

Fabricação de Filmes finos: Plasmas/ Sputtering

Henrique Piccoli Moreno

Ciência e Tecnologia de Filmes Finos



Conteúdo

- Plasmas
 - Definição
 - Geração
 - Representação esquemática
 - Classificação
 - Exemplos
 - Aplicações
- Sputtering
 - Definições
 - Representação esquemática
 - Eventos
 - Classificação
 - DC-sputtering
 - Magnetron sputtering
 - Efeito da distância alvo-substrato
 - Efeito da pressão

Plasmas - Definição

- Quarto estado da matéria
- Macroscopicamente neutro, composto por um conjunto de portadores de carga (elétrons livres, íons, fótons, etc.).

Condições/ parâmetros:

- Neutralidade
- Debye shielding
- Frequência

Elétrons são muito mais rápidos que os íons

Plasmas - Geração

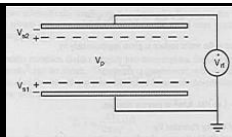
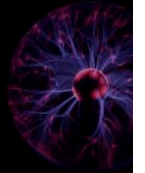
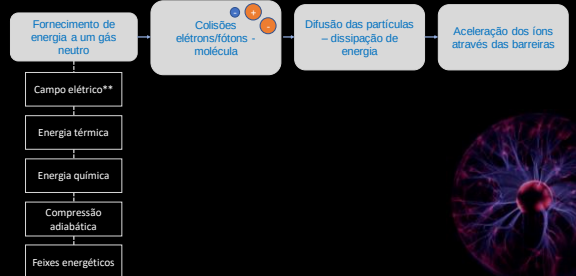


Figura 1. Esquema de geração de plasma por campo elétrico [3].

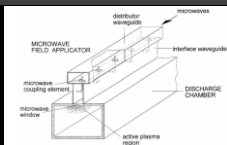


Figura 2. Esquema de geração de plasma por micro-ondas [3].

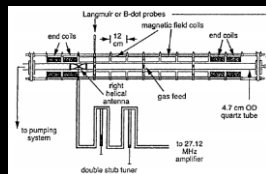
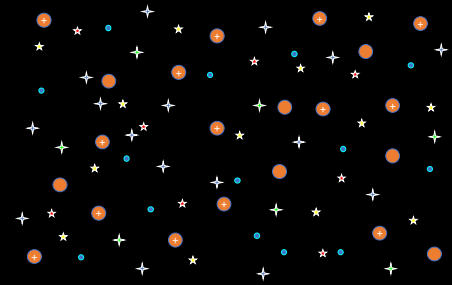


Figura 3. Esquema de geração de plasma por campo magnético [3].

Plasmas – Representação esquemática



Plasmas – Classificação

- Thermal plasma – Espécies formadoras em equilíbrio termodinâmico.
- Non-thermal / Low-temperature plasma:
 - Quase-equilibrium - equilíbrio térmico local.
 - Non-equilibrium – cold plasma.

Princípio:

$m_e \ll m_{ions}$: e⁻ aquecem mais em comparação com os íons. Esses elétrons aquecidos produzem radicais de forma eficiente sem gerar o aquecimento do gás.

- Plasmas de baixa pressão → Bombardeamento iônico → Sputtering

Plasmas - Exemplos

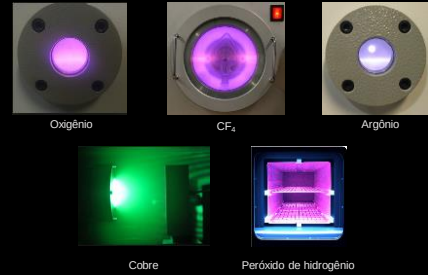


Tabela 1. Fontes de plasma, seus parâmetros e aplicações [3].

