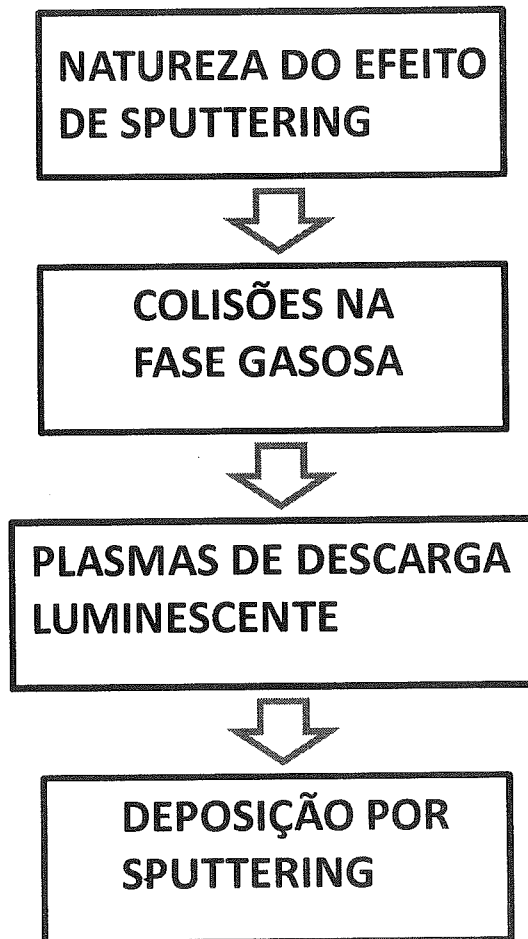
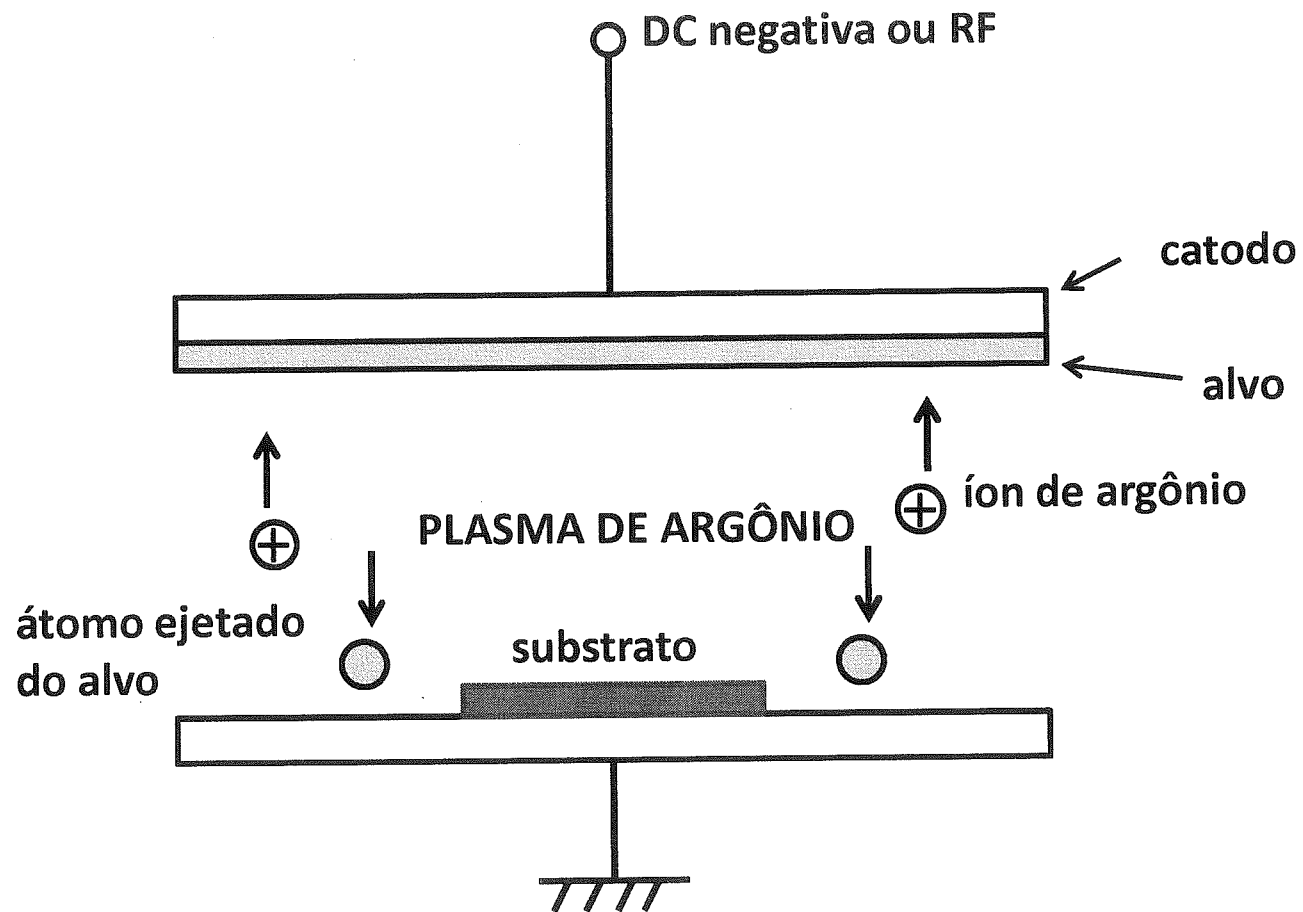


