

Microfabricação em Substratos: Processos, Materiais e Exemplos de aplicações

CONTEÚDO

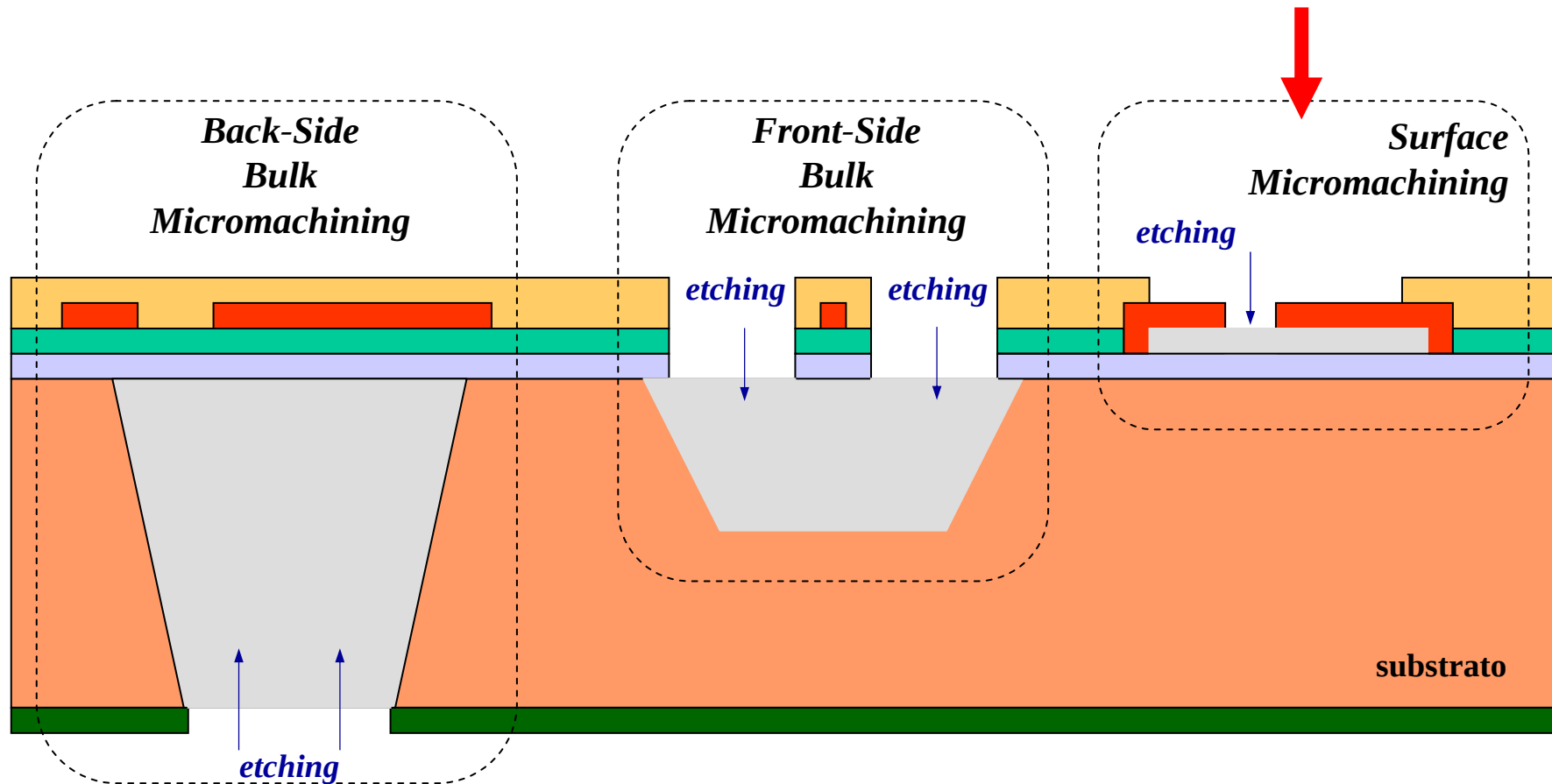
- Introdução,
- Histórico,
- Características Fabricação em Substrato,
- Corrosão úmida de silício,
- Corrosão úmida de vidro,
- Corrosão de silício por plasma,
- Corrosão de vidro por plasma,
- Combinação de corrosão úmida e seca de silício

Bibliografia Básica

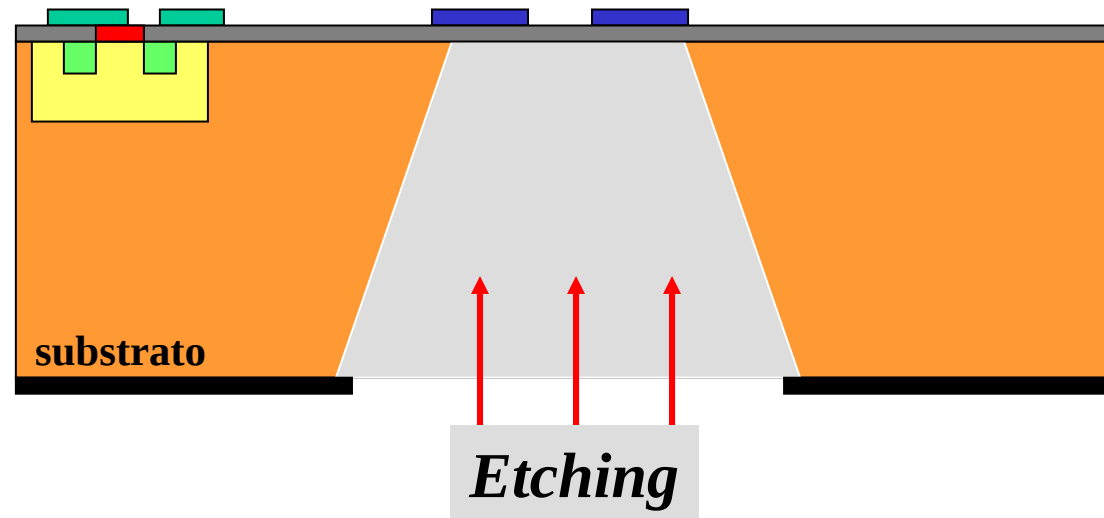
- Fundamentals of microfabrication, Marc Madou, CRC Press, 1997.
- Sensor technology and devices, editado por Ljubisa Ristic, Artech House, 1994.
- Semiconductor sensors, editado por S. M Sze, J. Wiley 1994.
- Microsensors: principles and applications, editado por J. W. Gardner, J. Wiley, 1994.
- Website: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

