

Plasmas tecnológicos

Dr. Stanislav Moshkalev

CCS-UNICAMP

Processos em micro-fabricação: ciclo típico

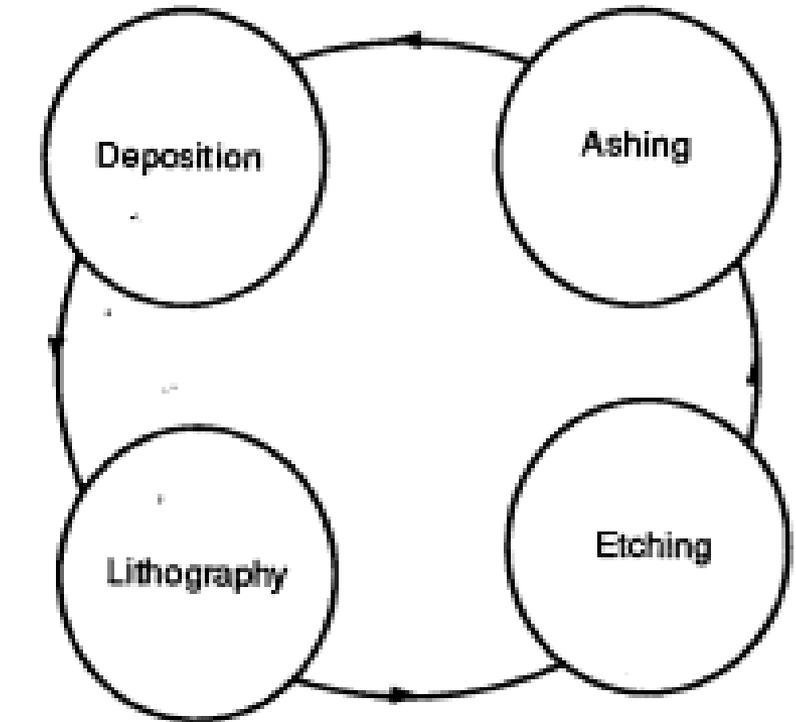
deposição de filmes finos
(semicondutor, metal, dielétrico,
etc.)

litografia (fotorresiste / gravação
com luz UV ou feixes de elétrons)

etching (**corrosão**) - tratamento
(modificação) e remoção do
material não coberto por
fotorresiste

remoção de fotorresiste

Na microeletrônica moderna, 3 dos
4 processos básicos (deposição,
etching e remoção de fotorresiste)
são feitos, geralmente, por **plasma**
(processos “secos”)



Schematic process cycle.

Corrosão seca: uma solução do problema de anisotropia em escala sub-micron

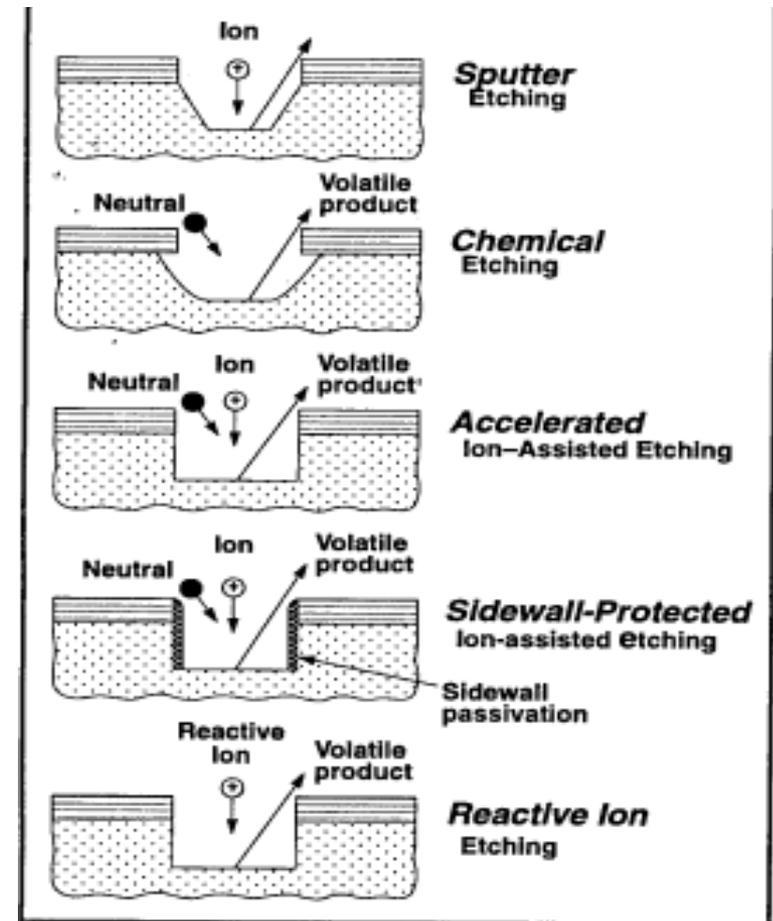
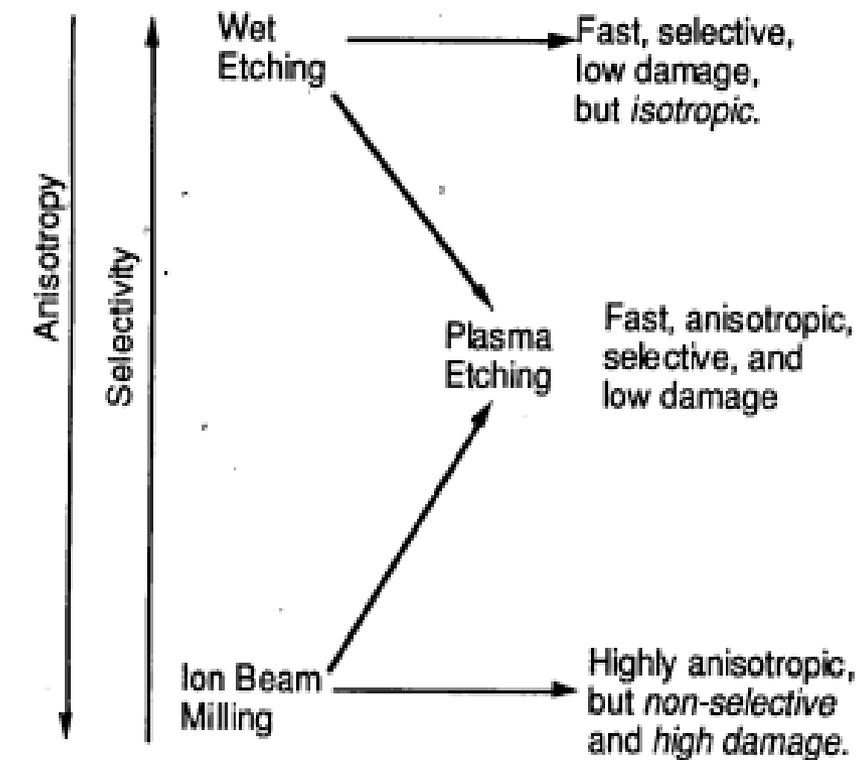


