




# PSI-5761 Introdução aos Processos de Fabricação em Microeletrônica

Laboratório de Microeletrônica  
Escola Politécnica  
Universidade de São Paulo

## Decapagem (etching) Úmida e Seca

Fernando J. Fonseca sala C2-65 (fernando.epusp@gmail.com)  
Roberto K. Onmori sala C2-70 (rkonmori@lme.usp.br)

1




## Tipos de decapagem

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

Normalmente utiliza-se a DECAPAGEM **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”.



PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 2

2

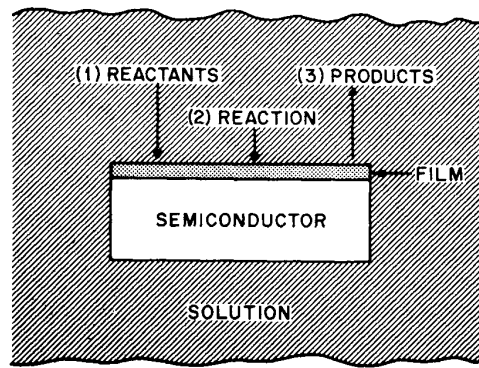
## Parâmetros da Decapagem

### Seletividade

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

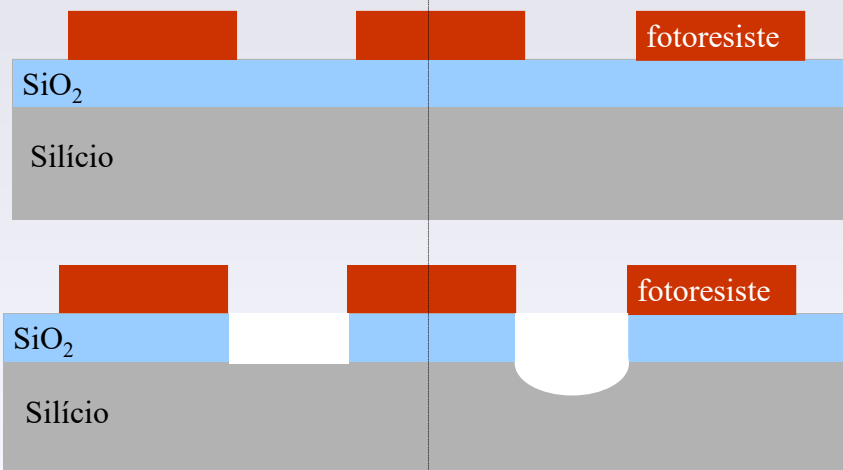
$$S = \text{taxa de decapagem do filme} / \text{taxa de decapagem do substrato}$$

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



Basic mechanisms in wet chemical etching.

### Seletividade



Seletividade  $\ll 1$   
entre o SiO<sub>2</sub> e o silício  $\Rightarrow$  bom

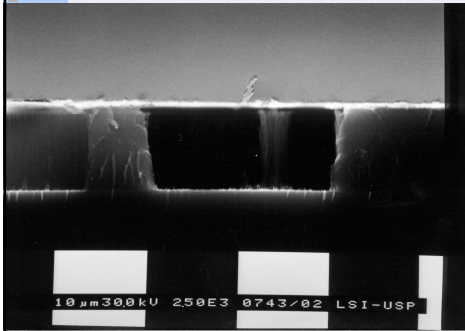
Seletividade = 1  
entre o SiO<sub>2</sub> e o silício  $\Rightarrow$  ruim

## Parâmetros da Decapagem

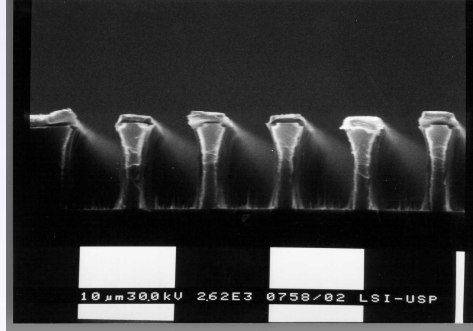
### Anisotropia

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

$A = 1 - (\text{taxa de decapagem horizontal do filme} / \text{taxa de decapagem vertical do filme})$