Introdução

Fabricação de superfície

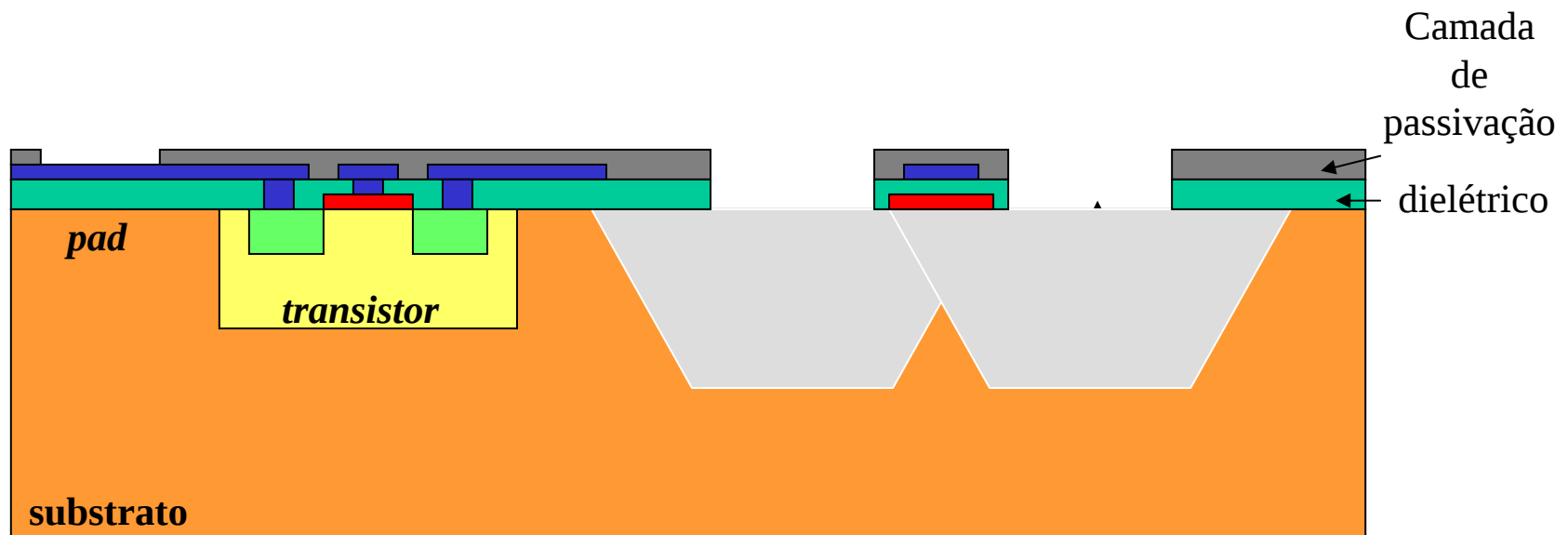


Back-Side Bulk Micromachining (Microfabricação em substrato)



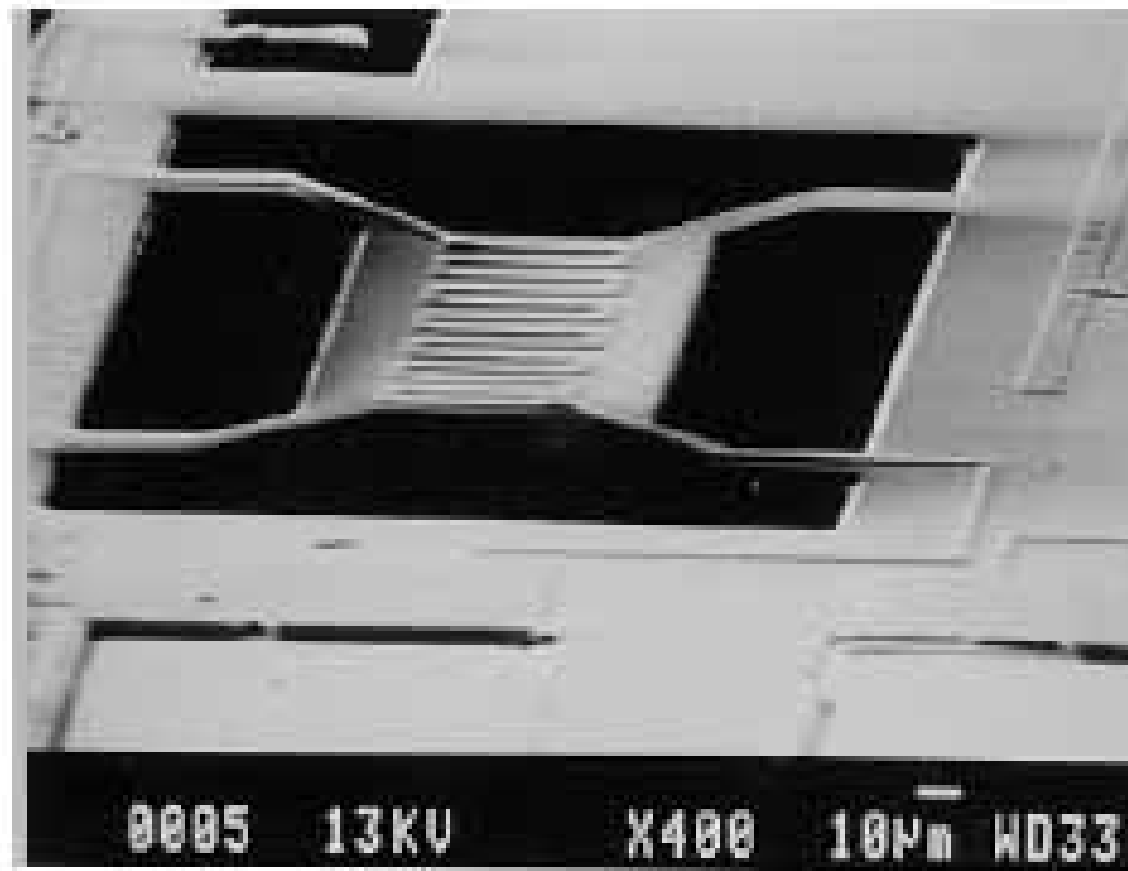
Front-Side Bulk Micromachining

Associação com processos convencionais de microeletrônica



Front-Side Bulk Micromachining

**Associação com processos convencionais
de microeletrônica**



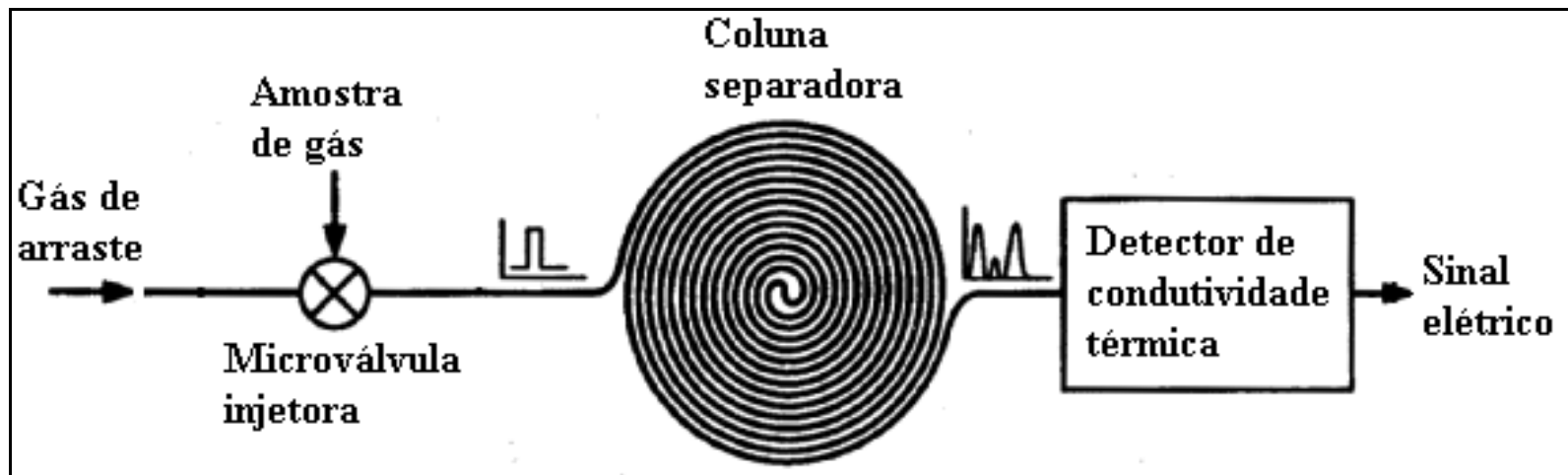
Histórico

Histórico

- Técnica usada nos últimos 30 anos
- Conceito de microssistema atraiu grande interesse:
- Considerada, ainda, a tecnologia mais popular de fabricação de dispositivos sensores