Illustration of plasma etching integrating chemical and physical etching.

The Five Classes of Etching Mechanism

Tipos de plasma

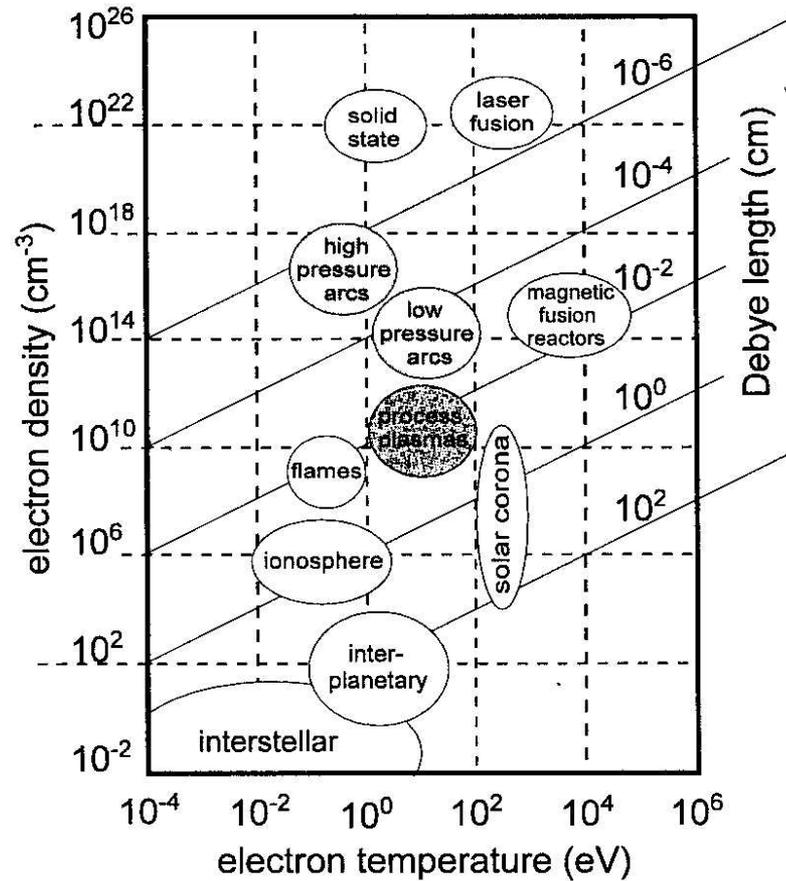


Fig. 8.1. Characteristic electron densities and energies of a number of plasmas. The corresponding Debye lengths are the diagonal lines [13].

Conceito de plasma

- **Plasma**: gás parcialmente ou totalmente *ionizado*, com densidade de elétrons e volume suficientes para estabelecer um *campo elétrico interno* bastante forte criando *um sistema* (partículas + campo) *auto-organizado*

- **Neutralidade** (quase) de plasma: $n_- \approx n_+$

- Parâmetros típicos de **plasmas tecnológicos**:

$$n_e = 10^8 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$$

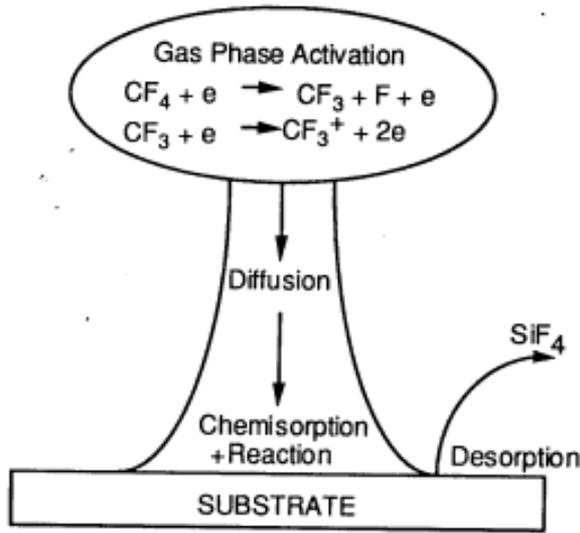
$$n_{\text{gás}} = 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ @ } 10 \text{ mTorr} \text{ (geralmente, } p_{\text{gás}} = 1 - 100 \text{ mTorr)}$$

$$T_e = 1-5 \text{ eV} \text{ (1 eV} = 11600 \text{ } ^0 \text{ K)}$$

$$T_i = 0.05 - 0.5 \text{ eV}$$

$$T_{\text{gas}} = 0.03 - 0.05 \text{ eV}$$

Processos em plasmas reativos (ex.: plasma de CF₄) :



Schematic illustration of Si etching in CF₄ plasma.