anisotrópica

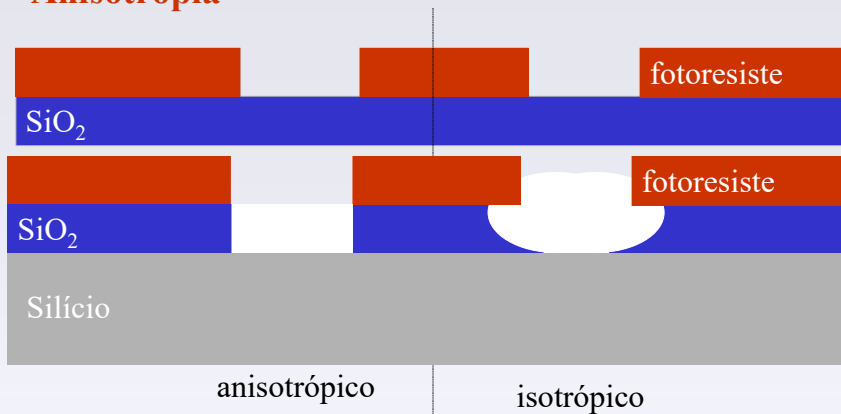


isotrópica

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

5

### Anisotropia



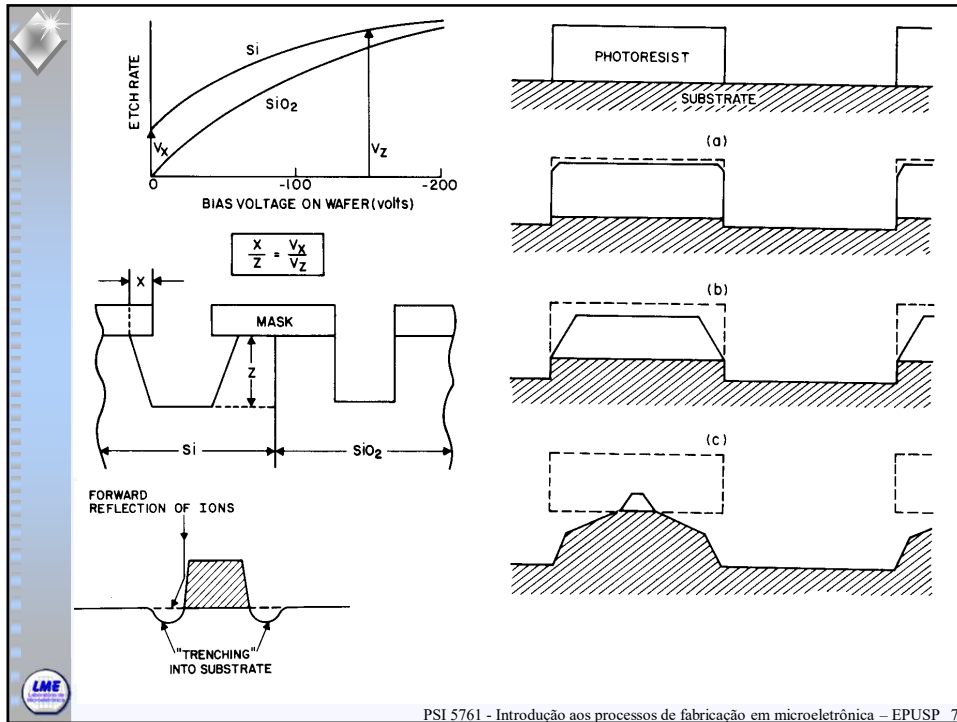
$$A = 1 - (T_{\text{Horiz}} / T_{\text{vert}})$$