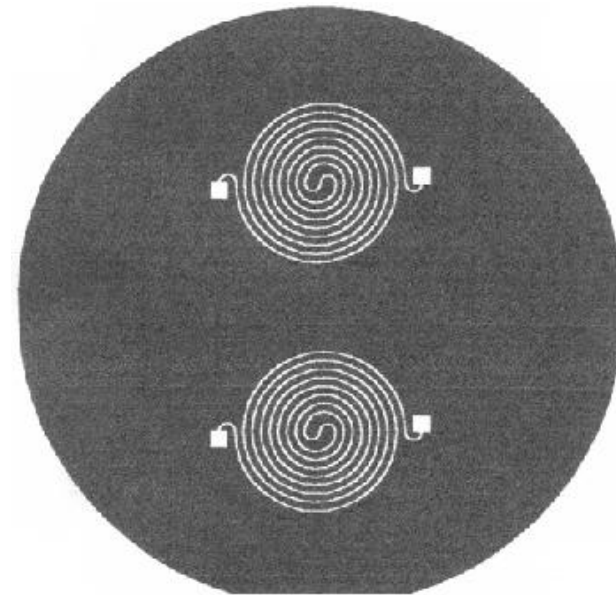
Histórico

- cromatógrafo miniaturizado implementado em silício - Angel e Terry - 1975



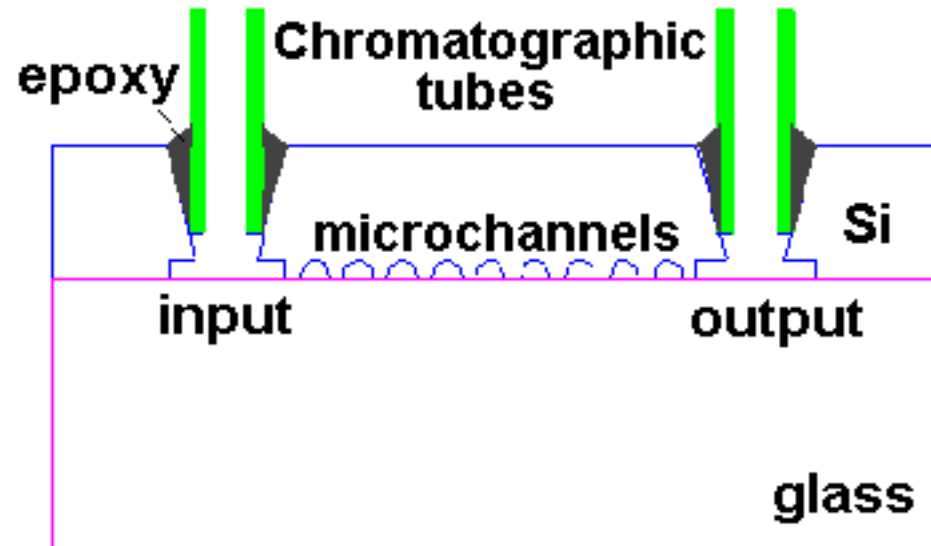
Histórico

- Coluna separadora desenvolvida no Laboratório de Sistemas Eletrônicos - 2001



Histórico

- Coluna separadora desenvolvida no Laboratório de Sistemas Eletrônicos - 2001



Características da fabricação em substrato

- Estruturas milimétricas ou micrométricas;
- Estruturas definidas por corrosão em:
 - silício: normalmente partes mecânicas,
 - Vidro amorfo: partes mecânicas e suportes estruturais;
- Soldagem/colagem de substratos.

Características do substrato de silício

- Resistente
- Completamente elástico
- Bom condutor térmico
- Propriedades elétricas sensíveis a estresse, temperatura, campos magnéticos e radiação
- Facilmente corroído:
- Corrosão úmida
 - isotrópica e anisotrópica
- Corrosão seca
 - isotrópica e anisotrópica

Propriedades

- Estrutura: Diamante;
- Fusão: 1415°C;
- Expansão térmica: $2,33 \times 10^{-6}/K$;
- Densidade: 2,3 g/cm³;
- Modulo de Young: $1,9 \times 10^{12}$ din/cm²;
- Dureza: 850 kg/mm².

Características do substrato de silício

Material	Tensão (Gpa)	Dureza (kg/mm ²)	Young's (100GPa)	Dens. (10 ³ kg/m ³)	Exp. Ter. (2,33x10 ⁻⁶ /K)
Diamante	53	7000	10,35	3,5	1,0
SiC	21	2480	7,0	3,2	3,3
Si ₃ N ₄	14	3486	3,85	3,1	0,8
Si	7	850	1,9	2,3	2,33
Aço Inox	2,1	660	2,0	7,9	17,3
Alumínio	0,17	130	0,7	2,7	2,5

Características do substrato de vidro

- Vidro é uma mistura de SiO_2 dopado com impurezas;
- Várias composições, propriedades mecânicas e pontos de fusão;
- Corroídos por via úmida ou seca;

Corrosão úmida de silício

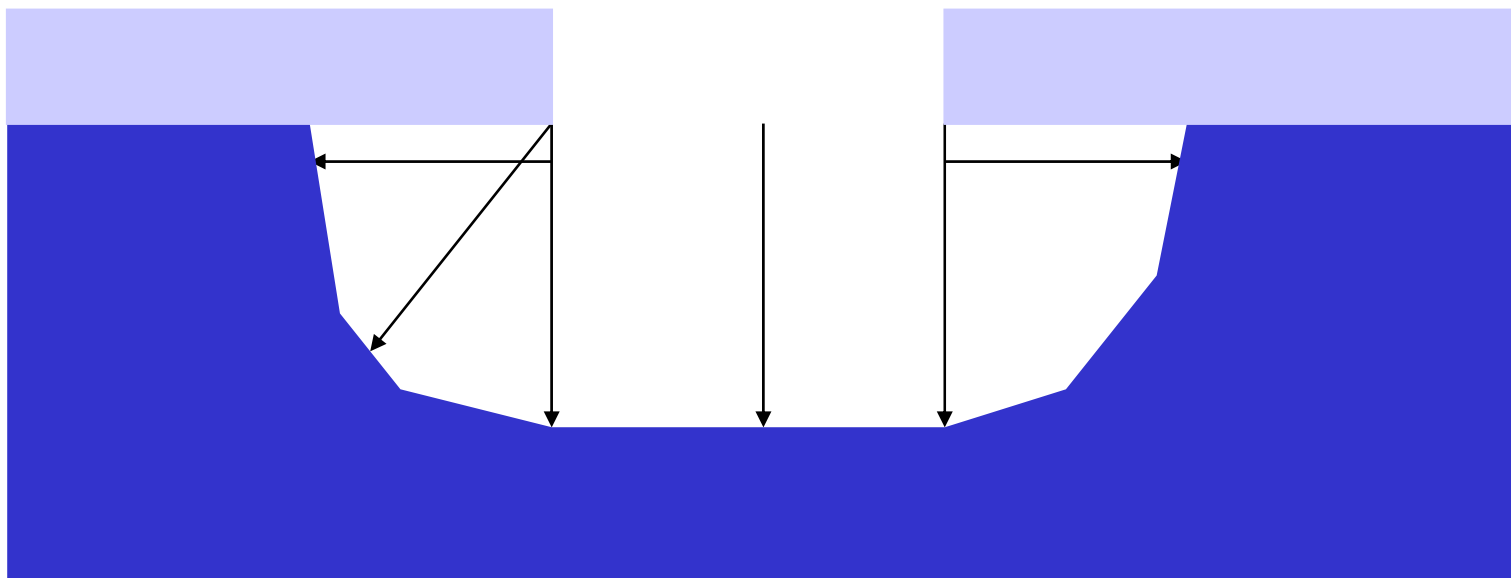
Corrosão úmida de silício (isotrópica)

- Perfil arredondado;
- Solução: ácido nítrico (HNO_3) + ácido fluorídrico (HF) + ácido acético (CH_3COOH);
- Ácido nítrico age como oxidante e HF remove o óxido fino formado;
- Taxas de corrosão: podem atingir da ordem de dezenas a centenas de μm por minuto;

Corrosão úmida de silício (isotrópica)

- Corrosão seletiva de regiões n^+ ou p^+
1HF:3HNO₃:8CH₃COOH (25°C)
Taxa de corrosão ($C > 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$): 50 $\mu\text{m/h}$ - 200 $\mu\text{m/h}$
Seletividade ($C_{\text{min}} < 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$): 150
- Mascaramento: nitreto de silício, metais nobres (Au),
- fotorresiste negativo polimerizado ou dióxido de silício
- Taxa de corrosão e precisão do processo de microusinagem: difícil controle

Corrosão úmida de silício (isotrópica)



Corrosão úmida de silício (anisotrópica)

