

**Materiais para fabricação de  
microestruturas em superfície:  
Camadas estruturais e sacrificiais  
Exemplos de aplicações**

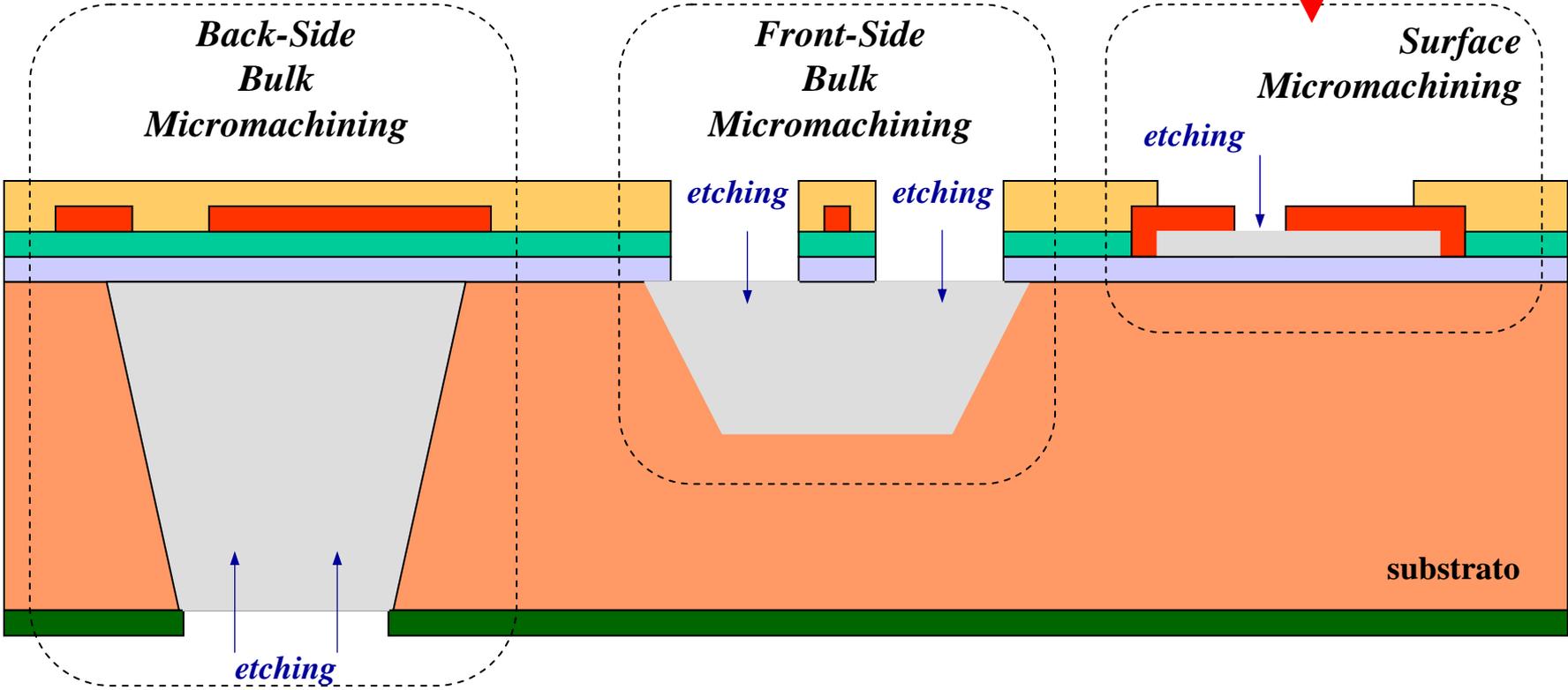
# CONTEÚDO

- Introdução
- Características Fabricação em superfície
- Tecnologia de camada sacrificial
- sensores capacitivos
- Atuadores eletrostáticos
- Utilização de processos CMOS

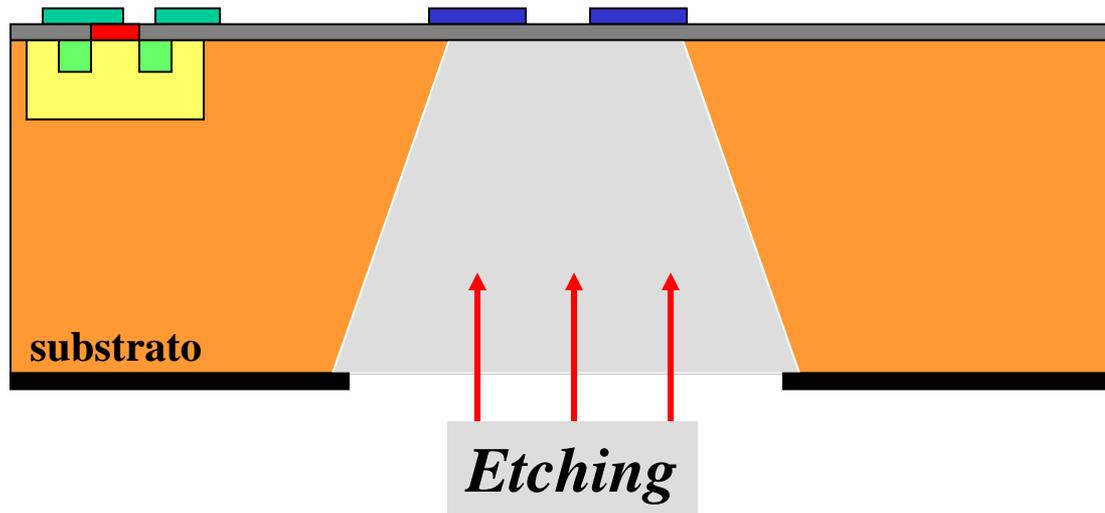
# Bibliografia Básica

- Fundamentals of microfabrication, Marc Madou, CRC Press, 1997
- Sensor technology and devices, editado por Ljubisa Ristic, Artech House, 1994
- Semiconductor sensors, editado por S. M Sze, J. Wiley 1994
- Microsensors: principles and applications, editado por J. W. Gardner, J. Wiley, 1994
- Website CCS-Unicamp - 2005

