

A micromaquinagem no silício

Estrutura da aula

1 - Micromaquinagem no silício

2 – Processos de fabrico

(a) Micromaquinagem volúmica

- Isotrópica

- Anisotrópica

(b) Micromaquinagem em superfície

(c) LIGA

(d) RIE

3 – Técnicas de deposição de filmes finos (FF)

Micromaquinagem

- Um grande número de fenómenos 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

- 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).

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

Corrosão química em solução aquosa Na micromaquinagem volúmica

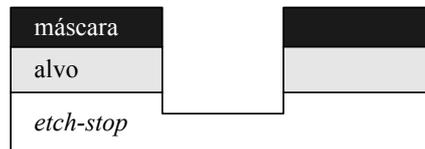
- Remoção de materiais em solução aquosa química recorrendo a uma base ou ácido forte.
 - Corrosão isotrópica
 - a corrosão processa-se em todas as direcções e à mesma taxa
 - Corrosão anisotrópica
 - A corrosão processa-se a diferentes taxas de corrosão em diferentes direcções. Permite a obtenção e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

Corrosão com KOH

- Corrói PR e alumínio instantaneamente
- Máscaras:
 - SiO₂
 - Stress compressivo
 - SiN
 - Stress tensão

Aspectos da corrosão - Selectividade

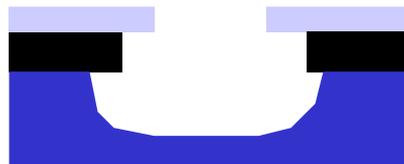
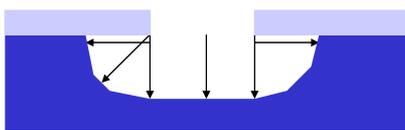
- A selectividade é a relação entre a taxa de corrosão do material alvo e a taxa de corrosão dos outros materiais
- A corrosão química é geralmente mais selectiva do que corrosão por plasma
- A selectividade para o material da máscara e para os materiais *etch-stop* é importante