- Planos $\langle 111 \rangle$: baixa taxa de corrosão;
- densidade de átomos por área;
- energia necessária para remover um átomo da superfície;
- efeitos geométricos de sombreamento (distribuição tridimensional dos átomos na rede);

Corrosão úmida de silício (anisotrópica)

⇒ Soluções alcalinas:

KOH, LiOH, NaOH ou CsOH + H ₂ O + Álcool Isopropílico (opcionalmente)
EDP: Etilenodiamina (NH ₂ (CH ₂) ₂ NH ₂) + Pirocatecol (C ₆ H ₄ (OH) ₂) + H ₂ O + Pirazina (C ₄ H ₄ N ₂) (opcionalmente)
TMAHW: Hidróxido de Tetrametil-Amônio (N(CH ₃) ₄ OH) + H ₂ O
Hidrazina (N ₂ H ₄) + H ₂ O
AHW: Hidróxido de Amônio (NH ₄ OH) + H ₂ O

Corrosão úmida de silício (anisotrópica)

⇒ Comparação: soluções para corrosão úmida anisotrópica de silício

Propriedades	Tipo de solução química			
	KOH	EDP	Hidrazina	TMAH
Anisotropia	alta	média	baixa	baixa
Taxa de corrosão	alta	baixa	alta	baixa
Qualidade	boa	boa	média	média
Custo	baixo	alto	médio	alto
Toxidade	baixa	alta	alta	média
Compatibilidade com MOS	não	sim	não	sim
Seletividade - óxido de silício	baixa	alta	alta	alta
Seletividade - nitreto de silício	média	alta	alta	alta

Corrosão com soluções baseadas em KOH

- Largamente utilizadas na fabricação de sensores;
- Mecanismo de corrosão:



- Altas taxas de corrosão (R):

~1 $\mu\text{m}/\text{minuto}$ (KOH 40% peso, 80 °C, Si <100>)

$$R = R_0 \exp(-E_a/KT)$$

- Boa anisotropia:

taxa de corrosão de Si <111> de 0,02 $\mu\text{m}/\text{min}$.

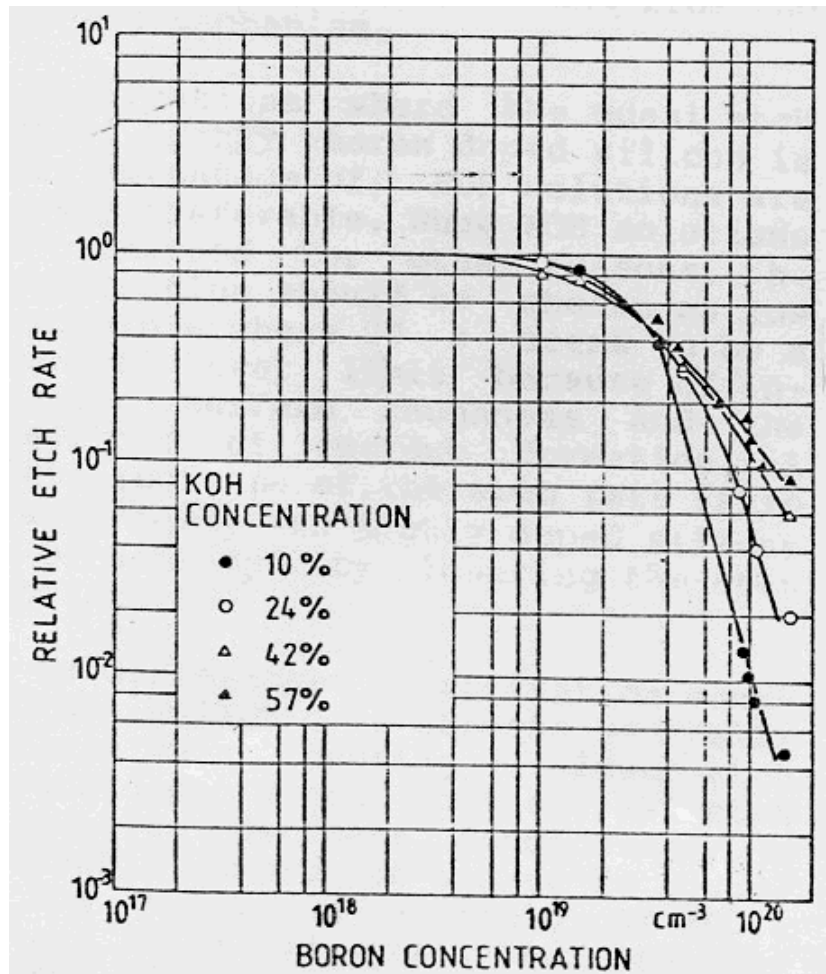
Corrosão com soluções baseadas em KOH

- Estruturas resultam bem definidas;
- Álcool isopropílico: aumenta a anisotropia e melhora a qualidade da corrosão;
- Dopagem de Si <100> com boro: diminui a taxa de corrosão – “etch stop”;
- Atacam regiões de contato de Al imediatamente;
- Seletividade com respeito ao dióxido de Si: relativamente baixa (mascaramento com camada espessa de dióxido de silício);
- Usadas na corrosão de Si das costas das lâminas com dispositivos CMOS se a parte da frente estiver mecanicamente protegida.

Corrosão com soluções baseadas em KOH

- Inibição por Efeito de Dopagem ("Etch-Stop"):
- Espessura da estrutura fica limitada à profundidade da difusão: uso de Boro
- Corrosão úmida anisotrópica é inibida na interface Si-n/Si-p⁺
- Inibição envolve fenômenos relacionados com a degeneração do silício
- Taxa de corrosão depende do tipo de solução química e do grau de diluição