**Fabricação de superfície**

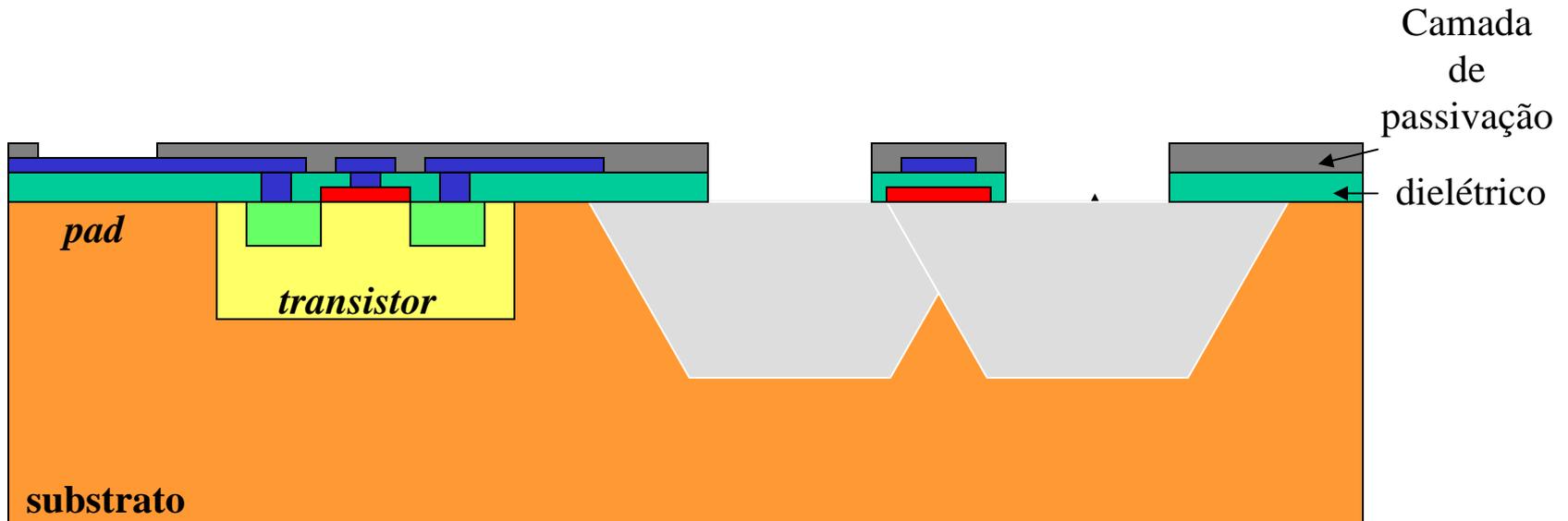


# *Back-Side Bulk Micromachining (Microfabricação em substrato)*



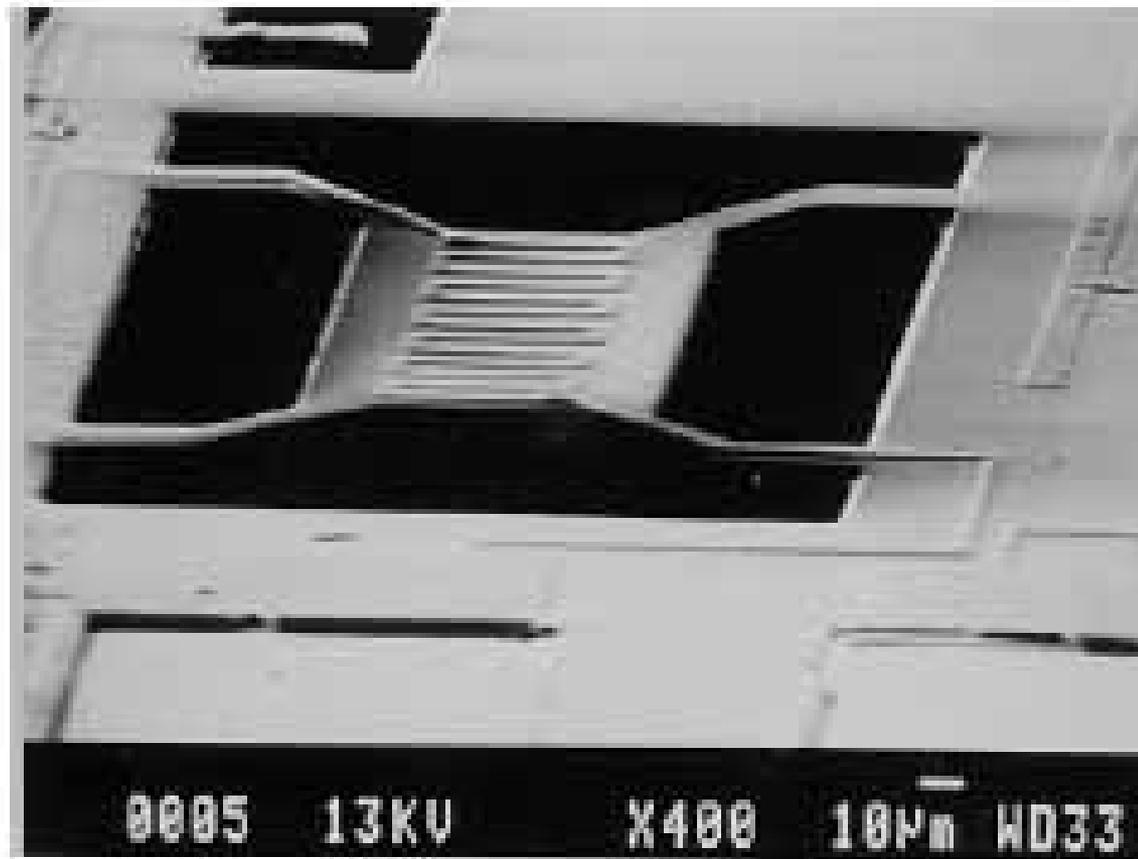
# *Front-Side Bulk Micromachining*

## **Associação com processos convencionais de microeletrônica**

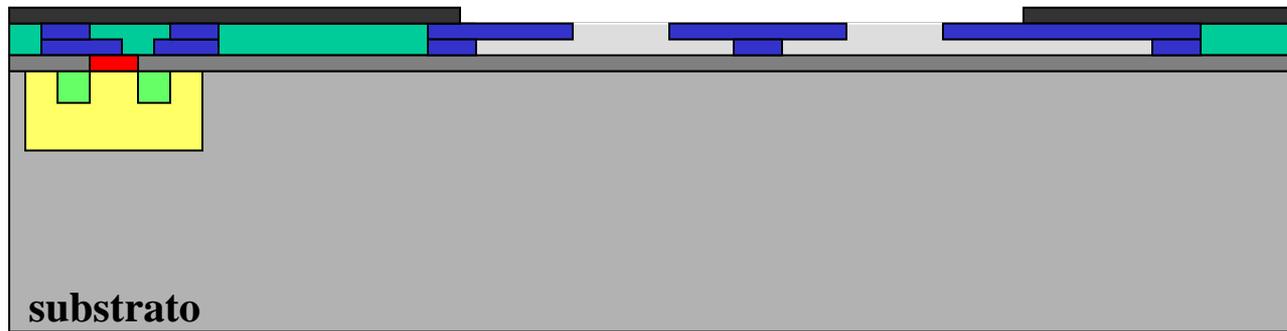


# *Front-Side Bulk Micromachining*

**Associação com processos convencionais  
de microeletrônica**



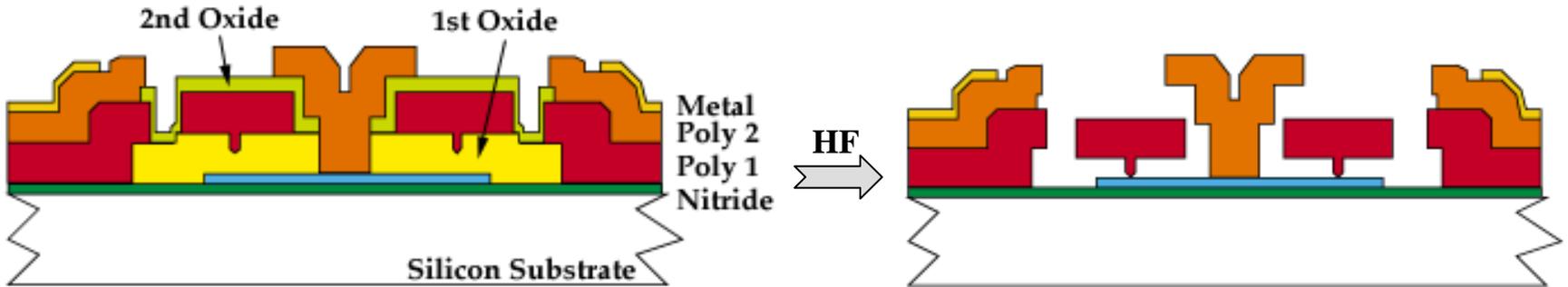
# *Surface Micromachining*



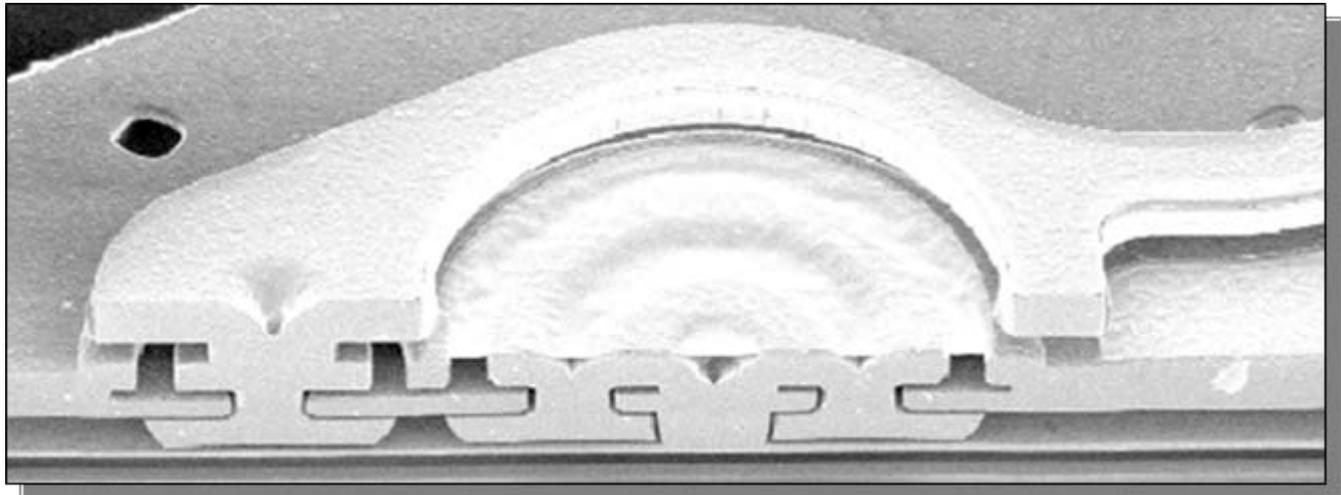
- corrosão lateral com ataque seletivo (uso de camada sacrificial)
- estruturas largas e pouco espessas
- maior flexibilidade para a construção de estruturas mecânicas
- problema de colagem com ataque úmido (capilaridade)