Anisotropia = 1  
no SiO<sub>2</sub> => bom

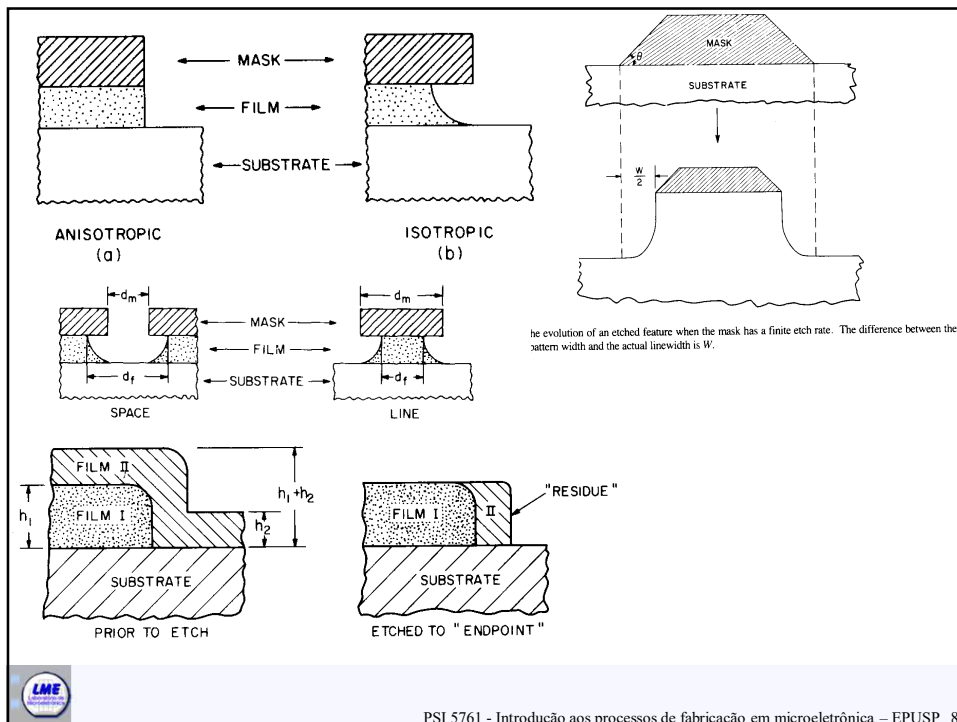
Anisotropia = 0  
no SiO<sub>2</sub> => ruim