Corrosão com soluções baseadas em KOH

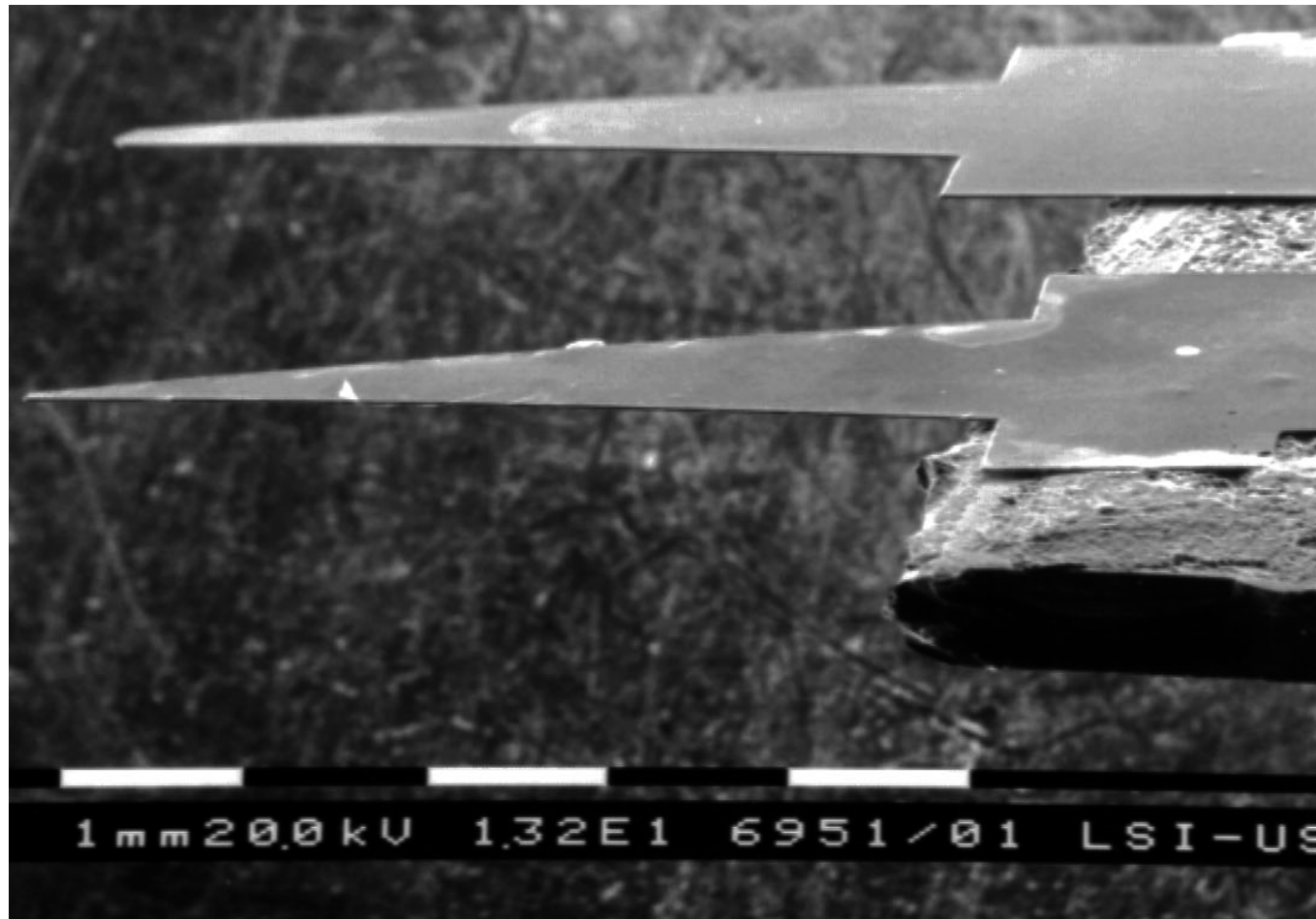


Siedel - 1989

- Silício pouco dopado pode ser totalmente dissolvido - “processo de dissolução de lâmina”

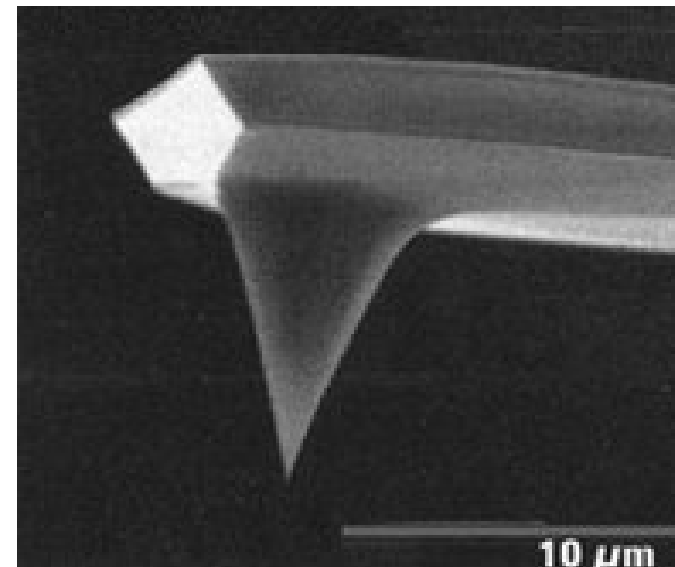
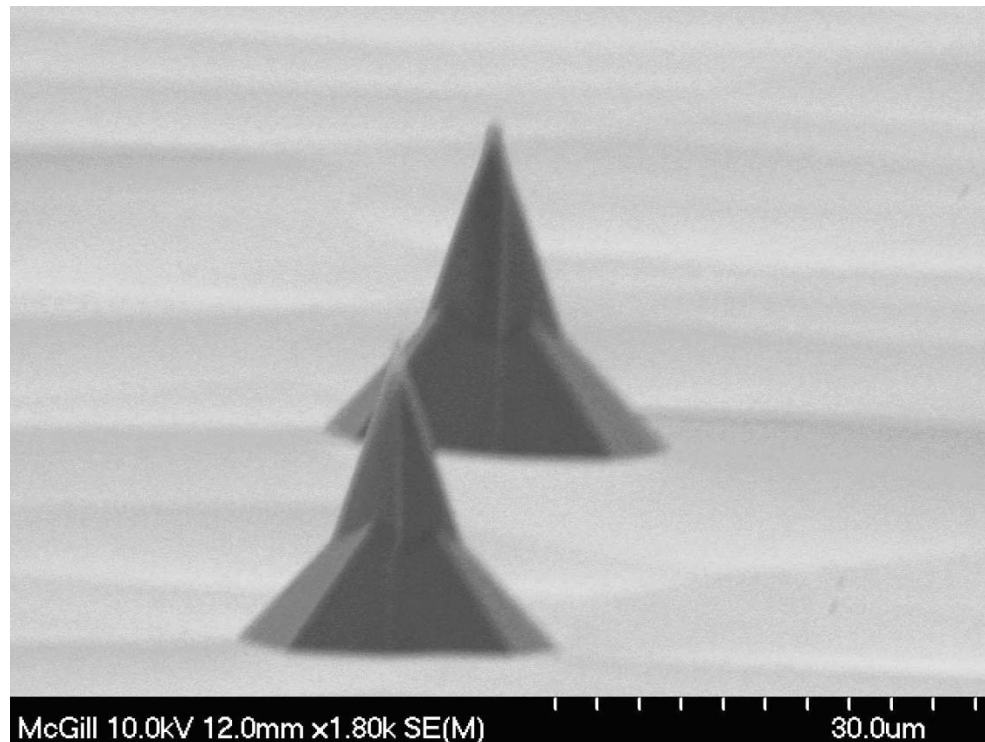
Corrosão com soluções baseadas em KOH

- “processo de dissolução de lâmina”



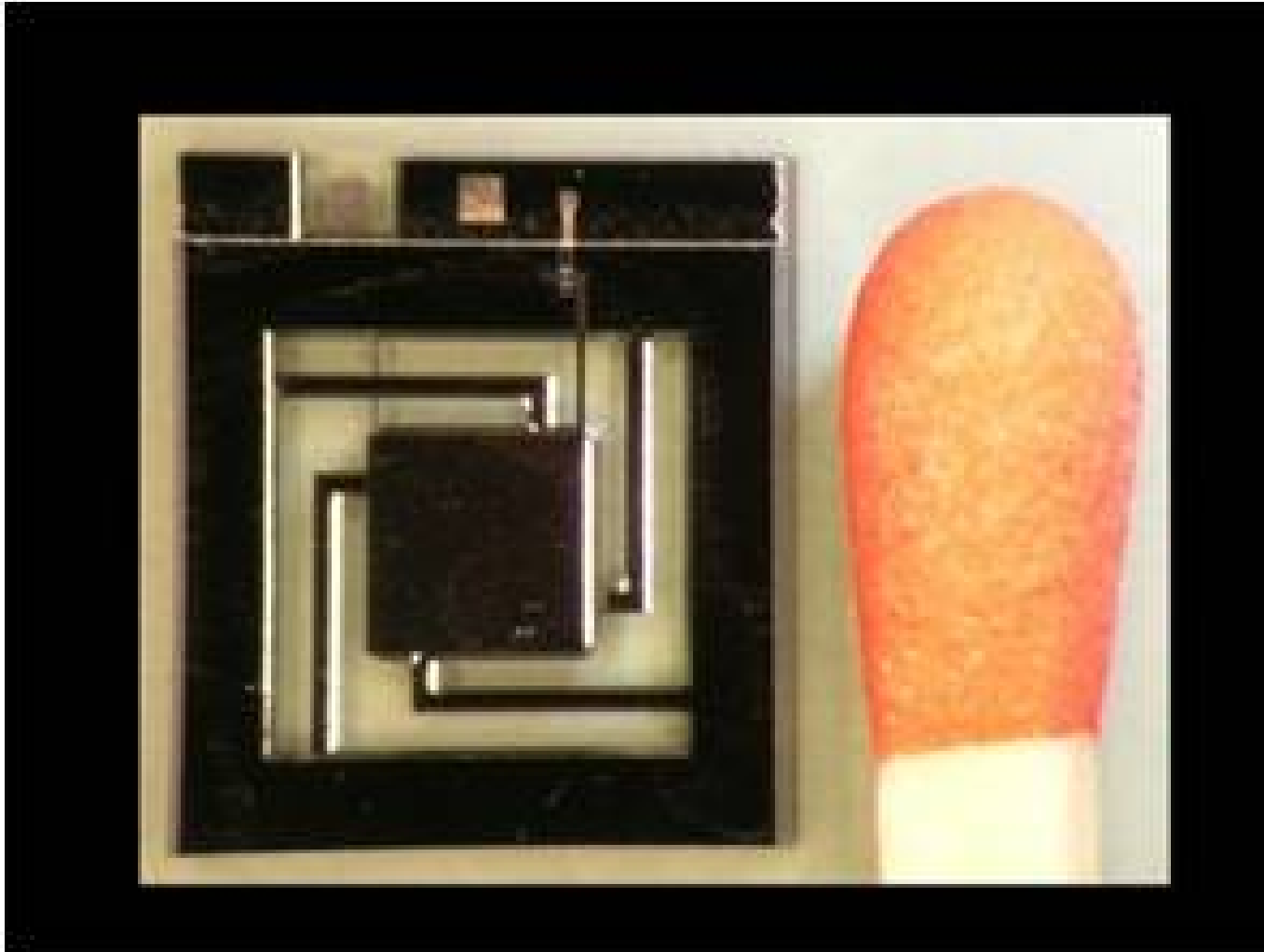
Corrosão com soluções baseadas em KOH

- “processo de dissolução de lâmina”