Aspectos da corrosão - Anisotropia

- Corrosivos isotrópicos removem a mesma taxa em todas as direcções

Isotrópico



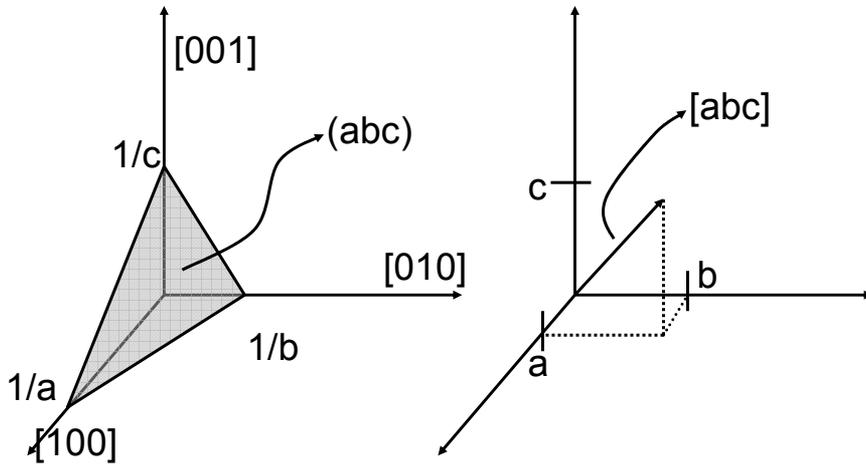
máscara



Anisotrópico



Índices de Miller



Corrosão anisotrópica do silício

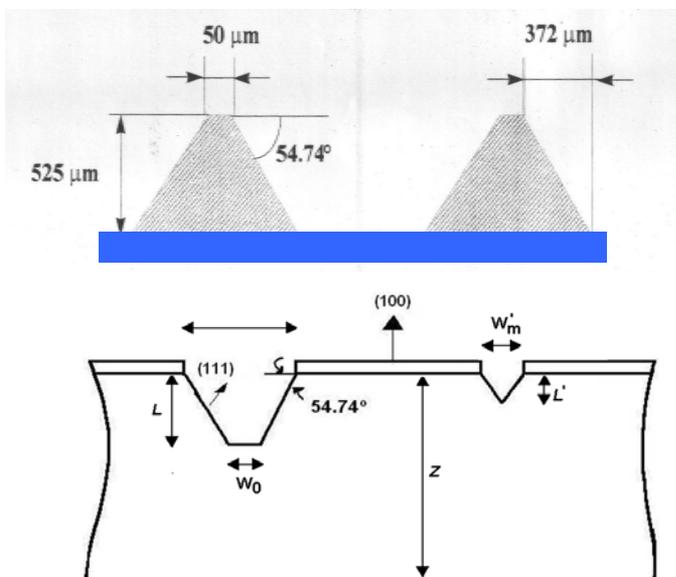
- Muitos dos corrosivos líquidos apresentam uma taxa de corrosão diferente para direcções diferentes
 - $[111]$ *etch rate* é a mais lenta, $[100]$ e $[110]$ mais rápida
 - Rápida:lenta pode ser mais de 400:1
 - KOH, EDP, TMAH são os corrosivos anisotrópicos mais comuns para o silício
- Corrosivos isotrópicos do silício
 - HNA (Hydrofluoric acid + Nitric acid + Acetic acid)
 - HF, ácidos nítricos e acético
 - Duro de utilizar
 - XeF₂, BrF₃

Corrosão anisotrópica do silício

- *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

- Projeções lateral e superior após a corrosão anisotrópica num *wafer* tipo [100]

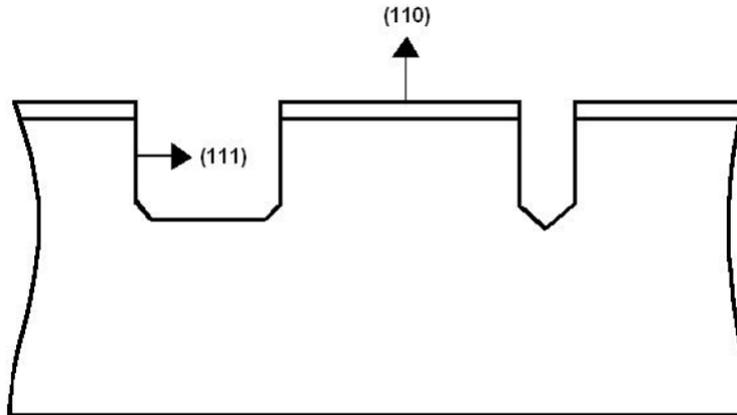


Corrosão anisotrópica do silício

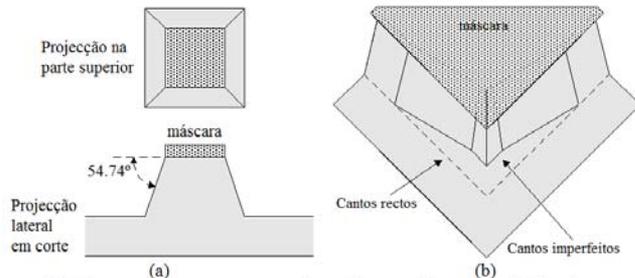
- Corrosão anisotrópica nos *wafers* do tipo [110]

(a) Estruturas com paredes verticais

(b) Observado de lado: os planos (110) e (111) são ortogonais



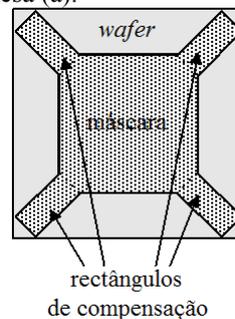
Corrosão anisotrópica do silício



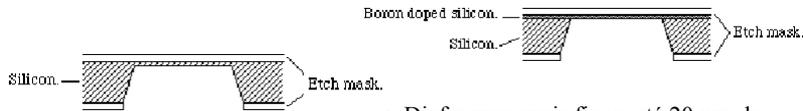
(a) Obtenção de uma estrutura em forma de mesa, (b) cantos mal definidos.

