

# O Silício

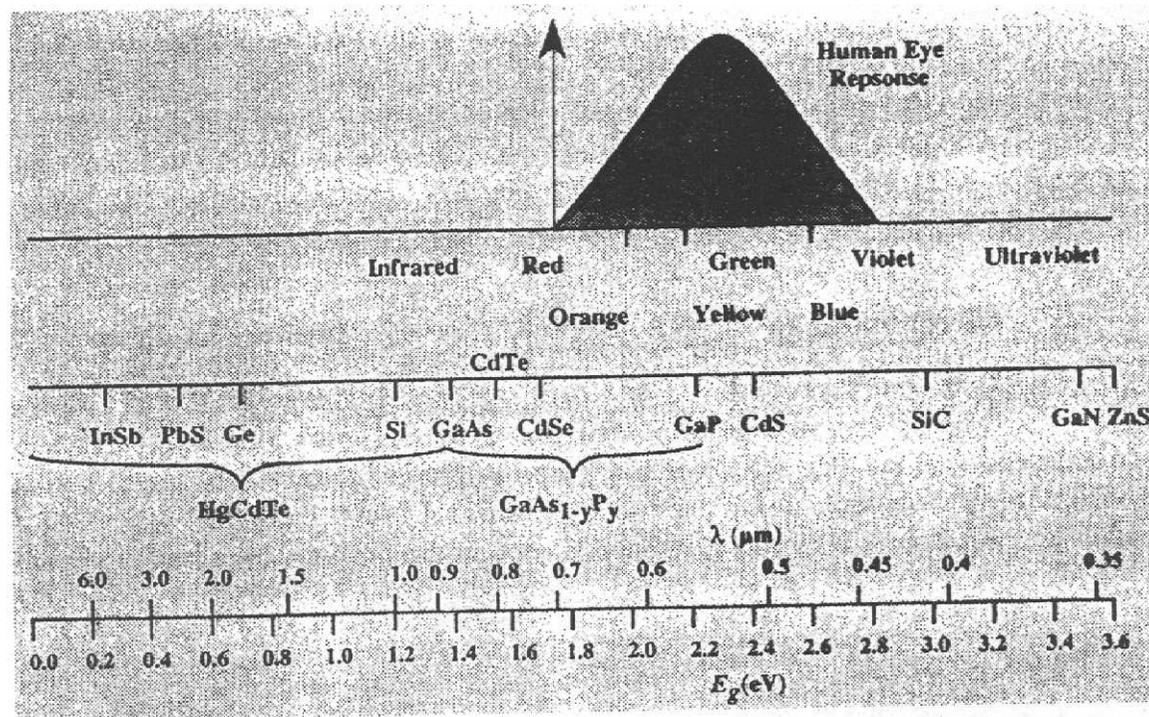
Si, existente em grande quantidade na Terra.

Processo de Czochralski (crescimento de cristais de Si) para formação de wafers de silício.

Facilidade de obtenção do  $\text{SiO}_2$  (um bom isolante) a temperaturas médias na presença de oxigénio.

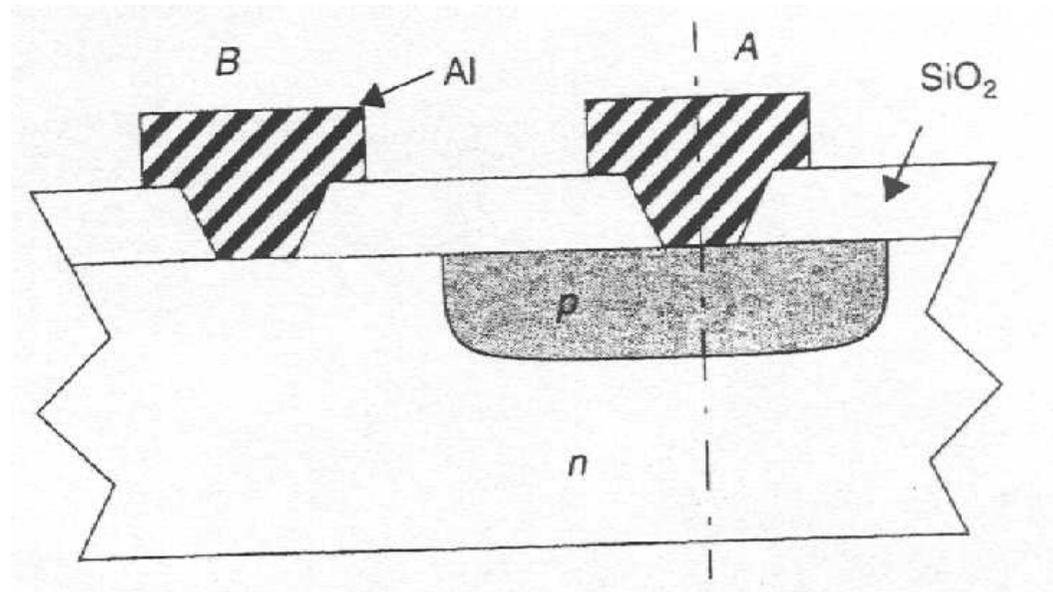
# Propriedades ópticas

O silício é muito utilizado para a construção de fotodetectores para a região visível do espectro electromagnético. A absorção pelo Si é dependente do comprimento de onda da luz incidente. Isto dificulta o fabrico de fotodetectores para a intensidade mas abre a possibilidade de fabricar sensores de cor.



# Propriedades ópticas

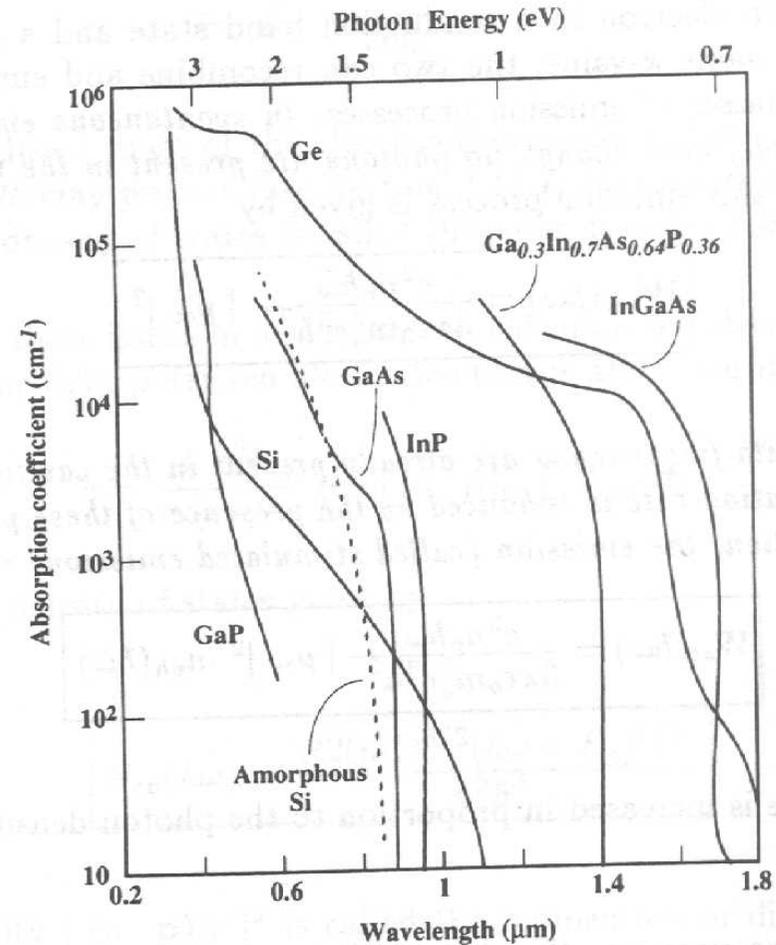
- Dopagem p num substrato n, formando um fotodetector. Dois contactos são abertos na camada de  $\text{SiO}_2$  para n e p.



# Propriedades ópticas

- Absorção óptica dos semicondutores em função do comprimento de onda.

Si quase transparente para  $\lambda > 1 \mu\text{m}$



# Propriedades mecânicas

Si é um excelente material para aplicações micromecânicas:

- baixa densidade,  $2.33 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$
- elevado grau de elasticidade (Young's modulus),  
 $E=164 \text{ GPa}$
- elevado grau de dureza,  $11 \text{ GPa}$
- muito boa resistência à fractura,  $0.1-0.5 \text{ GPa}$
- sem stress residual

# Estruturas 3D em Silício

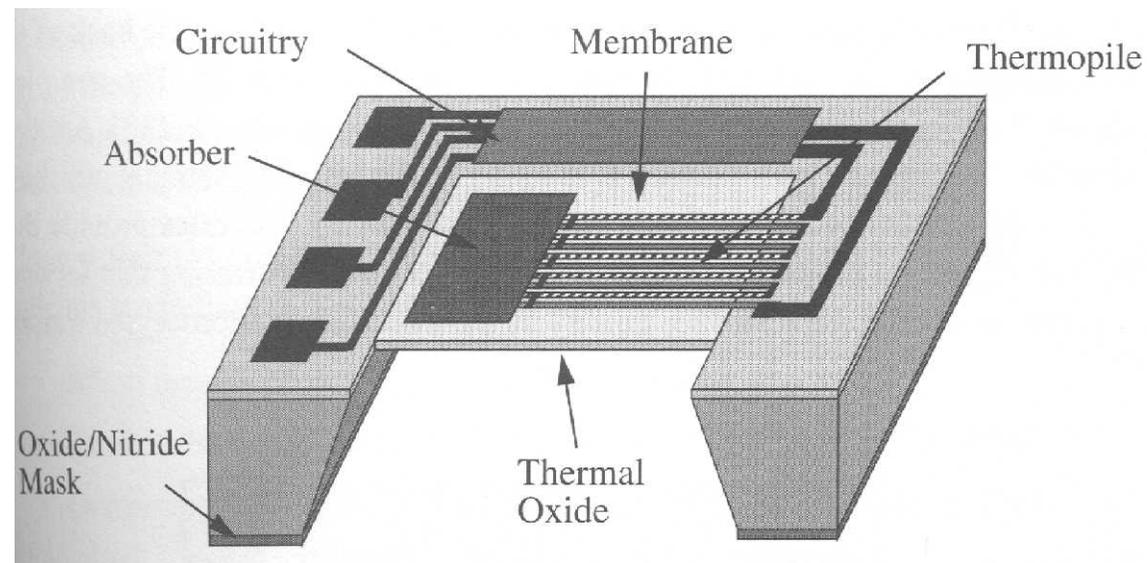
- Pontes
- Pranchas
- *Frames*
- Massas sólidas
- Membranas flexíveis
- Partes móveis
- Engrenagens, rodas dentadas

# Propriedades térmicas do silício

- Coeficiente de expansão térmica,

$$\alpha = 2.33 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$$

Condutividade térmica,  $147 \text{WK}^{-1}\text{m}^{-1}$



# Materiais usados nas microtecnologias

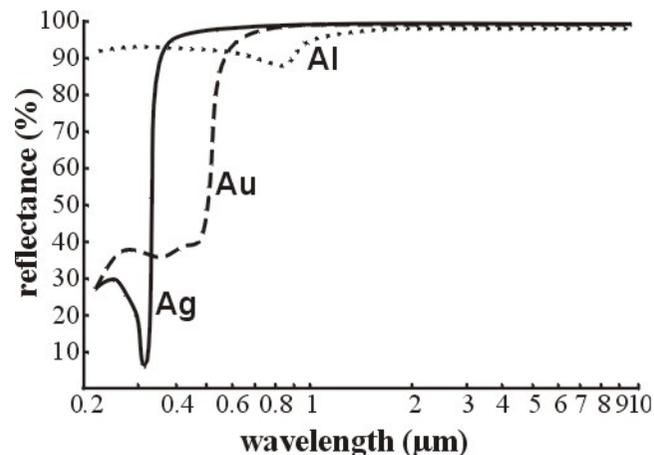
- **Materiais compatíveis com Si**
  - Si, puro
  - p-Si, n-Si, dopagem com Boro ou Fósforo
  - Si Wafer com os cristais orientados nas direcções [100], [110], [111]
  - Polissilício puro, cristais sem orientação
  - Poly-p, Poly-n, dopagem com Boro ou Fósforo respectivamente
  - SiO<sub>2</sub>, isolante, quase transparente à luz visível (n=1.4-1.5), ideal para membranas finas, exhibe stress residual compressivo
  - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, isolante, quase transparente à luz visível (n=2.2-2.5), ideal para membranas finas, exhibe stress residual em tensão.
  - Al, metal utilizado para as ligações, bom grau de dureza para evaporação térmica ou sputtering.

# Filmes finos

- Formação de filmes finos (na ordem dos micrómetros ou menor) de diferentes materiais sobre um wafer de silício
- Estes filmes podem ser formatados e padronizados por técnicas litográficas e técnicas de corrosão dos materiais em causa
- Metais nobres como o Au e a Ag, contaminam os circuitos de microeletrónica causando falhas, portanto wafers de silício com metais nobres têm que ser processados usando equipamento dedicado apenas a esta tarefa.
- Os metais nobres geralmente são padronizados recorrendo à técnica de *lift-off*.

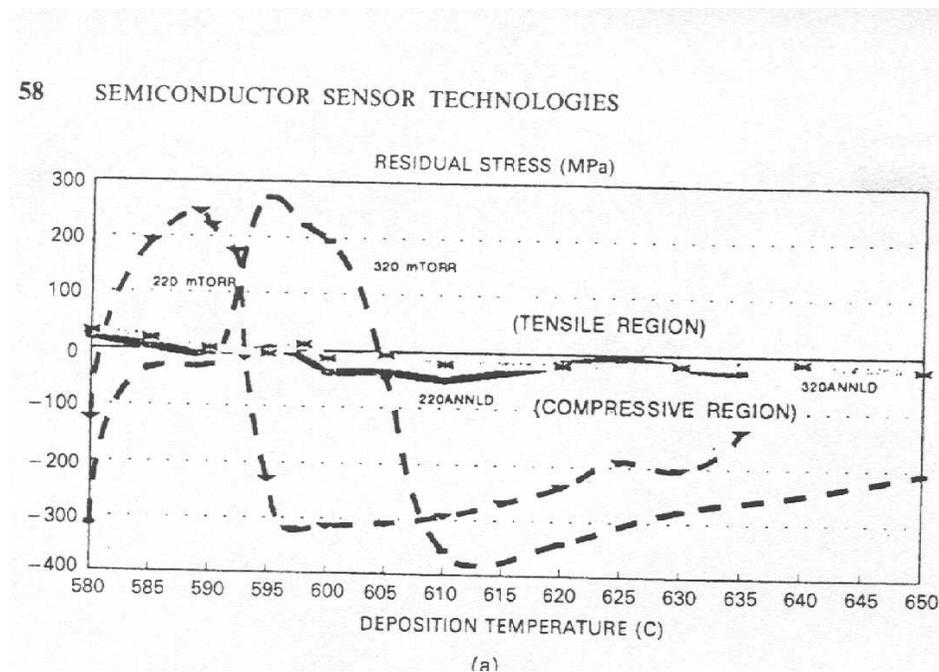
# Materiais usados nas microtecnologias

- Materiais não compatíveis com Si
- Ag e Au, muito macios para evaporação, mas com boas propriedades ópticas para a zona do visível e infra-vermelho respectivamente.
- Cu, material de baixa resistividade comparado com o Al. Requer processo especial para fazer o seu crescimento em wafers de silício.
- TiO<sub>2</sub>, filmes finos para filtros ópticos

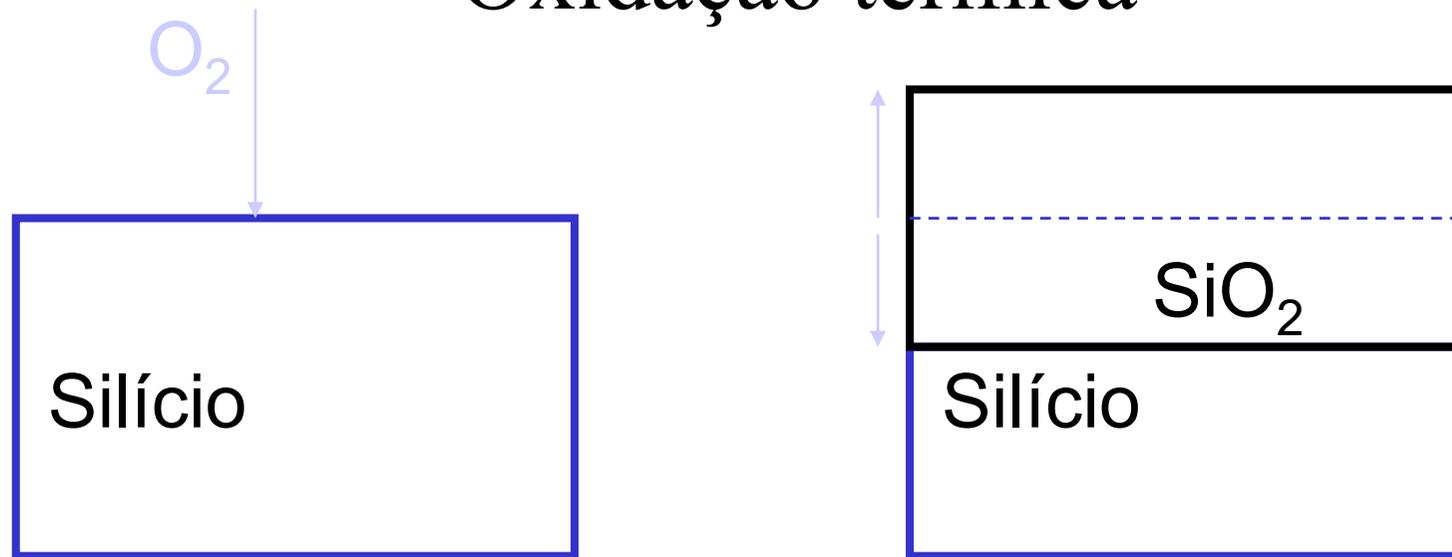


# Stress residual em filmes finos

- Condições de deposição (temperatura, pressão) dos filmes fazem variar o stress residual. O *LPCVD*  $\text{Si}_3\text{N}_4$  apresenta stress residual de 0.125-1 GPa conforme a variação de temperatura e o *annealing*. Em baixo está representado o stress residual do *LPCVD Poly* quando depositado a diferentes pressões e sem *annealing*.