ETAPAS PRELIMINARES PARA O ENTENDIMENTO DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO DE FILMES A PLASMA



ESQUEMA DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO A VÁCUO POR SPUTTERING



SISTEMA DE DEPOSIÇÃO DE FILMES POR SPUTTERING

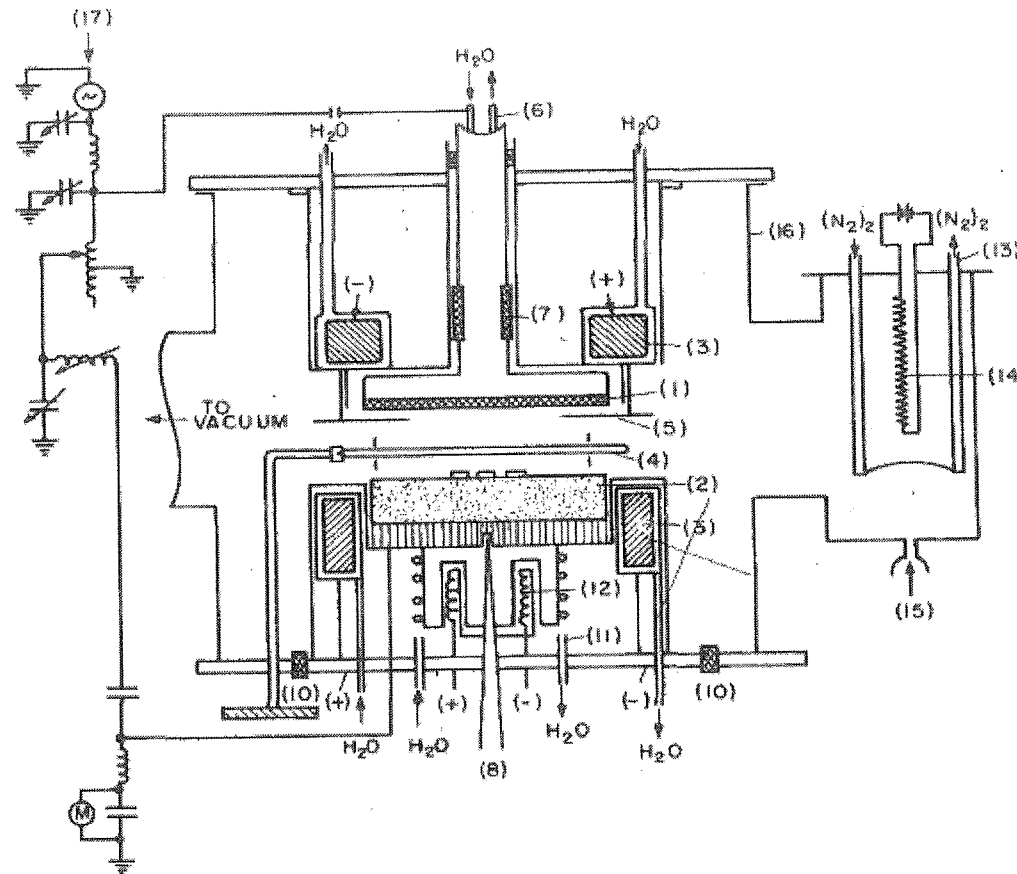


Fig. 8. Schematic of an rf sputtering apparatus. The components are listed as follows: (1) cathode target, (2) anode substrate holder, (3) cathode and anode magnets (water cooled), (4) shutter (SS), (5) cathode shield (SS), (6) cathode water cooling, (7) cathode isolation insulator, (8) substrate thermocouple, (9) substrates, (10) anode isolation insulator, (11) substrate cooling, (12) substrate heating, (13) liquid nitrogen cooled SS shroud, (14) Ti sublimation filaments, (15) sputter gas, (16) SS vacuum chamber, and (17) rf power supply matching network and substrate bias supply.

NATUREZA DO EFEITO DE SPUTTERING

No processo de colisão de um íon com uma superfície sólida

- o íon pode ser refletido, provavelmente sendo neutralizado no processo;
- o impacto do íon pode resultar na ejeção de um elétron – elétron secundário;
- o íon pode ser enterrado no alvo;
- o íon pode causar rearranjos estruturais no alvo;
- o íon pode colidir com outros átomos no interior do alvo e causar a ejeção de um átomo – processo que chamamos de *sputtering*.

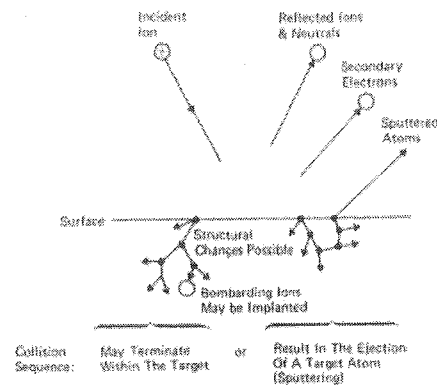


Figure 6-1. Interactions of ions with surfaces

No intervalo de energia mais relevante para deposição por sputtering, as interações entre os íons incidentes e os átomos do alvo podem ser tratadas como *colisões binárias*.

O processo de sputtering é frequentemente tratado, numa comparação simplificada, como um jogo de bolas de bilhar.