Corrosão com soluções baseadas em KOH

- “processo de dissolução de lâmina”

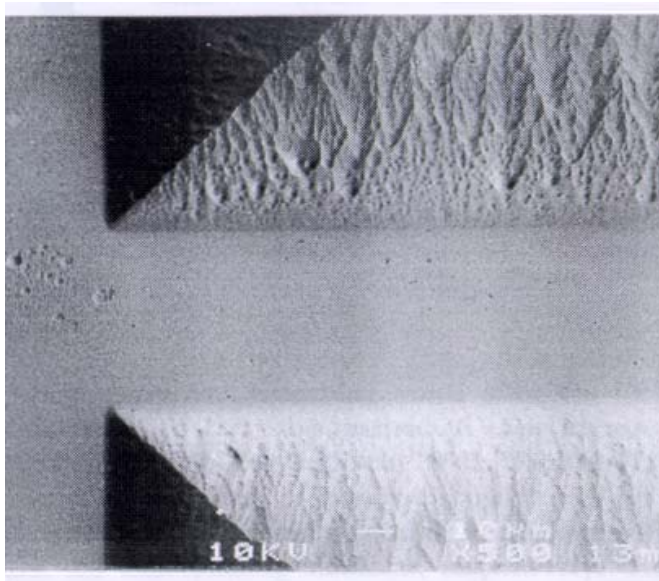


Corrosão úmida de vidro

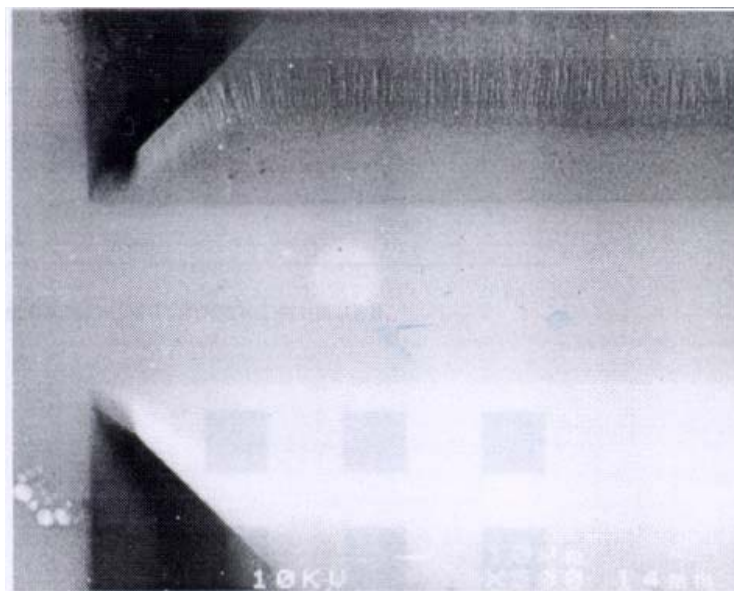
Corrosão úmida de vidro isotrópica

- Soluções de HF com NH_4F + HCl (baixa concentração), opcionalmente, para melhorar a qualidade da superfície;
- Altas taxas de corrosão – dezenas de micra;
- Mascaramento com Au/Cr.

Corrosão úmida de vidro (isotrópica)



Sem HCl



Com HCl

Corrosão úmida de vidro (anisotrópica)

- Ativação por descarga eletroquímica ou por ultrassom;
- Alta taxa de corrosão: obtenção de buracos com profundidade de centenas de micra;
- Soluções de KOH ou NaOH;
- Mascaramento com Fotorresiste/Au/Cr;

Corrosão de silício por plasma

Corrosão de silício por plasma

Vantagens:

- Independe de orientação cristalina;
- Possibilidade de obtenção elevada razão de aspecto (altura/largura);
- Controle (profundidade, perfil lateral);
- Isotrópica e anisotrópica;

Corrosão de silício por plasma

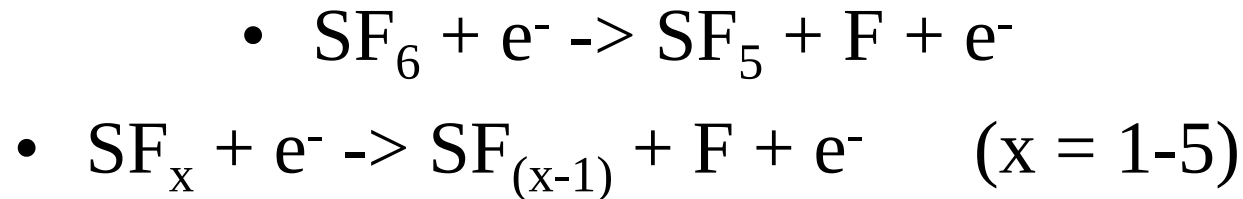
Etapas da Corrosão:

- 1) Formação de partículas reativas, normalmente dentro do plasma;
- 2) Difusão das partículas reativas para a superfície a ser corroída;
- 3) Adsorção das partículas reativas na superfície;
- 4) Quimissorção das partículas reativas com os átomos a serem removidos;
- 5) Formação de uma molécula volátil;
- 6) Dessorção da molécula volátil da superfície;
- 7) Remoção da molécula volátil pelo sistema de bombeamento.

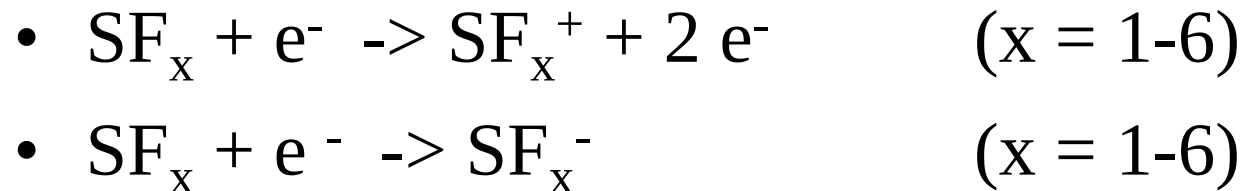
Corrosão de silício por plasma de SF₆

1) No próprio plasma:

a) Geração de partículas neutras reativas, em geral por impacto de elétrons (e⁻):



b) Geração de íons :



Corrosão de silício por plasma de SF_6

2) Na superfície do Si:

- $\text{Si(s)} + \text{F(g)} \rightarrow \text{SiF(s)}$
 - $\text{SiF(s)} + \text{F(g)} \rightarrow \text{SiF}_2\text{(s)}$
 - $\text{SiF}_2\text{(s)} + \text{F(g)} \rightarrow \text{SiF}_3\text{(s)}$
 - $\text{SiF}_2\text{(s)} + \text{SiF}_2\text{(s)} \rightarrow \text{Si(s)} + \text{SiF}_4\text{(g)}$
 - $\text{SiF}_2\text{(s)} + \text{SiF}_3\text{(s)} \rightarrow \text{SiF(s)} + \text{SiF}_4\text{(g)}$
-
- SiF_4 é a molécula volátil - SiF_x ($x = 1-3$) não são e ficam na superfície em estado sólido
 - Íons são mais reativos que as partículas neutras, mas estão presente em menor número (duas a quatro ordens de grandeza)