Processos elementares básicos no plasma
(veja tabela em baixo, com energias mínimas necessárias para sua implementação) :

- ionização
- dissociação
- excitação (eletrônica , rotacional, vibracional)
- colisões elásticas

Excitation	$CF_4 + e^- \Rightarrow CF_4^* + e^-$	[04.0 eV]
Dissociative attachment	$CF_4 + e^- \Rightarrow CF_3 + F^-$	[07.3 eV]
Dissociation	$CF_4 + e^- \Rightarrow CF_3 + F + e^-$	[12.5 eV]
Dissociative ionization	$CF_4 + e^- \Rightarrow CF_3^+ + F + 2e^-$	[14.8 eV]
Direct ionization	$CF_4 + e^- \Rightarrow CF_4^+ + 2e^-$	[15.5 eV]
Cumulative ionization	$CF_4^* + e^- \Rightarrow CF_4^- + 2e^-$	[eV]
Penning ionization	$CF_4 + A^* \Rightarrow CF_4^- + A + e^-$	[eV]

Processos em plasmas reativos :

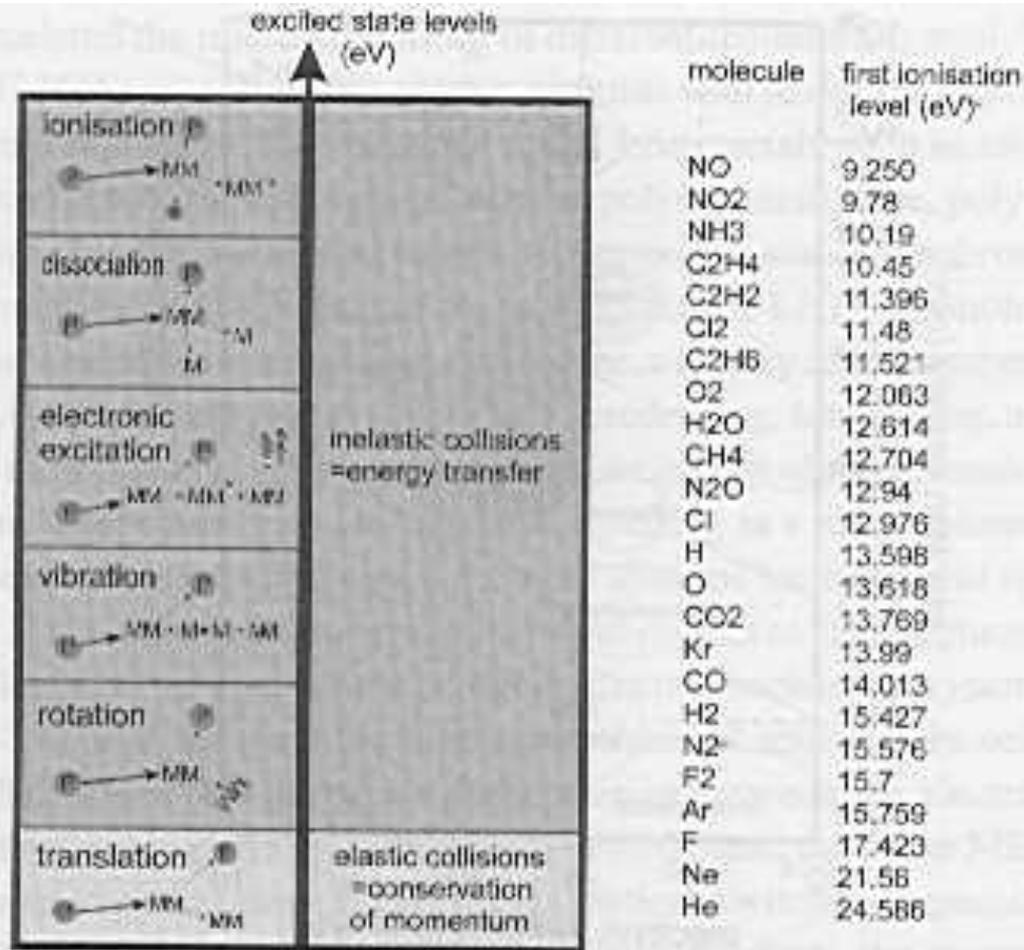


Fig. 8.2. Excited state levels caused by particle collisions with the minimum energy needed for ionization.

Geração de plasma (ruptura)

