

PSI-5761 Introdução aos Processos de Fabricação em Microeletrônica

Laboratório de
Microeletrônica
Escola Politécnica
Universidade de São Paulo

Corrosão (etching) Úmida e Seca

Fernando J. Fonseca sala C2-65 (fernando.epusp@gmail.com)

Roberto K. Onmori sala C2-70 (rkonmori@lme.usp.br)

Tipos de corrosão

- **CORROSÃO ÚMIDA** Única até a década de 80.
Decapagem por processos químicos úmido (reagente líquido)
- **CORROSÃO SECA** Início na década de 80. Principal método atualmente.
Processo de decapagem por fase gasosa (“dry etching”)

Normalmente utiliza-se a corrosão **ÚMIDA** ou **SECA** para a remoção PARCIAL de material.

Quando utiliza-se os mesmos processos para remoção TOTAL do material a etapa é denominada “STRIPING”.



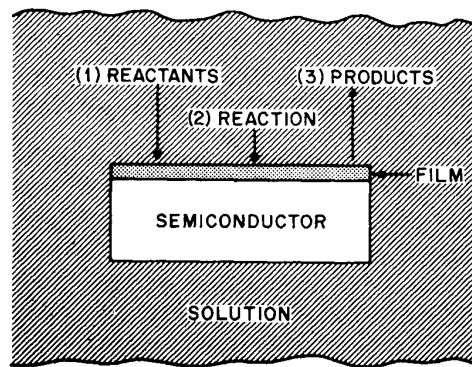
Parâmetros da Corrosão

Seletividade

É a relação entre a taxa de corrosão do filme a ser removido e da camada seguinte (substrato ou outro filme).

$$S = \text{taxa de corrosão do filme} / \text{taxa de corrosão do substrato}$$

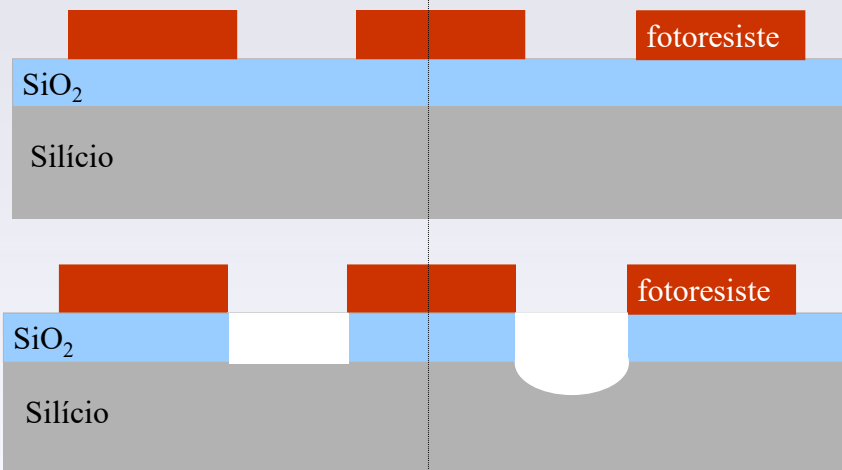
Portanto, o valor de S deve ser o maior possível!



Basic mechanisms in wet chemical etching.



Seletividade



Seletividade $\ll 1$
entre o SiO_2 e o silício \Rightarrow bom

Seletividade = 1
entre o SiO_2 e o silício \Rightarrow ruim

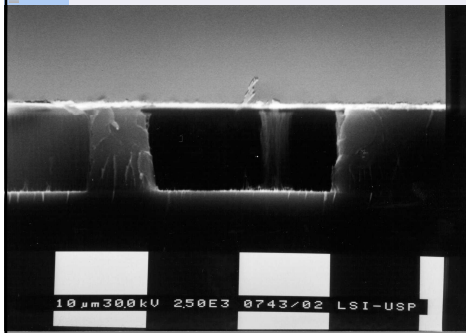


Parâmetros da Corrosão

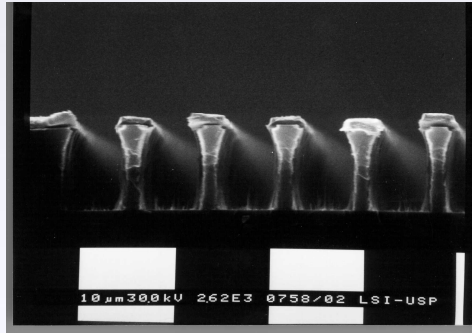
Anisotropia

É a relação entre as taxas de corrosão horizontal e vertical.