# Surface Micromachining ...

- **Processo MUMP (MCNC) :**



- **Processo SUMMiT (Sandia) :**

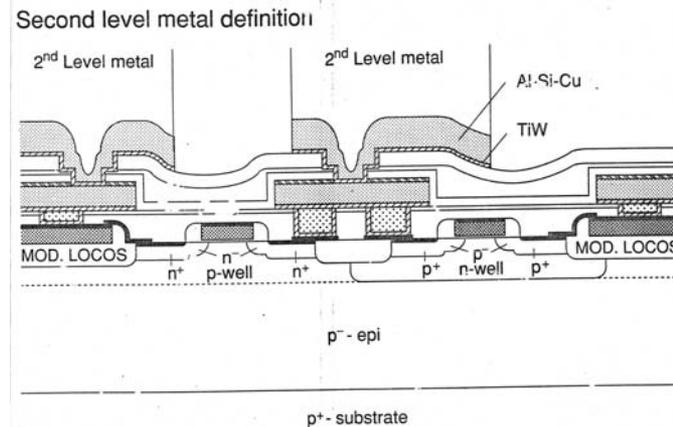
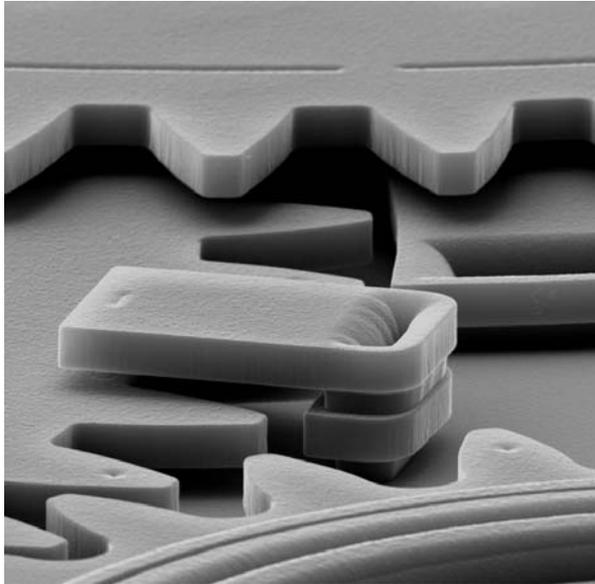


# Características da fabricação em superfície

- Estruturas micrométricas ou submicrométricas
- Estruturas complexas: integração de várias camadas de filmes finos
- Características dos filmes finos dependem fortemente das condições específicas de deposição e de tratamento térmico
- Estruturas flutuantes e partes móveis podem ser integradas utilizando-se a “Tecnologia de camada sacrificial”
- Possibilidade de integração com circuitos eletrônicos



# Materials estruturais



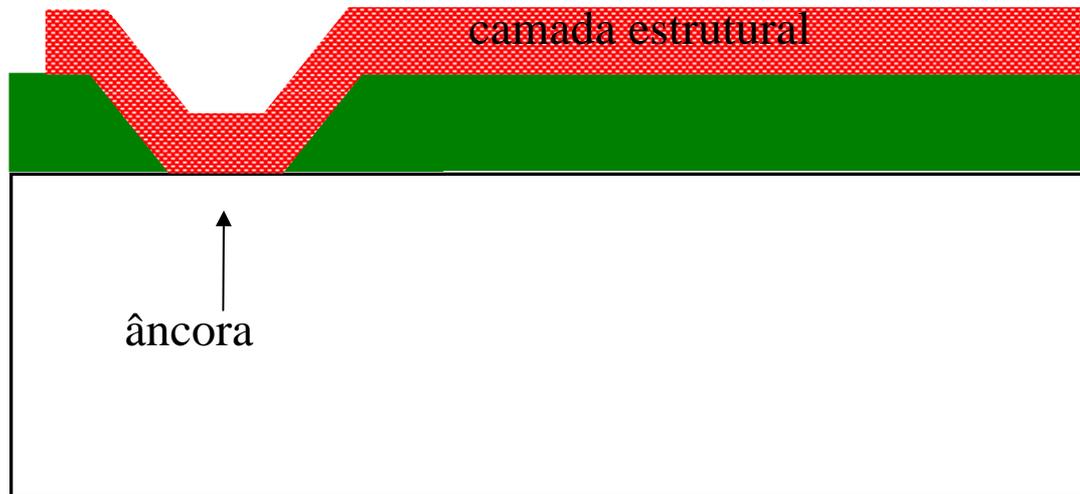
# Camada sacrificial

- a) Formação da camada sacrificial



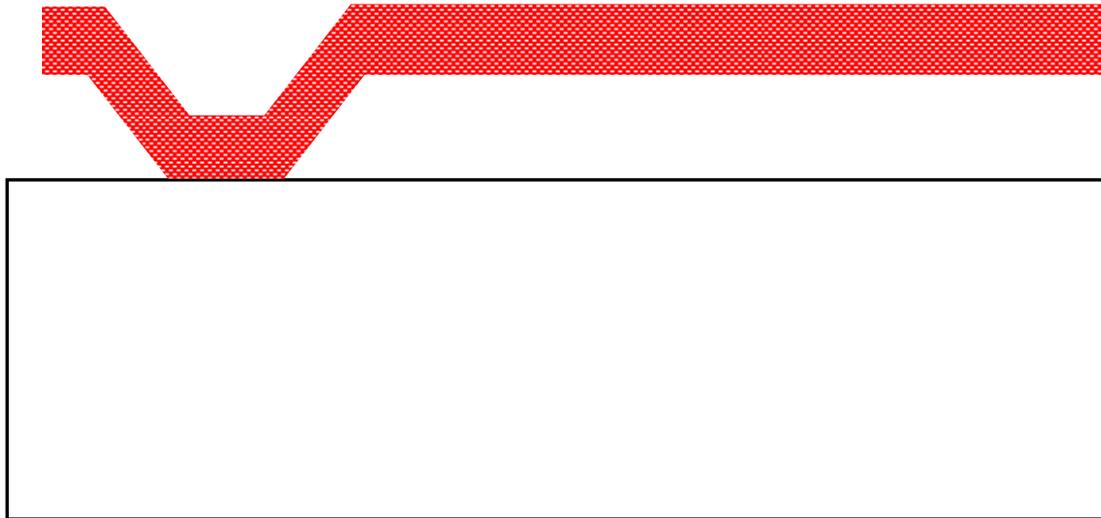
# Camada sacrificial

## b) Formação da camada estrutural



# Camada sacrificial

c) Remoção da camada sacrificial



# Materiais mais utilizados para a fabricação de microestruturas em superfície

- Silício Policristalino
- Óxido de Silício
- Nitreto de Silício

# Silício Policristalino e Amorfo

- Filmes finos de silício podem ser crescidos ou depositados sobre os mais variados tipos de substrato (condutor, isolante ou semicondutor).
- A estrutura dos filmes de silício podem ser desde monocristalinos, passando pelo policristalino, até completamente amorfo; dependendo da cinética do processo de obtenção do mesmo.

- O silício amorfo é utilizado na fabricação de TFTs para LCDs.
- O silício policristalino é utilizado principalmente como material de porta de transistores MOS na fabricação de circuitos integrados.
- O filme fino de silício policristalino tem características similares ao silício principalmente do ponto de vista elétrico.
- O silício policristalino pode ser obtido através dos seguintes métodos:

- Métodos físicos - Sputtering ou evaporação
  - Apresentam propriedades mecânicas pobres e, em geral, são amorfos quando depositados e necessitam de um tratamento térmico para se tornar policristalino.
- Métodos químicos - APCVD, LPCVD, PECVD.
  - Apresentam melhores propriedades mecânicas, em geral, são policristalinos quando depositados. Podem ser dopados “in situ”.

# Óxido de Silício

- O óxido de silício *CVD* tem uma estrutura amorfa. Estes filmes devem apresentar as seguintes características:
  - alta uniformidade em espessura;
  - baixa contaminação por particulados;
  - boa adesão ao substrato;
  - baixo estresse;
  - alta tensão de ruptura dielétrica;
  - baixa constante dielétrica;
  - bom índice de cobertura de degrau.

- O índice de cobertura de degrau é definido como sendo a razão entre a espessura do filme depositado na parede vertical e a espessura do filme depositado na horizontal em uma estrutura de linhas.
- Dependendo das condições de deposição, o  $SiO_2$  pode ter baixa densidade e uma estequiometria ligeiramente diferente do óxido crescido termicamente, causando mudanças nas propriedades químicas e físicas como o índice de refração, taxa de corrosão, estresse e constante dielétrica.