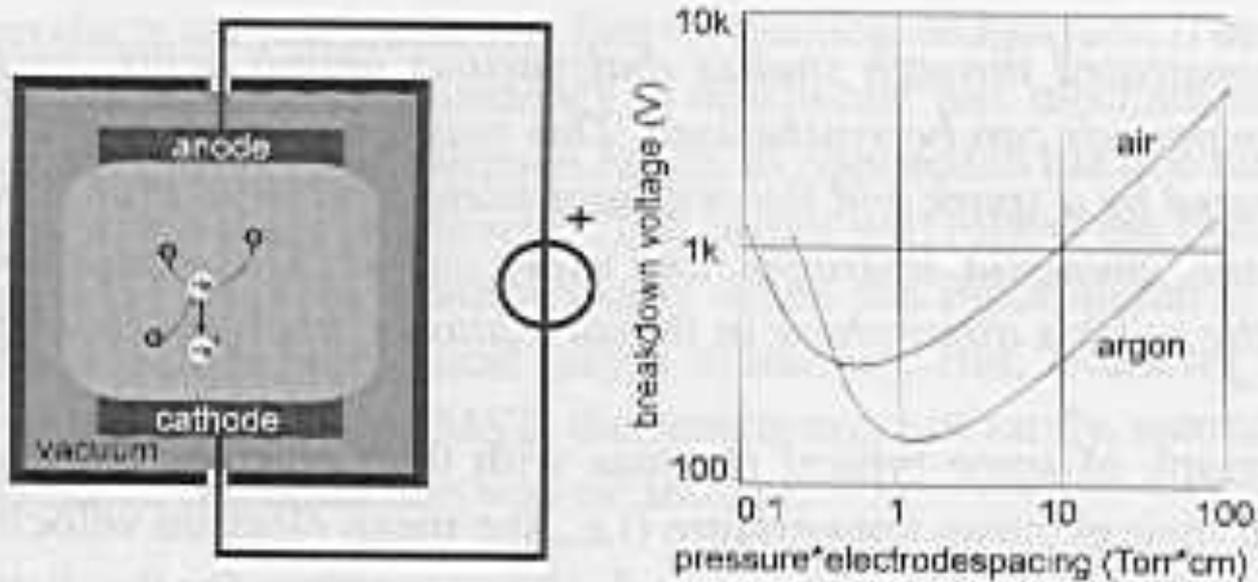
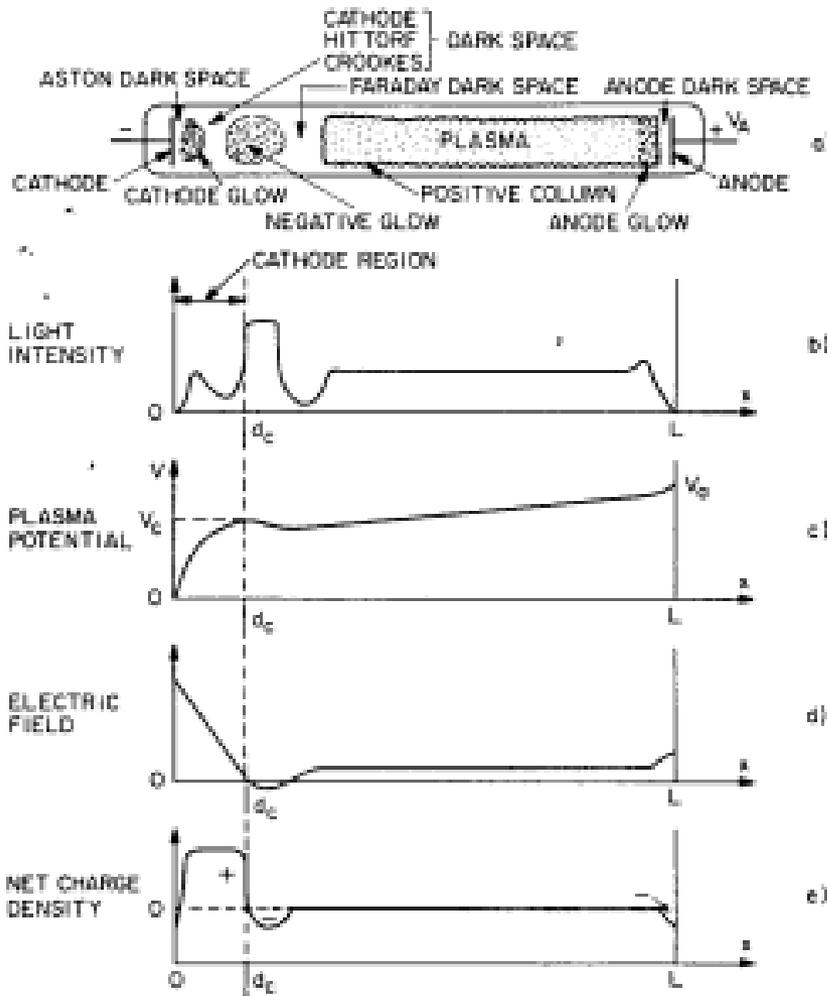


Fig. 8.3. A direct current plasma reactor showing ionization by electrons accelerated by the electric field between two electrodes together with the Paschen curve showing the breakdown voltage of a gas between the two electrodes separated by a distance d at a pressure p .