Physics	Pressure (mbar)	n_e (cm^{-3})	T_e (eV)	Bias	Application
DC glow	10^{-1} –100				
cathode glow		10^{12}	100	Yes	Sputtering, deposition, surface etching
negative glow		10^{12}	0.1	No	Chemistry, radiation
positive column		10^{12}	1–10	No	Radiation
hollow cathode	10^{-1} –1000	10^{12}	0.1	No	Radiation, chemistry
magnetron	10^{-2}			Yes	Sputtering
microwave					
external heating low voltage	1	10^{12}	0.1	No	Radiation
internal heating	1000	10^{12}	0.1	No	Radiation welding
RF	10				
capacitive					
low pressure	10^{-1} – 10^{-2}	10^{12}	1–10	Yes	Processing, sputtering
moderate pressure	10^{-1} – 10	10^{12}	1–10	No	Processing, deposition
hollow cathode	1	10^{12}	0.1	No	Processing, radiation
RF inductive					
helicon	10^{-1} – 10^{-2}	10^{12}	1	No	Processing, etching
MW	10^{-1} – 10^{-2}	10^{12}	1	No	Processing
closed structure	1000	10^{12}	3	No	Chemistry
SLAN	1000	10^{12}	5	No	Processing
open structure	1000	10^{12}	5	No	Processing
planar	100	10^{12}	2	No	Processing
ECR	10^{-1}	10^{12}	5	No	Processing
Electron beam					
BPD	10^{-1} –1	10^{12}	1	No	Processing
Heliconic barrier discharge	1000	10^{12}	5	No	Ozone, processing chemistry

Plasma - Aplicações

Tabela 2. Aplicações do plasma em engenharia de materiais [3].

Surface modification Etching structuring (microelectronics, micromechanics) cleaning (assembly lines) Functionalization hydrophobization graftability adhesability printability Interstitial modification diffusion (bonding) implantation (hardening) Deposition change of properties mechanical (tribology) chemical (corrosion protection) electrical (integrated circuits) optical (antireflecting coating) architecturing crystallographics (lateral diamonds) morphologic (scaffolds for cells)	Volume-related transformations Energy conversion electrical energy → electromagnetic radiation particular population of banded electronic states tailoring of the population of free electrons in phase space luminescent lamps high-pressure metal vapour lamps gas lasers excimer radiation sources electrical energy → nuclear energy fusion of DT Plasma chemistry transforming into specific compounds production of precursors production of excimeres clean-up of gases odours flue gases, diesel exhaust Carrier functions Electrical current circuit breakers spark gap switches Heal welding/sintering arcs plasma spray thermochemical drivers Particle sources Electrons Ions Neutrals
--	--

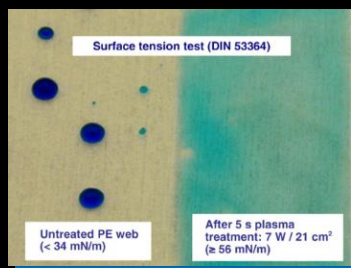


Figura 4. Efeito da ativação de superfície (PE). (Tinta de caneta forma gotas esféricas antes da aplicação do plasma e após formam um filme contínuo sobre a superfície). [4].

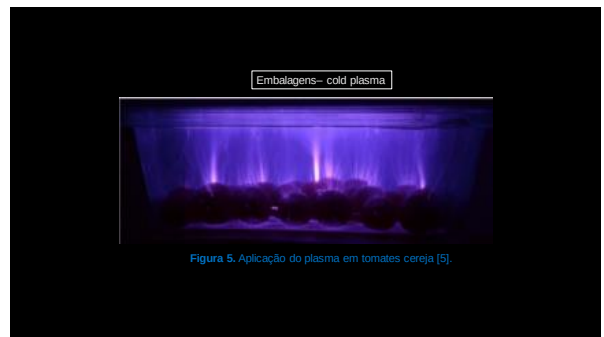


Figura 5. Aplicação do plasma em tomates cereja [5].