- KOH pode ser usado para obter estruturas com a forma de mesa (a).
- Os cantos das estruturas em forma de mesa podem ser corroidos mais do que o pretendido (b) obtendo-se cantos imperfeitos.

- (1) A máscara de corrosão é desenhada de maneira a incluir estas estruturas nos cantos.
- (2) As estruturas de compensação são desenhadas de maneira a que a mesa é formada obtendo-se cantos a 90°.



Corrosão anisotrópica do silício

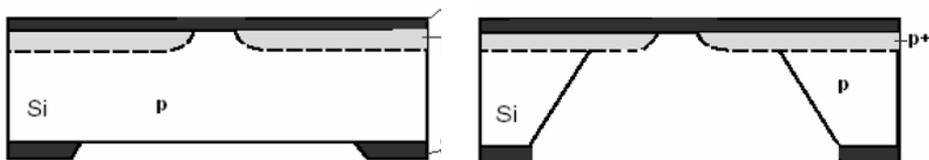


- Diafragmas em silício com a espessura de 50 μm podem ser obtidos em wafers de Si com a corrosão por KOH.
- A espessura é controlada pelo tempo que demora a corrosão, portanto tem um intervalo de incerteza associado

- Diafragmas mais finos, até 20 μm 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.

Corrosão anisotrópica do silício

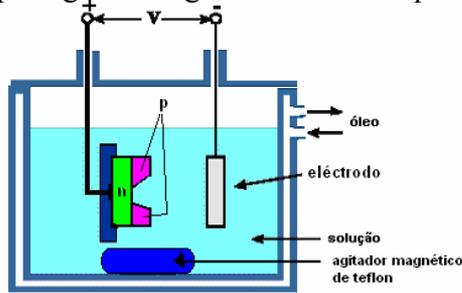
- **Técnica da barreira dopada p+**
- É muito similar à dopagem com boro para parar a corrosão química (corrosão dependente da concentração de impurezas).
 - As estruturas produzidas são muito parecidas com aquelas produzidas pela técnica de paragem por doping elevado com boro.
 - A vantagem deste método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



Corrosão electroquímica do silício

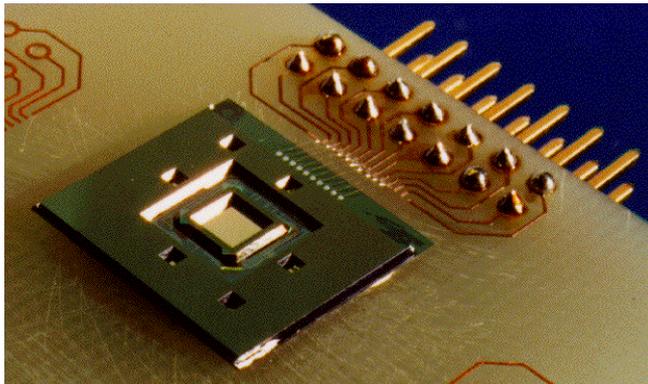
• Técnica da tensão de polarização

- 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.