# Propriedades dos óxidos depositados

**Tabela :** Propriedades do óxido de silício depositado<sup>[25]</sup>

Reação de Deposição	$SiH_4 + O_2$	$SiH_4 + O_2$	TEOS	$SiCl_2H_2 + N_2O$
Tipo de Reator	PECVD	APCVD ou LPCVD	LPCVD	LPCVD
Temperatura (°C)	200	450	700	900
Composição	$SiO_{1,9}(H)$	$SiO_2(H)$	$SiO_2$	$SiO_2(Cl)$
Índice de cobertura de degrau	não conforme	não conforme	conforme	conforme
Densidade ( $g/cm^3$ )	2,3	2,1	2,2	2,2
Índice de Refração	1,47	1,44	1,46	1,46
Estresse ( $10^9 \text{ dyn/cm}^2$ )	3C - 3T	3T	1C	3C
Ruptura dielétrica ( $10^6 \text{ V/cm}$ )	3 - 6	8	10	10
Taxa de corrosão ( $\text{Å/min}$ ) (100:1/ $H_2O$ :HF)	400	60	30	30

# Composição Química

- Os filmes de  $SiO_2$  depositados a baixa temperatura (400 - 500 C), normalmente contém hidrogênio associado com cadeias de óxido-silício como  $Si-OH$ ,  $Si-H$  ou água ( $H_2O$ ). A concentração de  $Si-OH$  encontrado tipicamente é de 1 a 4 wt.% e menos de 0,5 wt.% de  $Si-H$ .<sup>[25]</sup> O hidrogênio pode ser observado por espectroscopia de infravermelho.
- A concentração de água no filme, que depende da temperatura de deposição, cresce com a exposição aos vapores de água da atmosfera. Óxidos de silício depositados a 700 C pela decomposição do Tetraetilortosilicato ( $TEOS$ ), ou a 900 C pela reação do óxido nítrico e a diclorosilana, não contém hidrogênio detectável por absorção infravermelho.

# Taxa de Deposição

- A taxa de deposição de  $SiO_2$  pela reação de  $SiH_4$  com  $O_2$  cresce com o aumento da temperatura entre 310 a 450 °C. A uma temperatura constante, a taxa de deposição pode aumentar com o aumento da razão  $O_2:SiH_4$ . O aumento contínuo da razão, eventualmente resulta em um decréscimo na taxa de deposição, como um resultado da adsorção do  $O_2$  pelo substrato, inibindo assim a decomposição de  $SiH_4$ .<sup>[24]</sup>
- Os filmes depositados num reator *LPCVD* pela decomposição de *TEOS* apresenta um aumento exponencial na taxa de deposição com a temperatura variando de 650 a 800 °C. A taxa de deposição depende também da pressão parcial de *TEOS* com uma relação linear a baixas pressões.

# Taxa de Corrosão

- A taxa de corrosão de  $SiO_2$ , em reatores a plasma (corrosão seca), depende de vários fatores de processo como a pressão, potência e de características do filme.
- O  $SiO_2$  CVD depositado a baixa temperatura normalmente corroe muito mais rapidamente que o  $SiO_2$  crescido termicamente. Essa diferença depende de muitos fatores como as condições de deposição, a concentração de impurezas e as condições do recozimento.
- A presença de dopantes no óxido pode afetar fortemente a taxa de corrosão. A alta concentração de boro resulta na redução da taxa de corrosão, enquanto a alta concentração de fósforo aumenta rapidamente a taxa de corrosão.

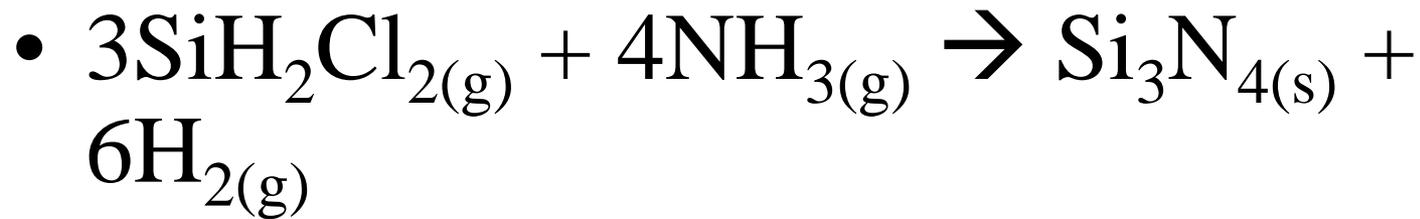
# Estresse

- Devido ao método pelo qual os filmes são produzidos, praticamente todos eles estão sob um estado de estresse, que pode ser de compressão ou tensão.
- Os filmes estressados compressivamente podem expandir paralelamente à superfície do substrato e nos extremos ocorrer uma torção. Filmes estressados por tensão podem contrair-se paralelamente ao substrato e quebrar, se seu limite de elasticidade for excedido.<sup>[24,26]</sup>
- Filmes altamente estressados são em geral indesejáveis para aplicações em *VLSI* por vários motivos como:
  - baixa adesão ao substrato;
  - aumento da taxa de corrosão;

# Nitreto de Silício

- Filmes finos de nitreto de silício são comumente utilizados como máscara, como barreira de difusão de contaminantes (para processos em alta temperatura) e camada de passivação.
- O nitreto de silício pode ser estequiométrico ou não, possui uma estrutura amorfo, é resistente a soluções de HF e KOH e é um excelente isolante térmico quando comparado ao silício policristalino.

- A resistividade é maior que  $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ .
- O nitreto de silício pode ser obtido por sputtering, PECVD ou LPCVD. Por LPCVD o filme de nitreto apresenta maior qualidade.



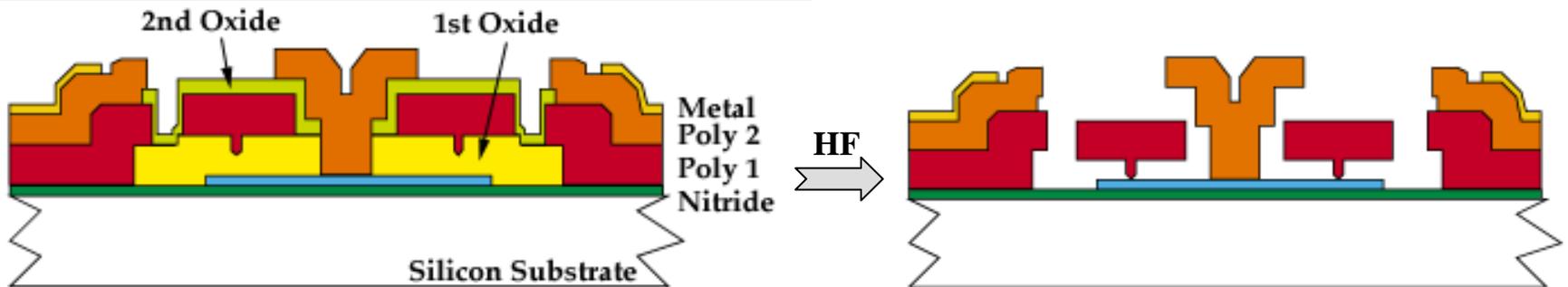
# Composição de camadas

Camada Estrutural		Camada Sacrificial	
Material	Espessura Típica ( $\mu\text{m}$ )	Material	Espessura Típica ( $\mu\text{m}$ )
Si policristalino	1 - 4	PSG, SiO <sub>2</sub>	1 - 7
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,2 - 2	PSG, SiO <sub>2</sub>	2
SiO <sub>2</sub>	1 - 3	Si-Poli	1 - 3
Polimida	10	Al	1,5 - 3
W	2,5 - 4	SiO <sub>2</sub>	8
Mo	0,5	Al	0,7
SiC	1,5	SiO <sub>2</sub>	1,5
TiNi	8	Polimida ou Au	3 ou 2
NiFe	2,5	Al ou Cu	7
Si-poli/ZnO	2 / 0,95	PSG	0,6
Si-Poli/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si-Poli	1 / 0,2 / 1	PSG	2

# Processo típico

## MEMS Multiusuário (MUMPs)

Centro de Microeletrônica da Carolina do Norte



# Processo

- Camada de isolamento: nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )
- Camada sacrificial: PSG - óxido de silício dopado com fósforo
  - taxa de corrosão vertical e horizontal em HF maior que a do  $\text{SiO}_2$  não dopado.
  - necessários processos com alta taxa de deposição.