Corrosão isotrópica de silício por plasma

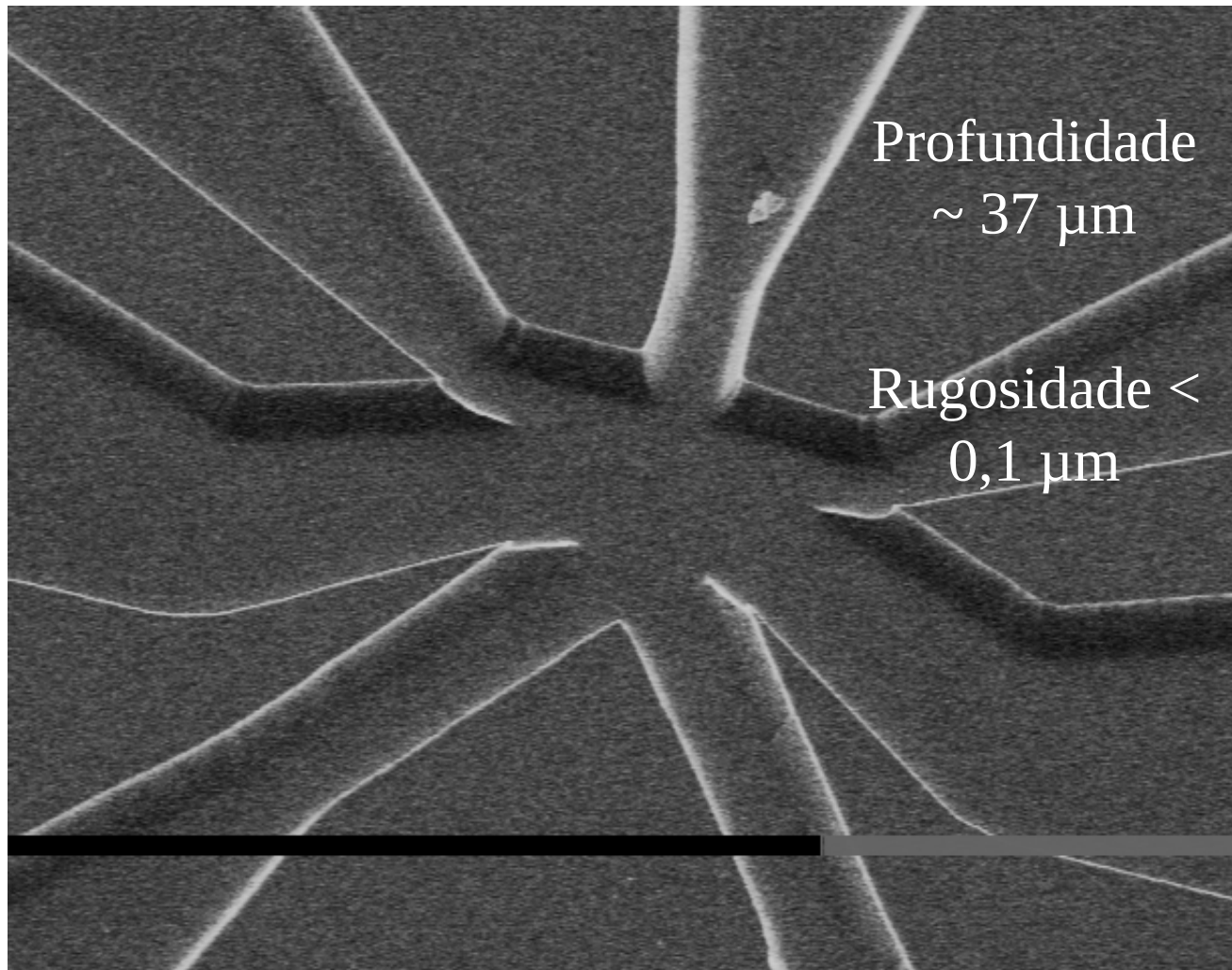
- Maior controle de processo que o da corrosão úmida;
- Utiliza plasmas que geram bastante Flúor (CF_4 , SF_6 e NF_3);
- F é um átomo muito pequeno que penetra facilmente a rede do silício e difunde em todas as direções, promovendo a corrosão;
- F reage facilmente com Si formando o produto volátil (SiF_4);

Corrosão isotrópica de silício por plasma

- Bombardeamento iônico pode enriquecer o processo de corrosão, produzindo sítios ativos devido aos danos causados na superfície do Si por sputtering;
- Bombardeamento iônico pode ser aumentado pelo controle das condições de processo (Pressão, Potência) e pela introdução de aditivos (Ar, O₂, N₂);
- SF₆ tem sido largamente utilizado pela facilidade no manuseio;
- Taxa de corrosão de $\sim 1 \mu\text{m}/\text{minuto}$;
- Mascaramento com filmes de SiO₂ ou com filmes metálicos (Al, NiCr);

Corrosão isotrópica de silício por plasma

Microcanaais corroídos por plasma em silício



Corrosão anisotrópica de silício por plasma

Com Flúor:

- SF_6 (fácil manuseio);
- Introdução de O_2 para forma uma fina camada de SiO_2 nas paredes laterais, impedindo a corrosão lateral: a quantidade de oxigênio é crítica (inibição da corrosão ou aumento de rugosidade);
- Pode-se forçar a deposição de polímero (composto de átomos de C, H e/ou F) nas paredes laterais - introdução de um gás (por ex. CH_4), erosão do próprio resiste ou erosão de um eletrodo de carbono: composição da mistura é crítica (inibição da corrosão ou aumento de rugosidade);

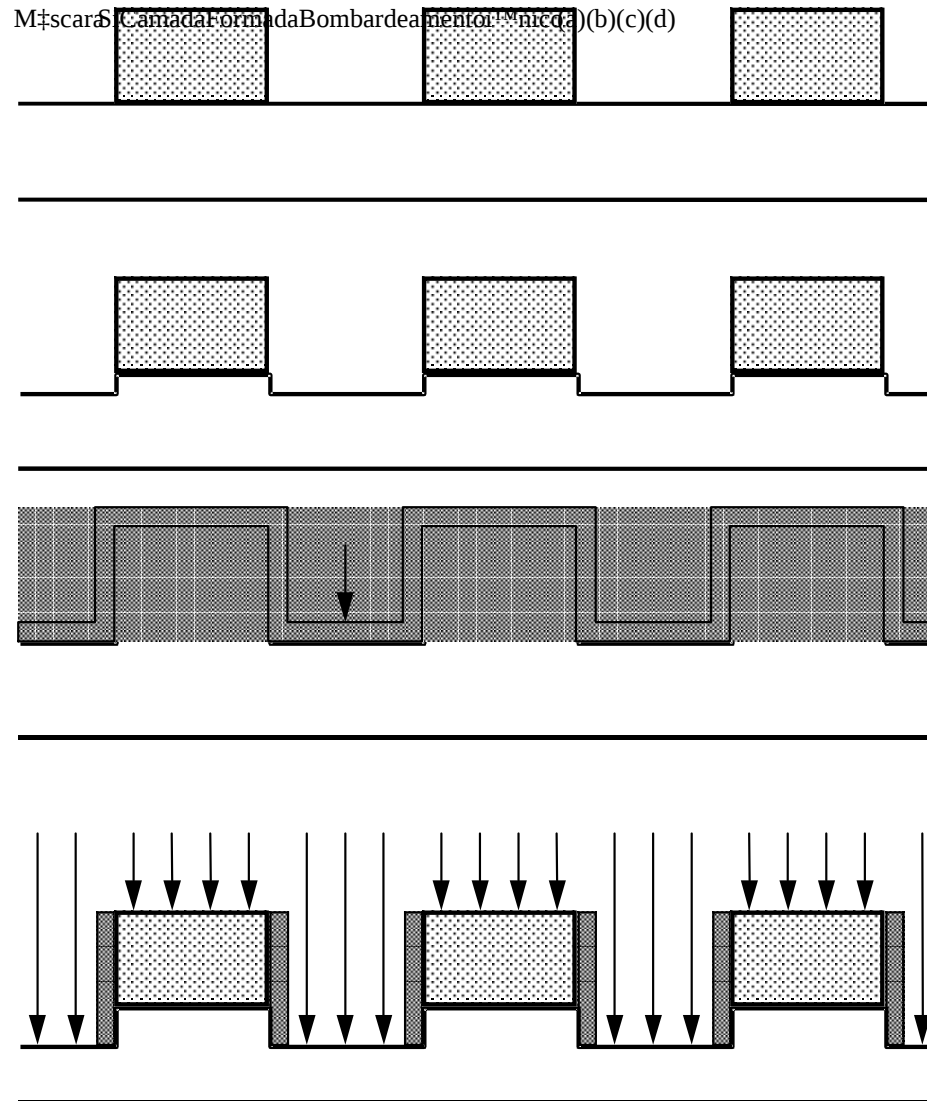
Corrosão anisotrópica de silício por plasma