## Oxidação térmica



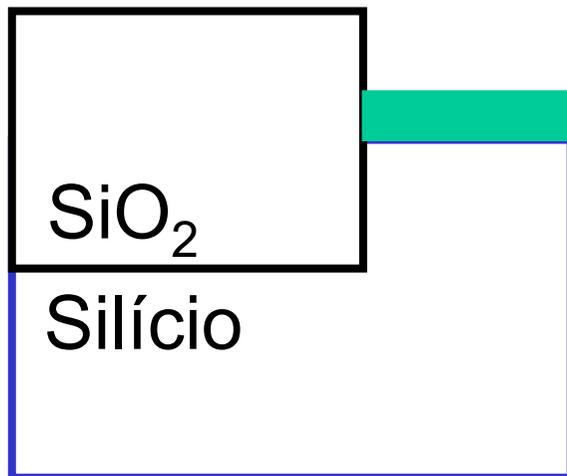
O silício é consumido à medida que o dióxido de silício cresce.

O crescimento ocorre em oxigénio e/ou vapor a 800-1200 °C

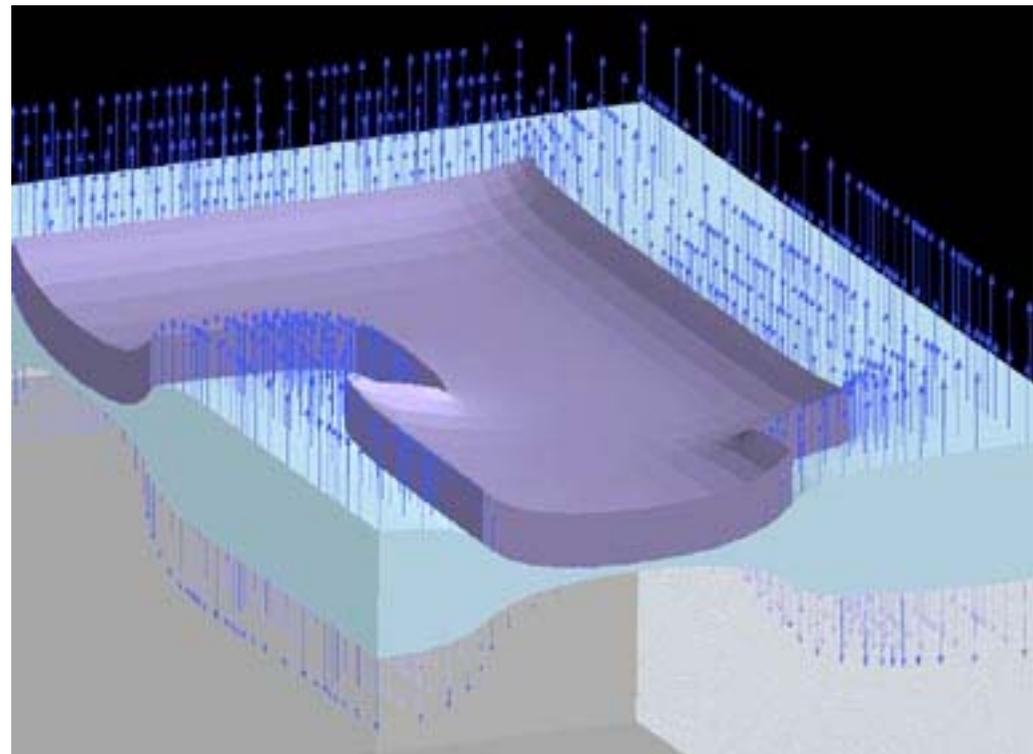
Filmes com ~2um é o máximo valor prático possível

# Oxidação térmica

- A oxidação pode ser mascarada com nitreto de silício, que evita a difusão do  $O_2$



nitreto de silício

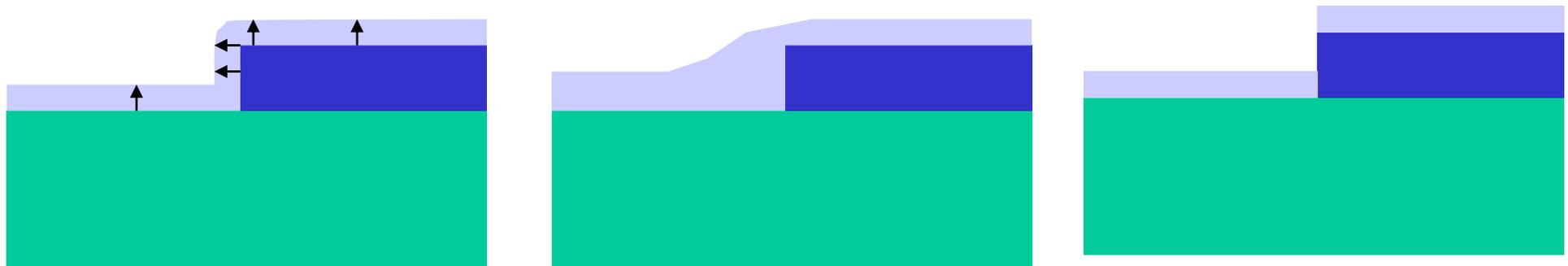


# Aspectos da deposição - Compatibilidade

- Compatibilidade térmica
  - A oxidação térmica e os filmes LPCVD são mutuamente compatíveis
  - A oxidação térmica e o LPCVD não são compatíveis com polímeros (derretem/ardem) e com a maioria dos metais (formação eutética, difusão, contaminação do forno)
- Compatibilidade topográfica
  - Não se pode fazer spin-coat sobre degraus elevados
  - Deposição sobre rasgos profundos deixa buracos

## Aspectos da deposição - Conformabilidade

- Um coating (cobertura) *conformal* cobre todas as superfícies com uma película uniforme
- Um coating planarizador tende a reduzir o degrau vertical da secção transversal
- Um coating não-*conformal* deposita mais nas superfícies do topo do que nas superfícies da base e/ou laterais



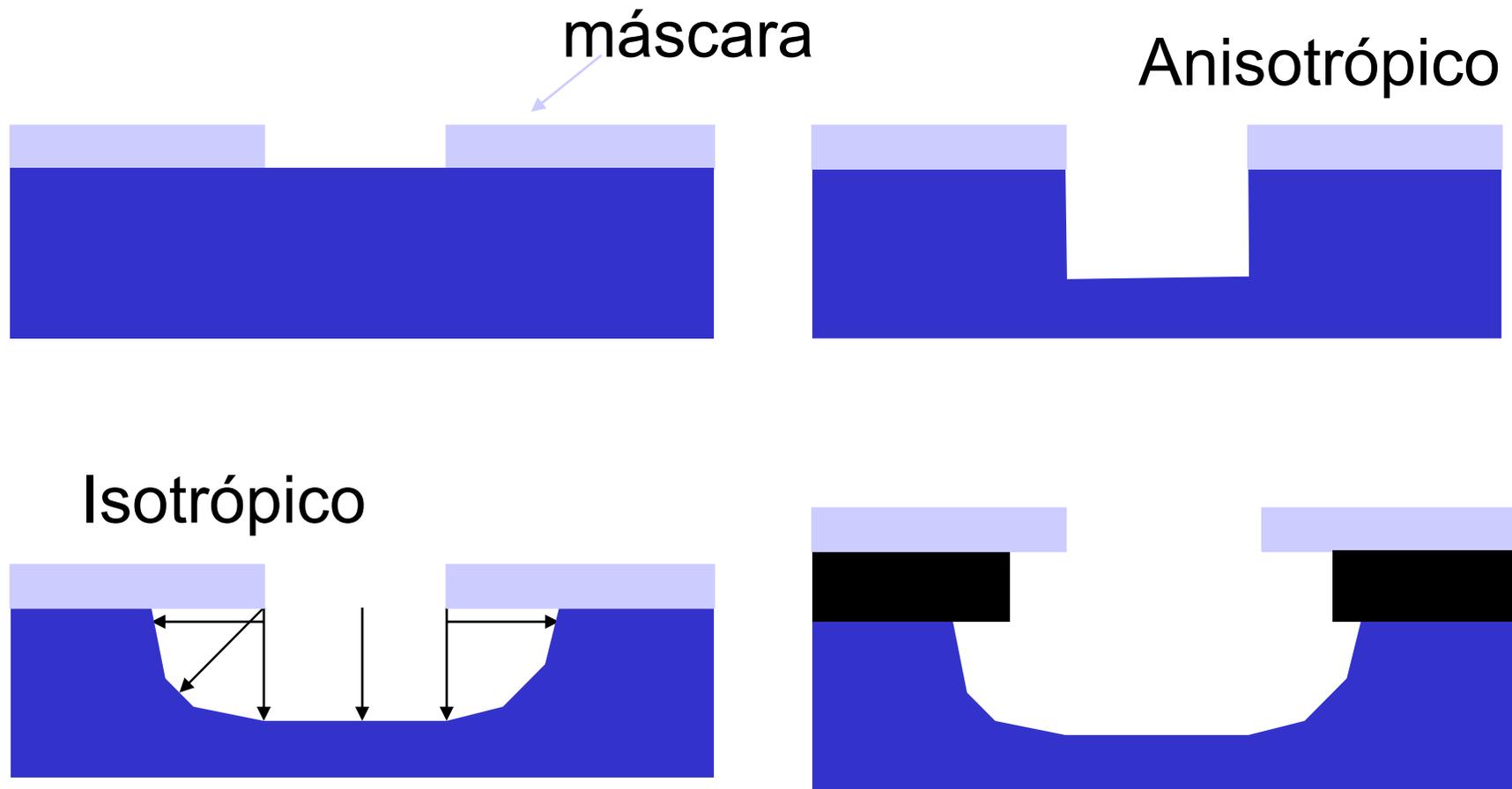
Conformal

Planarizador

Não-conformal

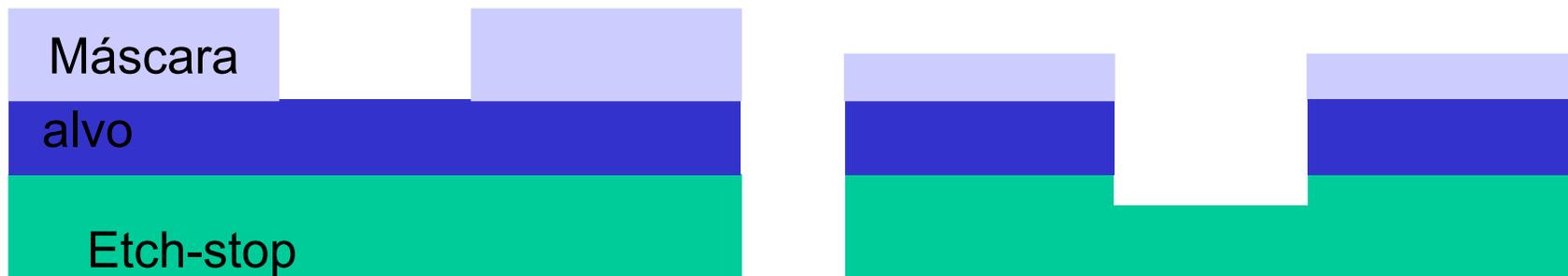
# Aspectos da corrosão - Anisotropia

- Corrosivos isotrópicos removem a mesma taxa em todas as direcções



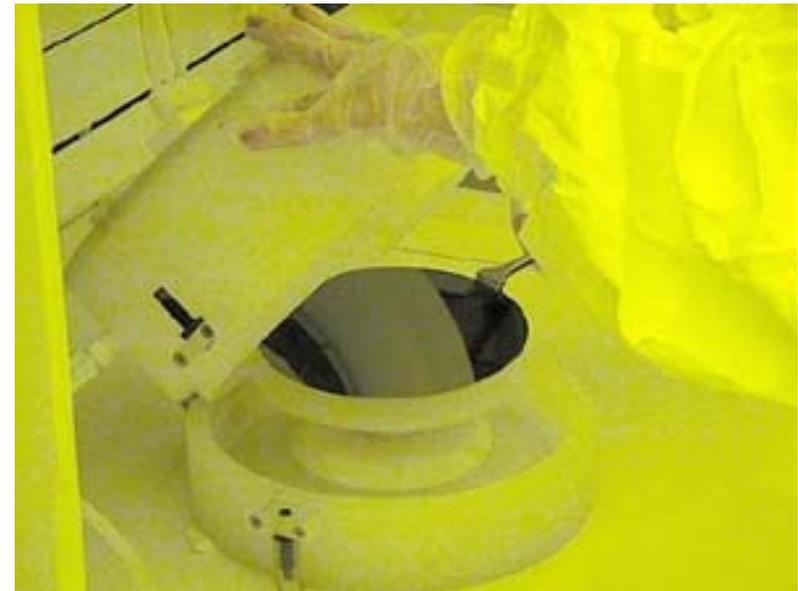
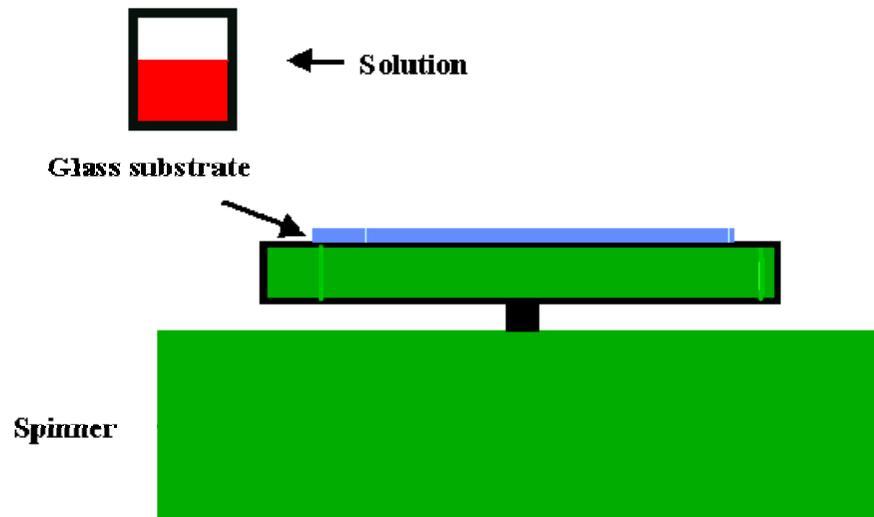
## Aspectos da corrosão - Selectividade

- A selectividade é a relação entre a taxa de corrosão do material alvo e a taxa de corrosão dos outros materiais
- A corrosão química é geralmente mais selectiva do que corrosão por plasma
- A selectividade para o material da máscara e para os materiais etch-stop é importante



