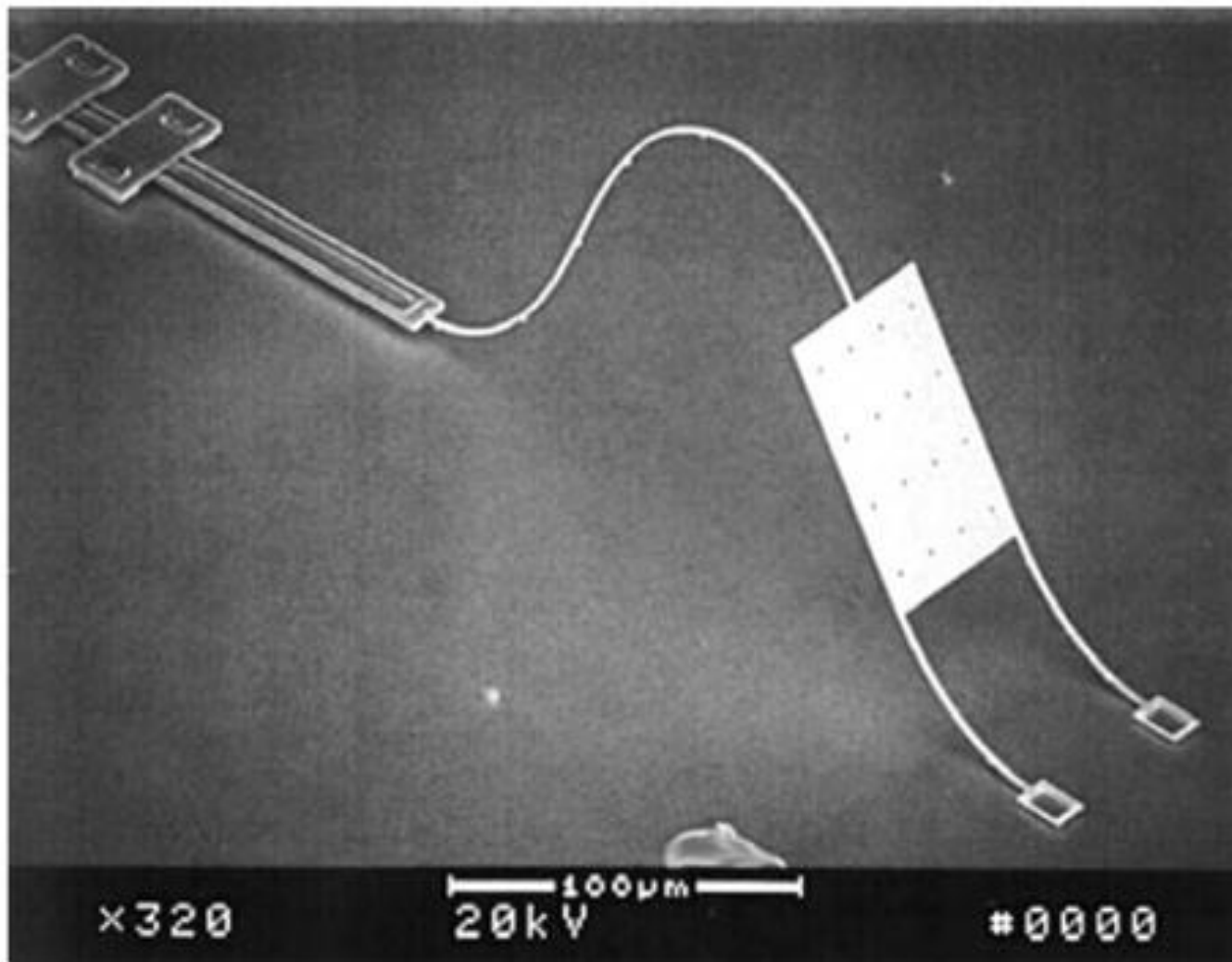


Acelerômetro com tampa de encapsulamento removida.

(Photograph courtesy of Jon Custer of Sandia National Laboratories.)