# Processo

- Camada estrutural: silício policristalino
  - dopado in situ ou a posteriori
  - tratamento térmico em alta temperatura, para minimização de estresse ( $T > 1000$  °C)
- Camada condutora/refletora: alumínio
  - Mínima dimensão:  $3 \mu\text{m}$

# Processo

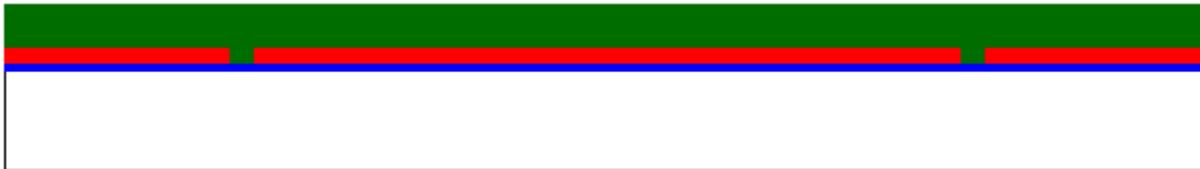
1) Camada de isolação elétrica (0,1  $\mu\text{m}$ )



2) Camada estrutural nível “0” (0,5  $\mu\text{m}$ )

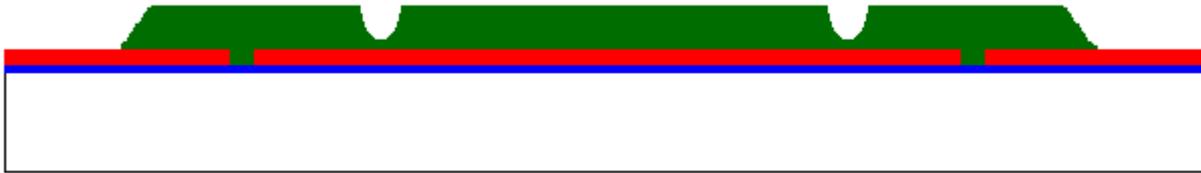


3) Primeira camada sacrificial (2  $\mu\text{m}$ )

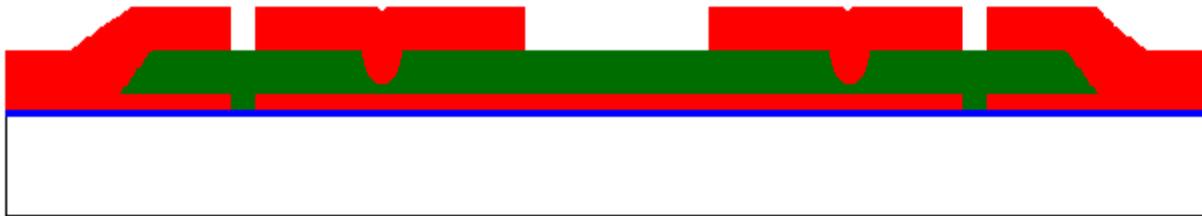


# Processo

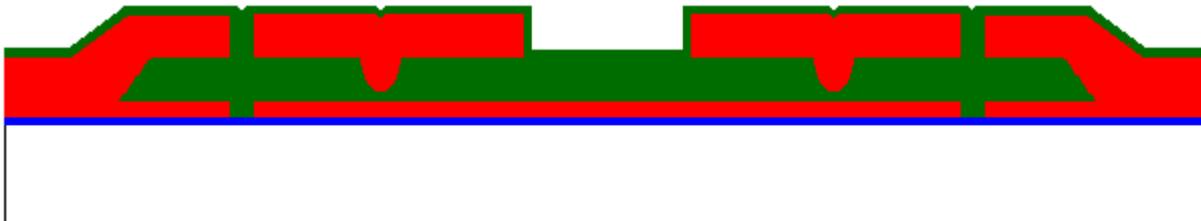
4) Cavidades ( $0,75 \mu\text{m}$ ) e âncoras na primeira camada sacrificial



5) Camada estrutural nível "1" ( $2 \mu\text{m}$ )

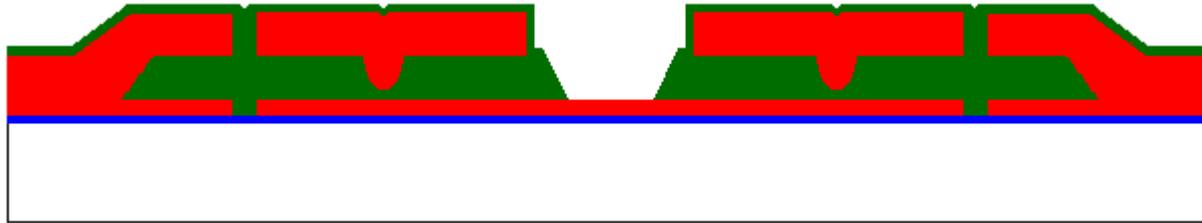


6) Segunda camada sacrificial ( $0,5 \mu\text{m}$ )

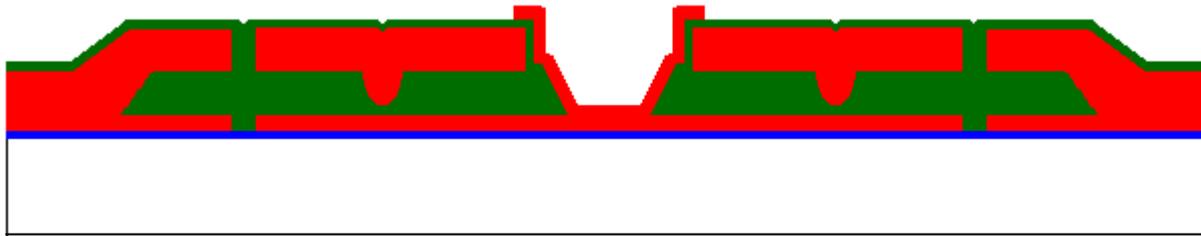


# Processo

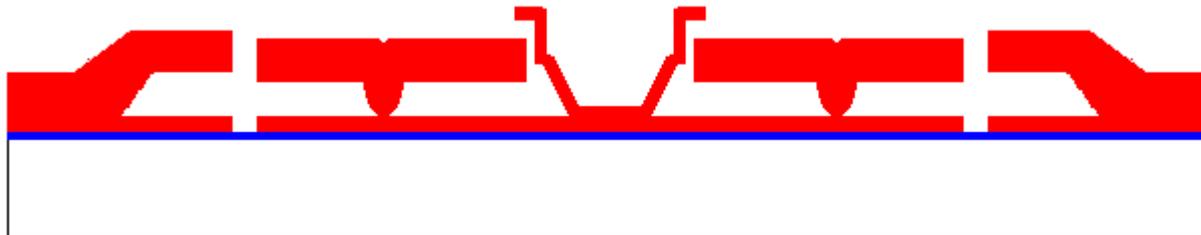
7) Segunda âncora (2,5  $\mu\text{m}$ )



8) Camada estrutural nível "2" (1,5  $\mu\text{m}$ )



9) Corrosão das camadas sacrificiais



# Corrosão da camada sacrificial de $\text{SiO}_2$

- Solução: 1HF : 6  $\text{NH}_4\text{F}$   
( $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ )
- Taxa de corrosão lateral depende das características do  $\text{SiO}_2$  (espessura, tipo de deposição, dopagem, densificação, tipo de cavidade, etc...)

<b>Tipo de camada sacrificial</b>	<b>Taxa de corrosão lateral</b>
1,0 $\mu\text{m}$ de PSG (4 %)	0,3 $\mu\text{m}/\text{min.}$ (BHF 7:1)
0,3 $\mu\text{m}$ de Óxido PECVD densificado (800 $^\circ\text{C}$ , 60 s)	0,2 $\mu\text{m}/\text{min.}$ (BHF 6:1)

# Corrosão da camada sacrificial de $\text{SiO}_2$

- Si-Poli dopado é atacado por BHF:
  - Usar o mínimo tempo de corrosão necessário;
  - Se possível proteger o si-poli com  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ;
- Facilitar ao máximo a penetração da solução de BHF:
  - Utilizar linhas estreitas (máximo de  $10\ \mu\text{m}$ );
  - Utilizar estruturas perfuradas;

# Corrosão da camada sacrificial de $\text{SiO}_2$

- Evitar que a estrutura suspensa fique grudada no substrato após a secagem (“stiction”):
  - Forças de Van der Waals
  - Ligações com hidrogênio
  - Cargas

# Corrosão da camada sacrificial de $\text{SiO}_2$



# Corrosão da camada sacrificial de $\text{SiO}_2$

- Água e secagem com lâmpada de infravermelho;
- Líquido com baixa tensão superficial (álcool) e secagem em vapor;
- Congelamento do líquido (misturas de água/metanol) e sublimação em baixa pressão.