# Spin Coating

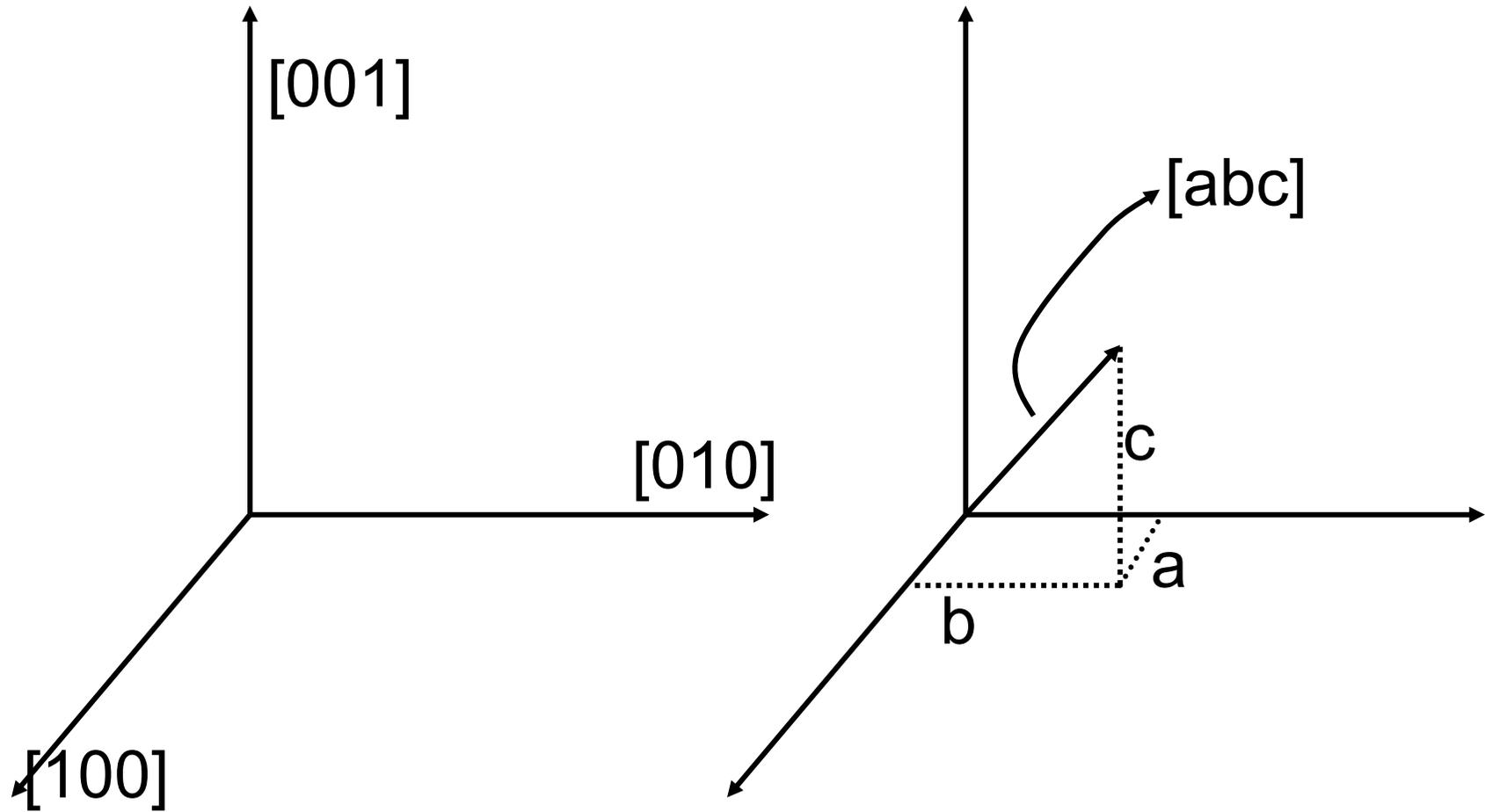
- Um líquido viscoso é colocado no centro do wafer
- O wafer roda entre 1000-5000 RPM, 30 s
- Baked (levar ao forno) em pratos quentes 80-500 °C, 10-1000s
- Aplicação de corrosivos e solventes, secar
- Deposição de polímeros, precursores sol-gel

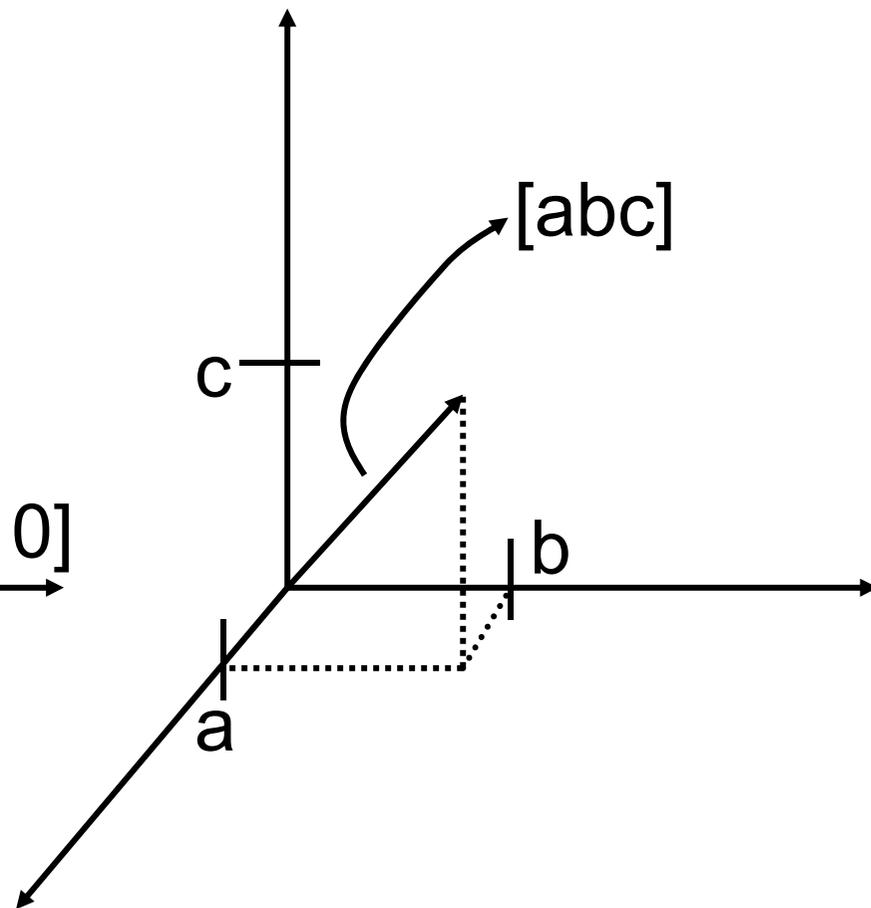
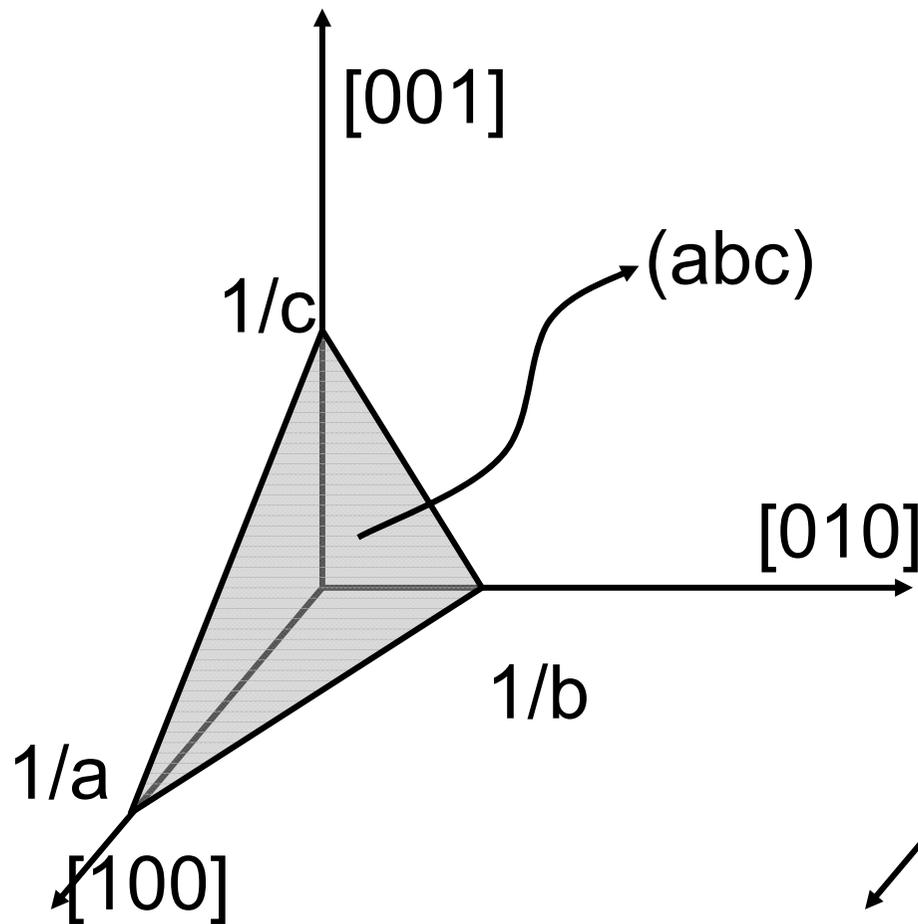


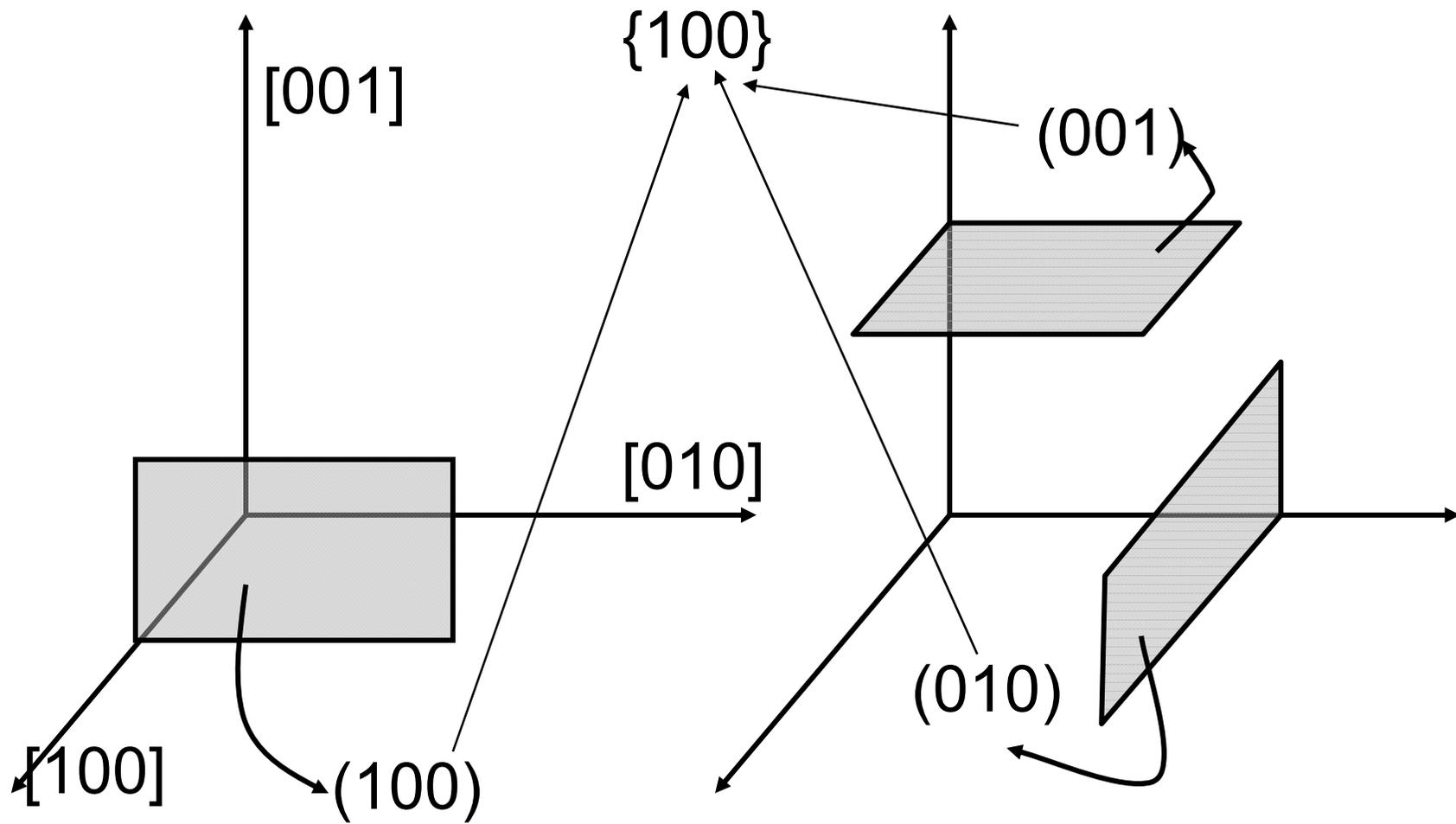
# Physical Vapor Deposition - Evaporação

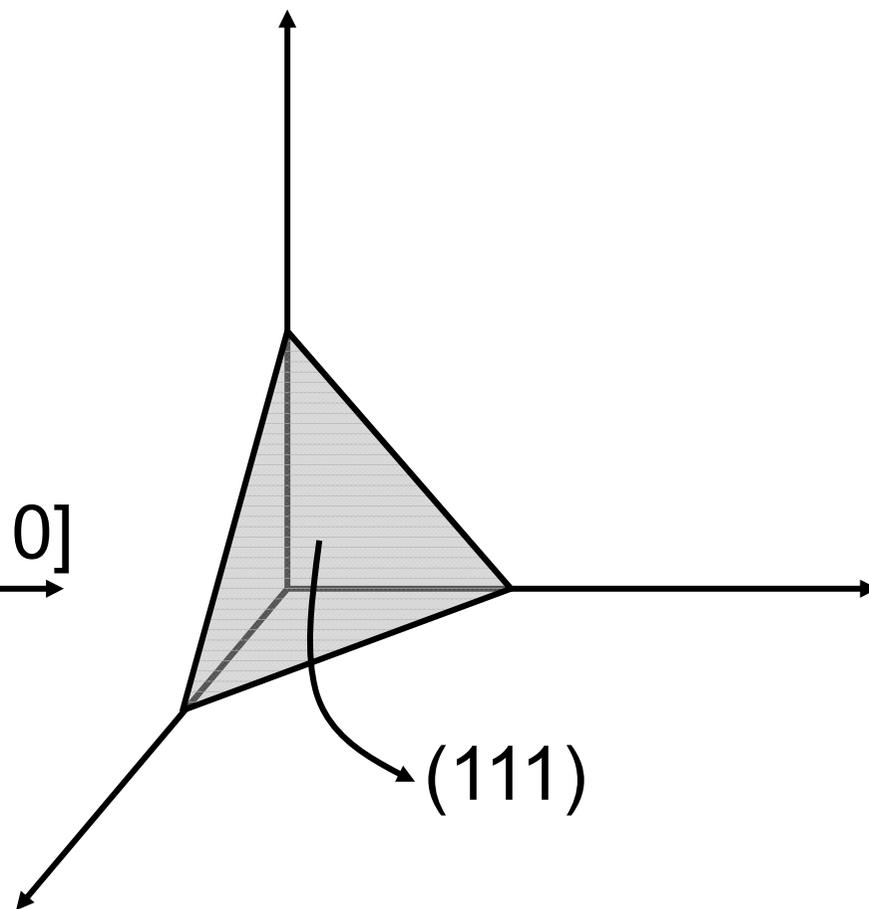
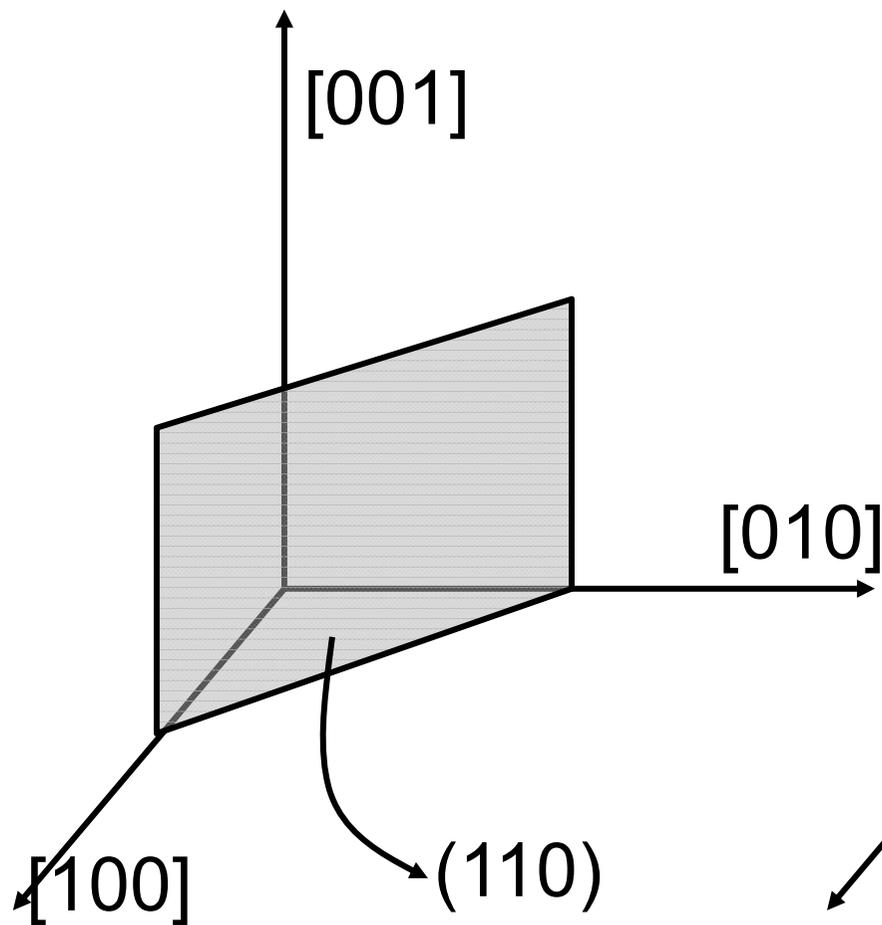
- Metais evaporados num cadinho de tungsténio
  - Alumínio, ouro
- Tipicamente para deposição em linha de vista
- Vácuo elevado necessário para evitar a oxidação, e.g., do alumínio

# Índices de Miller









# Micromaquinagem do silício

- Técnicas para:
  - moldar e/ou criar padrões nos filmes finos que foram depositados sobre um wafer de silício
  - mudar a forma do wafer,
  - criar microestruturas 3D básicas.
- Técnicas associadas com a micromaquinagem do silício:
  - deposição de filmes finos,
  - remoção de materiais e filmes finos recorrendo à corrosão química,
  - remoção de materiais e filmes finos por corrosão a seco (e.g, corrosão por plasma)
  - introdução de impurezas no silício, modificando as suas propriedades (i.e, doping).