$A = 1$ - taxa de corrosão do filme horizontal/taxa de corrosão do filme vertical



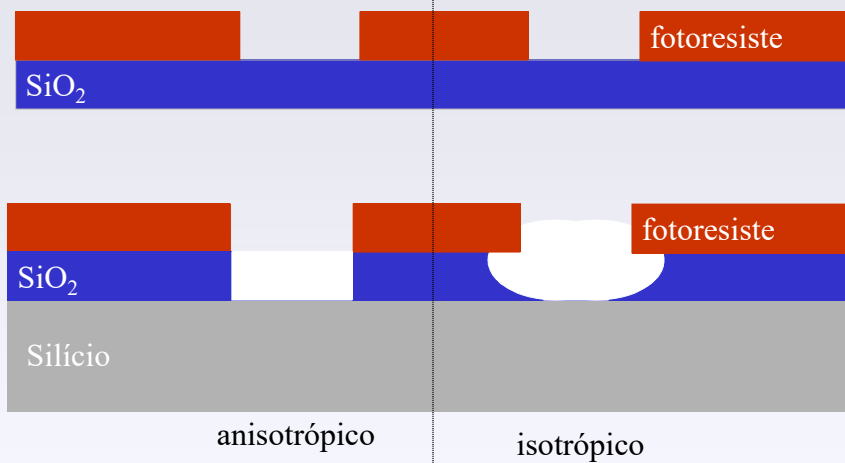
anisotrópica



isotrópica

PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica - EPUSP 5

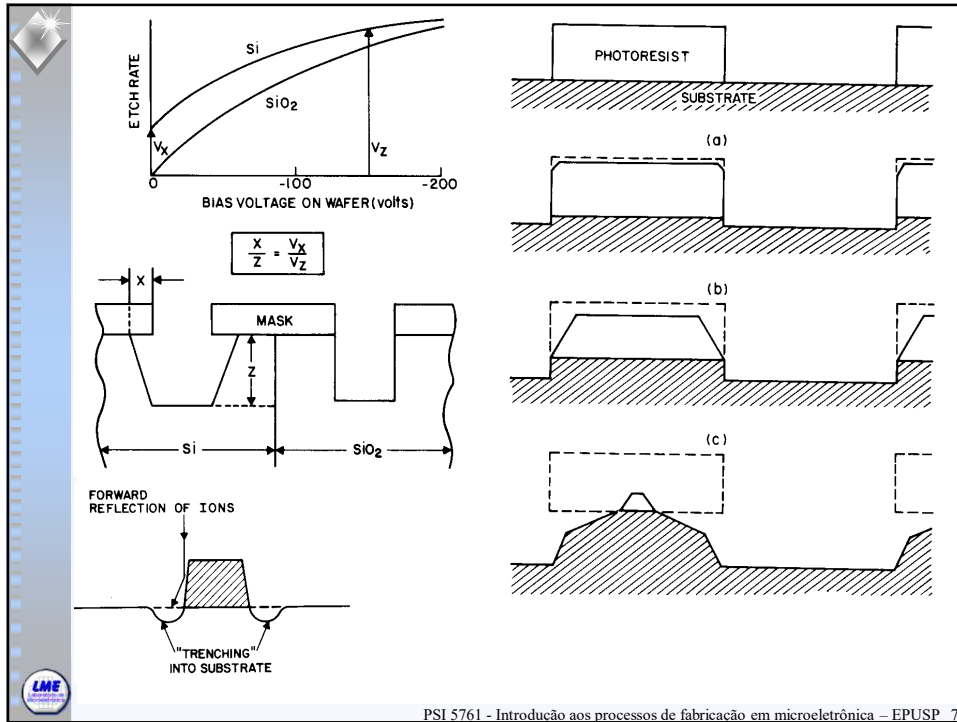
Anisotropia



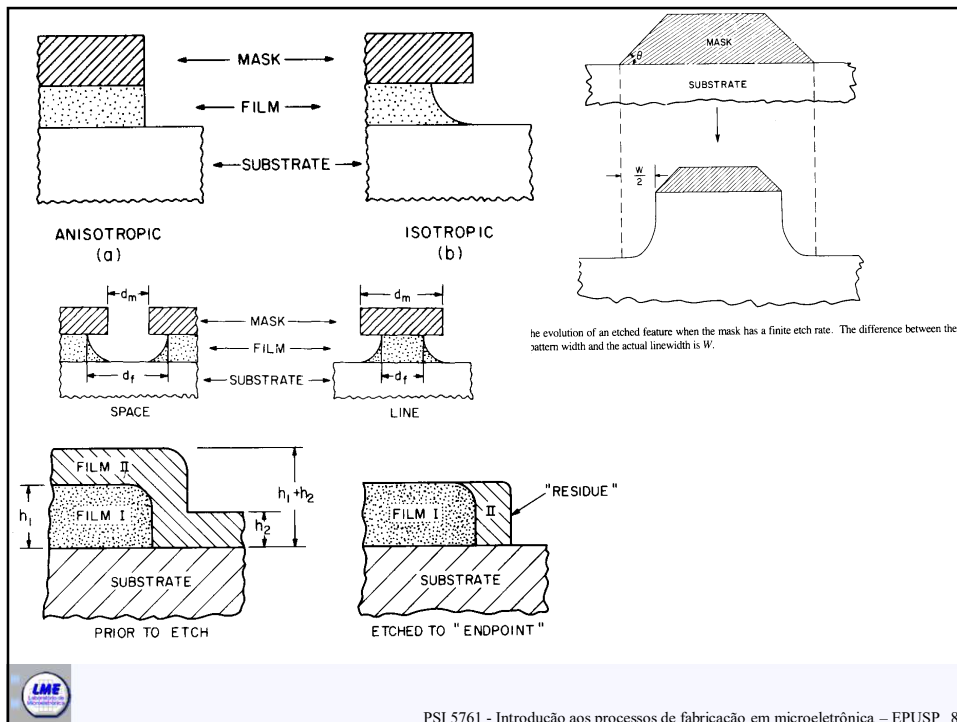
Anisotropia = 1
no $\text{SiO}_2 \Rightarrow$ bom