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

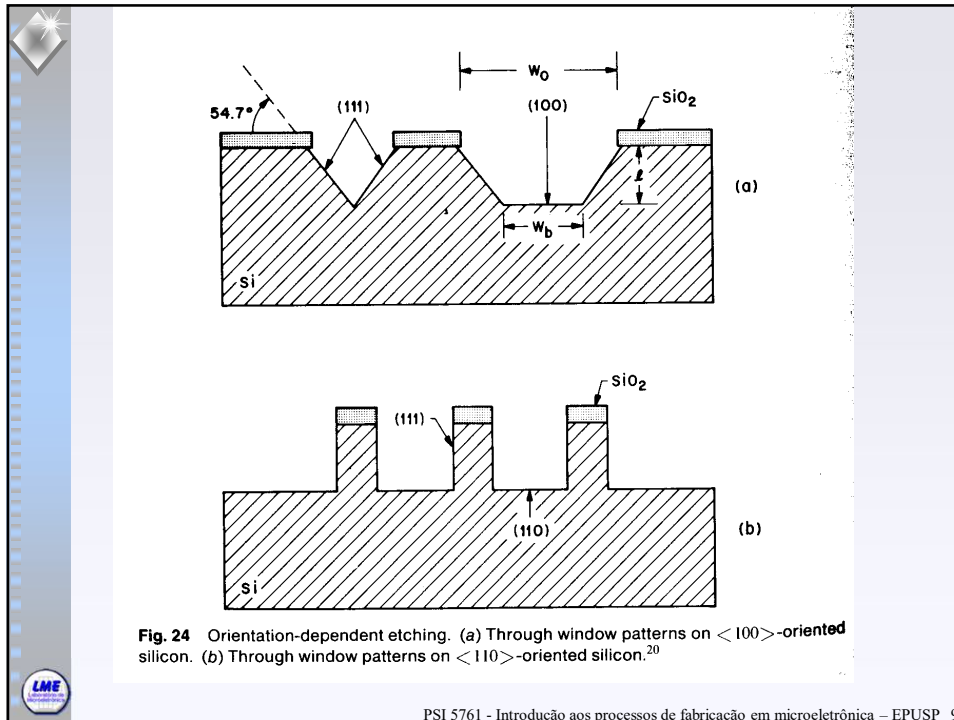
6



7



8



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

9

## Decapagem 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

10

## Algumas receitas de decapagens úmidas

### - ÓXIDO DE SILÍCIO (SiO<sub>2</sub>)

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

### - NITRETO DE SILÍCIO (Si<sub>2</sub>N<sub>3</sub>)

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

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 5 ml HNO <sub>3</sub> 3 ml CH <sub>3</sub> COOH	34.8
	CP-8	Polishing	1 ml HF 5 ml HNO <sub>3</sub> 2 ml CH <sub>3</sub> COOH 0.3 g I <sub>2</sub> /250 ml solution	7.4
	Junction-staining etch	Measurement of Junction depth	HF + 0.1% HNO <sub>3</sub> –	–
	Orientation-dependent etch	Groove etching	23.4 wt% KOH 13.3 wt% Propyl alcohol 63.3 wt% H <sub>2</sub> O	0.6 for <100> 6 × 10 <sup>-3</sup> for <111>
GaAs	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O System	Polishing	8 ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1 ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 1 ml H <sub>2</sub> O	0.8 for <111>-Ga 1.5 for all other
	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O System	Polishing	3 ml H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 1 ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 50 ml H <sub>2</sub> O	0.4 for <111>-Ga 0.8 for all other



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

12

**Table 3** Etchants for Insulators and Conductors

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

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

13

## Decapagem 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 decapagem 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

14

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

Por exemplo:

- Fotorresiste;
- Silício Policristalino
- Carbono

### Parâmetros Importantes da Decapagem Seca

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



15

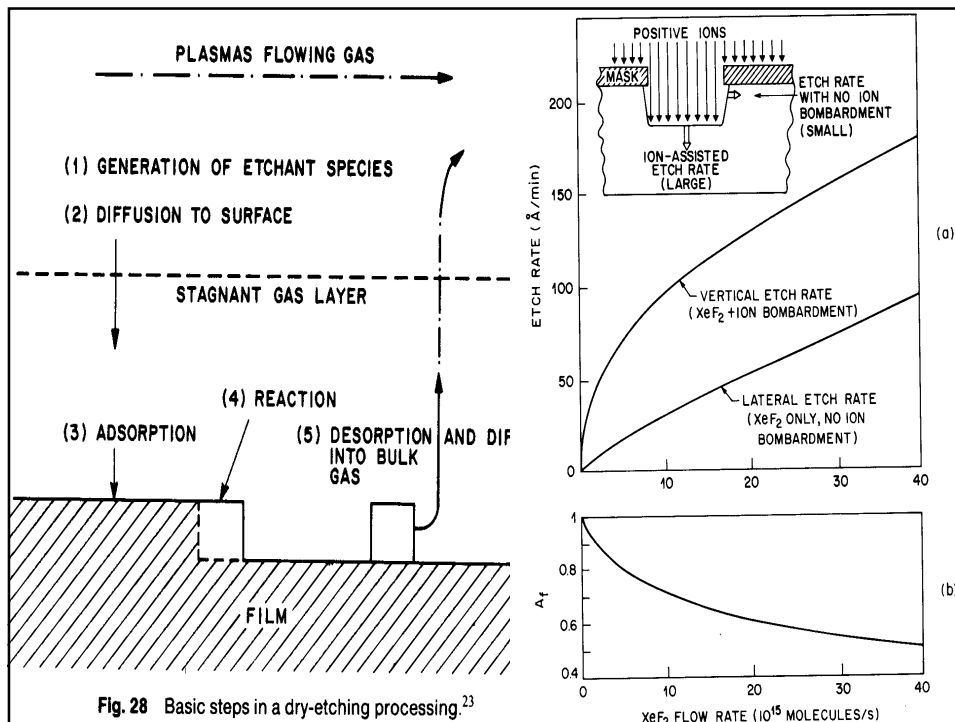


Fig. 28 Basic steps in a dry-etching processing.<sup>23</sup>

16



### Vantagens da decapagem 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 Decapagem SECA

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



PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 17

17

## 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 decapagem depende primariamente da reação química entre as espécies reativas do plasma do que ataque iônico.

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

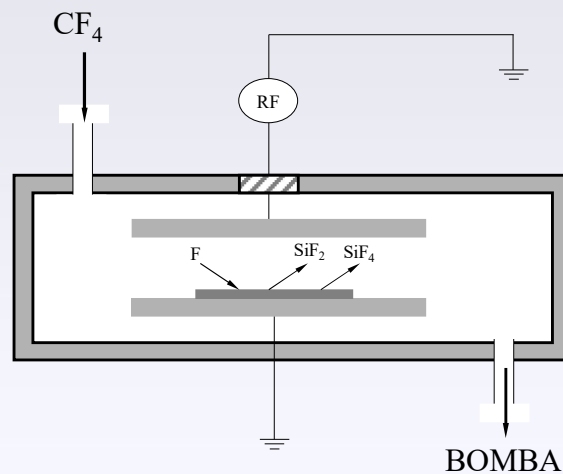
Geralmente é um processo de decapagem isotrópico. (ruim!!)



PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 18

18

## Reator para Plasma Etching

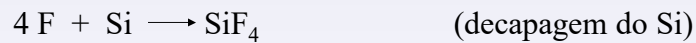
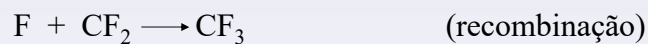
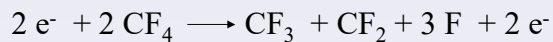


19

## Mecanismo no PE – Decapagem de silício

A superfície da amostra é atingida por radicais ou átomos.

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



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



20

## RIE - REACTIVE ION ETCHING

É a técnica mais largamente utilizada em decapagem 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

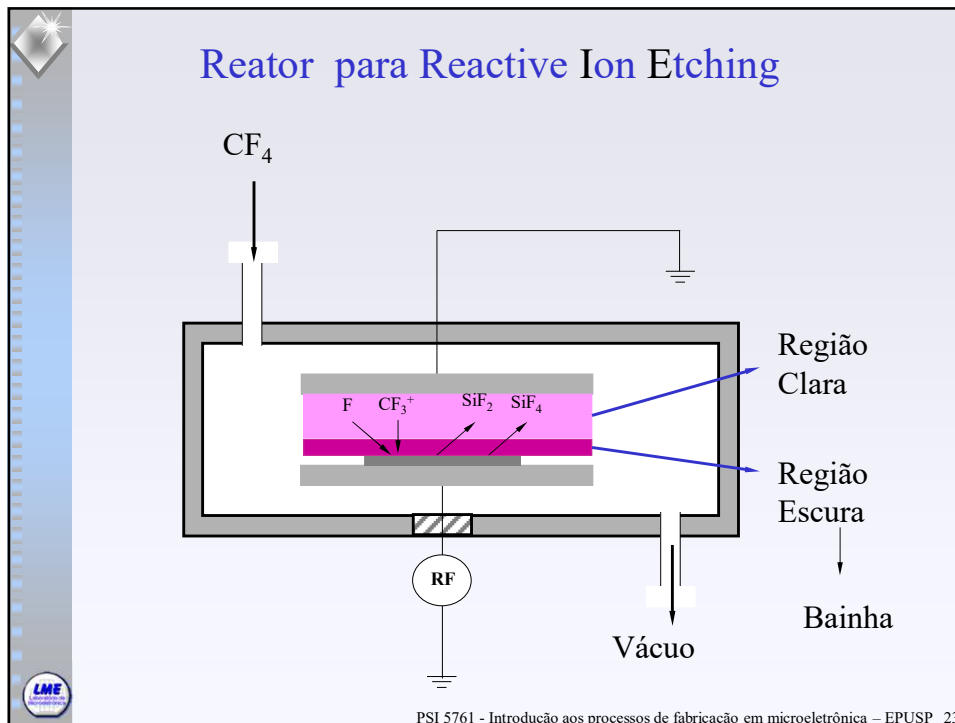
No processo RIE, a superfície da amostra está exposta a íons positivos, radicais ou átomos. O efeito dos radicais e átomos é o mesmo que no *plasma etching*.

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





23

### Exemplo de reações com RIE

**Decapagem de fotoresiste**

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

Processo químico, por isso não necessita de bombardeamento iônico.

**Decapagem 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

24

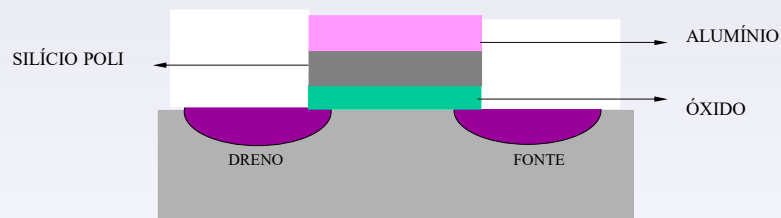
A taxa de deposição de polímero é função da relação  $c/f$ , da pressão, da potência, da área exposta de fotorresiste e da taxa de liberação de oxigênio.