Sputtering - Definições

- O termo sputtering indica o mecanismo de arrancamento de átomos da superfície de um material quando pelo choque de partículas energéticas.
- Aplicado para a obtenção de filmes finos a partir da década de 1920 por Langmuir.

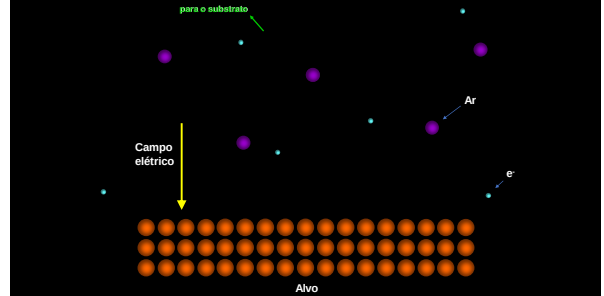
Vantagens

- Controle da espessura/uniforme e reprodutibilidade;
- Materiais com alta T_p ;
- Boa adesão ao substrato;
- Recobrimento de geometrias complexas;
- Menor manutenção;

Desvantagens:

- Materiais orgânicos - degradação
- Danos ao substrato devido ao bombardeamento iônico;
- Fonte de potência;
- Pressões elevadas $\rightarrow$ contaminação ($<10^{-5}$ torr)

Sputtering – Representação esquemática



Sputtering - Configurações:

- DC sputtering
- RF sputtering
- Magnetron sputtering
- Sputtering reativo

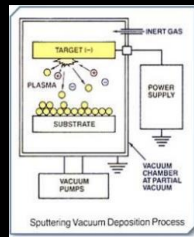


Figura 6. Sistema de sputtering genérico.

DC sputtering:

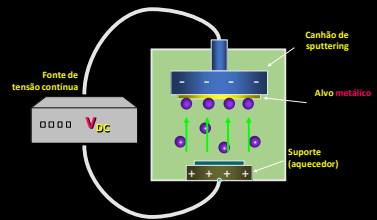


Figura 7. Representação esquemática de DC-sputtering [10].

Magnetron Sputtering

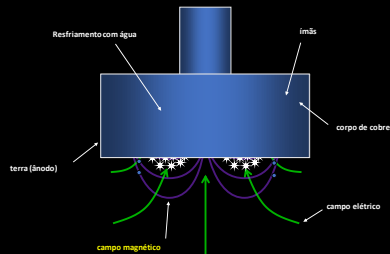


Figura 8. Representação esquemática de Magnetron sputtering [10].

Variáveis importantes:

- Substrato:**
 - Temperatura
- Alvo:**
 - Distância alvo-substrato
 - Potência aplicada ao alvo
- Ambiente:**
 - Gás de trabalho (Inerte)
 - Pressão de deposição
 - Gases reativos
- Outros:**
 - Tratamentos térmicos

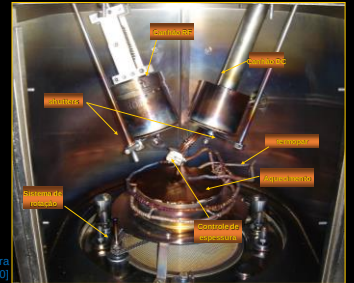


Figura 9. Sistema sputtering LIEC Araraquara [10]

Efeito da distância alvo-substrato

• Taxa de deposição varia com o comprimento da distância
• forma da curva depende também da pressão
para distâncias muito pequenas varia significativamente

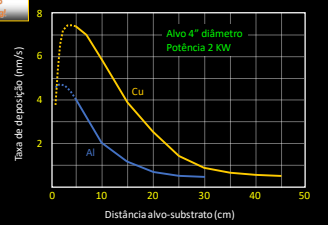
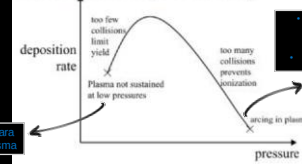


Figura 10. Efeito da distância alvo- substrato [10]