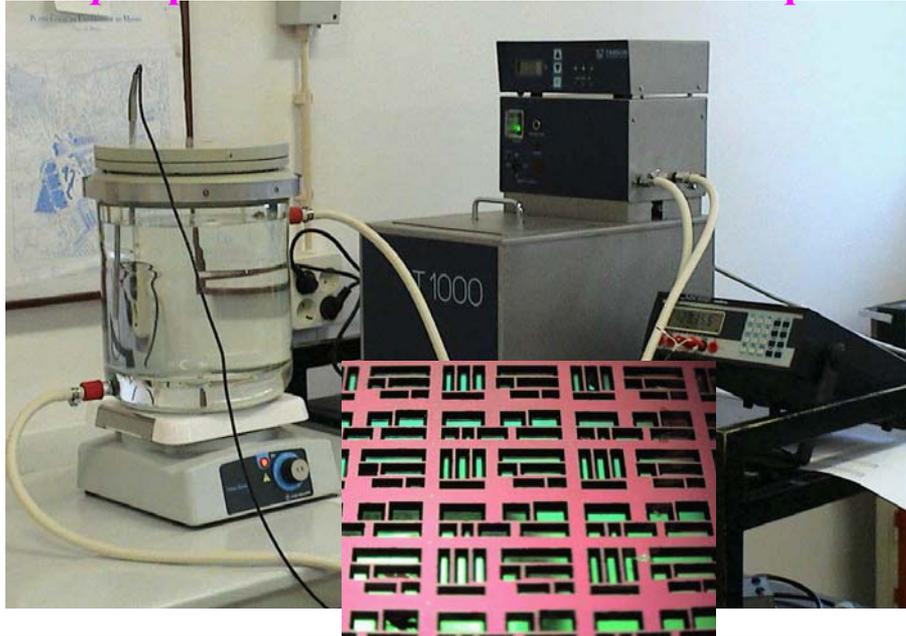
Bulk-silicon micromachining **Micromaquinagem volúmica** **Corrosão anisotrópica do silício**

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



Corrosão anisotrópica do silício com KOH

Setup experimental e estruturas micromaquinadas



Micromaquinagem superficial

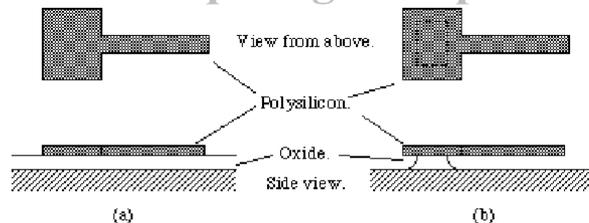
Surface micromachining

- 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 polissilício)
 - 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.

Materiais para micromaquinagem superficial

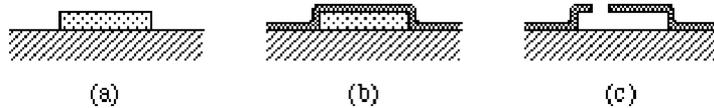
• Estrutura/	Sacrifício/	Corrosivo
• Polissilício/	Dióxido de Silício /	HF
• Dióxido de Silício /	Polissilício /	XeF ₂
• Alumínio/	photoresist/	plasma
• Photoresist/	Alumínio /	corrosão de Al
• Alumínio /	SCS	EDP, TMAH, XeF ₂
• Poly-SiGe	poly-SiGe	água DI

Micromaquinagem superficial



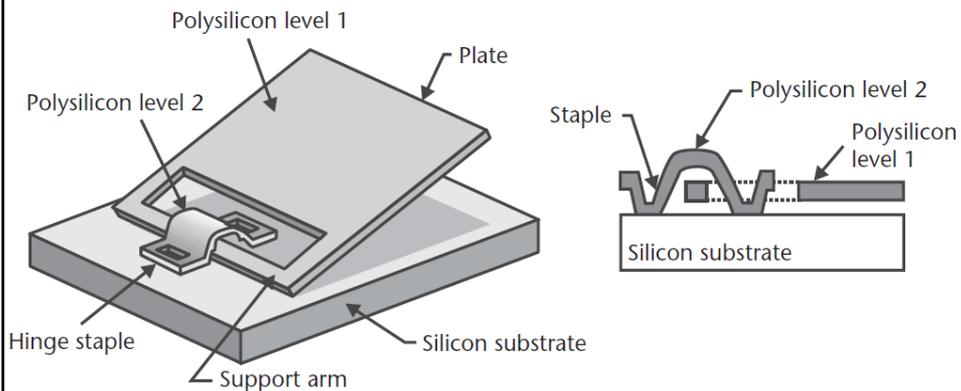
- Construção de uma prancha simples usando:
 - Uma camada de óxido é depositada na superfície do wafer.
 - Uma camada de polissilício é então depositado e padronizado utilizando técnicas de RIE.
 - O wafer é então atacado com um composto que corrói a camada de óxido debaixo do polissilício, libertando-o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