Anisotropia = 0
no $\text{SiO}_2 \Rightarrow$ ruim

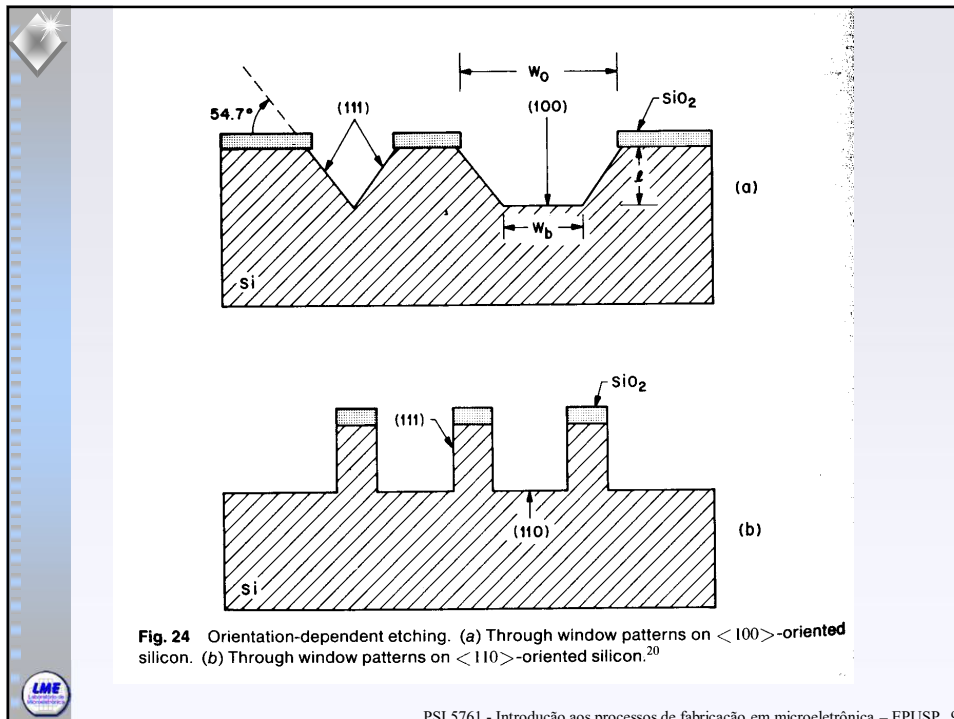
PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica - EPUSP 6



PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 7



PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 8



PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 9

Corrosão Úmida

Vantagens:- Ainda é uma técnica utilizada em processos de baixo custo e alternativa em processos menos críticos;

- Simplicidade;
- Confiabilidade;
- Pode ser muito seletivo;
- isotrópico e anisotrópico;
- utilizado como limpeza de lâminas

Desvantagens: - Falta de Anisotropia;

- Controle difícil durante a operação;
- Gera particulado (sólido);
- Depende da orientação cristalográfica.

PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 10

Algumas receitas de corrosões úmidas

- ÓXIDO DE SILÍCIO (SiO₂)

Ácido Fluorídrico (HF) com ou sem Fluoreto de Amônia.

- NITRETO DE SILÍCIO (Si₂N₃)

Ácido Fluorídrico (HF) com ou sem Fluoreto de Amônia.
Ácido Fosfórico aquecido a 195 °C.

- SILÍCIO MONO E POLICRISTALINO

Ácido Fluorídrico com Ácido Nítrico.
Hidróxido de Potássio.

- ALUMÍNIO

Ácido Fosfórico com Ácido Nítrico.



PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 11

Table 2 Etchants for Silicon and Gallium Arsenide

Semi-Conductor	Etchant	Purpose	Composition	Etch Rate (μm/min)
Si	CP-4A	Polishing or lapping	3 ml HF	34.8
			5 ml HNO ₃	
	CP-8	Polishing	3 ml CH ₃ COOH	7.4
			1 ml HF	
Junction-staining etch	Measurement of Junction depth	5 ml HNO ₃	-	
		2 ml CH ₃ COOH		
Orientation-dependent etch	Groove etching	0.3 g I ₂ /250 ml solution	6 × 10 ⁻³ for <111>	
		HF + 0.1% HNO ₃		
GaAs	H ₂ SO ₄ -H ₂ O ₂ -H ₂ O System	Polishing	23.4 wt% KOH	0.6 for <100>
			13.3 wt% Propyl alcohol	6 × 10 ⁻³ for <111>
	H ₃ PO ₄ -H ₂ O ₂ -H ₂ O System	Polishing	63.3 wt% H ₂ O	0.8 for <111>-Ga
			8 ml H ₂ SO ₄	
H ₃ PO ₄ -H ₂ O ₂ -H ₂ O System	Polishing	1 ml H ₂ O ₂	0.4 for <111>-Ga	
		1 ml H ₂ O		0.8 for all other
			50 ml H ₂ O	



PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 12

Table 3 Etchants for Insulators and Conductors

Material	Etchant Composition	Etch Rate
SiO ₂	28 ml HF 170 ml H ₂ O 113 g NH ₄ F	Buffered HF 1000 Å/min
	15 ml HF 10 ml HNO ₃ 300 ml H ₂ O	
Si ₃ N ₄	Buffered HF H ₃ PO ₄	5 Å/min 100 Å/min
Al	1 ml HNO ₃ 4 ml CH ₃ COOH 4 ml H ₃ PO ₄ 1 ml H ₂ O	350 Å/min
Au	4 g KI 1 g I ₂ 40 ml H ₂ O	1 μm/min
Mo	5 ml H ₃ PO ₄ 2 ml HNO ₃ 4 ml CH ₃ COOH	0.5 μm/min
Pt	150 ml H ₂ O 1 ml HNO ₃ 7 ml HCl 8 ml H ₂ O	500 Å/min
W	34 g KH ₂ PO ₄ 13.4 g KOH 33 g K ₃ Fe(CN) ₆ H ₂ O to make 1 liter	1600 Å/min

PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 13

Corrosão Seca (Dry etching)

O aumento nas aplicações dos processos utilizando plasmas, é devido a redução das dimensões dos dispositivos eletrônicos.

A redução é tão grande, que os dispositivos atuais não podem ser obtidos por corrosão úmida.

É um processo que pode ser puramente químico ou químico mais físico. vai depender do tipo de reator utilizado.

PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 14

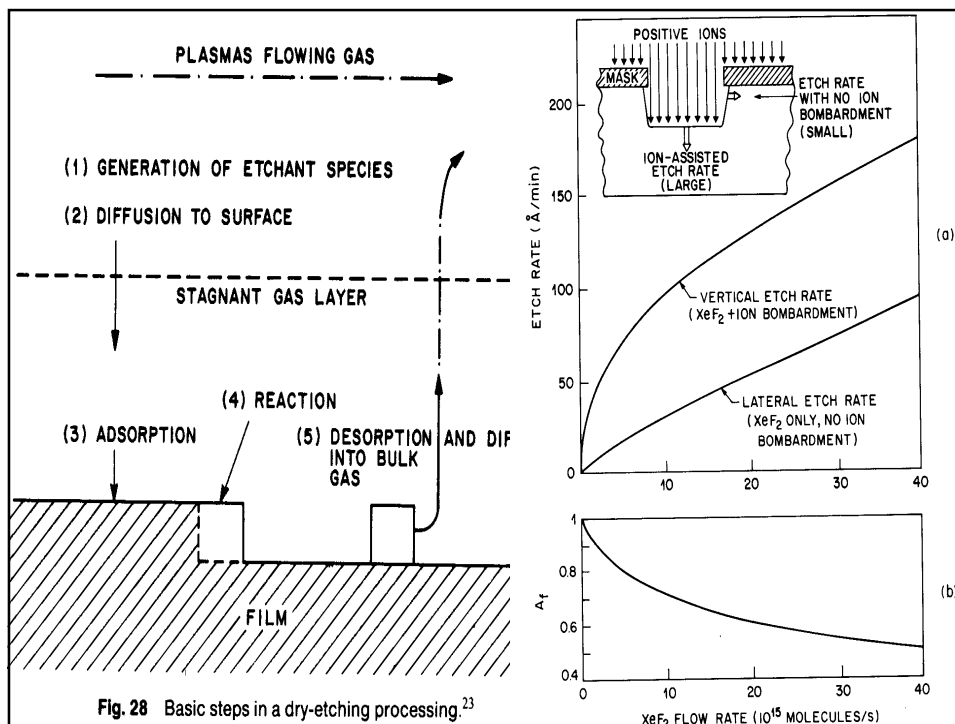
Quando um filme apresenta problemas para ser removido por corrosão úmida, a corrosão seca consegue remover normalmente.