Efeito da pressão

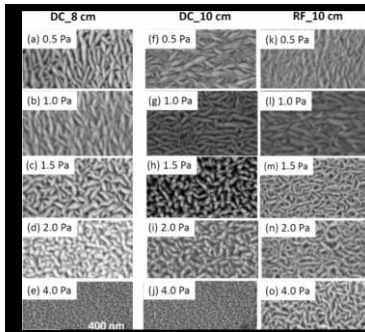
Pressure effects (DC and RF):



• limiar de pressão para manutenção do plasma

• Pressões elevadas: filmes porosos, nanopartículas;
• Taxa de deposição $\propto \frac{1}{\text{pressão}}$

Figura 11. Influência da distância alvo-substrato e da pressão de trabalho na microestrutura de filmes finos de Mo [7].



• Filmes finos de Mo - DC/RF sputtering.

• Substrato: SLG

• Gás: Ar

• Pressão de trabalho (0.5 – 4.0 Pa)

• Distância alvo – substrato (8 e 10 cm)

• $D_{AS} \uparrow$ resistividade

• $D_{AS} \downarrow$ refletividade

Figura 12. Influência da distância alvo-substrato e da pressão de trabalho na microestrutura de filmes finos de Mo [7]

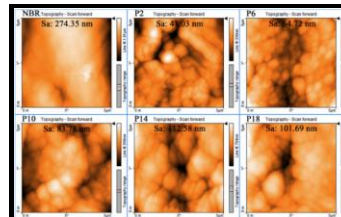


Figura 13. Efeito da pressão de trabalho na rugosidade de filmes finos de DLC/NBR obtidos por DC-MS [8]

Carbono – Diamante (DLC)

• DC-Magnetron sputtering;

• Gás: Ar

• Substrato: NBR

• Pressão: 0.2 – 1.8 Pa

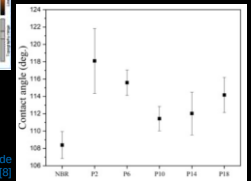


Figura 14. Efeito da pressão de trabalho na mobilidade de filmes finos de DLC/NBR obtidos por DC-MS [8]

Referências

- [1] BITTENCOURT, J. A. Fundamentals of plasma physics. 3rd Ed. New York: Springer, 2004.
- [2] FRIDMAN, A.; KENNEDY, L. A. Plasma physics and engineering. 2nd Ed. New York: Taylor & Francis, 2004.
- [3] CONRAOS, H.; SCHMIDT, M. Plasma generation and plasma sources. Plasma Sources Science and Technology. v. 9, p. 441-454, 2000.
- [4] PANKAJ, S. K. et al. Applications of cold plasma technology in food packaging. Trends in Food Science & Technology. v. 35, p. 5-17, 2014.
- [5] PANKAJ, S. K.; KEENER, K. M. Cold Plasma Applications in Food Packaging. Reference Module in Food Science. v. 1, p. 1-10, 2015.
- [6] MANDAL, B. et al. Recent developments in cold plasma decontamination technology in the food industry. Trends in Food Science & Technology. v. 90, p. 95-103, 2018.
- [7] ZHU, H. et al. DC and RF sputtered molybdenum electrodes for Cu(In,Ga)Se₂ thin film solar cells. Applied Surface Science. v. 465, p. 48-55, 2019.
- [8] LIU, J. Q. et al. Effect of sputtering pressure on the surface topography, structure, wettability and biological performance of DLC films coated on rubber by magnetron sputtering. Surface and Coatings Technology. v. 365, p. 33-40, 2019.
- [9] RAWAL, S. K. et al. The influence of various sputtering parameters on structural, wettability and optical properties of ZrO₂/ZnO thin films. Materials Science and Engineering: B. v. 161, p. 16-23, 2014.
- [10] Ramirez, M. A. Notas de aula - Cerâmica Avançada - Fabricação de filmes finos: métodos físicos, 2018.