# Micromaquinagem

- Um grande número de fenômenos físicos têm um especial significado à escala do micrómetro comparado com o dispositivo macroscópico.
  - Micro-mecânica
    - partes móveis e engrenagens
  - Microfluidos
    - microcanais, microválvulas
  - Micro-óptica
    - há partes móveis e engrenagens

# Micromaquinagem

- Micromaquinagem volumica - Bulk micromachining
- Micromaquinagem superficial - Surface micromachining
- Deep reactive ion etching (DRIE)
- Outros materiais/processos

# Volúmica, Superficial, DRIE

- Micromaquinagem volúmica envolve a remoção de material do próprio wafer de silício
  - Tipicamente corrosão a frio
  - Tradicionalmente na indústria MEMS
  - Desenhos artísticos, equipamento barato
  - Problemas com compatibilidade com IC
- Micromaquinagem superficial deixa o wafer intacto mas adiciona/remove camadas adicionais sobre a superfície do wafer
  - Tipicamente corrosão com plasma
  - Filosofia de desenho semelhante à do IC, equipamento relativamente barato
  - Também se colocam questões com compatibilidade com IC
- DRIE (Deep Reactive Ion Etch) remove substrato mas assemelha-se à micromaquinagem superficial

# Micromaquinagem volúmica

- Muitos dos corrosivos líquidos apresentam uma taxa de corrosão diferente para direcções diferentes
  - $\langle 111 \rangle$  etch rate é a mais lenta,  $\langle 100 \rangle$  e  $\langle 110 \rangle$  mais rápida
  - Rápida:lenta pode ser mais de 400:1
  - KOH, EDP, TMAH são os corrosivos anisotrópicos mais comuns para o silício
- Corrosivos isotrópicos do silício
  - HNA (Hydrofluoric acid + Nitric acid + Acetic acid)
    - HF, ácidos nítricos e acético
    - Duro de utilizar
  - XeF<sub>2</sub>, BrF<sub>3</sub>

# Fotolitografia na micromaquinagem

- Técnica usada para definir a forma das estruturas a micromaquinar
- Uso da mesma técnica que na indústria da microelectrónica
- Em alguns casos usa-se como máscara o  $\text{SiO}_2$  ou  $\text{Si}_3\text{N}_4$  em vez de *photoresist*

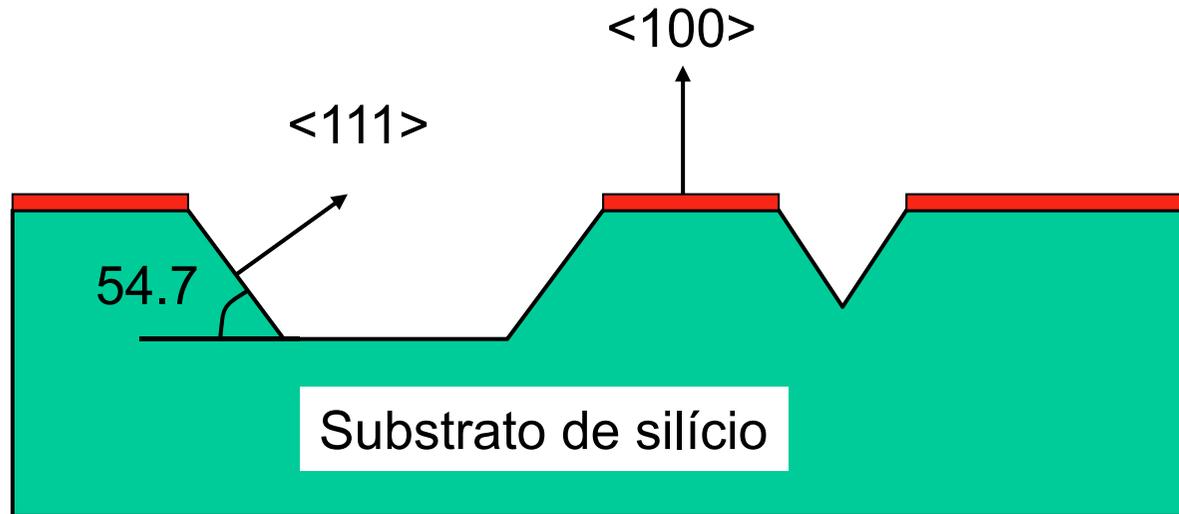
# Corrosão com KOH

- Corrói PR e alumínio instantaneamente
- Máscaras:
  - SiO<sub>2</sub>
    - compressivo
  - SixNy
    - tensão
  - Parylene!
  - Au?

# Corrosão química em solução aquosa

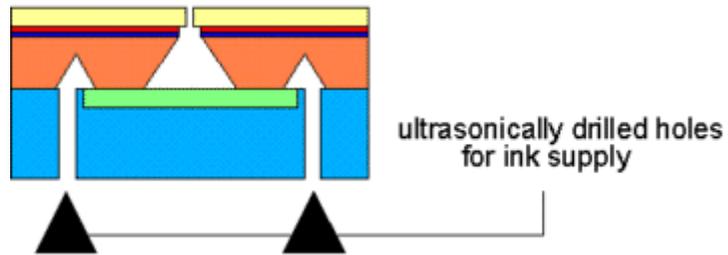
- óxido e nitreto são pouco corroídos em soluções aquosas de KOH.
  - Óxido pode ser usado para máscara durante um curto período de tempo (i.e, para aberturas superficiais no silício)
  - Para longos períodos de tempo, o nitreto é a melhor máscara porque corrói mais devagar em soluções aquosas de KOH.
- *Corrosão dependente da concentração de impurezas*
  - Elevados níveis de boro no silício reduz drasticamente a taxa de corrosão.
  - Elevada concentração de boro a dopar o silício provoca a paragem da corrosão.

# Corrosão anisotrópica do silício

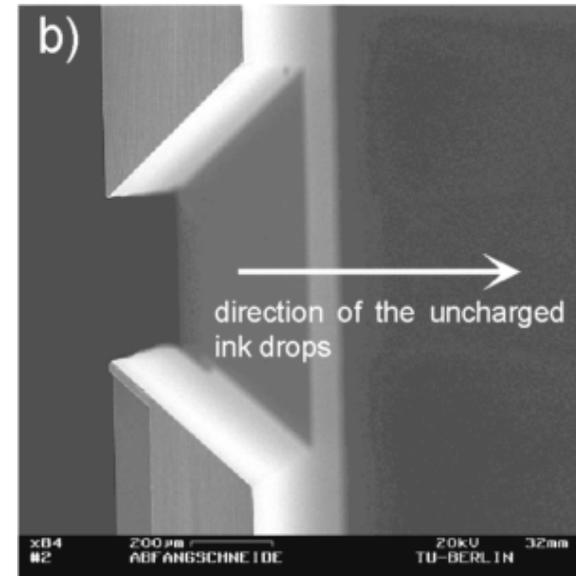
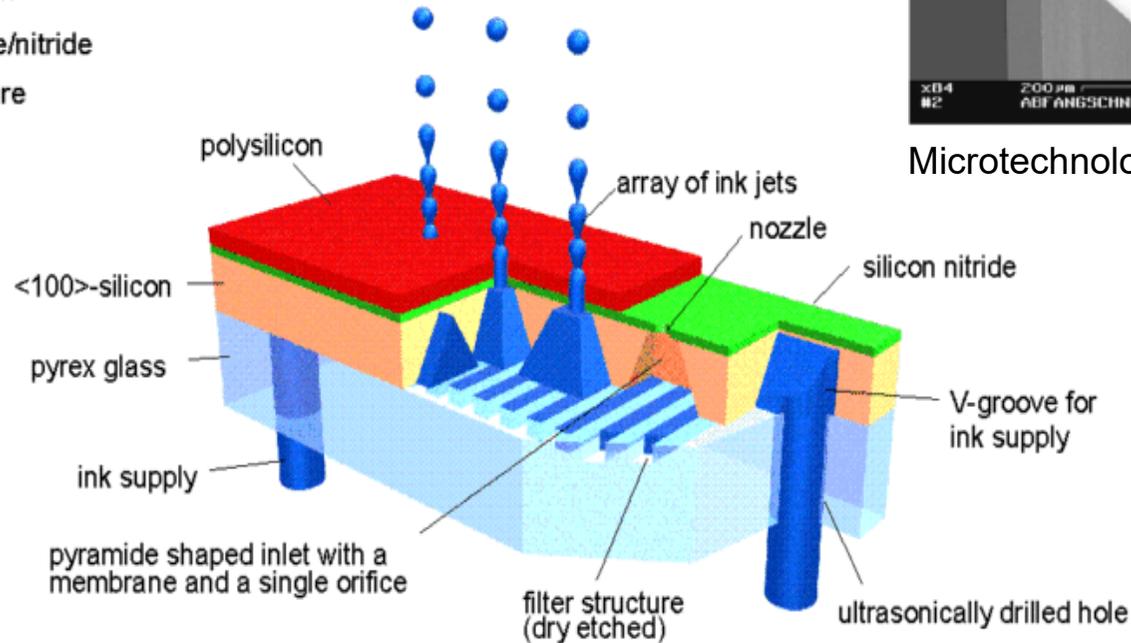


- A corrosão anisotrópica tem taxas de corrosão dependentes das direcções do cristal
- Tipicamente, as taxas de corrosão são mais lentas para direcções perpendiculares ao plano cristalinos com a maior densidade
- Os corrosivos anisotrópicos tipicamente utilizados para o silício incluem o Hidróxido de potássio (KOH), o Tetramethyl Ammonium Hydroxide (TMAH), e o Ethylene Diamine Pyrochatecol (EDP)

# Micromachining of Ink Jet Nozzles

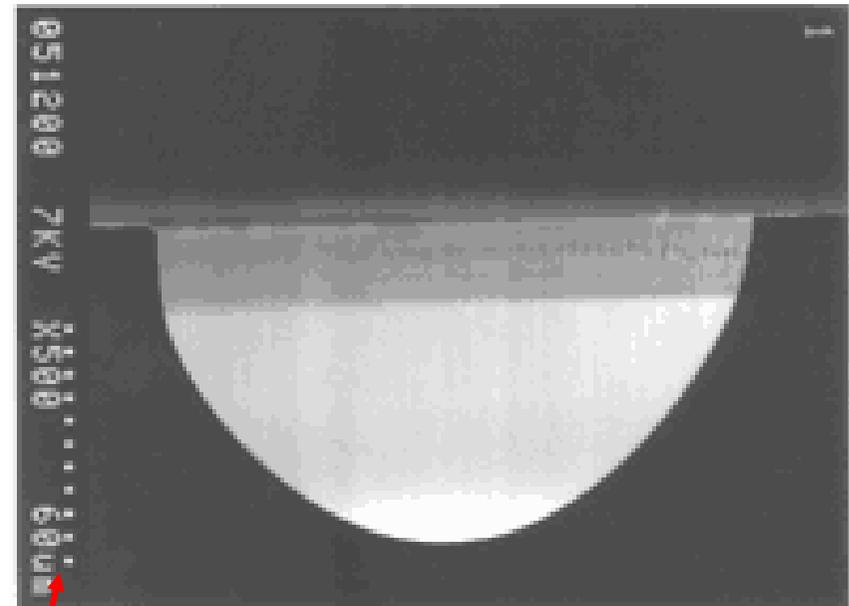
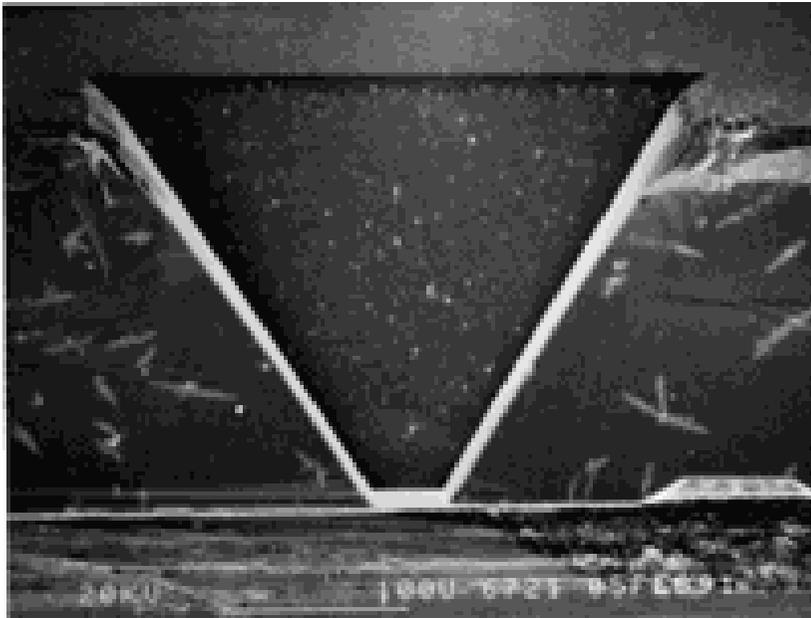


- polysilicon
- <100>-silicon
- silicon oxide/nitride
- filter structure
- pyrex glass

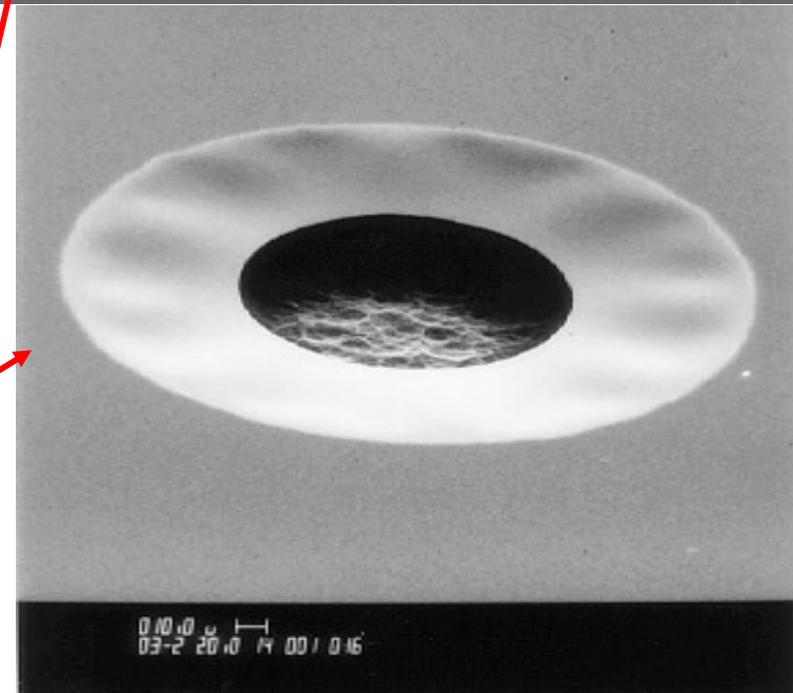


Microtechnology group, TU Berlin

# Cavidades-micromaquinagem volúmica

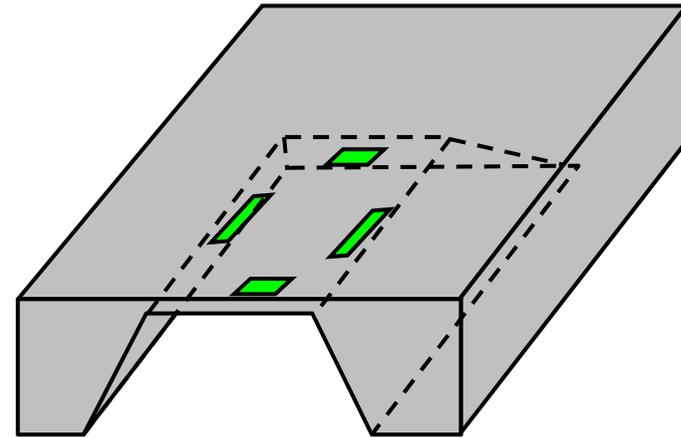


- Corrosão anisotrópica com KOH
- Corrosão com plasma isotrópico
- Corrosão isotrópica com BrF3 com óxido compressivo ainda visível