Micromaquinagem superficial

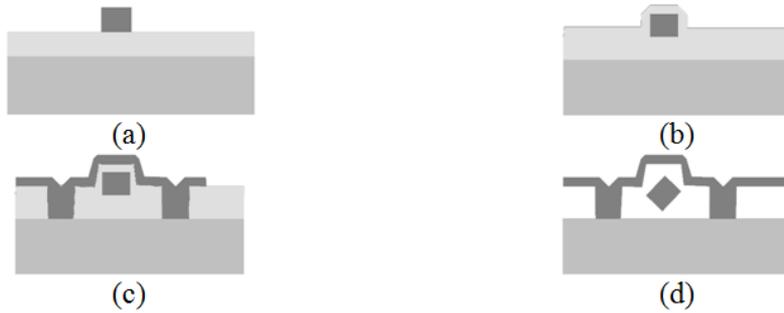


- Uma grande variedade de estruturas fechadas (quartos) podem ser fabricadas na superfície do wafer de silício utilizando as técnicas de *surface micromachining*.
 - o volume do quarto é definido pelo volume da camada de óxido que serve de camada sacrificial (a).
 - Uma camada de polisilício é então 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

Micromaquinagem superficial

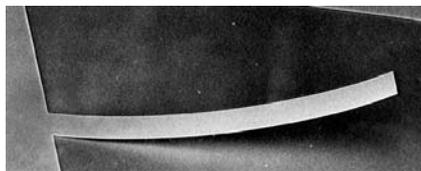


Micromaquinagem superficial

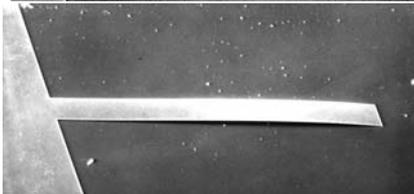


- (a) Deposição da camada de sacrifício e padronização da camada em polissilício.
- (b) deposição e padronização da segunda camada de sacrifício.
- (c) Padronização dos contactos, deposição e padronização da segunda camada de polissilício.
- (d) Remoção da camada de sacrifício.