Por exemplo:

- Fotorresiste;
- Silício Policristalino
- Carbono

Parâmetros Importantes da Corrosão

- potência de RF aplicada
- pressão total
- vazão dos gases
- temperatura do eletrodo
- tensão de VDC



Vantagens da corrosão SECA sobre a Úmida:

- menor sensibilidade a variações de temperatura;
- maior facilidade de interrupção do processo;
- melhor repetibilidade;
- mantém estruturas de pequenas dimensões;
- pode ter menor presença de particulados;
- produz menos resíduo químico;
- Independe da orientação cristalográfica.

Reatores utilizados na Corrosão SECA

- PE - PLASMA ETCHING
- RIE - REACTIVE ION ETCHING
- ECR - ELECTRON CYCLOTRON RESSONANCE
- ICP - INDUCTEVELY COUPLED PLASMA



PLASMA ETCHING - PE

Foi o primeiro reator introduzido na Microeletrônica no início da década de 70.

É baseado em média pressão (10^{-1} - 10^1 torr), baixa potência de geração de plasma, livre caminho médio das espécies no plasma é baixo comparado com o tamanho do reator.

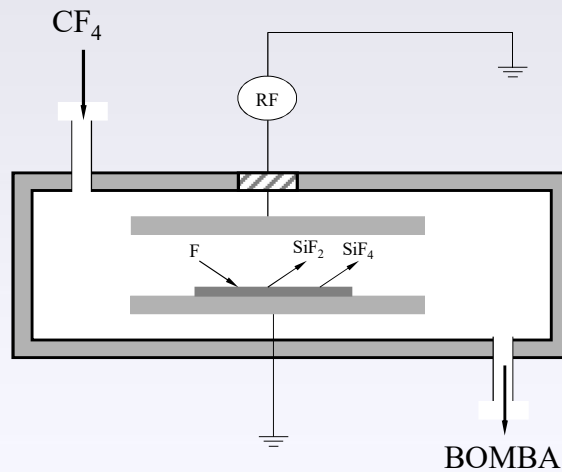
Dessa forma, a corrosão depende primariamente da reação química entre as espécies reativas do plasma do que ataque iônico.

Pode-se dizer que o processo é semelhante à corrosão úmida.

Geralmente é um processo de corrosão isotrópico. (ruim!!)



Reator para Plasma Etching

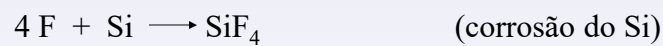
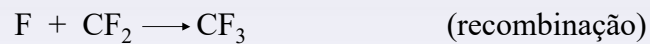
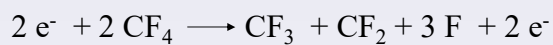


PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 19

Mecanismo no PE - Corrosão de silício

A superfície da amostra é atingida por radicais ou átomos.

Íons positivos chegam com **baixa energia** e **não** contribuem para a corrosão.



Dessas espécies, a espécie atômica encontra-se em maior concentração.

PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 20

RIE - REACTIVE ION ETCHING

É a técnica mais largamente utilizada em corrosão seca.

É baseada na combinação de **atividade química** das espécies reativas geradas no plasma com **efeitos físicos** causados por bombardeamento iônico.

O bombardeamento iônico ocorre devido a polarização negativa que é gerada no eletrodo da amostra por aplicação de RF. Dessa forma, íons positivos são atraídos com alta energia. **esse efeito é semelhante ao sputtering.**

Os íons possuem alta energia devido às menores pressões utilizadas no RIE, de 10 - 200 mtorr.



Mecanismo no RIE

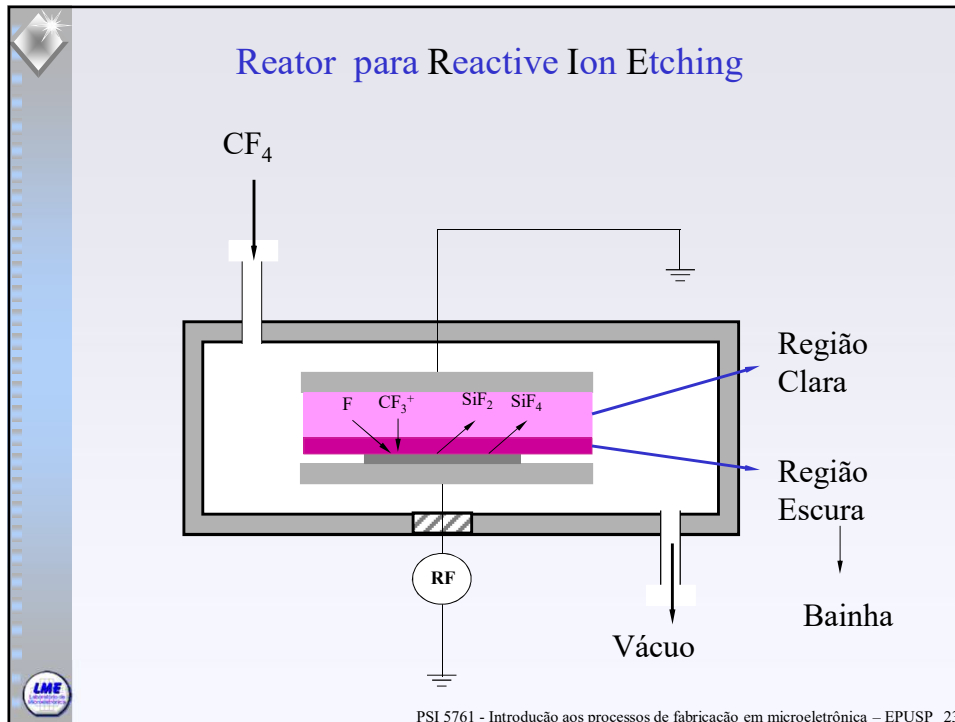
No processo RIE, a superfície da amostra está exposta a íons positivos, radicais ou átomos. O efeito dos radicais e átomos é o mesmo que no plasma etching.