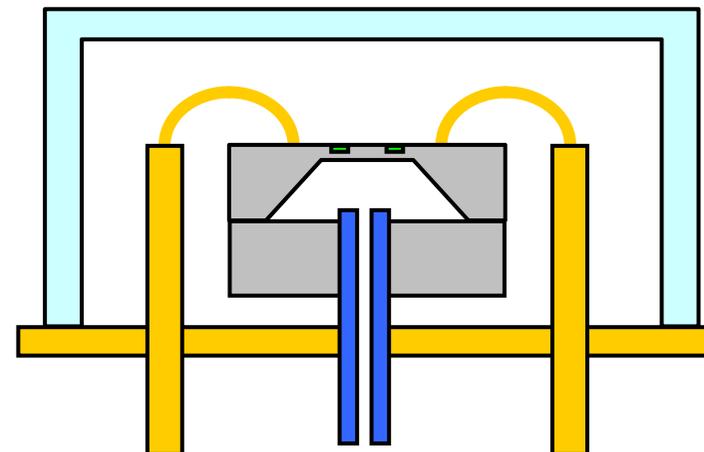


# Micromaquinagem volúmica – Sensor de pressão

- Corrosão anisotrópica permite maquinar o silício com elevada precisão
- Silício apresenta um elevado efeito piezoresistivo
- Estas propriedades, combinadas com as propriedades mecânicas excepcionais e com um bom desenvolvimento do processo de fabrico, torna o silício o material ideal para sensores de precisão
- Sensores de pressão e acelerómetros foram os primeiros a serem desenvolvidos



Chip do sensor de pressão



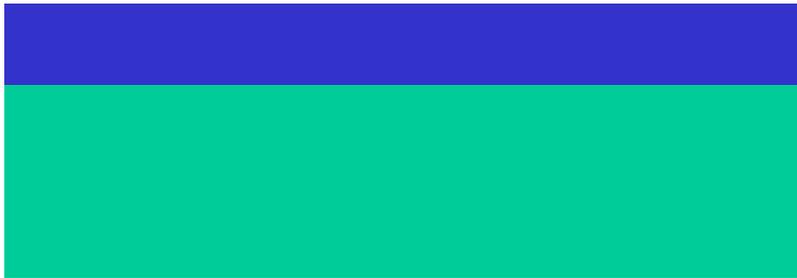
Sensor de pressão encapsulado

# Micromaquinagem superficial (*surface micromachining*)

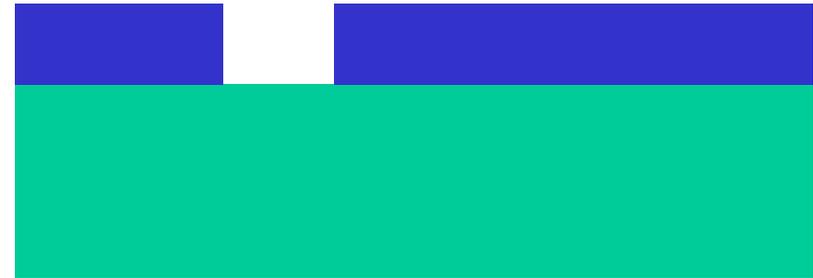
- As técnicas de micromaquinagem superficial constroem a estrutura em camadas de filmes finos sobre o substrato de silício ou outro substrato a servir de base.
- Tipicamente são empregues filmes de dois materiais diferentes
  - O material da estrutura (quase sempre polisilício)
  - O material de sacrifício (óxido).
    - Ambos os materiais são depositados e formatados.
    - No final o material de sacrifício é removido por corrosão química por solução aquosa de maneira a obter-se a estrutura pretendida.
    - Quanto maior o número de camadas, mais complexa é a estrutura e mais difícil se torna o seu fabrico.

# Micromaquinagem superficial

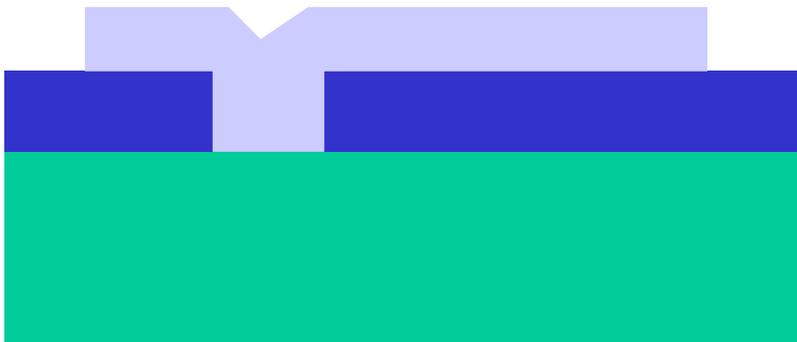
Deposição da camada de sacrifício



Obtenção de contactos



Deposição da camada estrutural



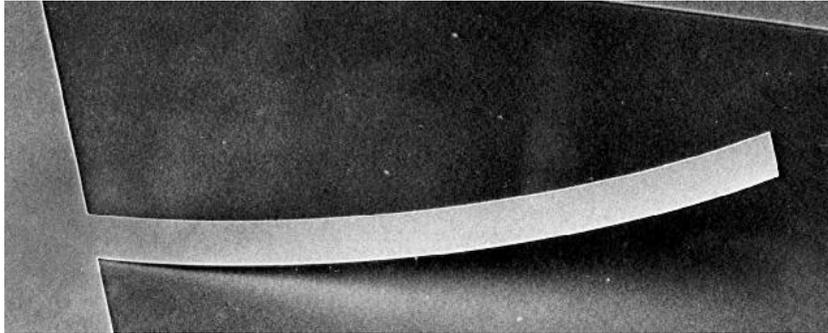
Corrosão da camada de sacrifício



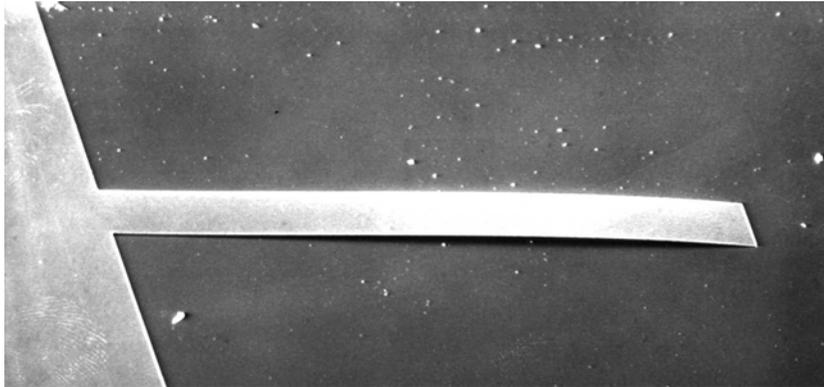
# Materiais para micromaquinagem superficial

- Estrutura/ sacrifício/ corrosivo
- Polissilício/ Dióxido de Silício / HF
- Dióxido de Silício / Polissilício / XeF<sub>2</sub>
- Alumínio/ photoresist/ plasma
- Photoresist/ Alumínio / corrosão de Al
- Alumínio / SCS EDP, TMAH, XeF<sub>2</sub>
- Poly-SiGe poly-SiGe água DI

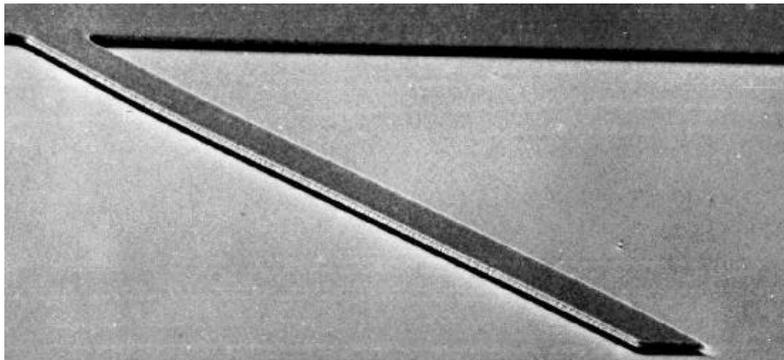
# Gradientes de stress residual



Mais tenso no topo



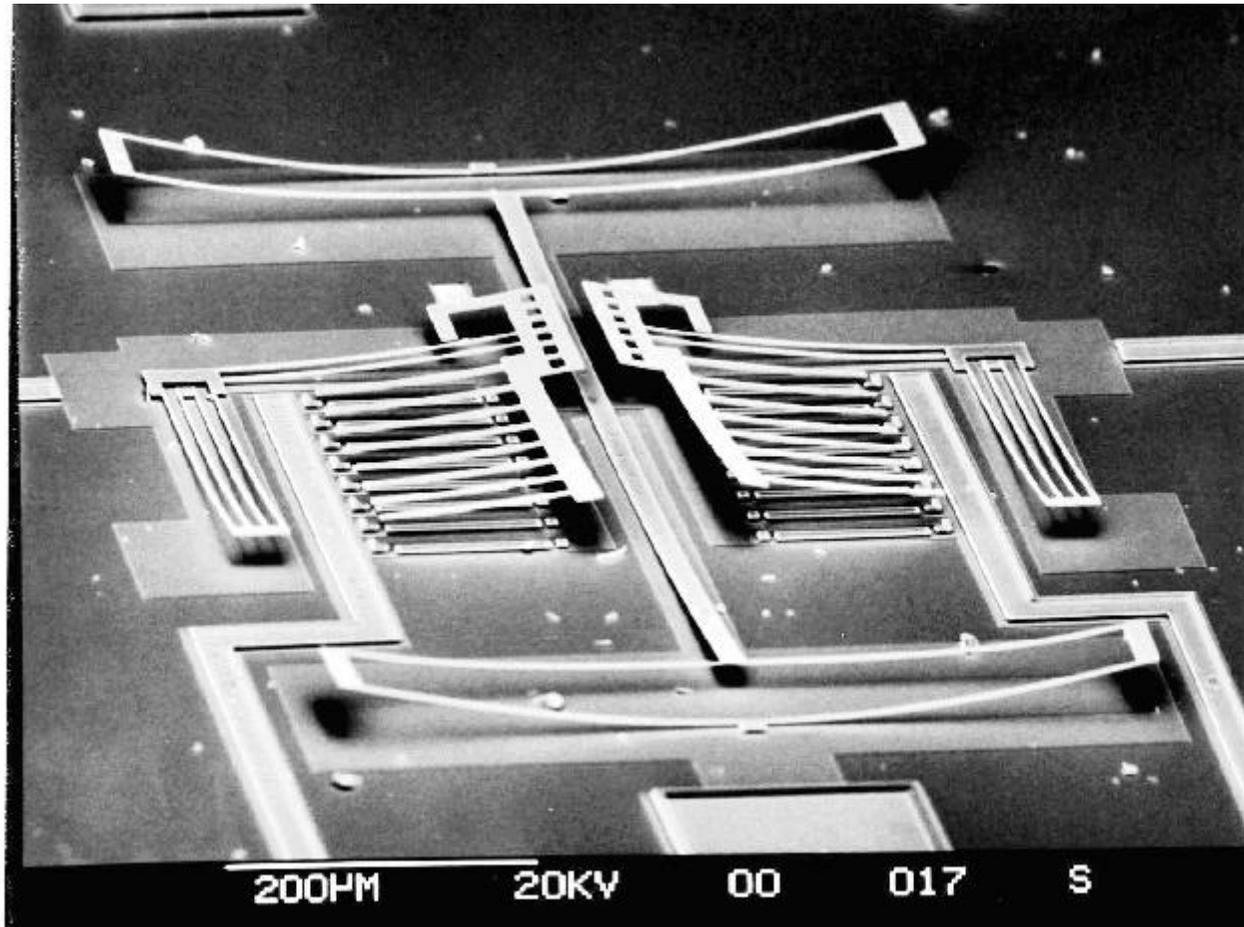
Mais compressivo no topo



Medida certa!

Após recozedura  $\sim 1000\text{C}$  durante  
 $\sim 60$ .

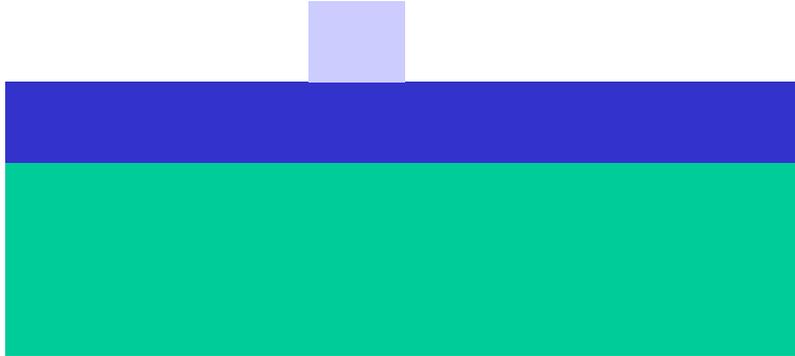
# Gradientes de stress residual



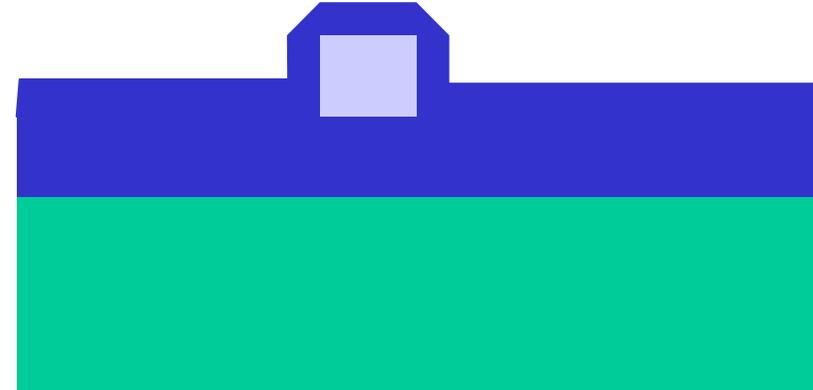
Um mau dia!

# Dobradiças

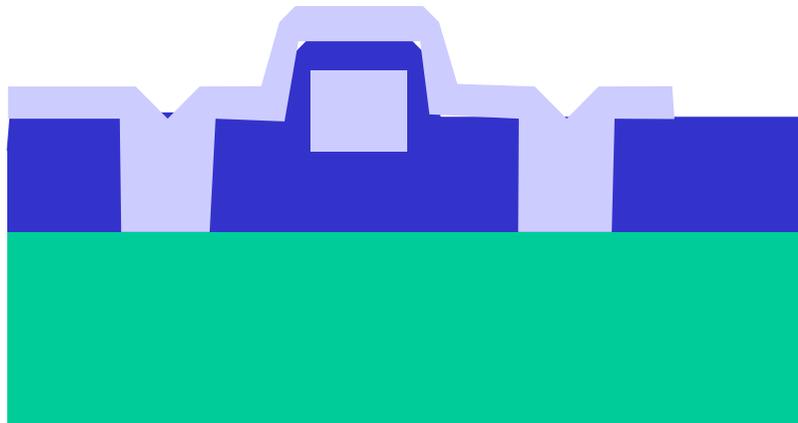
Deposição da camada de sacrifício  
Deposição e padronização da poly



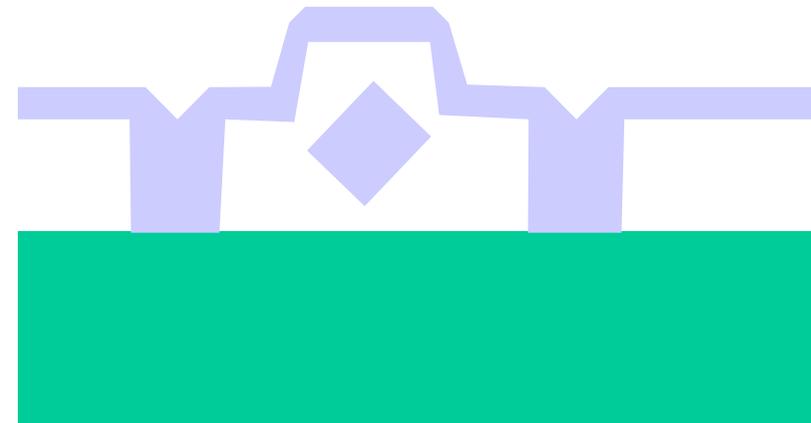
Depositar e padronizar a 2ª  
camada de sacrifício