Plasmas de descargas elétricas: estrutura típica



Exemplo: descarga DC luminosa

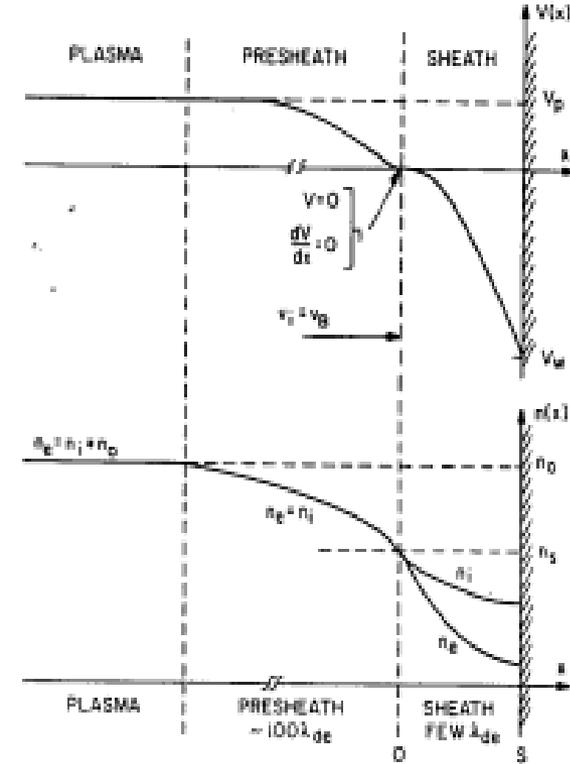
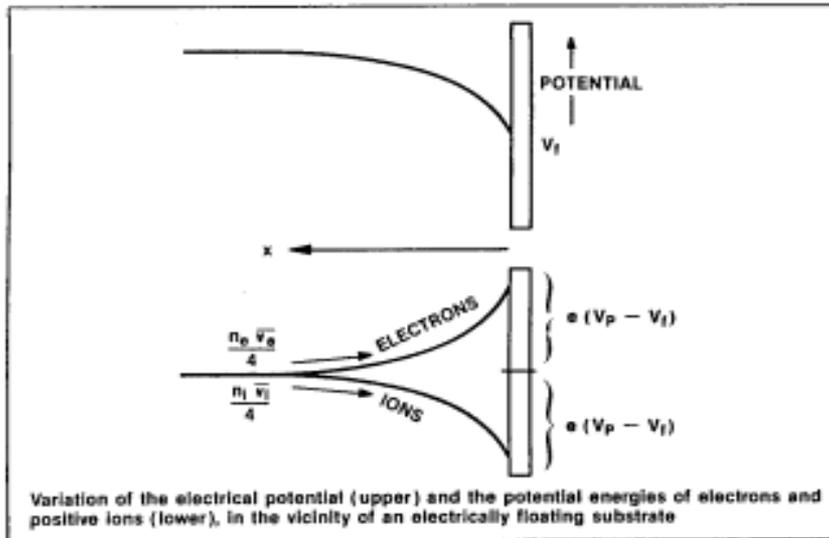
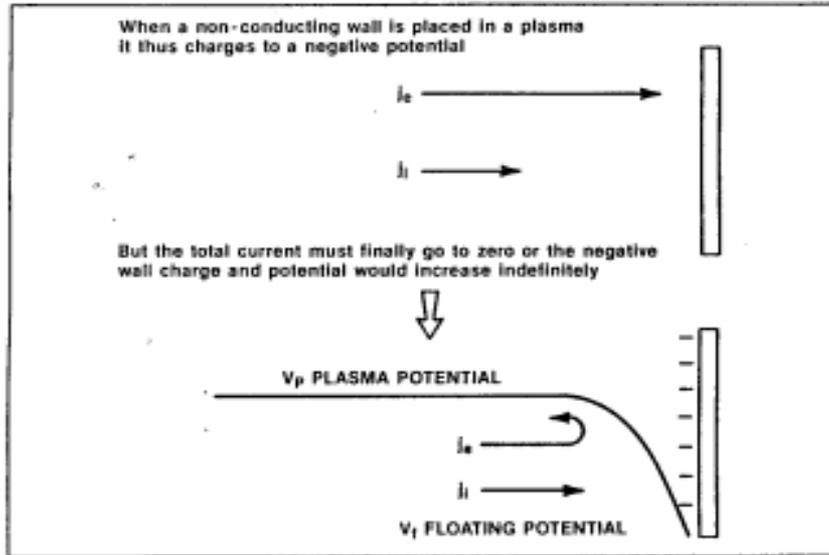
Distribuição de parâmetros

(luminosidade, potencial, campo elétrico, densidade de elétrons e íons) - essencialmente **não uniforme**.

Não-uniformidade maior é observada nas regiões próximas aos eletrodos (**bainhas**)

Axial variation of the characteristics of the normal glow discharge.

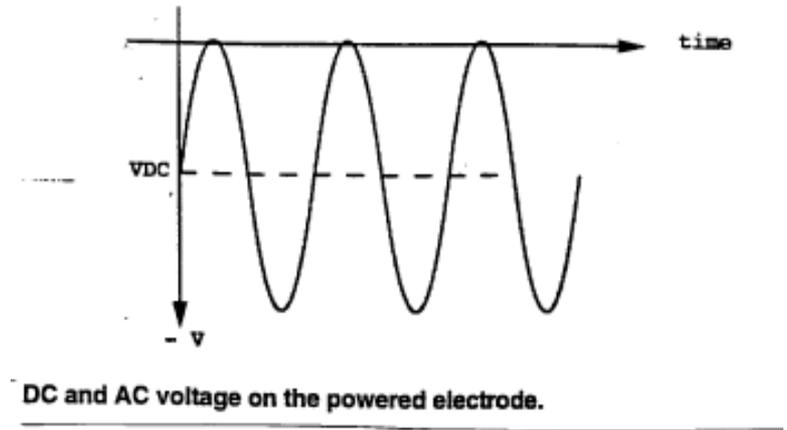
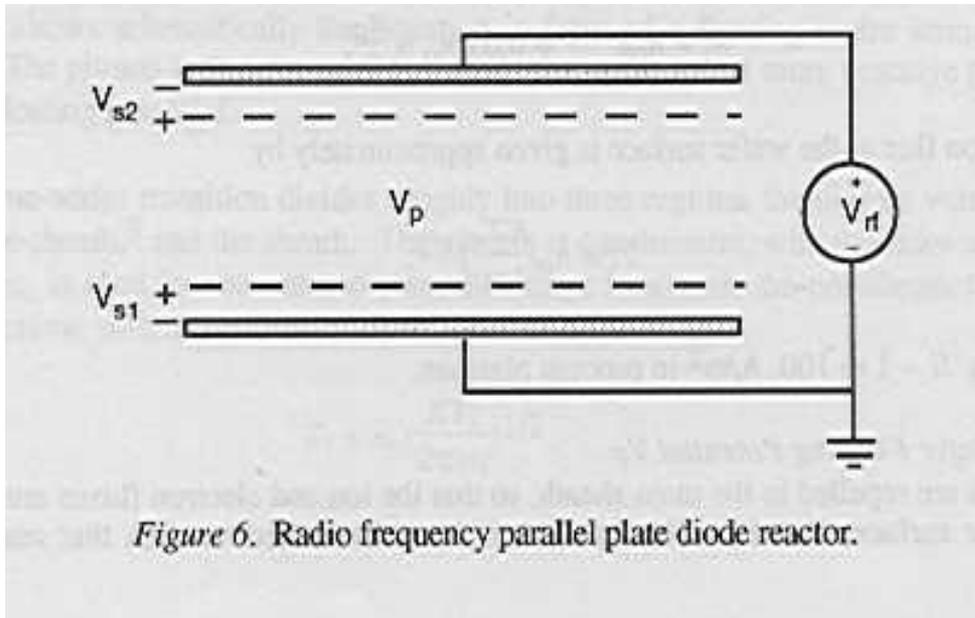
Plasmas de descargas elétricas: bainha (*sheath*)



A schematic of the potential and charged particle number density across the presheath and sheath of a quasi-neutral plasma. Ions leave the presheath with the Bohm velocity v_B .