Comumente é usado o  $CF_4 + H_2$ , que aumenta a taxa de corrosão do óxido, mantendo a seletividade com o silício.



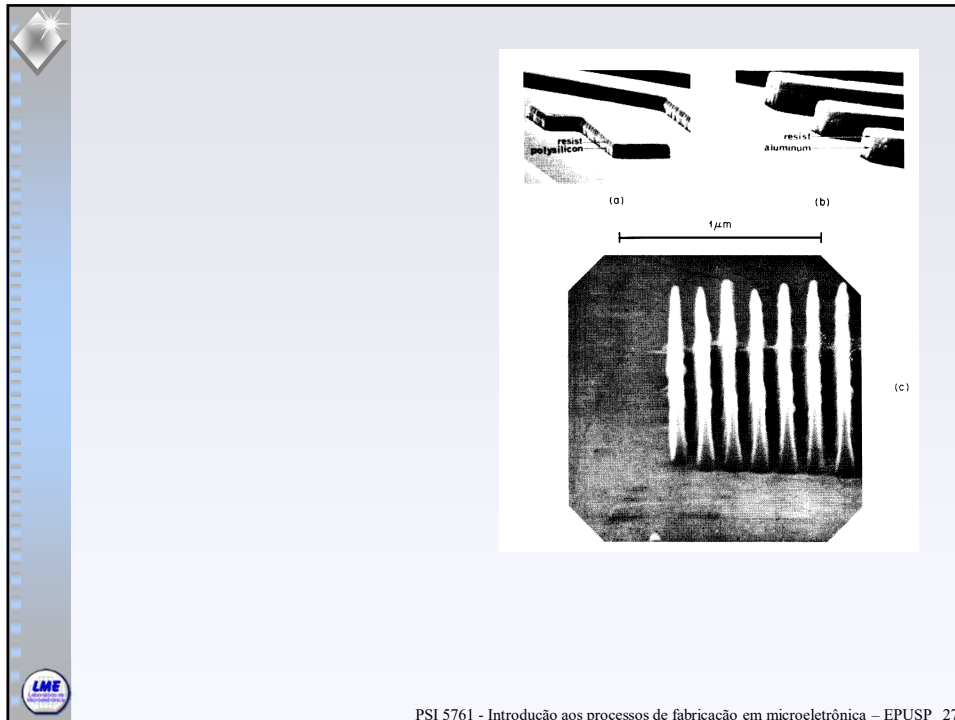
## Decapagem de Silício

Utilizado na decapagem de porta de silício policristalino



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





27

## Decapagem de Alumínio



Os produtos  $\text{AlF}_3$  E  $\text{AlBr}_3$  não são voláteis, por isso apenas gases clorados podem ser utilizados.

O principal problema deste tipo de decapagem é a remoção do  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , que é bastante fino mas muito estável, sendo difícil de ser removido.

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

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

28

## Caracterização do Plasma

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

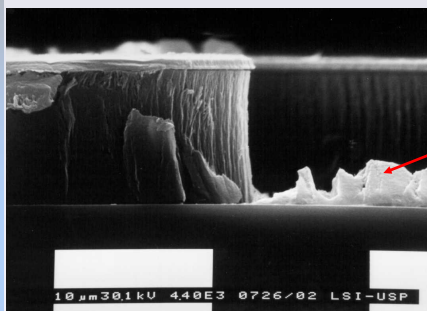
- cor do plasma - visual
- espectrometria de massa
- espectroscopia de emissão
- fluorescência induzida por laser
- sonda de Langmuir



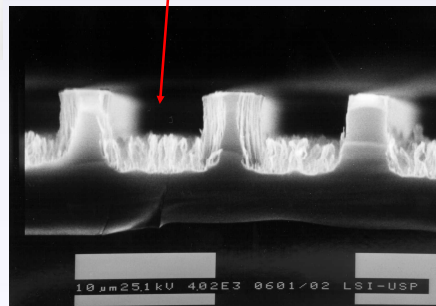
PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 29

29

## Problemas com Decapagem Seca



Resíduos???