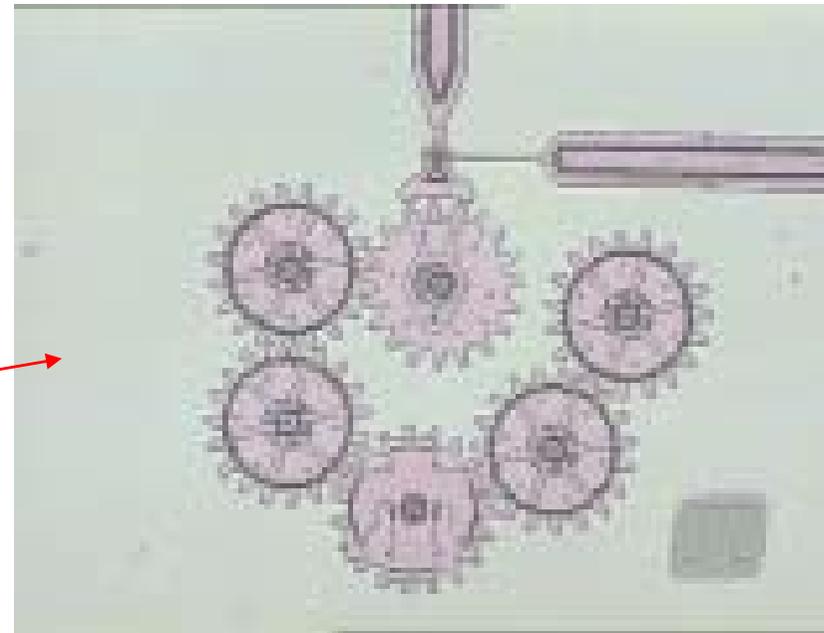
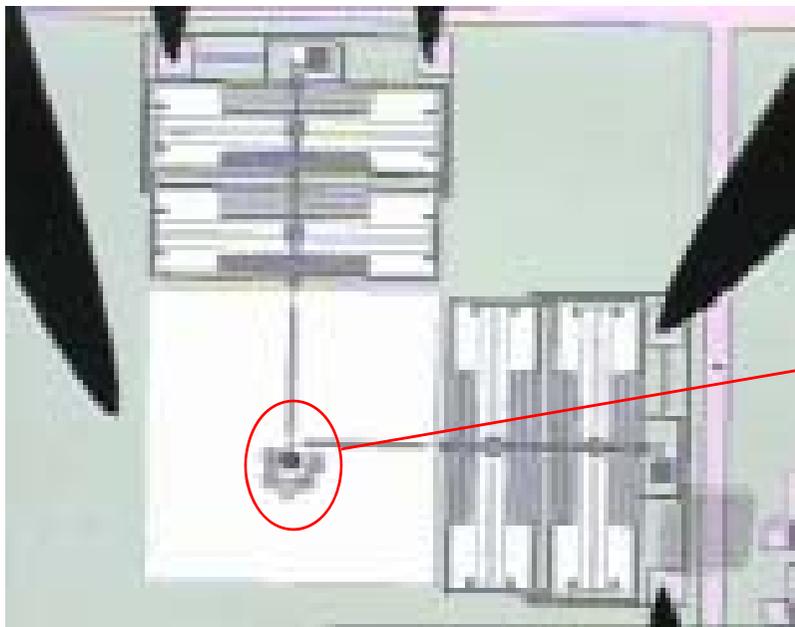
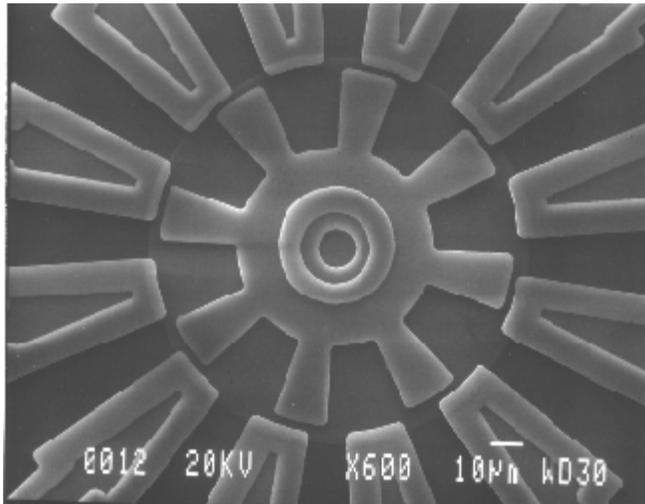
Padronizar contactos  
Depositar e padronizar 2ª poly



Remover a camada de sacrifício



# *Surface micromachining*



# DRIE

Geometrias sem restrição



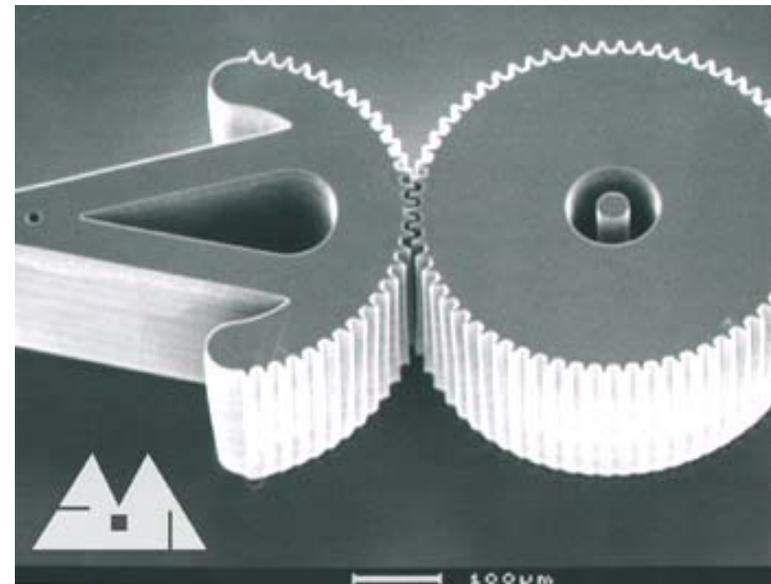
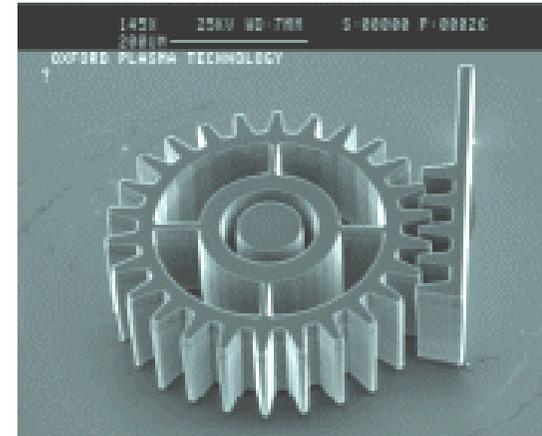
Paredes a 90°

Elevada relação de aspecto 1:30

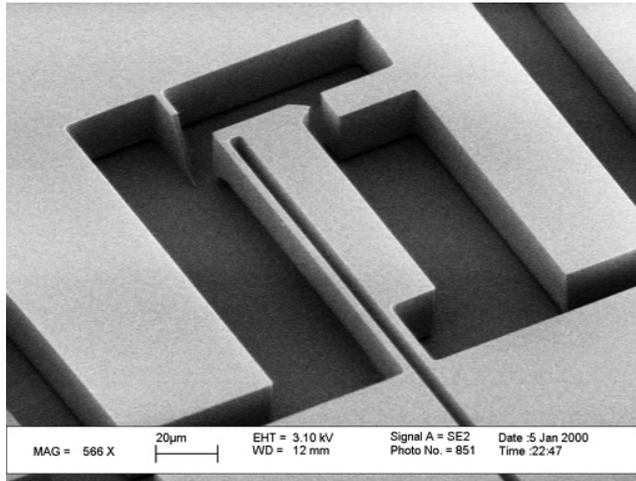
Máscara fácil (PR, SiO<sub>2</sub>)



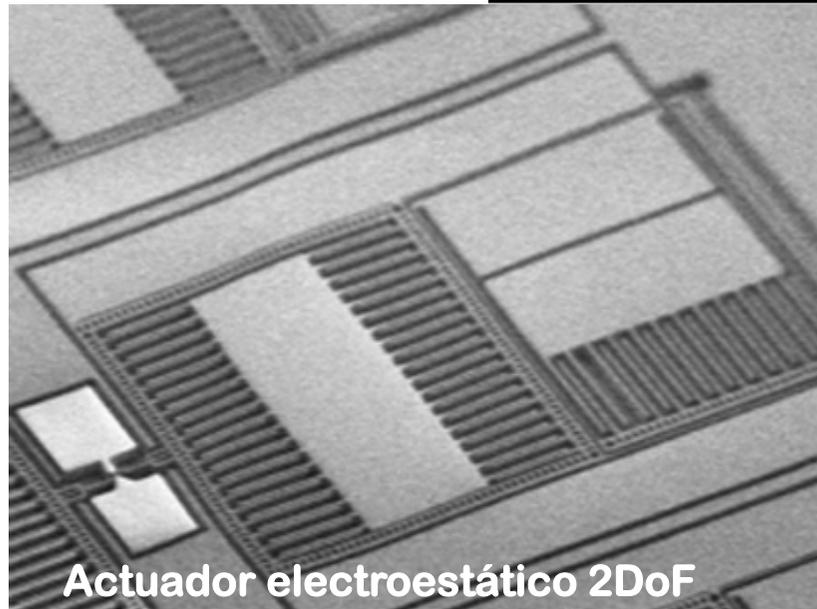
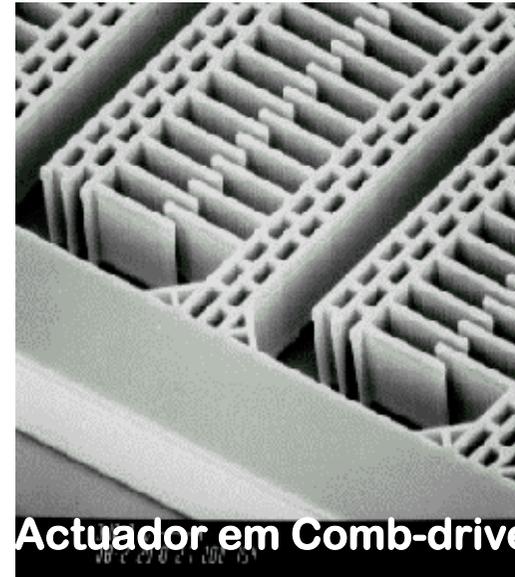
Receita do processo depende da geometria



# Estruturas DRIE



**Actuador térmico**



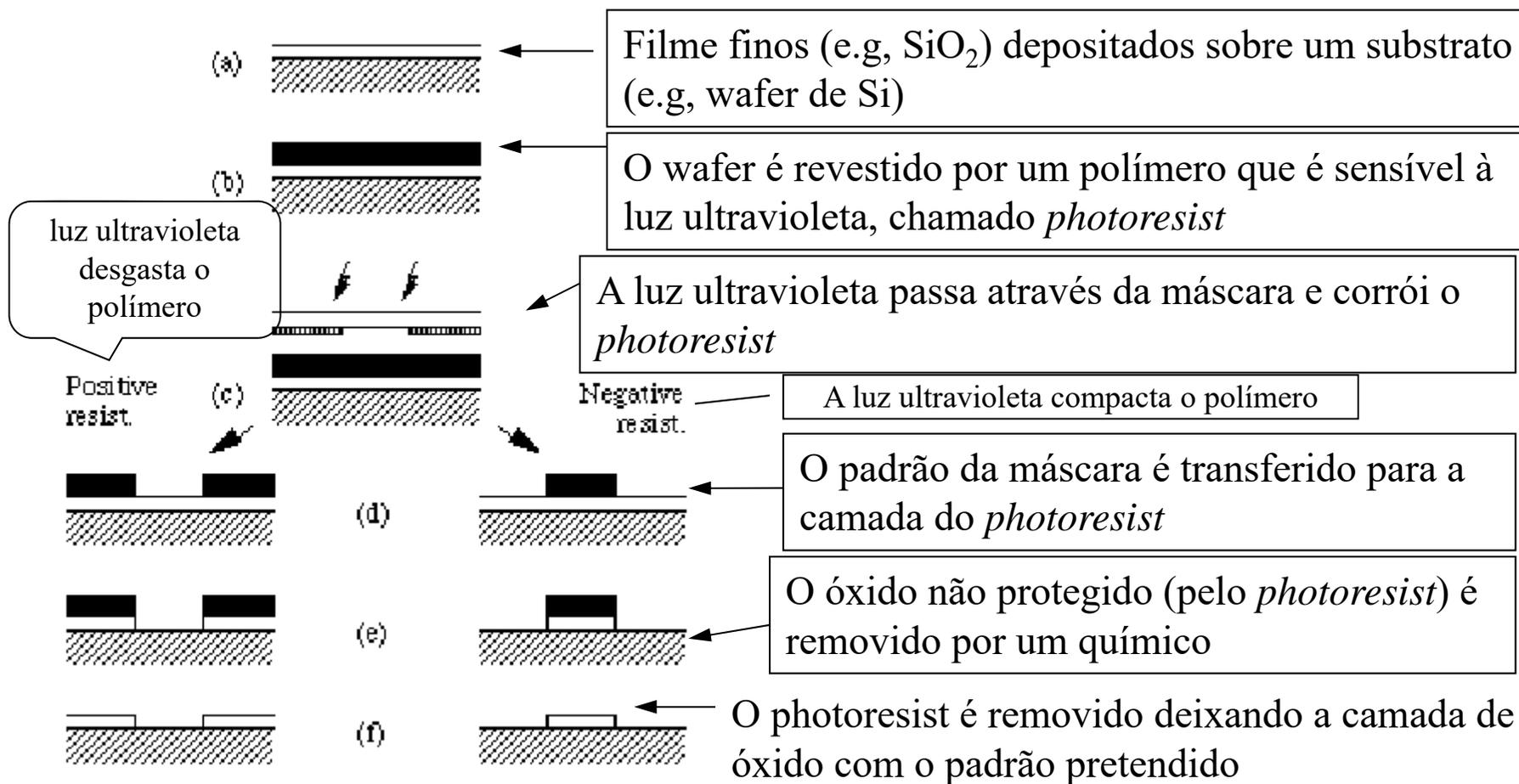
# Técnicas de *wafer bonding*

- Usam-se técnicas de colagem e adesão para wafers e/ou *dies*:
  - entre wafers micromaquinados e pequenos *dies*,
  - entre *dies* e substratos,
  - para formar dispositivos complexos com maior quantidade de elementos.
  - muito usado em *Multi-Chip-Module*, combinando circuitos, sensores e actuadores num mesmo substrato ou *die*.

# Fotolitografia na micromaquinagem

- Técnica usada para definir a forma das estruturas a micromaquinar
- Uso da mesma técnica que na indústria da microelectrónica
- Em alguns casos usa-se como máscara o  $\text{SiO}_2$  ou  $\text{Si}_3\text{N}_4$  em vez de *photoresist*

# Fotolitografia na micromaquinagem



# Micromaquinagem do silício

- técnicas para:
  - moldar e/ou criar padrões nos filmes finos que foram depositados sobre um wafer de silício
  - mudar a forma do wafer,
  - criar microestruturas 3D básicas.
- técnicas associadas com a micromaquinagem do silício:
  - deposição de filmes finos,
  - remoção de materiais e filmes finos recorrendo à corrosão química,
  - remoção de materiais e filmes finos por corrosão a seco (e.g, corrosão por plasma)
  - introdução de impurezas no silício, modificando as suas propriedades (i.e, doping).

# Corrosão química

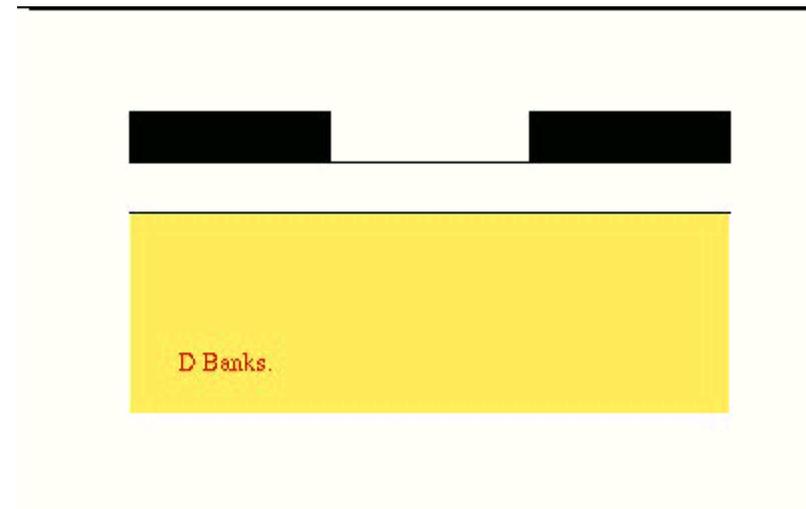
- Quando o *photoresist* não é suficientemente resistente para suportar a corrosão química
    - Um filme fino de material mais resistente (e.g, óxido ou nitrato) é depositado e padronizado usando fotolitografia.
    - O óxido/nitreto então actua como máscara quando se dá a corrosão do material pretendido
- Quando a corrosão do material está completa o óxido/nitrato que serviu de máscara é removido.

# Corrosão química em solução aquosa

- Remoção de materiais em solução aquosa química recorrendo a uma base ou ácido forte.
  - Corrosão isotrópica
    - a corrosão processa-se em todas as direcções e à mesma taxa
  - Corrosão anisotrópica
    - A corrosão processa-se a diferentes taxas de corrosão em diferentes direcções. Permite a obtenção e controlo de várias formas.
    - Alguns compostos químicos corroem o silício a taxa diferentes que dependem da concentração das impurezas no silício.

# Corrosão química em solução aquosa

- *Químicos corrosivos isotrópicos*
  - Disponíveis para óxido, nitrato, alumínio, polisilício, ouro, e silício.
    - Ataca os materiais à mesma taxa em todas as direcções, corroem debaixo da máscara à mesma taxa que corroem ao longo do material.