Fuga de elétrons no estágio inicial da descarga \Rightarrow criação de potencial negativo dos eletrodos (*self-bias*) e formação da bainha (área de carga espacial)

Geração de plasma: descarga elétrica RF (13,56 MHz), acoplamento capacitivo



Reator tipo diodo

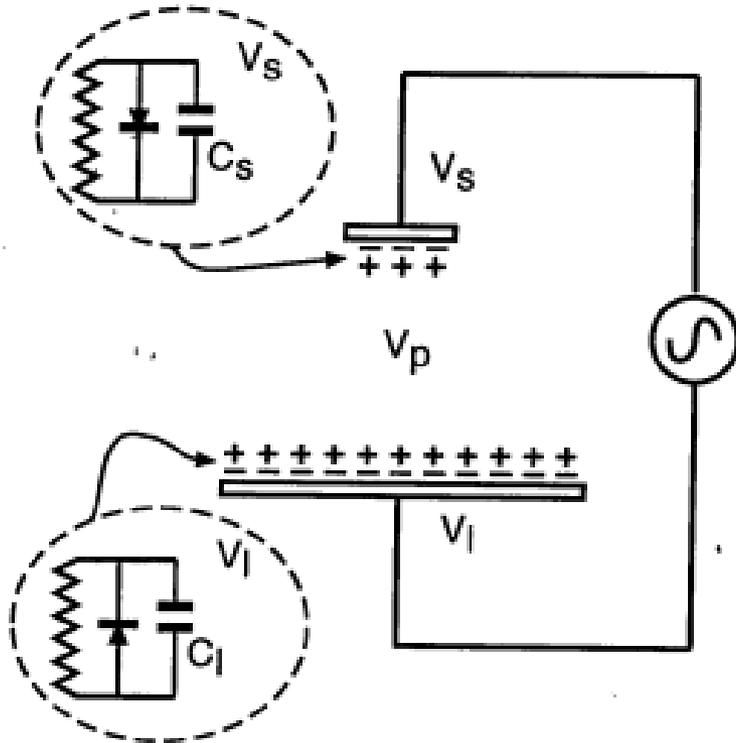
$$V_{rf} = V_{rfo} \sin(\omega t)$$

$$V_{s1} (\text{DC}) = V_{s2} (\text{DC})$$

$$V_{s1} (t) = (V_{rfo} / 2) [1 + \sin(\omega t)]$$

$$V_{s2} (t) = (V_{rfo} / 2) [1 + \sin(\omega t + \pi/2)]$$

Descarga RF, *self-bias* I

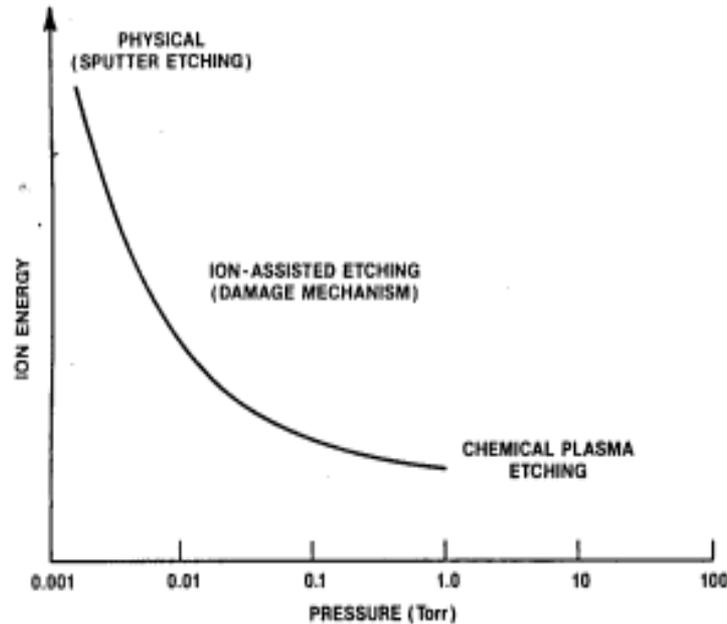


Equivalent Circuit for an Asymmetric Reactor.

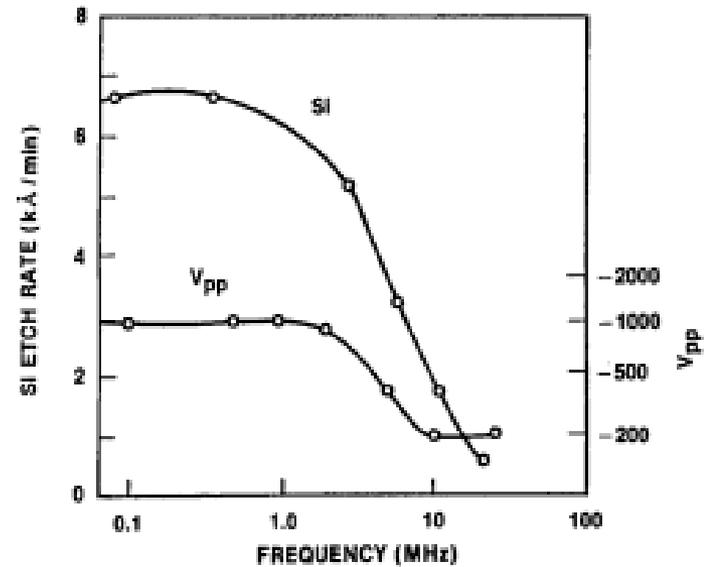
- Descarga assimétrica:
efeito de **razão de áreas**,
 A ,
($Z=1/j\omega C$, $C \sim A$)
 $V_s/V_l = (A_l/A_s)^n$,
 $1 \leq n \leq 2.5$

Self-bias é maior para
eletrodo menor

Descarga RF, *self-bias* II



Ion bombardment energy decreases and the flux of neutral radicals increases with pressure. Accordingly, the mechanism of plasma etching that is favored changes.