# Dispositivos e Aplicações

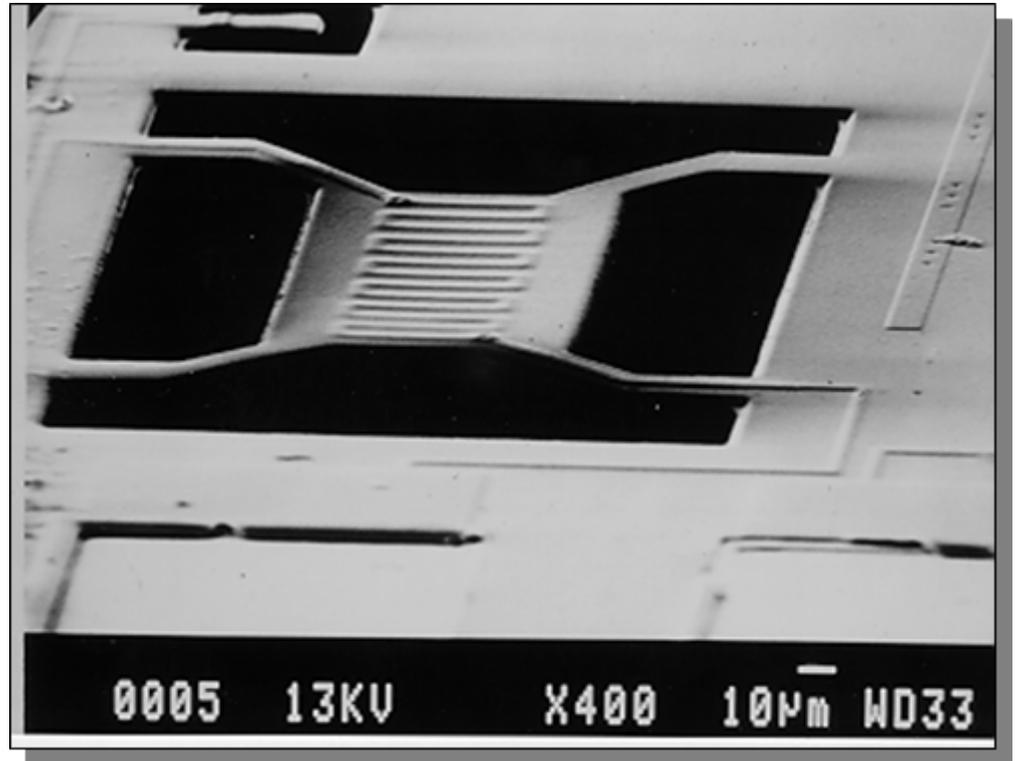
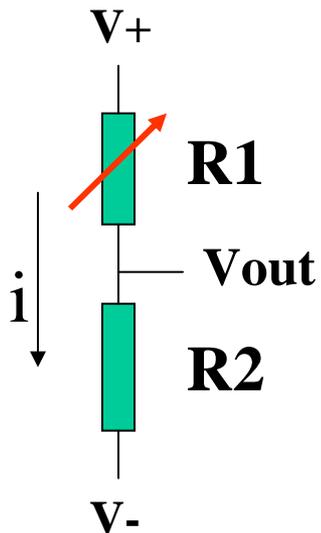
A usinagem (microfabricação) em superfície tem diversas aplicações entre elas temos:

- Dispositivos térmicos
- Dispositivos elétricos
- Dispositivos para sistemas ópticos
- Micro-estruturas mecânicas

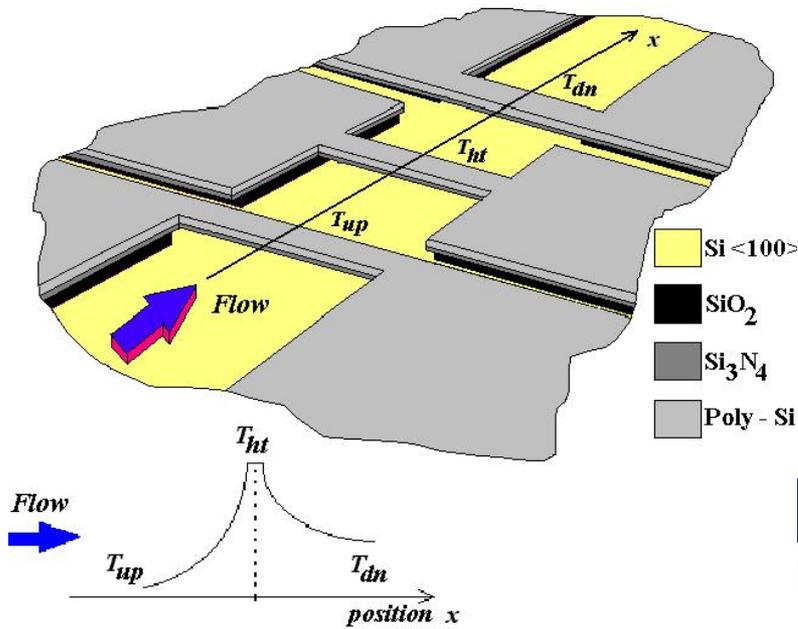
# **Dispositivos Térmicos**

# *Bolômetro (CMOS)*

- $TCR = (1/\rho_0)(d\rho/dT)$
- **Sensor Infra-Vermelho**  
(matriz de pixels)