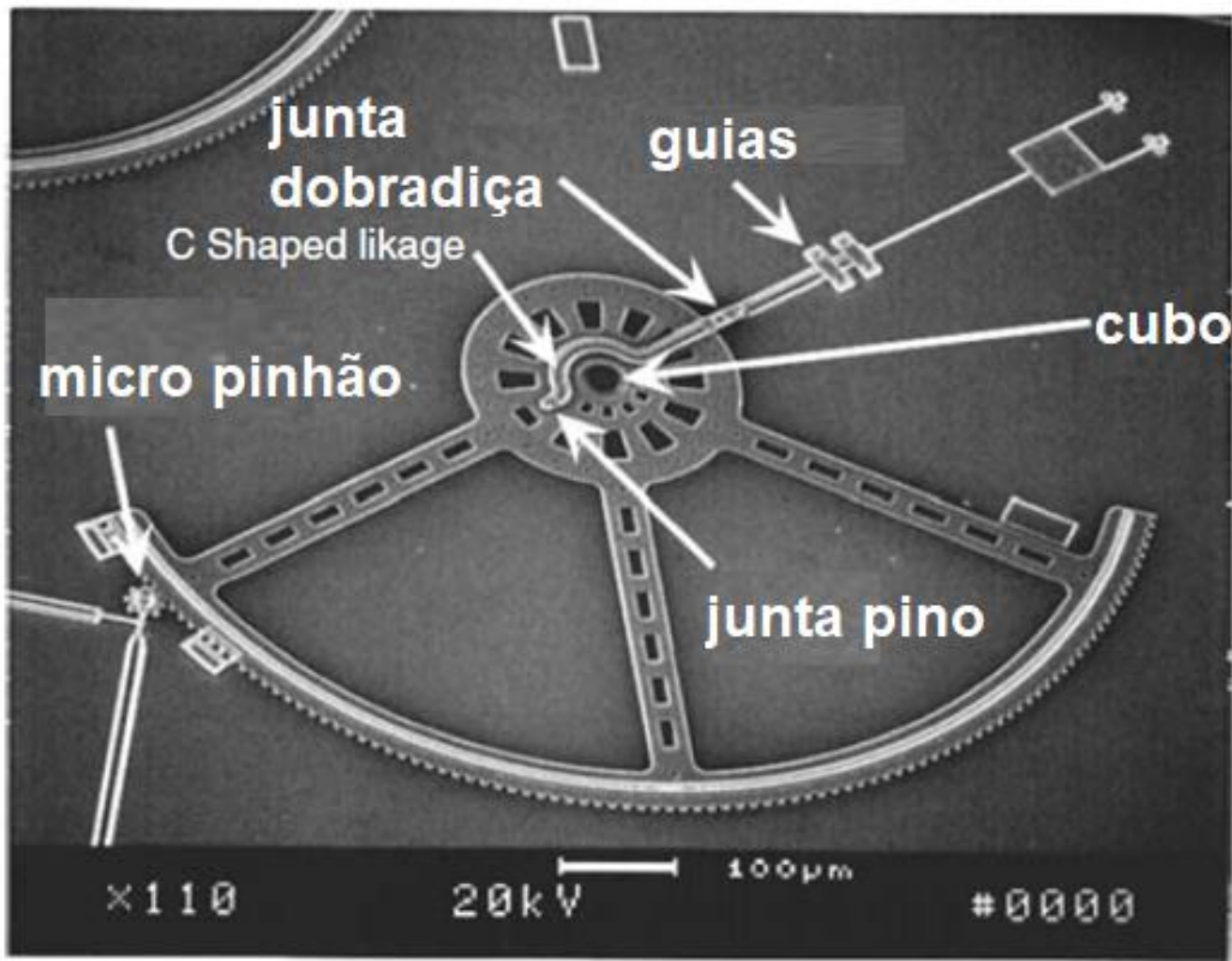


Superfície microusinada encapsulada por peça de vidro. Comb-drives (pente) podem ser vistos no lado direito.