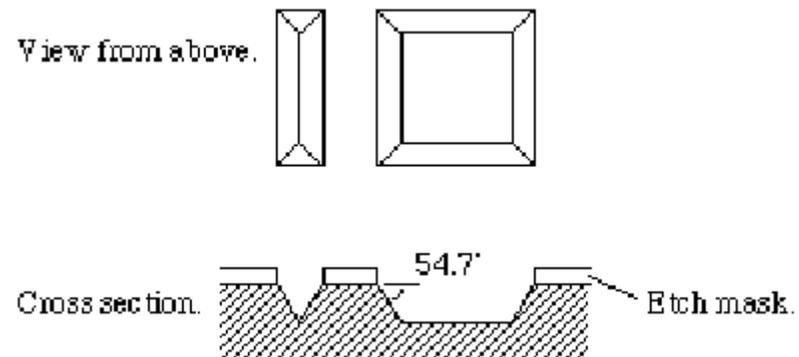


Na figura o *photoresist* é preto, e o substrato está representado a amarelo.

# Corrosão química em solução aquosa

- *Químicos corrosivos anisotrópicos*

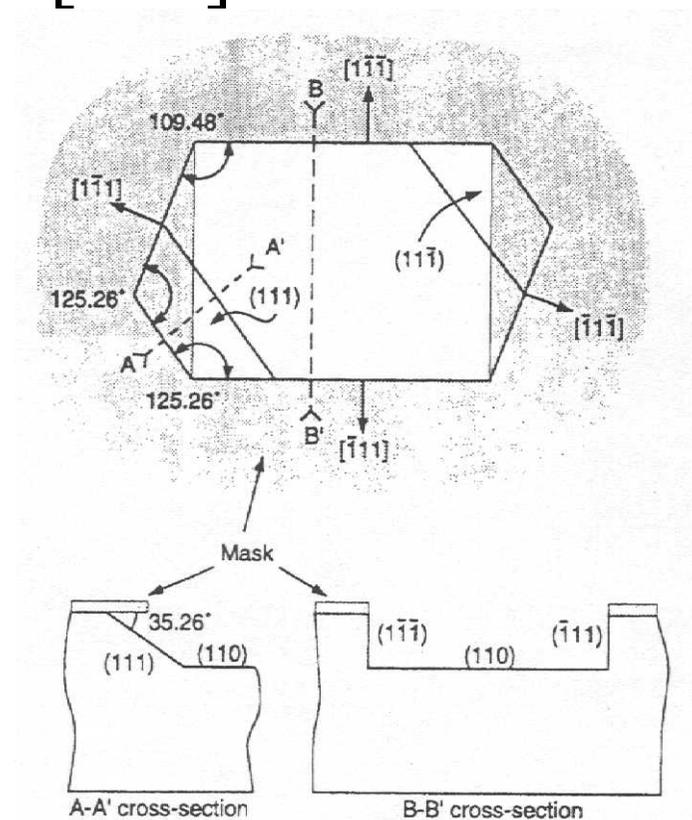
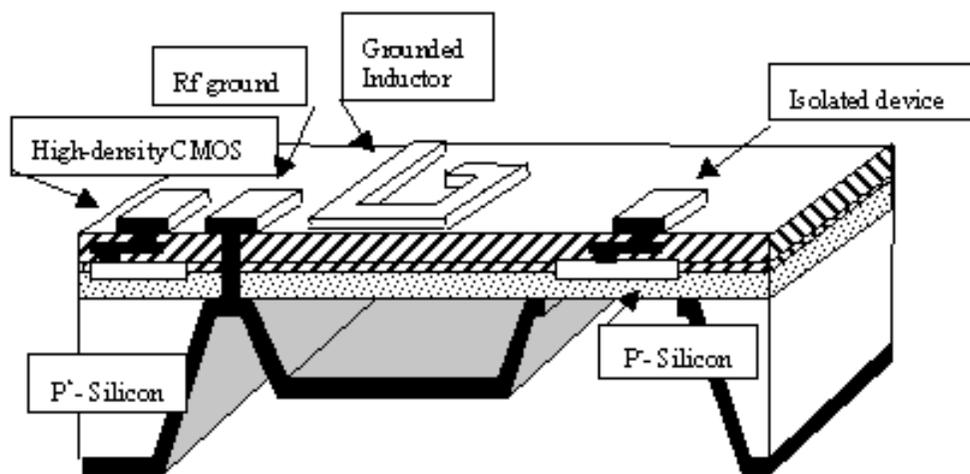
- Há vários compostos químicos no mercado disponíveis para corroer os diferentes planos do silício a diferentes taxas de corrosão.
- Hidróxido de potássio (KOH)
  - O mais popular e barato
  - Condições de segurança médias



- Aberturas em V no silício, inclinações segundo ângulos dependentes da orientação cristalina do silício.
- Wafer com orientação cristalina [100] dá origem a inclinações de 54,7°
- O uso de wafers com orientações cristalinas diferentes [110] produz aberturas em V e inclinações a 90° - paredes verticais.

# Corrosão química em solução aquosa

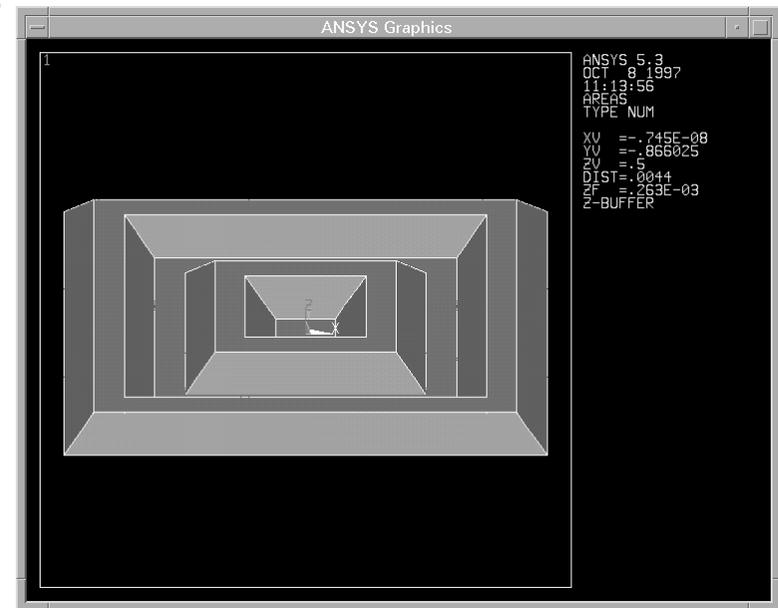
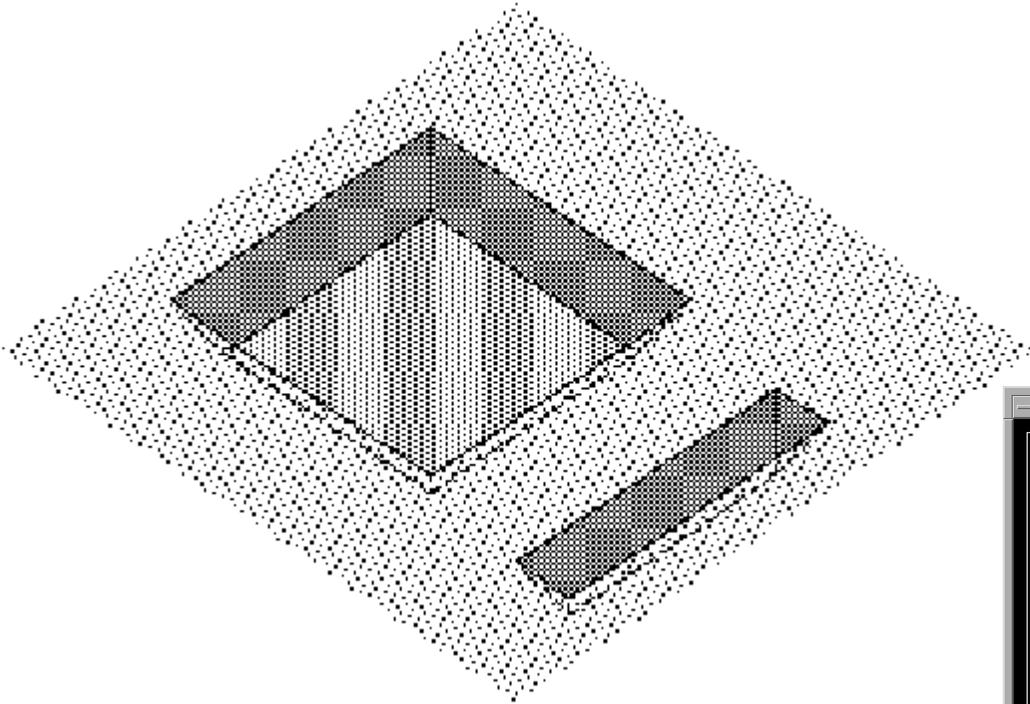
- KOH em RF-chips e wafers [110]



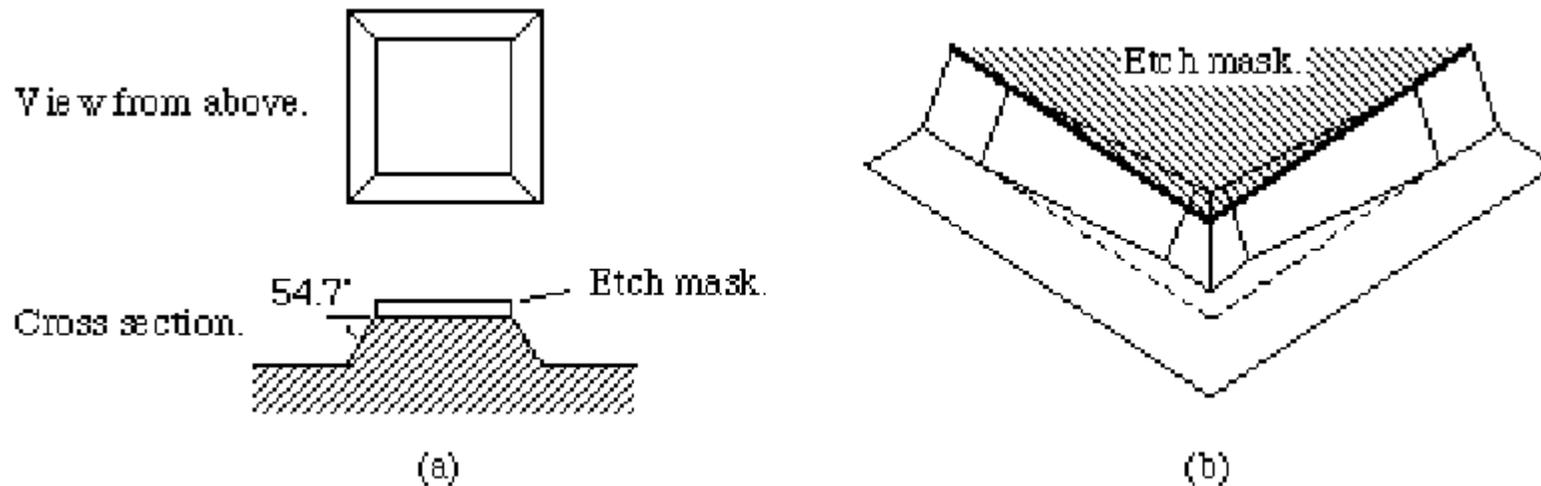
# Corrosão química em solução aquosa

- óxido e nitrato são pouco corroídos em soluções aquosas de KOH.
  - Óxido pode ser usado para máscara durante um curto período de tempo (i.e, para aberturas superficiais no silício)
  - Para longos períodos de tempo, o nitrato é a melhor máscara porque corrói mais devagar em soluções aquosas de KOH.
- *Corrosão dependente da concentração de impurezas*
  - Elevados níveis de boro no silício reduz drasticamente a taxa de corrosão.
  - Elevada concentração de boro a dopar o silício provoca a paragem da corrosão.

# *Corrosão química volúmica em solução aquosa (Bulk silicon micromachining)*

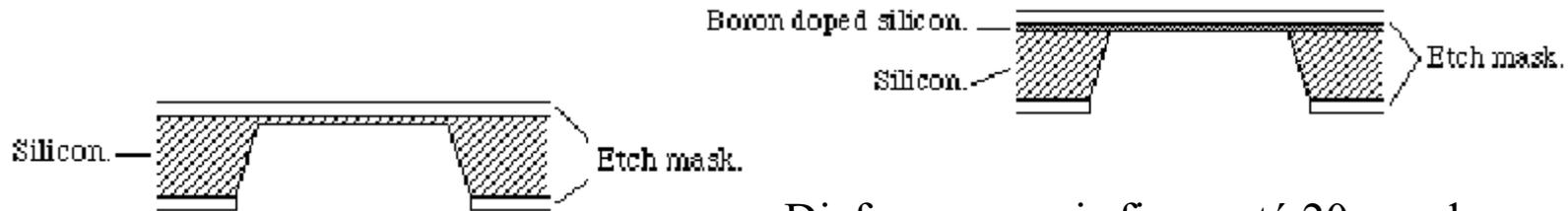


# *Bulk-silicon micromachining*



- KOH pode ser usado para obter estruturas com a forma de mesa (a).
- Os cantos das estruturas em forma de mesa podem ser corroídos mais do que o pretendido (b) obtendo-se cantos imperfeitos.
  - Este problema pode ser resolvido com estruturas de compensação. Tipicamente a máscara de corrosão é desenhada de maneira a incluir estas estruturas nos cantos. Estas estruturas de compensação são desenhadas de maneira a que a mesa é formada obtendo-se cantos a 90°.