# Gas flow sensor



## Fabrication

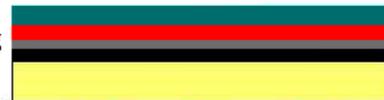
PECVD oxide



LPCVD nitride and Polysilicon



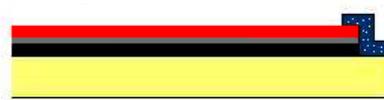
Difusion Doping



Plasma Etching



Evaporation of Aluminium and wet chemical etching



Sacrificial Layer Removal



$\text{Si} \langle 100 \rangle$

$\text{SiO}_2$

$\text{Si}_3\text{N}_4$

Poly-Si

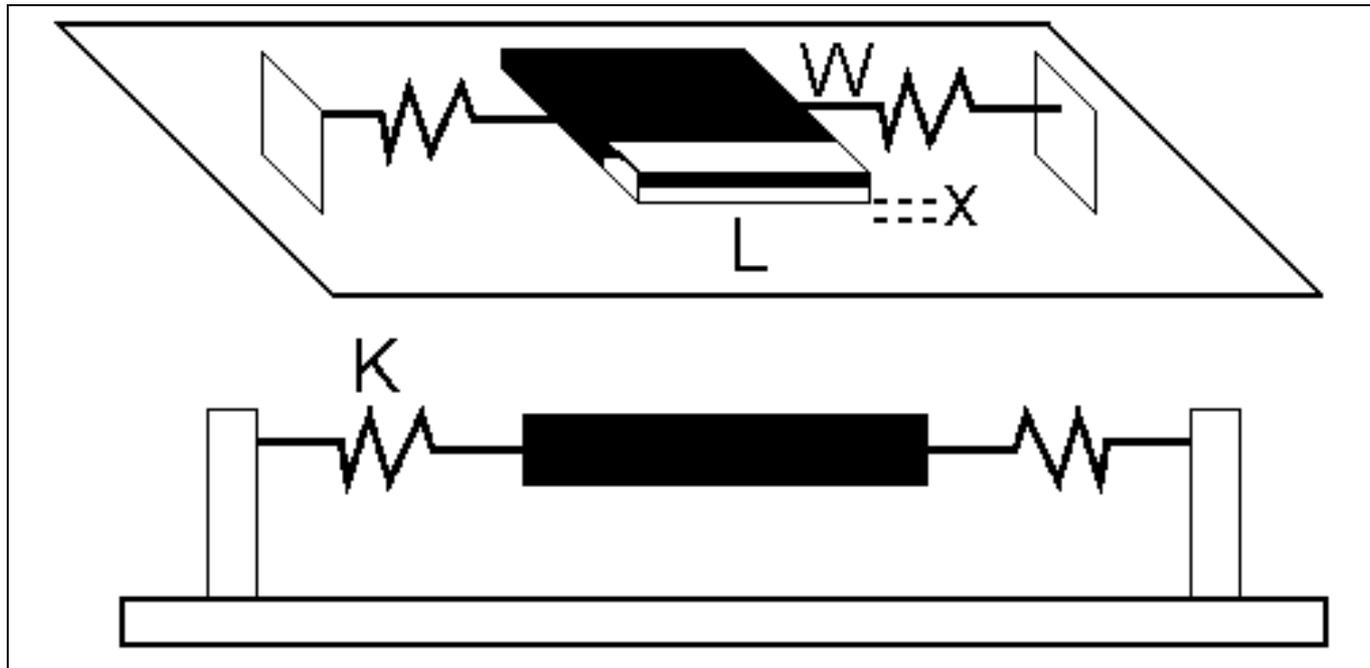
PSG

Al

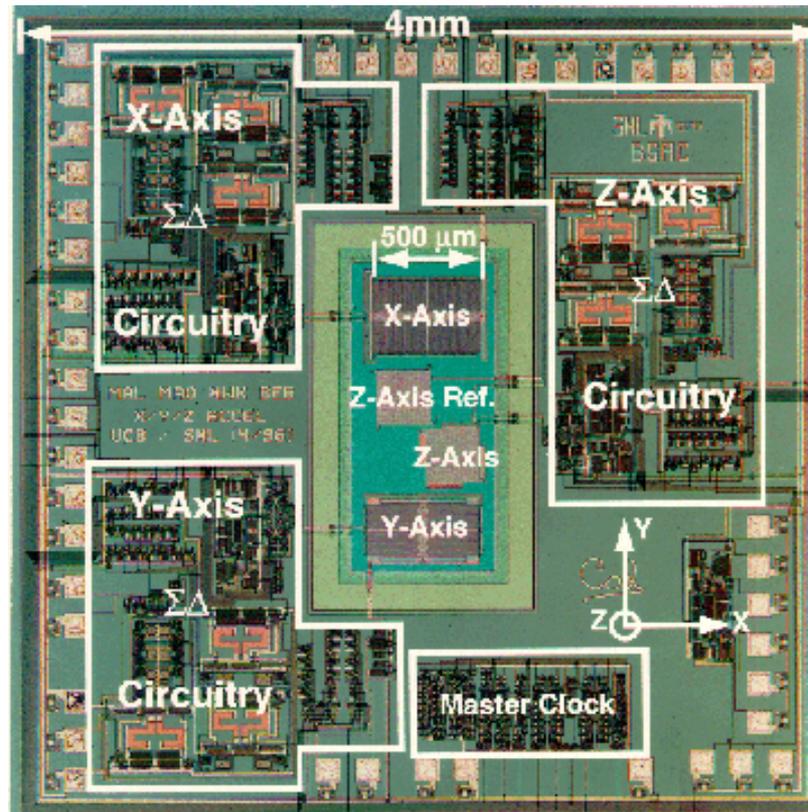


# **Dispositivos elétricos**

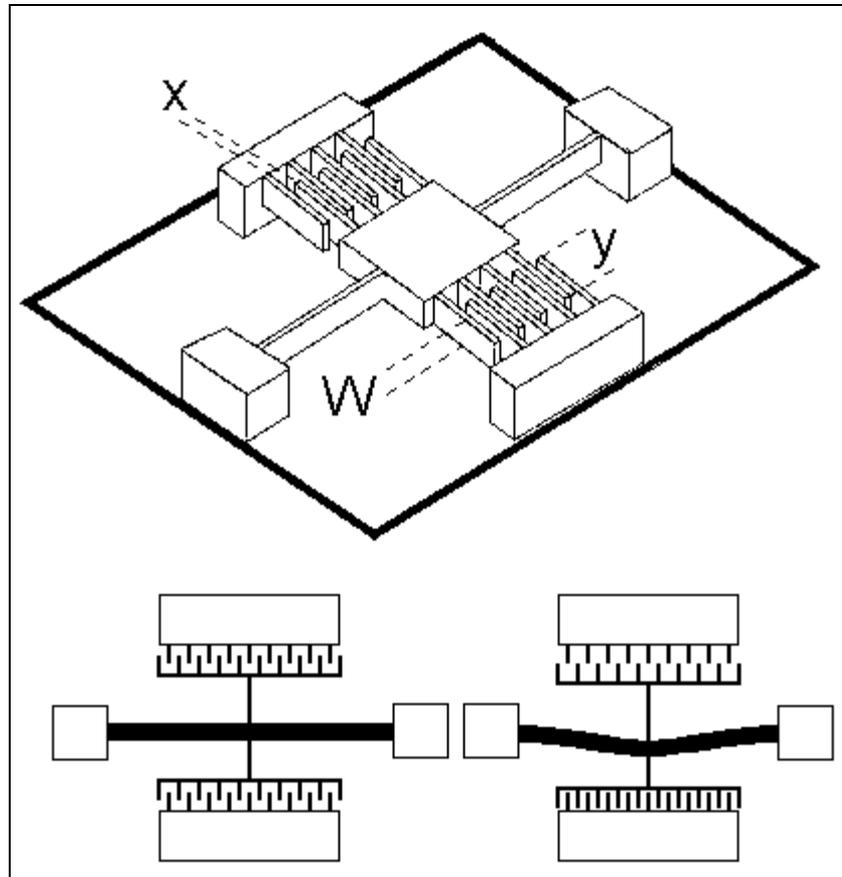