O bombardeamento iônico auxilia a reação química, da ordem de até duas ordens de magnitude.

O bombardeamento iônico ajuda através da:

- formação de ligações incompletas
- criação de “sítios ativos”
- reorganização de moléculas
- remoção de produtos voláteis da superfície





Exemplo de reações com RIE

Corrosão de fotoresiste

$$C_xH_yO_z + O_2 \longrightarrow CO + CO_2 + H_2O + \dots$$

Processo químico, por isso não necessita de bombardeamento iônico.

Corrosão de Óxido de Silício

Em geral a taxa de corrosão do silício é MAIOR do que a do ÓXIDO DE SILÍCIO. Para AUMENTAR a Seletividade é utilizado polímero, gerado durante a própria corrosão, para PROTEGER as paredes do silício.

$$CF_4 + H_2 + e^- \longrightarrow C_xH_yF_3 + F + e^-$$

$$SiO_2 + 4 F \longrightarrow SiF_4 + 2 O$$

PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 24

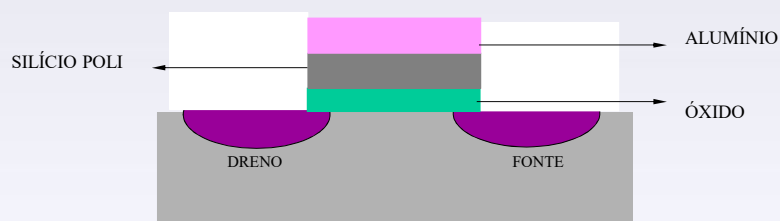
A taxa de deposição de polímero é função da relação c/f, da pressão, da potência, da área exposta de fotorresiste e da taxa de liberação de oxigênio.

Comumente é usado o $\text{CF}_4 + \text{H}_2$, que aumenta a taxa de corrosão do óxido, mantendo a seletividade com o silício.



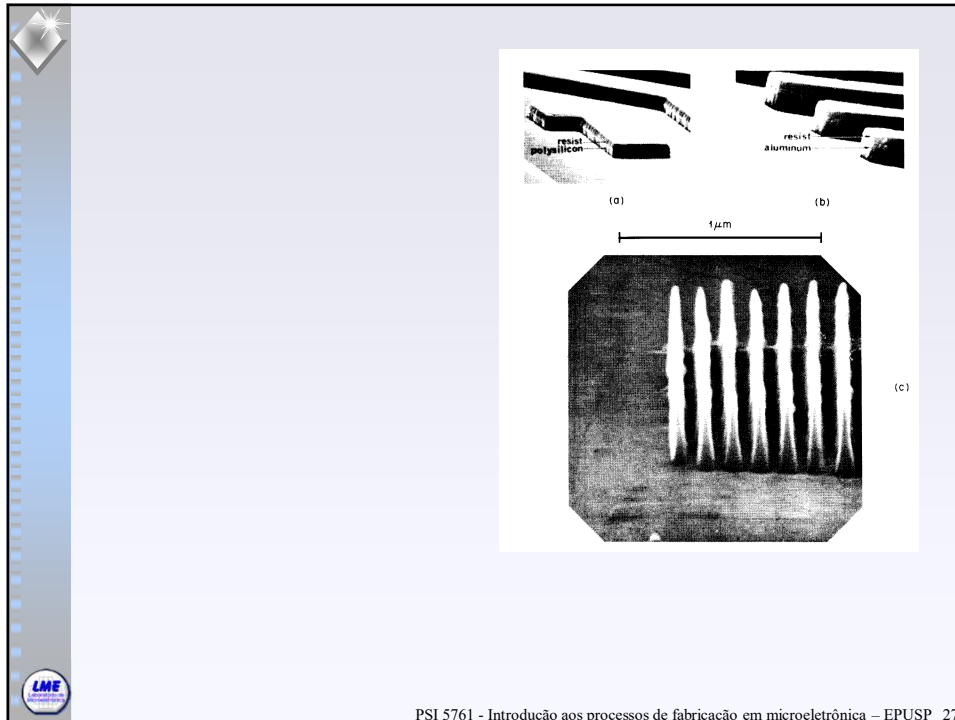
Corrosão de Silício

Utilizado na corrosão de porta de silício policristalino



Corrosão mais eficiente através da utilização de gases fluorados: CF_4 , SF_6 .





PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 27

Corrosão de Alumínio



Os produtos AlF_3 e AlBr_3 não são voláteis, por isso apenas gases clorados podem ser utilizados.

O principal problema deste tipo de corrosão é a remoção do Al_2O_3 , que é bastante fino mas muito estável, sendo difícil de ser removido.

Problema a ser evitado é a formação de HCl , da reação do Cl e vapor d'água do ambiente.

PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 28

Caracterização do Plasma

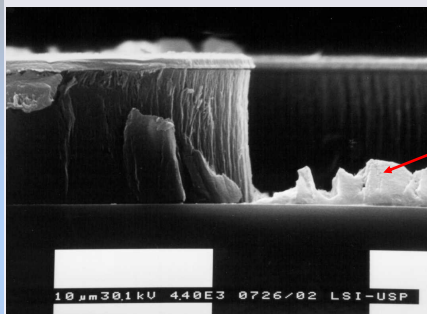
Independente da finalidade do plasma, este pode ser caracterizado por:

- cor do plasma - visual
- espectrometria de massa
- espectroscopia de emissão
- fluorescência induzida por laser
- sonda de Langmuir

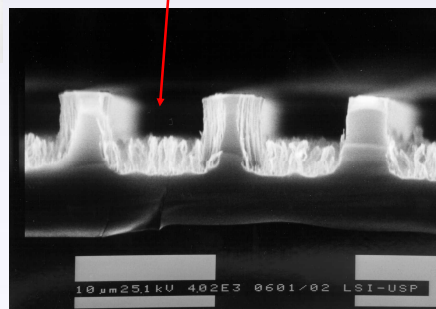


PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 29

Problemas com Corrosão Seca



Resíduos???



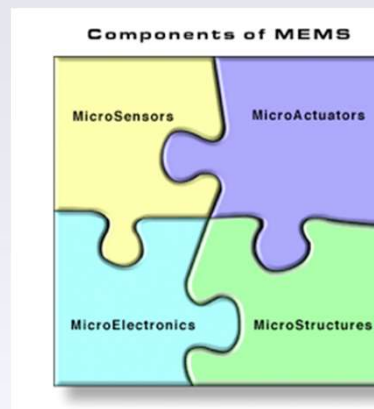
PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 30

<p><100mTorr</p> <p>100 m Torr</p> <p>Alta Pressão</p>	<p>SPUTTERING FÍSICO</p> <ul style="list-style-type: none"> - Transferências de momento - Decapagem direcionada - Baixa seletividade - Possibilidade de danos por radiação 	
	<p>RIE</p> <ul style="list-style-type: none"> - Físico e Químico - Direcional - Seletividade 	
	<p>PLASMA ETCHING</p> <ul style="list-style-type: none"> - Químico - Isotrópico - Alta seletividade - Baixa possibilidade de danos por radiação 	
SÓLIDO	GÁS	PRODUTOS
Si, SiQ ₂ , Si ₃ N ₄	CF ₄ , SF ₆ , NF ₃	SiF ₄
Si	Cl ₂ , CCl ₂ F ₂	SiCl ₂ , SiCl ₄
Al	BCl ₃ , CCl ₄ , SiCl ₄ , Cl ₂	AlCl ₃ , Al ₂ Cl ₆
Sólidos Orgânicos	O ₂ , O ₂ + CF ₄	CO, CO ₂ , H ₂ O, HF

PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 31

MEMs – Microelectromechanical system

Sistemas microeletromecânicos (MEMS) é a tecnologia de dispositivos microscópicos, particularmente aqueles com partes móveis. Ela funde a escala nano em sistemas nanoeletromecânicos (NEMS) e nanotecnologia.



É uma tecnologia que de forma geral pode ser definida como sendo elementos mecânicos e electro-mecânicos miniaturizados (isto é, dispositivos e estruturas) que são feitos usando as técnicas de **microfabricação**.

PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 32

MEMS

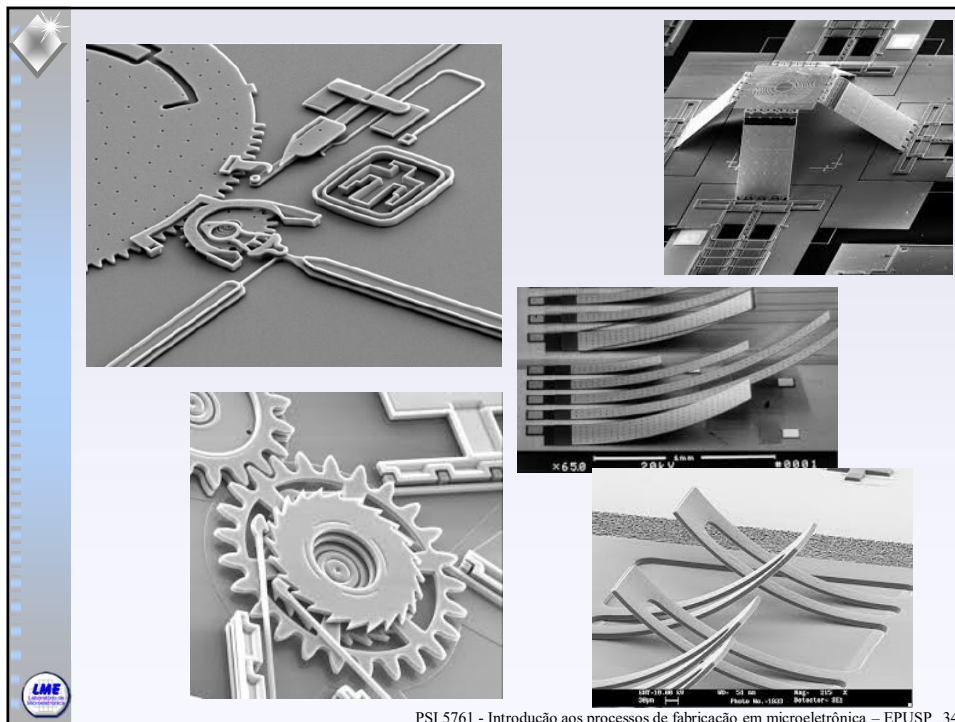
As dimensões físicas críticas dos dispositivos de MEMS podem variar de bem abaixo de um micrón na extremidade inferior do espectro dimensional, até vários milímetros.

Da mesma forma, os tipos de dispositivos MEMS podem variar de estruturas relativamente simples, sem elementos móveis, a sistemas eletromecânicos extremamente complexos, com múltiplos elementos móveis sob o controle de microeletrônica integrada.

O principal critério de MEMS é que tenha menos alguns elementos com algum tipo de funcionalidade mecânica, independentemente de esses elementos poderem ou não se mover.

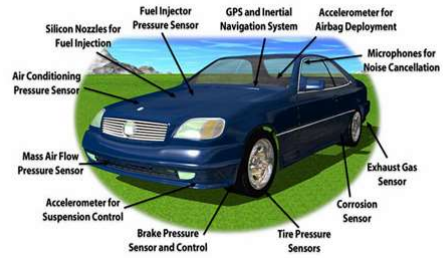
Nos MEMS a corrosão adquire um papel central na fabricação dos dispositivos.

PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 33



PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 34

Automotive Applications of Microelectromechanical Systems (MEMS)



G. Lammot et al./Sensors and Actuators A 92 (2001) 52-59

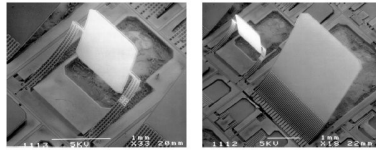
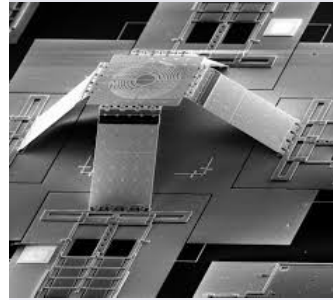


Fig. 7. SEM pictures of free-standing, actuatable, tunable interference filters of density-modulated porous silicon lifted out of plane. The plates contain 256 layers periods with high and low indices of refraction. Left: with two actuator arms, dimensions: $1100\mu\text{m} \times 1850\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$. Right: with oblong actuator, dimensions: $2570\mu\text{m} \times 500\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$.

G. Lammot et al./Sensors and Actuators A 92 (2001) 52-59

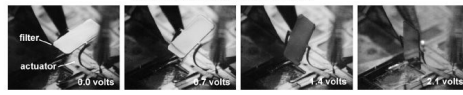
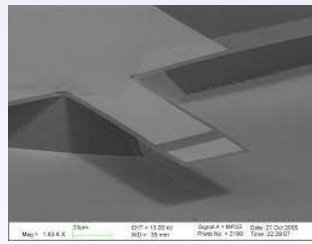


Fig. 9. Optical filter of porous silicon in motion. The tilt angle is a function of the actuator dc voltage and achieves 90° . The filter can also oscillate in resonance at 61 Hz. Dimensions: $1850\mu\text{m} \times 1100\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$.



Tema para TRABALHO