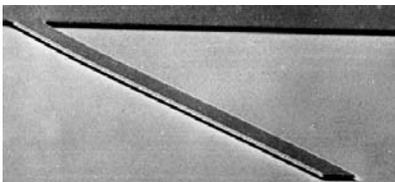
Gradientes de stress residual



Stress compressivo

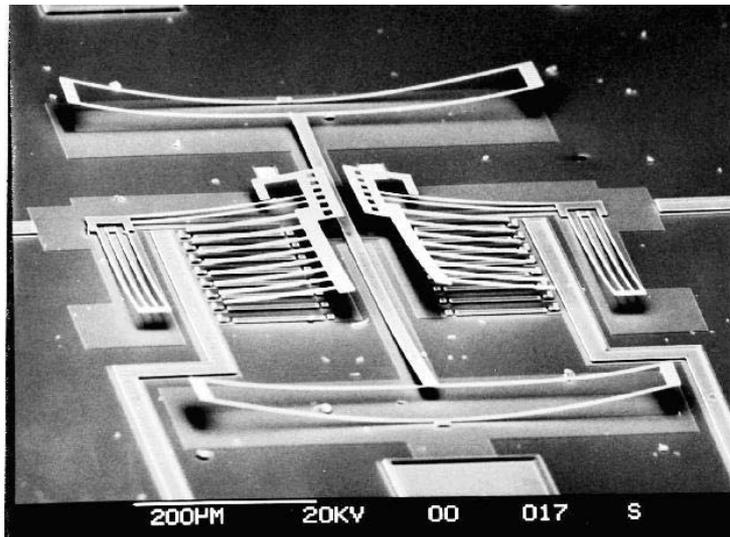


Stress em tensão



Após annealing

Gradientes de stress residual

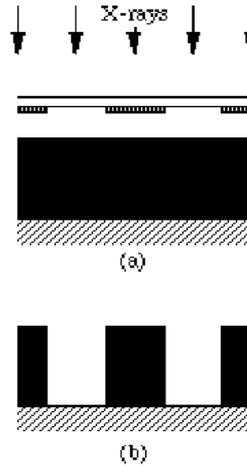


O processo LIGA

- *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).

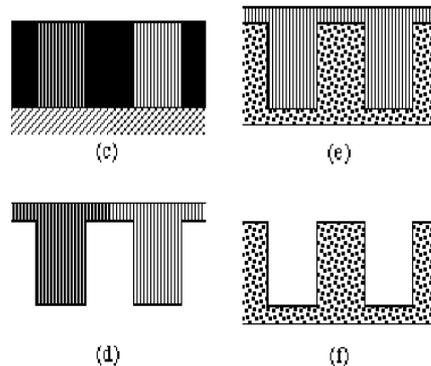
O processo LIGA

- 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).



O 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).



O processo LIGA

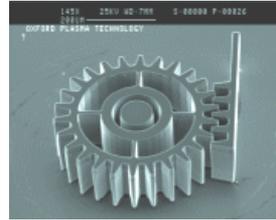
- O uso do *synchrotron* torna o processo *LIGA* muito caro
 - Alternativas têm sido desenvolvidas
 - Um feixe de electrões colimado pode ser usado para fabricar estruturas na ordem dos 100 μm de altura.
 - Laser capaz de definir estruturas até várias centenas de micrómetros de altura.

Corrosão a seco

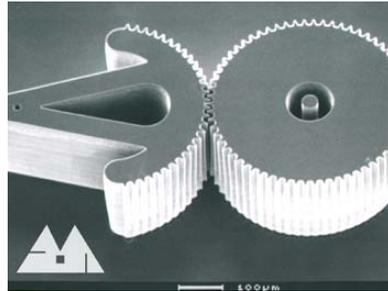
- *Reactive Ion Etching* (RIE)
 - Os iões são acelerados contra um material corroendo-o.
 - Aberturas profundas com diferentes formas e com paredes verticais podem ser obtidas com esta técnica numa grande variedade de materiais incluindo o silício, óxido e nitrato.
 - Ao contrário da corrosão química aquosa anisotrópica, *RIE* não é afectado pela orientação cristalina do silício.

DRIE

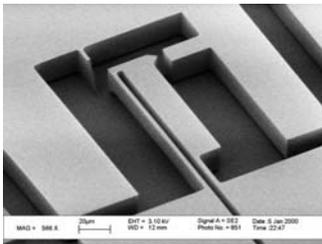
- ☺ - Geometrias sem restrição
- Paredes a 90°
- Elevada relação de aspecto 1:30
- Máscara fácil (PR, SiO₂)



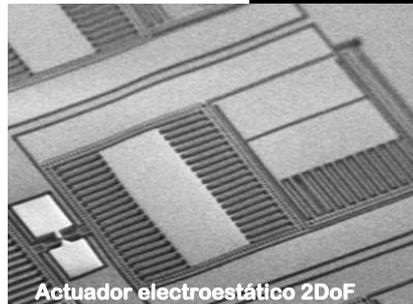
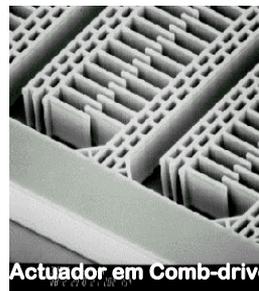
- ☹ - A receita do processo depende da geometria