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

30

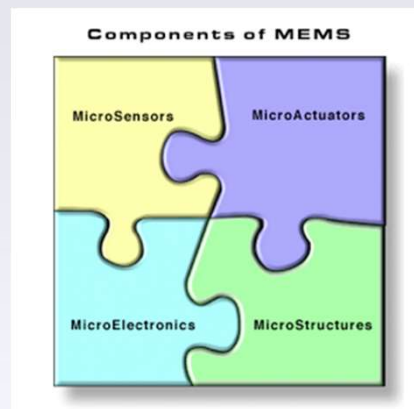
<p>&lt;100mTorr</p> <p>100 m Torr</p> <p>Alta Pressão</p>	<p><b>SPUTTERING FÍSICO</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Transferências de momento</li> <li>- Decapagem direcionada</li> <li>- Baixa seletividade</li> <li>- Possibilidade de danos por radiação</li> </ul>	<p>Energia de Excitação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

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

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

32



## MEMs

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

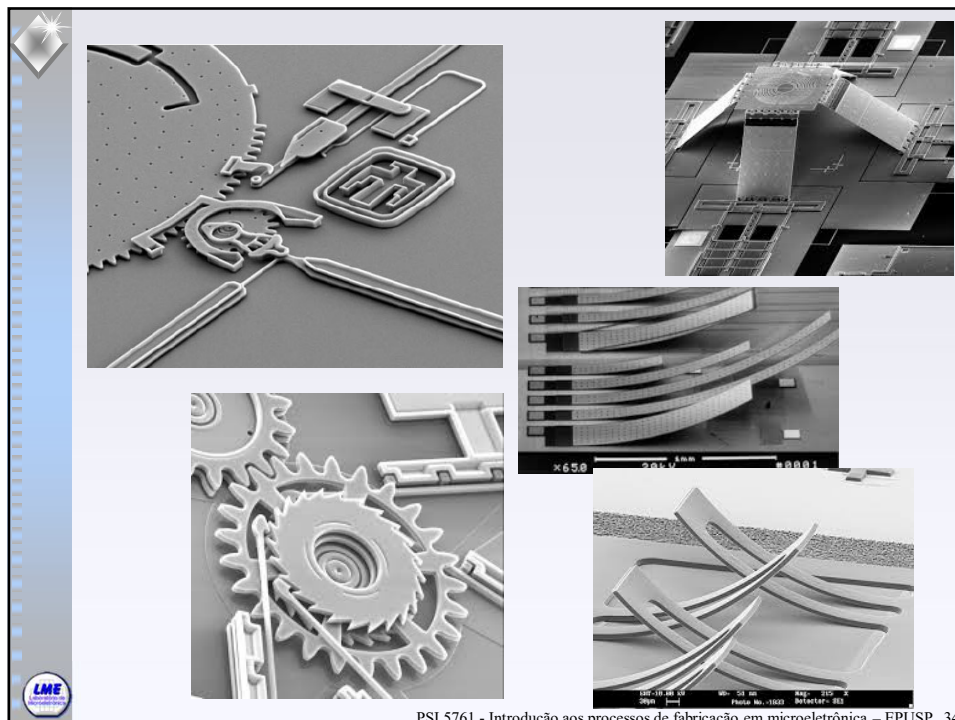
Da mesma forma, os tipos de dispositivos MEMS podem variar de estruturas relativamente simples, sem elementos móveis, a sistemas eletromecânicos extremamente complexos, com múltiplos elementos móveis sob o controle de microeletrônica integrada.

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

Nos MEMs a decapagem adquire um papel central na fabricação dos dispositivos.

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

33



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

34

### Automotive Applications of Microelectromechanical Systems (MEMS)

G. Lammot et al./Sensors and Actuators A 92 (2003) 52-59

Fig. 7. SEM pictures of flow-rate-filg, actuatable, tunable interference filter of densely modulated porous silicon film on Si of glass. The glass contains 256 layers periods with high and low indices of refraction. Left: with two actuator arms, dimensions: 1100µm x 1850µm x 30 µm; Right: with oblique actuator, dimensions: 2700µm x 2000µm x 30 µm.

G. Lammot et al./Sensors and Actuators A 92 (2003) 52-59

Fig. 8. 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. Electrostatic: 1850µm x 1100µm x 30 µm.

Mag: 1.83 K X  
Dist: 13.52 µm  
WD: 38 mm  
Signal A = 895.0  
Date: 21 Oct 2005  
Phot: N4 = 2100  
Time: 22:29:07

PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 35

35

# Tema para TRABALHO

PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica – EPUSP 36

36