# Sensores capacitivos tipo membrana



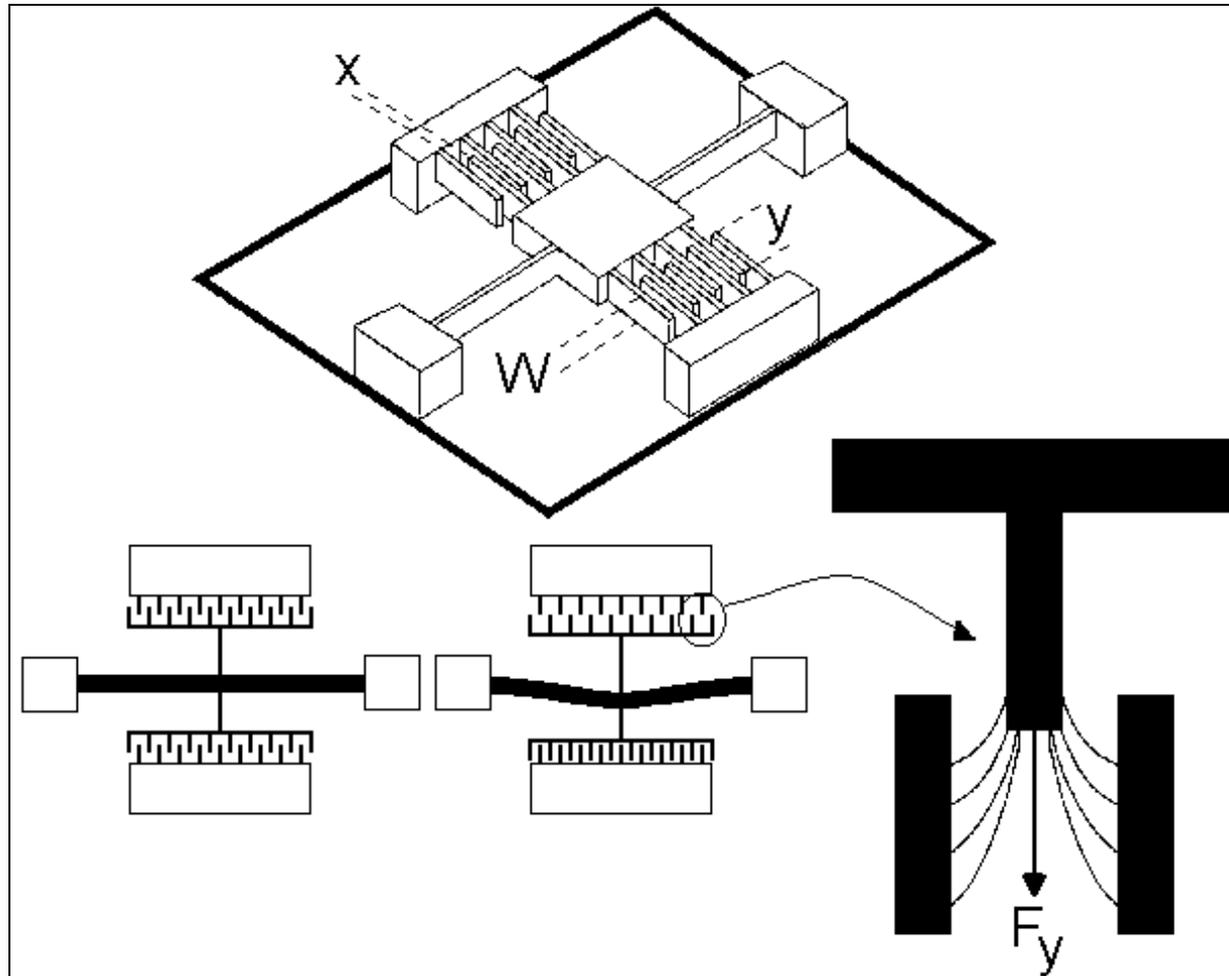
# Sensores capacitivos tipo membrana



# Sensores capacitivos tipo interdigital

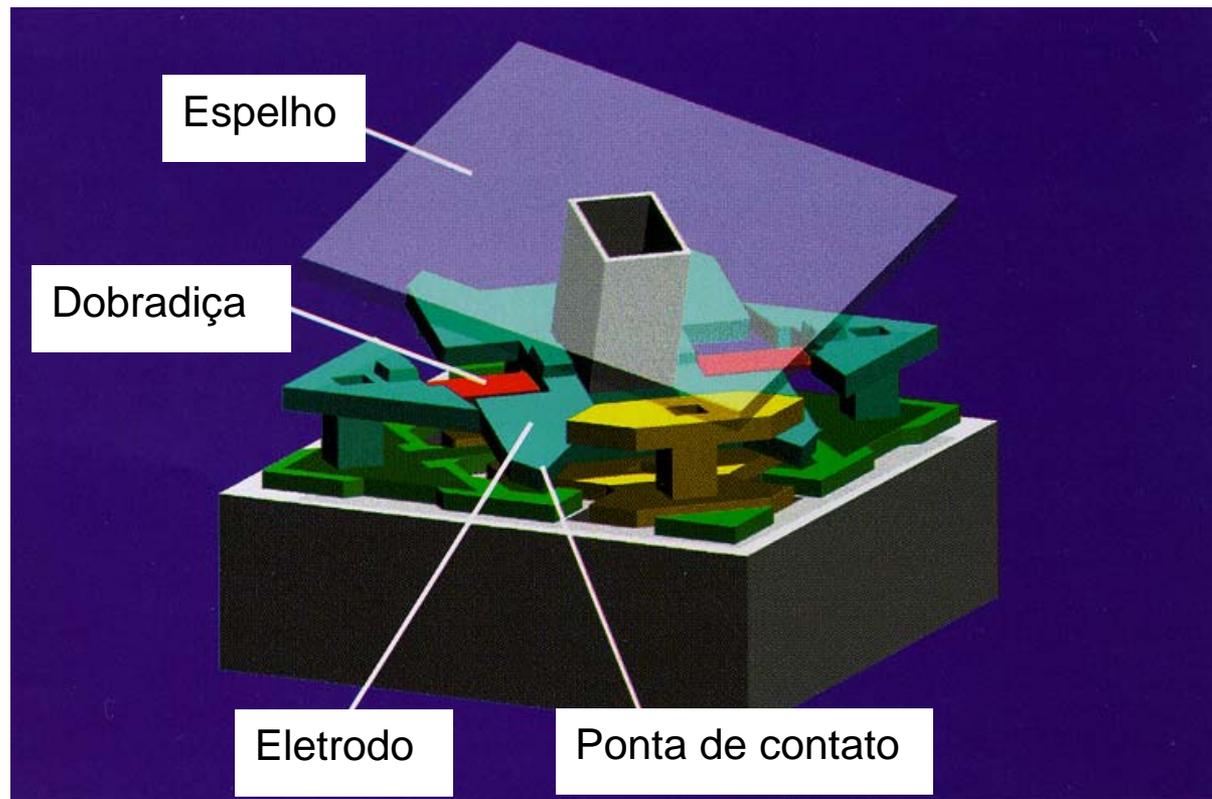


# Atuadores eletrostáticos tipo interdigital



# **Dispositivos para sistemas ópticos**

# Micro espelho rotativo

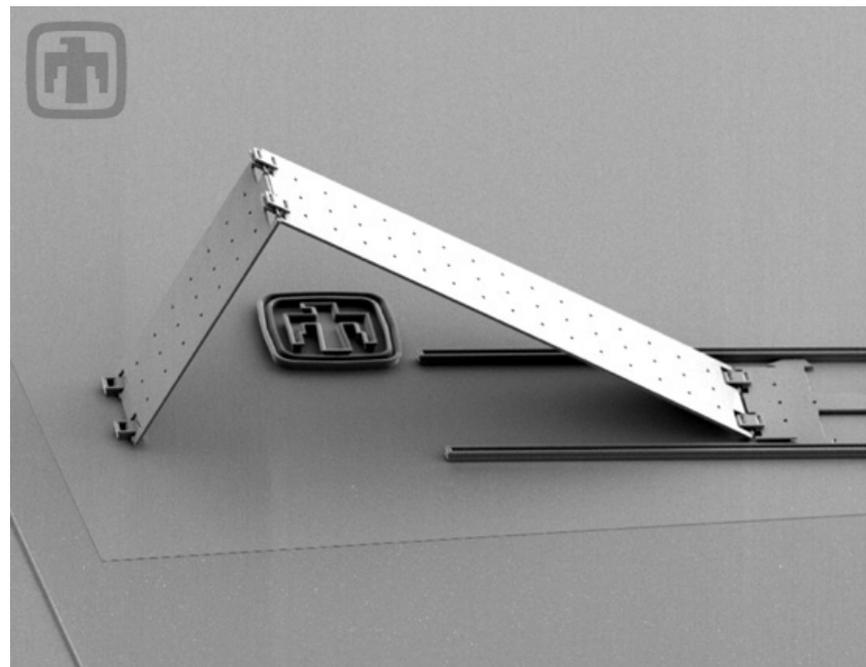
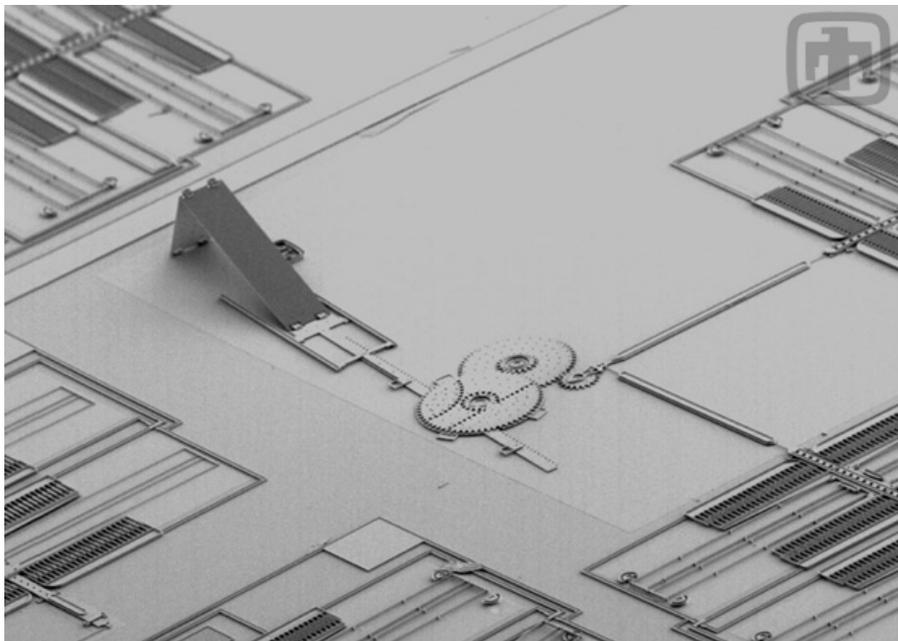


# **Micro-estruturas mecânicas**

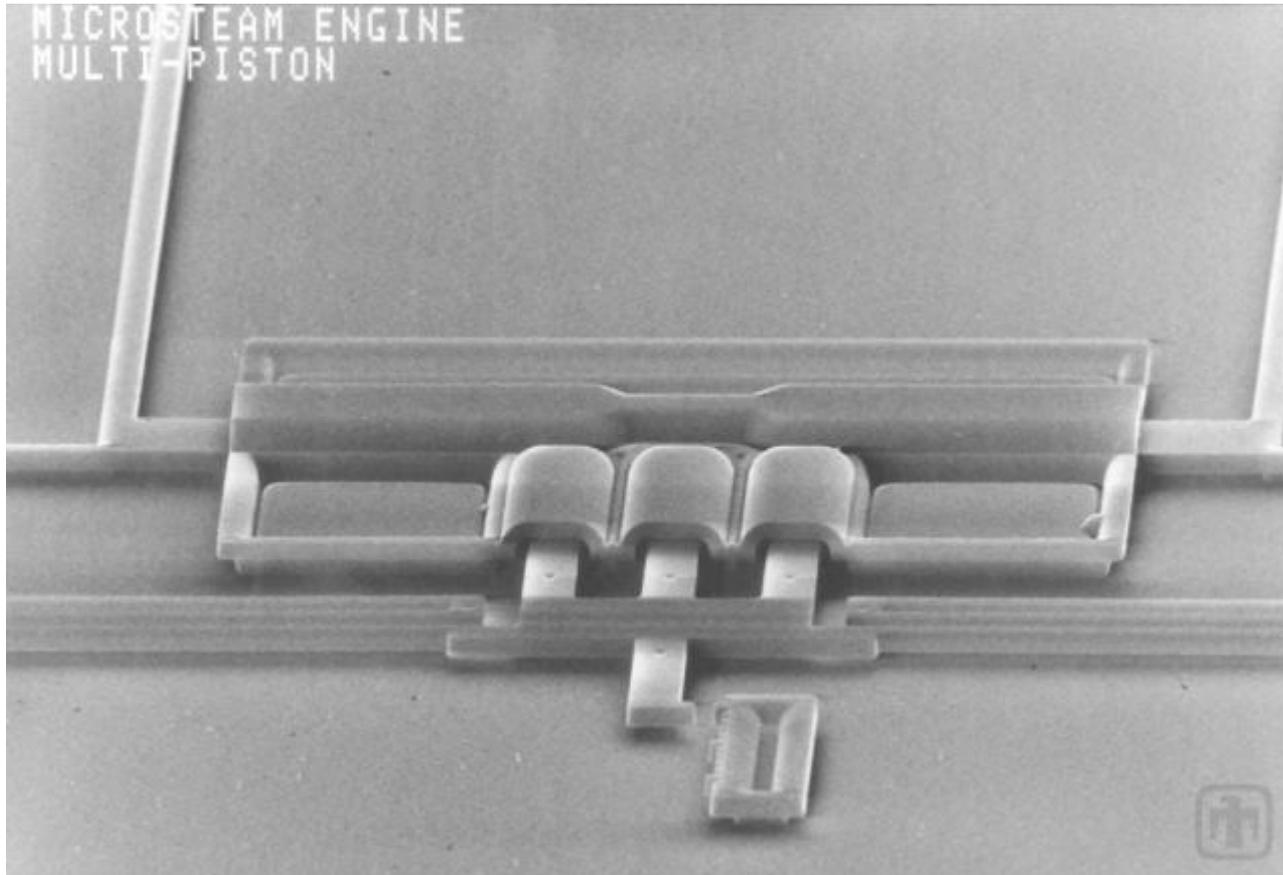
# Conjunto de microengrenagens



# Micro espelho basculante



# Micro Piston



# Cantilevers