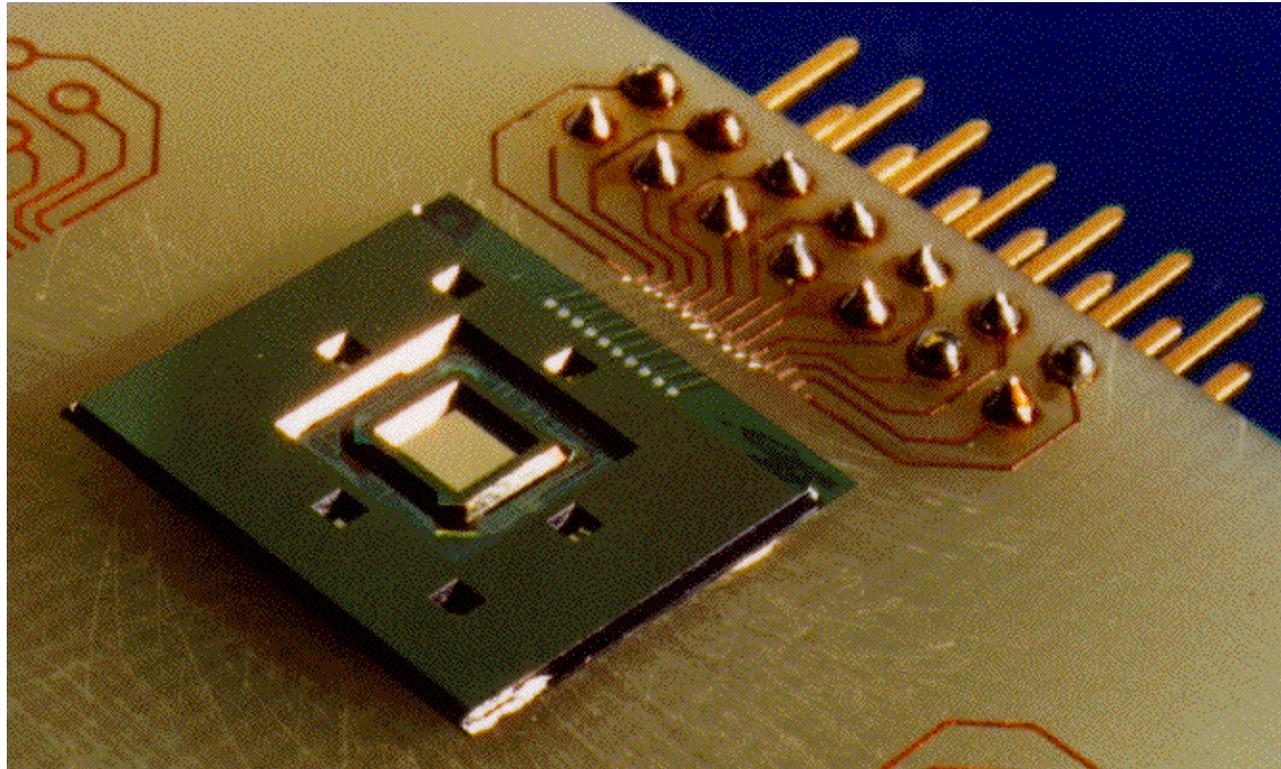
# *Bulk-silicon micromachining*



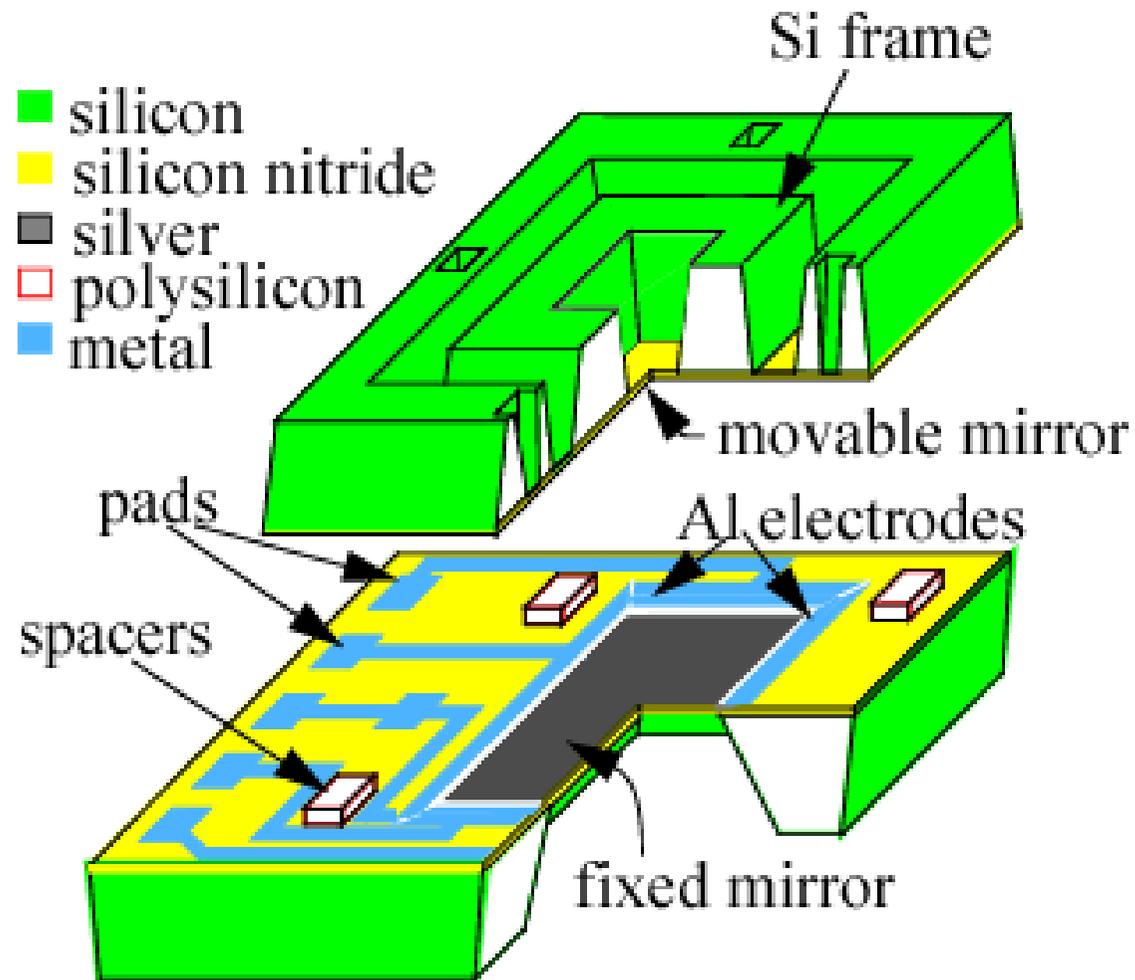
- Diafragmas em silício com a espessura de  $50\ \mu\text{m}$  podem ser obtidos em wafers de Si com a corrosão por KOH.
- A espessura é controlada pelo tempo que demora a corrosão, portanto tem um intervalo de incerteza associado
- Diafragmas mais finos, até  $20\ \mu\text{m}$  de espessura, podem ser produzidos usando a dopagem por Boro para fazer parar a corrosão por KOH
- A espessura do diafragma é dependente da profundidade à qual o Boro é difundido dentro do silício, neste processo o controle é mais preciso que o simples controle da corrosão por tempo.
- O diafragma de silício é a estrutura básica dos sensores de pressão.
  - Este micro-sensor de pressão pode ser adaptado com uma mesa sobre o diafragma para servir de acelerómetro.

## *Bulk-silicon micromachining*

- *Bulk-micromachined* micro-espectrómetro sintonizável para a luz visível



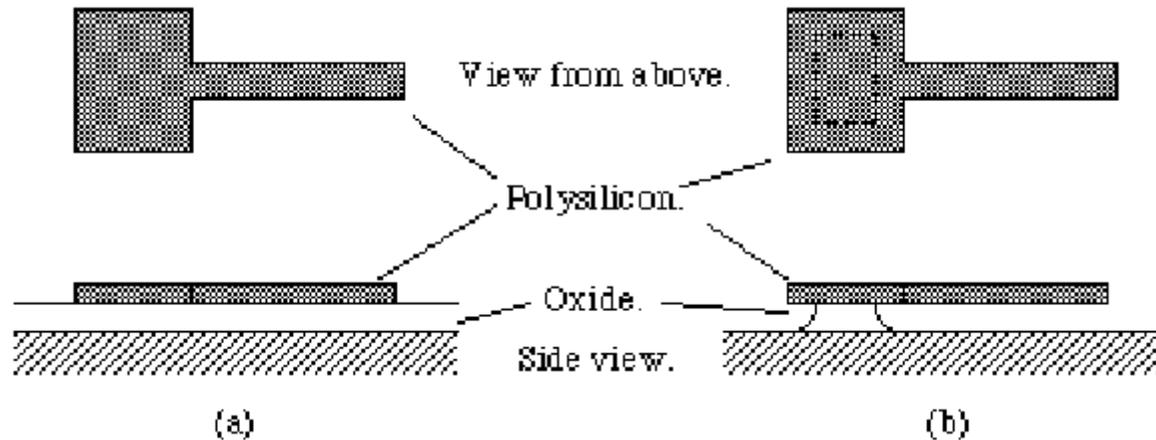
# Tunable microspectrometer



# Micromaquinagem superficial (*surface micromachining*)

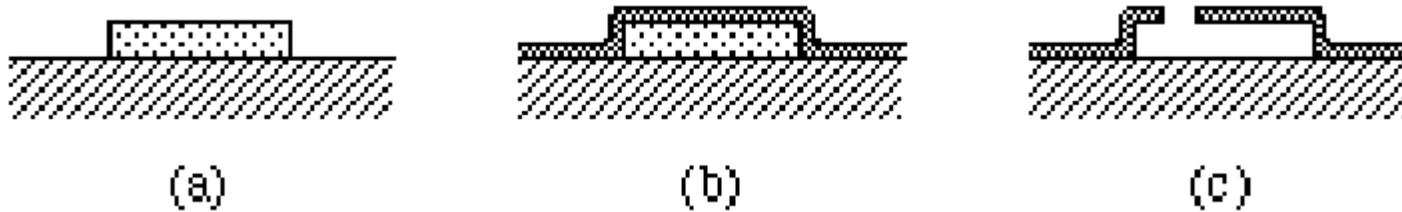
- As técnicas de micromaquinagem superficial constroem a estrutura em camadas de filmes finos sobre o substrato de silício ou outro substrato a servir de base.
- Tipicamente são empregues filmes de dois materiais diferentes
  - O material da estrutura (quase sempre polisilício)
  - O material de sacrifício (óxido).
    - Ambos os materiais são depositados e formatados.
    - No final o material de sacrifício é removido por corrosão química por solução aquosa de maneira a obter-se a estrutura pretendida.
    - Quanto maior o número de camadas, mais complexa é a estrutura e mais difícil se torna fabricá-la.

# Surface micromachining



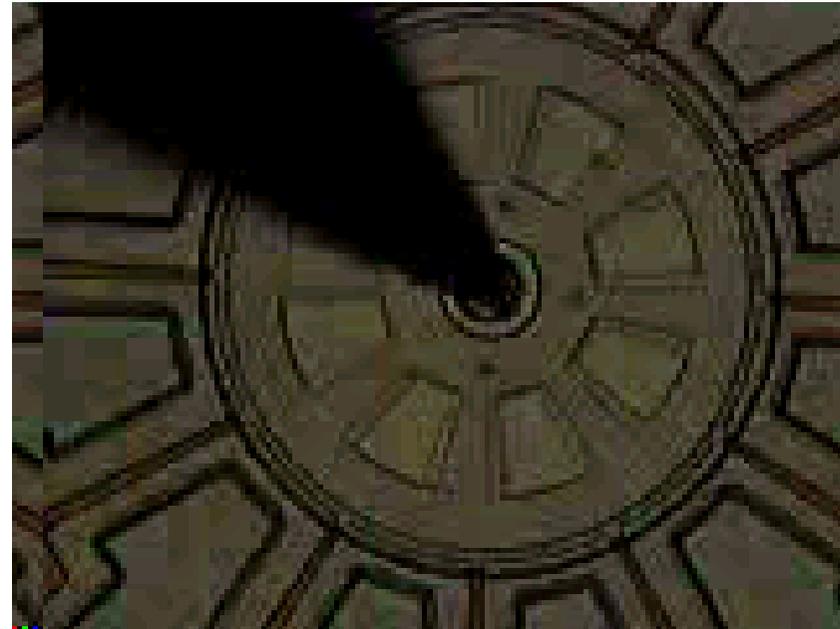
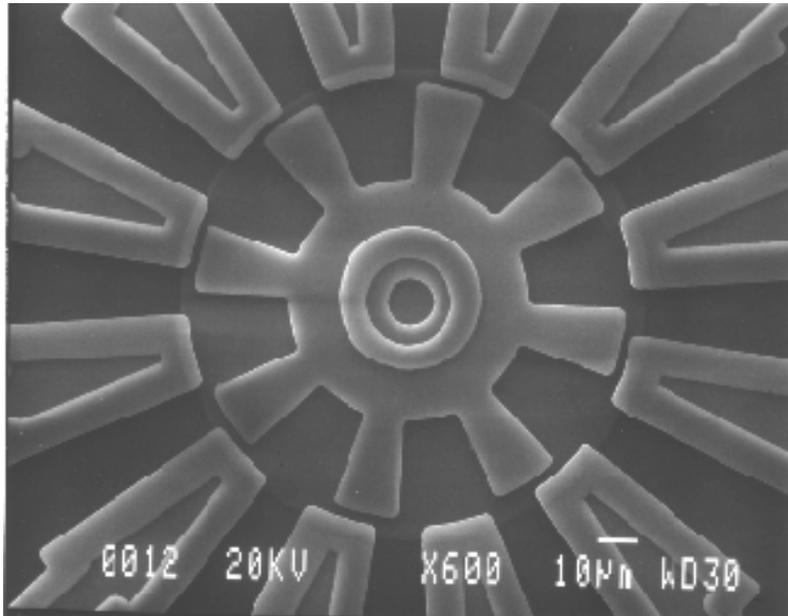
- Construção de uma prancha simples usando:
  - Uma camada de óxido é depositada na superfície do wafer.
  - Uma camada de polisilício é então depositado e padronizado utilizando técnicas de RIE.
  - O wafer é então atacado com um composto que corrói a camada de óxido debaixo do polisilício, libertando-o (b).
  - Porque o óxido não foi todo removido, fica ancorado o wafer ao polisilício por uma pequena parte de óxido.

# *Surface micromachining*



- Uma grande variedade de estruturas fechadas (quartos) podem ser fabricadas na superfície do wafer de silício utilizando as técnicas de *surface micromachining*.
  - o volume do quarto é definido pelo volume da camada de óxido que serve de camada sacrificial (a).
  - Uma camada de polisilício é então depositada sobre a superfície do wafer. (b).
  - Uma janela é aberta no polisilício por *RIE*, e o wafer é então submerso numa solução aquosa de HF que remove todo o óxido (c).
- *Surface micromachining* permite o fabrico de estruturas complexas; como micro-pinças e engrenagens

# *Surface micromachining*



**Harmónico Motor**

# Corrosão electroquímica do silício

- Técnica electroquímica de passivação
  - Um wafer do tipo p dopado com impurezas do tipo n é usado
  - A dopagem é realizada de forma a que se obtenha uma junção pn
  - A junção vai determinar a estrutura pretendida.
  - Um potencial eléctrico é aplicado à junção durante o tempo que o wafer é submerso na solução aquosa de KOH para se iniciar a corrosão química.
  - Quando a corrosão chega à junção uma fina camada de óxido forma-se a qual protege esta região da corrosão química.

## Corrosão electroquímica do silício

- É muito similar à dopagem com Boro para parar a corrosão química (corrosão dependente da concentração de impurezas).
  - As estruturas produzidas são muito parecidas com aquelas produzidas pela técnica de paragem por doping elevado com Boro.
  - A vantagem deste método é necessitar de baixas concentrações de impurezas.
    - Este método é mais compatível com o fabrico de microelectrónica.

# Corrosão a seco

- *Reactive Ion Etching (RIE)*

- Os iões são acelerados contra um material corroendo-o.

- Aberturas profundas com diferentes formas e com paredes verticais podem ser obtidas com esta técnica numa grande variedade de materiais incluindo o silício, óxido e nitrato.
    - Ao contrário da corrosão química aquosa anisotrópica, *RIE* não é afectado pela orientação cristalina do silício.

# Técnicas de *wafer bonding*

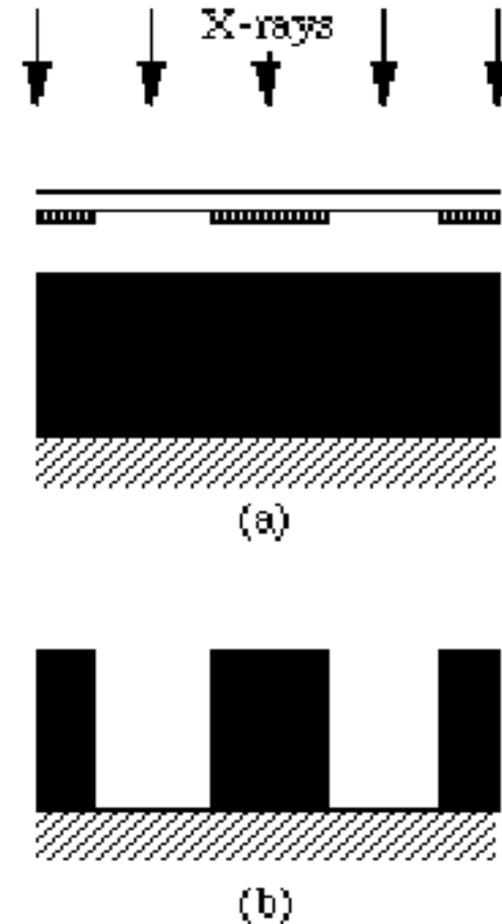
- Usam-se técnicas de colagem e adesão para wafers e/ou *dies*
  - entre wafers micromaquinados e pequenos *dies*,
  - entre *dies* e substratos,
  - para formar dispositivos complexos com maior quantidade de elementos.
  - muito usado em *Multi-Chip-Module*, combinando circuitos, sensores e actuadores num mesmo substrato ou *die*.

# *LIGA*

- *LIGA* é um acrónimo do nome em alemão para o processo (*Lithographie, Galvanoformung, Abformung*).
- *LIGA* usa litografia, cromagem, e moldagem para fabricar as micro-estruturas.
  - É capaz de criar com elevada resolução muito finas estruturas com alturas de 1 mm ou mais (pilares ou colunas).

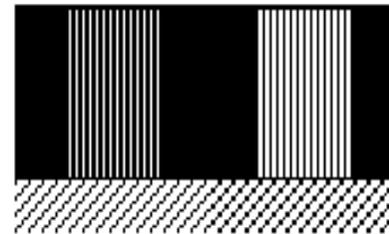
# Processo *LIGA*

- usando raios-X (litografia de raios-X) produz-se padrões em filmes de *photoresist* muito espessos:
  - Os raios-X (precisa-se de uma fonte de raios-X suave, *synchrotron*) passam através de uma máscara especial e de uma camada espessa de *photoresist* que cobre o substrato.
  - Este *photoresist* é então revelado (b).

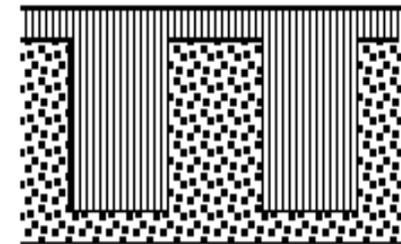


# Processo *LIGA*

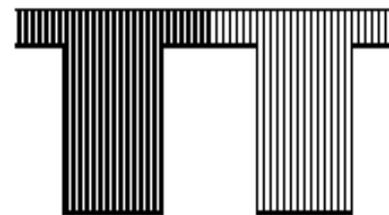
- O padrão formado é então metalizado. (c).
- Esta estrutura em metal costuma ser o produto final, contudo é comum produzir um molde de metal (d).
- Este molde pode então ser enchido com outro material como por ex: plástico (e) para produzir o produto final neste material (f).



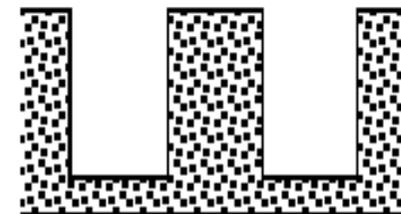
(c)



(e)



(d)



(f)

# LIGA

- O uso do *synchrotron* torna o processo *LIGA* muito caro
  - Alternativas têm sido desenvolvidas
    - Um feixe de electrões colimado pode ser usado para fabricar estruturas na ordem dos 100  $\mu\text{m}$  de altura.
    - Laser capaz de definir estruturas até várias centenas de micrómetros de altura.

- Evaporação,  $< 100$  Pa
- Sputtering,  $< 10^{-4}$  Pa
- CVD,  $< 10^{-5}$  Pa
- 1 bar=0,98 atm
- 1 mbar=100 Pa
- sccm, standard cubic centimeter per minute
- Raio do átomo de Al=0,143 nm=1,43 Angstrom