Com Flúor:

- Temperatura criogênica: reação nas paredes laterais é inibida em baixas temperaturas e nas paredes do fundo das estruturas é ativada pelo bombardeamento iônico - equipamentos são complicados;
- Plasma de alta densidade (Induced Coupled Plasma – ICP) – 10^{11} cm^{-3} - a baixas pressões (10 mTorr ou menos) com SF_6 puro: mecanismos físico-químicos não são bem conhecidos;
- Utilização de máscara metálica (alumínio);

Corrosão anisotrópica de silício por plasma

Corrosão anisotrópica com proteção das paredes laterais:



Corrosão anisotrópica de silício por plasma

Microcanais definidos em silício - corrosão com plasma
(SF_6 + Ar) de alta densidade:



Corrosão anisotrópica de silício por plasma

Com Bromo:

- Bromo é um átomo ainda maior que cloro: corrosão é ainda mais anisotrópica;
- Gases mais usados para introduzir o átomo de bromo no reator: CBrF_3 e HBr ;
- CBrF_3 tem a grande vantagem de não ser tóxico e de relativamente fácil manuseio;
- É difícil corroer muito mais que $1\text{ }\mu\text{m}$ de silício usando CBrF_3 puro: formação de polímero espesso inibe a corrosão – formação de polímero na bomba também é prejudicial;
- HBr é normalmente usado junto com um gás clorado (Cl_2) que aumenta um pouco a anisotropia e melhora muito a seletividade silício - óxido de silício;

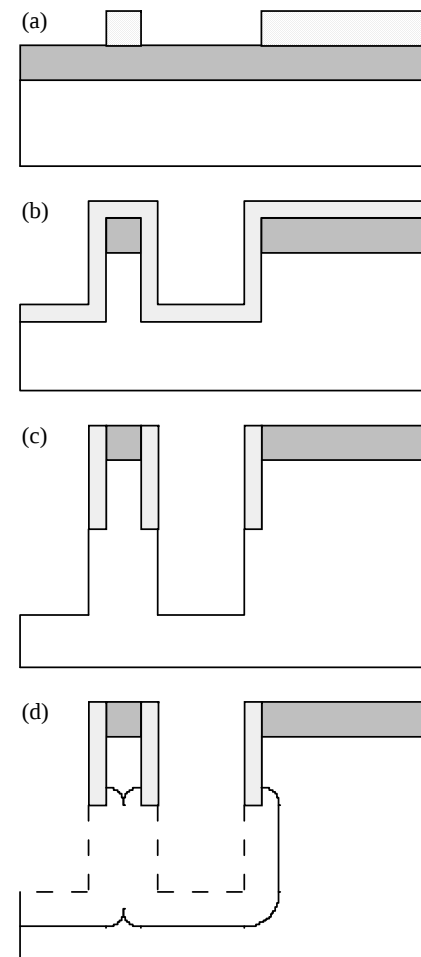
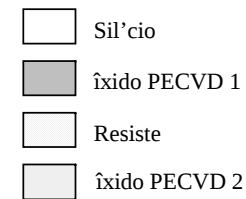
Corrosão anisotrópica de silício por plasma

Com Cloro:

- Para pressões maiores é possível obter paredes verticais utilizando-se agentes inibidores da corrosão lateral (CCl_4 , CH_4): deve ser feito um compromisso para não impedir a corrosão vertical, por causa de um excesso de polímeros;
- rugosidade lateral também é muito baixa: fabricação de microespelhos;
- Cloro é tóxico e extremamente corrosivo para todos os metais: utilização de máscara de óxido de silício e equipamentos especiais.

Corrosão anisotrópica de silício por plasma

Tecnologia SCREAM
(Single-Crystal Reactive
Etching and Metallization):



Corrosão de vidro por plasma

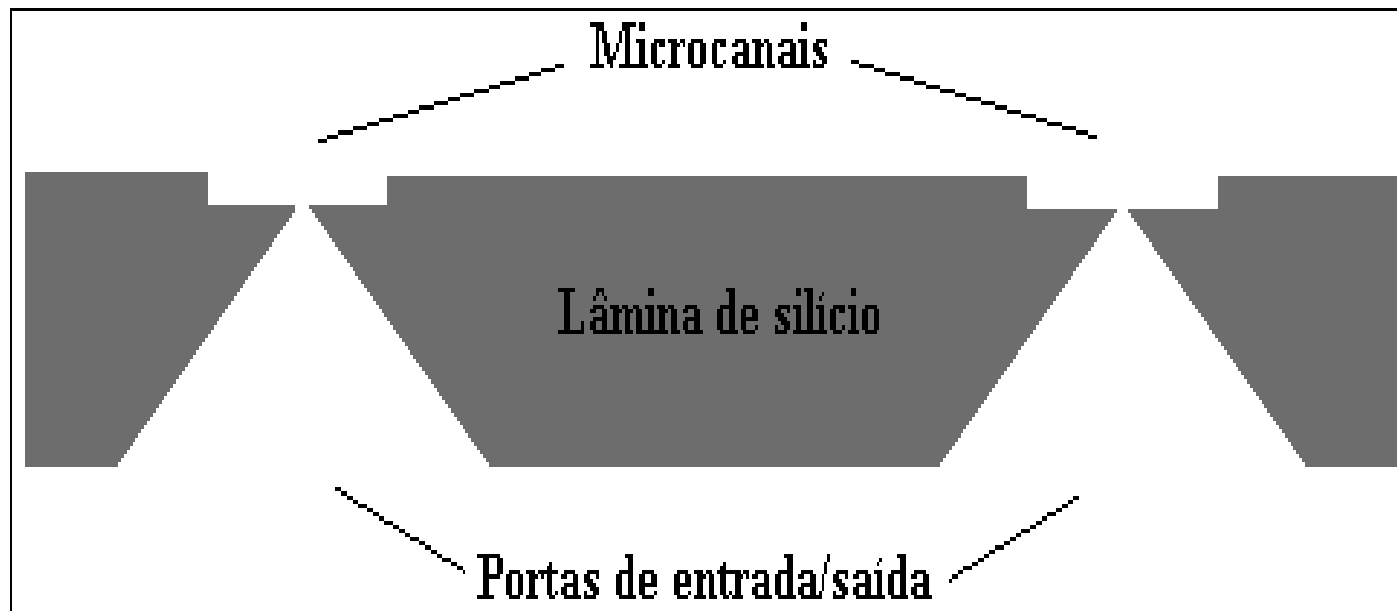
Características:

- Em princípio é similar a corrosão de SiO_2 (normalmente $\text{CF}_4 + \text{H}_2$);
- Mascaramento com fotorresiste ou metal;
- Taxa de corrosão ($\sim 0,1 \text{ } \mu\text{m}/\text{min.}$) menor que a obtida para SiO_2 : substrato espesso e isolante modifica o acoplamento de potência;
- Presença de contaminantes no vidro que são difíceis de corroer e contaminam o reator.

Combinação de corrosão
úmida e seca de silício

Combinação de corrosão úmida e seca de silício

Microamplificador fluídico:



Combinação de corrosão úmida e seca de silício