The peak-peak voltage and silicon etch rate in a chlorine plasma are plotted against the power frequency. The applied voltage V_{pp} and sheath potential increase with decreasing frequency and provide a more energetic ion flux, which gives higher etch rates.

Geração de plasma: descarga elétrica RF (13,56 MHz), acoplamento capacitivo

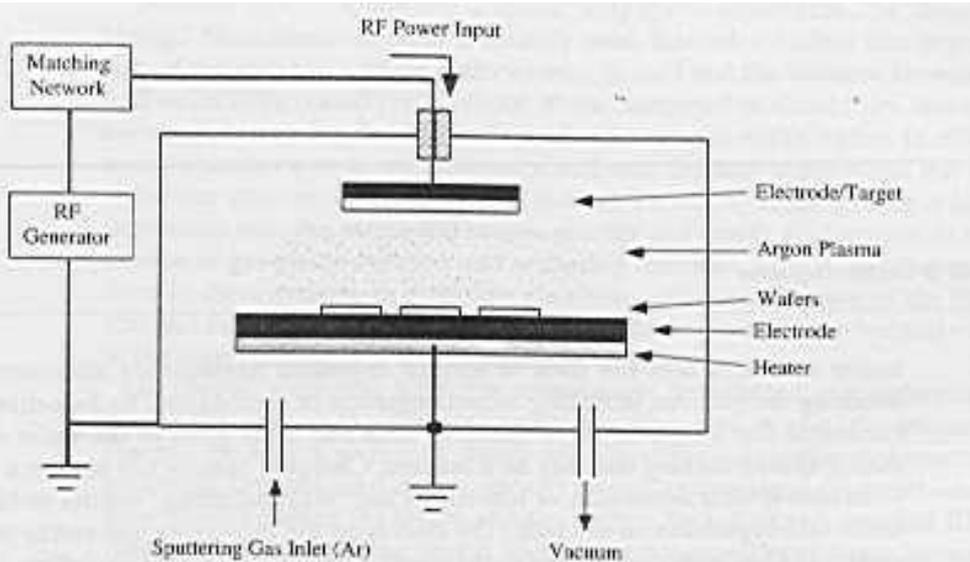


Figure 9-28 Schematic diagram of RF-powered sputter deposition system.

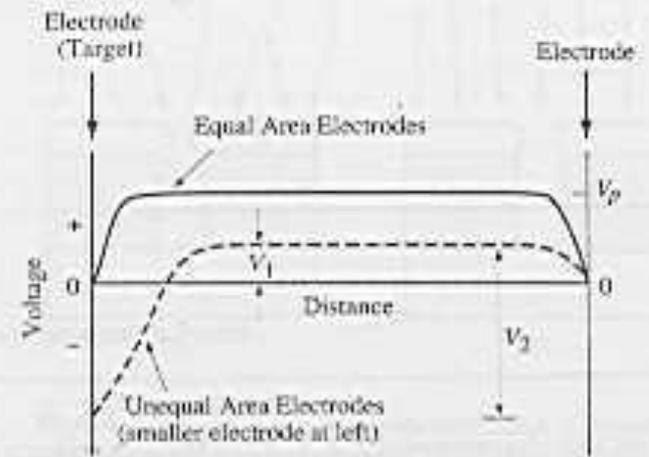


Figure 9-27 Steady-state voltage distribution in RF powered sputtering systems. The wafer sits on the right electrode.

Descarga RF, acoplamento capacitivo: limitações

Vantagens:

- simplicidade, custo baixo

Problemas:

- baixa densidade do plasma ($n_e \sim 10^9\text{-}10^{10}\text{cm}^{-3}$)
- *self-bias* alto $\sim 100\text{-}1000\text{ V}$
- pressão do gás alta ($>10\text{ mTorr}$) \Rightarrow perda da direcionalidade do tratamento (caminho médio livre para íons comparável com a espessura da bainha \Rightarrow espalhamento de íons na bainha)
- falta de controle independente da densidade (n_e) e *self-bias* (energia de íons, E_i)

Alternativas: fontes de plasma de baixa pressão, alta densidade e com controle independente de self-bias (ECR, ICP)