Estruturas DRIE

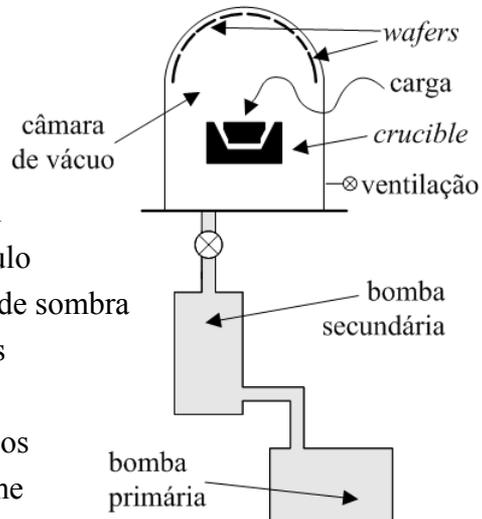


Actuador térmico



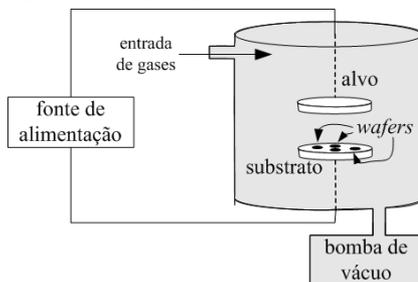
Deposição de filmes finos por evaporação

- Aquece-se um material (*load*) até atingir altas temperaturas e evaporar
- Necessita de vácuo elevado para evitar a oxidação dos FF
- Qualquer metal pode ser depositado por evaporação
- Problemas em depositar materiais compostos por mais que um elemento
- É possível obter filmes multicamada por evaporação sequencial
- Evaporar segundo um único ângulo potencia o aparecimento de zonas de sombra e a existência de zonas descobertas (nos cantos e paredes laterais)
- Rodando a face do *wafer* em vários ângulos torna o filme mais uniforme



Deposição de filmes finos por *sputtering*

- Uma câmara de vácuo é usada: 10^{-6} mbar tipicamente



Sputtering = Pulverização catódica

- Normalmente é usado um gás inerte (árgon) para produzir plasma
- Um fluxo de iões proveniente do gás inerte colidem com o material (alvo - *target*) soltando partículas que irão projectar-se no substrato, formando o filme fino desse material
- É a técnica mais usada pela indústria da microelectrónica
- Filmes de melhor qualidade (mais uniformes)
- Técnicas mais usadas: DC e RF (reactivos ou não) *sputtering*

Deposição de filmes finos por CVD

- Envolve uma reacção química à superfície do substrato usando na maior parte dos casos o silano (SiH_4) – muito inflamável e tóxico
- O material que compõe o FF deposita-se directamente a partir da fase gasosa sobre a superfície do substrato

- O CVD é muito utilizado na indústria da microelectrónica para depositar polissilício, dióxido de silício e nitreto de silício

- Uma câmara de reacção é usada (LPCVD diminui o stress dos FFs)

- Envolve os seguintes passos:

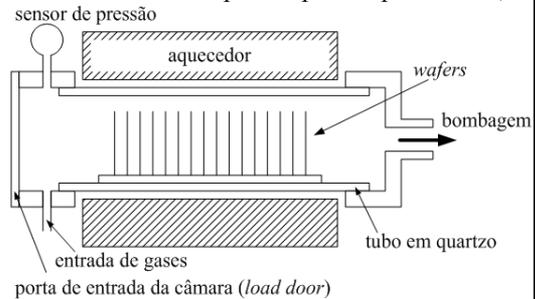
- (1) um gás e os reagentes são injectados no reactor
- (2) os gases deslocam-se por difusão Até à superfície do substrato

(3) os reagentes à superfície são absorvidos e reagem formando o FF

(4) os sub-produtos da reacção são removidos por uma bomba de extracção

PERMITEM:

Excelente uniformidade, processamento simultâneo de muitos wafers, e depositar dieléctricos



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 (o impacto mais severo é a contaminação do forno por estes metais)

• 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

CONCLUSÃO

A imaginação é o limite