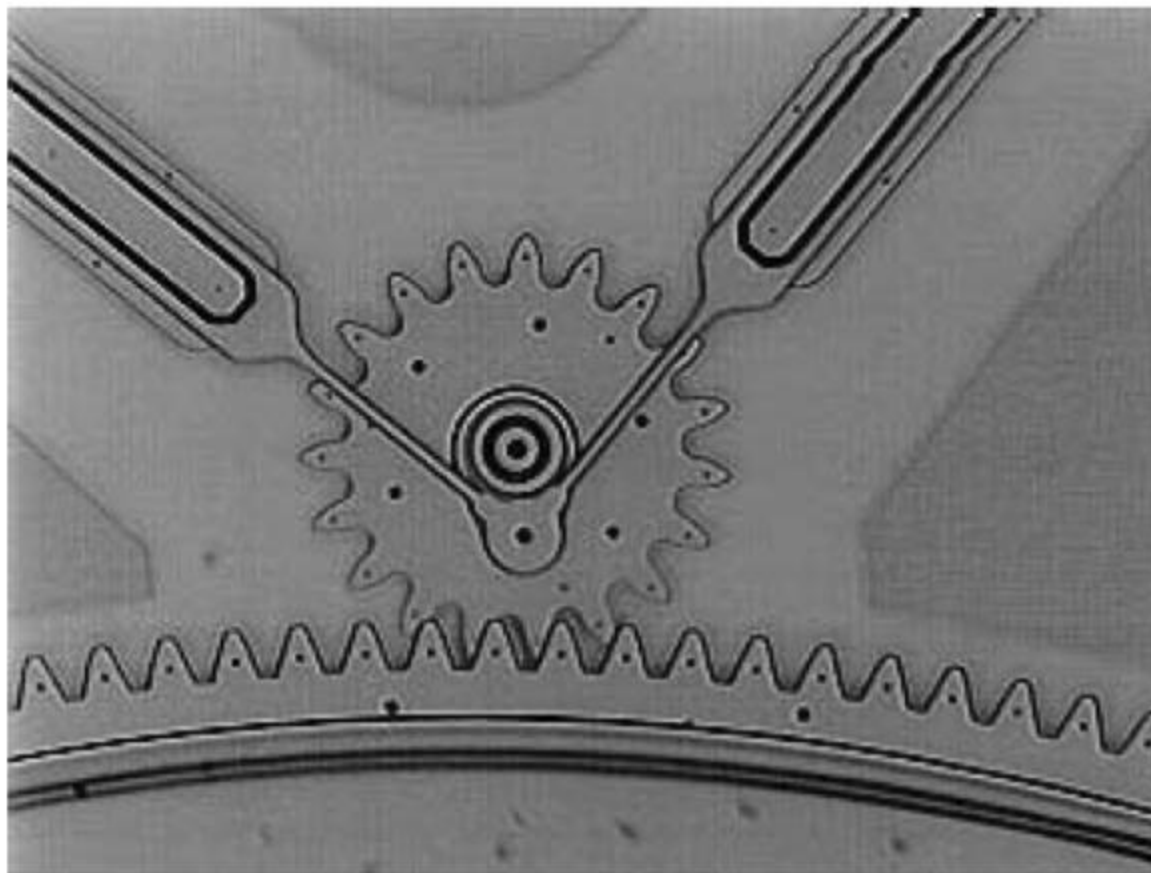


Espelho flexível que atua por flambagem.

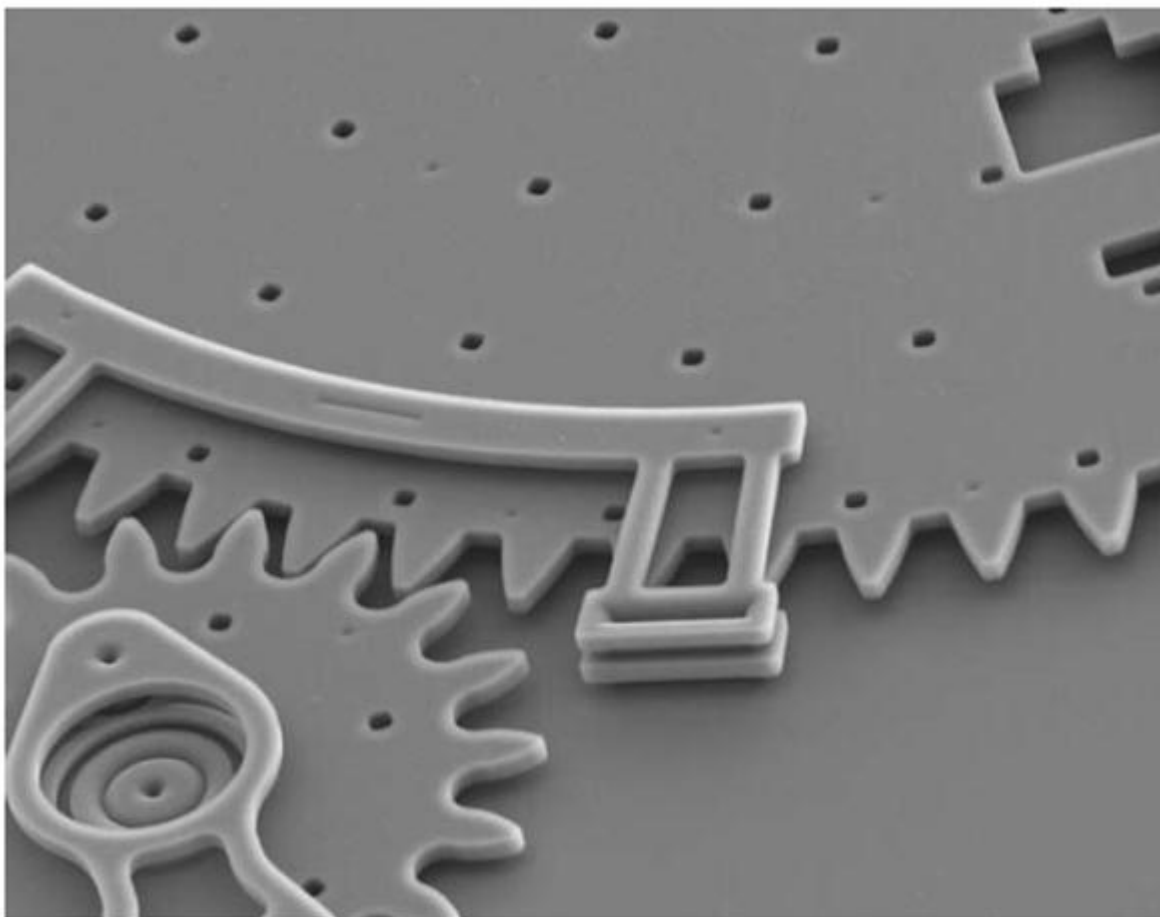
(Photograph courtesy of E.J. Garcia of Sandia National Laboratories.) A further description of this device can be found in Garcia, E.J. (1998) "Micro-Flex Mirror and Instability Actuation Technique," in *Proc. 1998 IEEE Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '98)*, pp. 470–474.



Um espelho flexível em seu estado inicial e uma grande engrenagem com raios.
A engrenagem atua como dispositivo de transmissão.



Pinhão.



Clip sobre a engrenagem (para limitar o deslocamento vertical)