Descarga RF, acoplamento indutivo

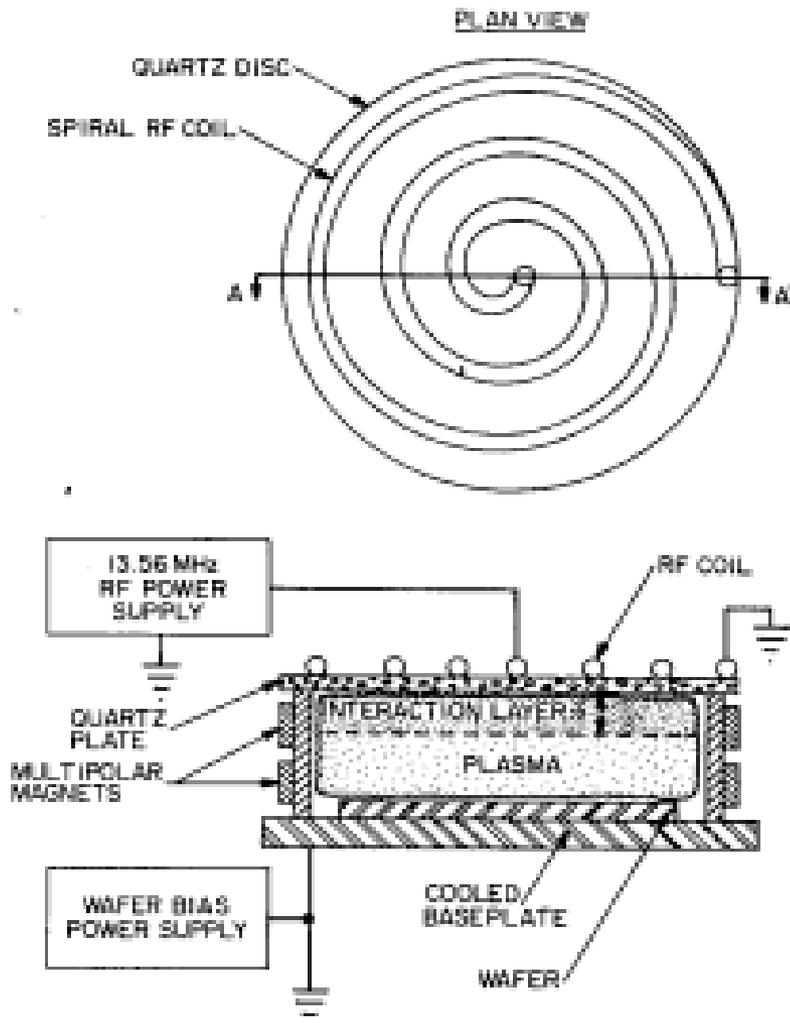
ICP- *inductively coupled plasma*

Alta densidade do plasma:
 $n_e \sim 10^{10}-10^{12}\text{cm}^{-3}$

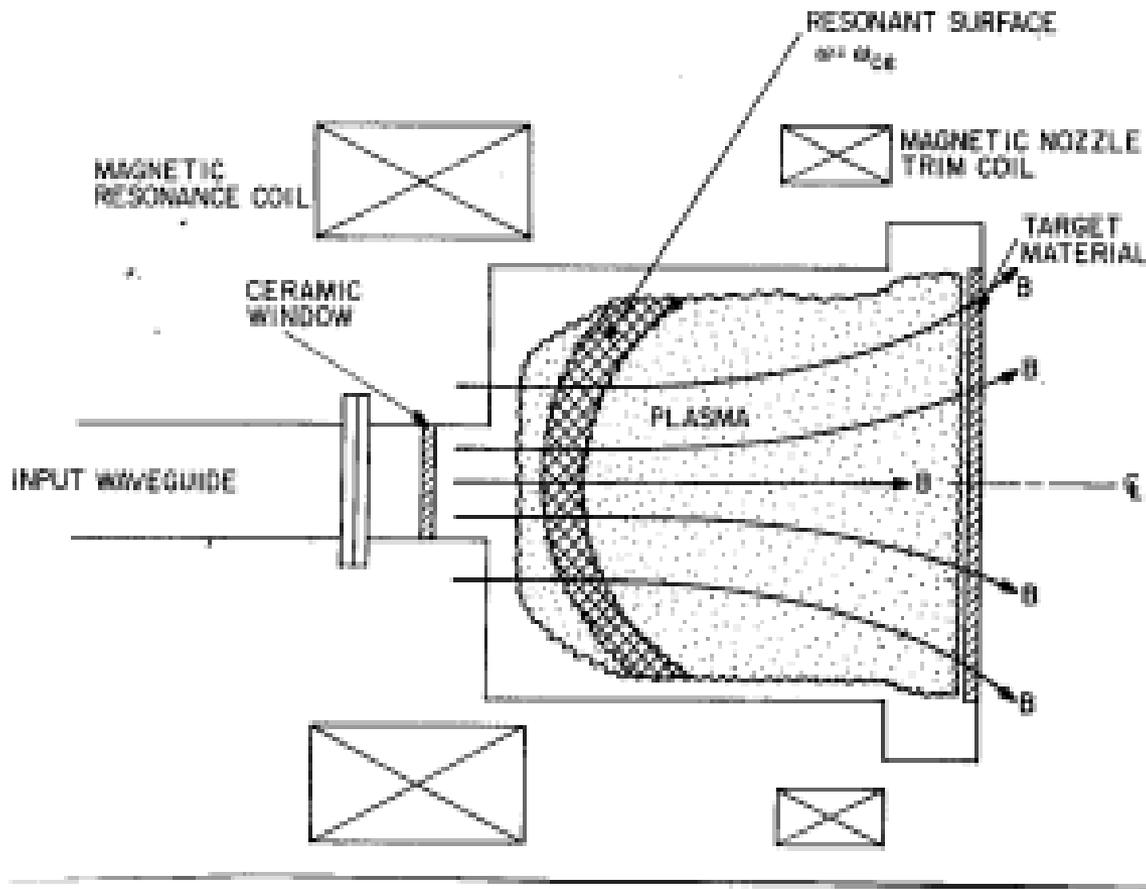
Pressão do gas pode ser
baixa (até ~ 1 mTorr)

Fonte adicional de RF \Rightarrow
controle independente de
polarização do eletrodo
inferior (*self-bias*)

Problemas: acoplamento
capacitivo parasítico \Rightarrow
bombardeamento da janela
de quartzo por ions (injeção
de impurezas)



Descarga ECR (2.45 GHz)



ECR- *electron cyclotron resonance*

Alta densidade do plasma:
 $n_e \sim 10^{10}-10^{12}\text{cm}^{-3}$

Pressão do gas baixa (até
 ~ 1 mTorr ou menos)

Possibilidade de ter uma
fonte adicional de RF \Rightarrow
controle independente de
polarização do eletrodo
inferior (*self-bias*)

Problemas: sistema
magnético complexo \Rightarrow
manutenção relativamente
difícil

Referências

- Plasma etching. An introduction. D.Manos, D.Flamm, Eds., *Academic Press*, 1989
- Plasma Processing of Semiconductors, P.Williams, Ed., NATO ASI Series, *Kluwer Academic Publishers*, 1997
- J.Reece Roth, Industrial Plasma Engineering, v.1, *Institute of Physics Publishing*, 1995
- S.Wolf, R.Tauber, Silicon Processing, v.1, *Lattice Press*, 1986