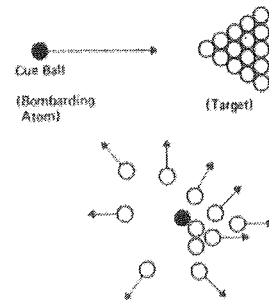


Figure 6-2. Sputtering - the atomic billiards game

NATUREZA DO EFEITO DE SPUTTERING

Modelo de colisões binárias

As interações do íon incidente com os átomos do alvo são de alcance suficientemente curto e podem ser tratadas como *colisões binárias*.

Transferência de energia numa colisão binária:

$$\Delta E = 4 m_i m_t / (m_i + m_t)^2$$

m_i e m_t = massas do íon incidente e do átomo do alvo

Rendimento de sputtering

É a grandeza $S(E)$

$$S(E) = (\text{número de átomos ejetados}) / (\text{número de íons incidentes})$$

E = energia do íon incidente.

Para a energia E de até 1keV, aproximadamente:

$$S(E) = (3\alpha/4\pi^2) [4m_i m_t / (m_i + m_t)^2] (E/U_0)$$

U_0 = energia de ligação do material do alvo

α = é uma função que cresce monotonicamente com m_t/m_i assumindo o valor 0,17 para $m_t/m_i = 0,1$ e aumenta para 1,4 para $m_t/m_i = 10$.

Para a energia E acima de 1keV, aproximadamente:

$$S(E) = 0,042 [\alpha S_n(E) / U_0]$$

$S_n(E)$ = seção de choque nuclear para o íon incidente. (Valores de α são dados de forma gráfica e para $S_n(E)$ em tabelas. [Lidhard et al (ref. 164, cap. 3, "Handbook of Thin Film Technology", L. Maissel e R. Glang, McGraw-Hill, 1970).

NATUREZA DO EFEITO DE SPUTTERING

TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA EM COLISÕES BINÁRIAS

We shall consider here the collision between two particles of masses m_i and m_t . Assume that m_t is initially stationary and that m_i collides with velocity v_i at an angle θ to the line joining the centres of m_i and m_t at the moment of collision (Figure 1-9).

By conservation of linear momentum

$$m_i v_i \cos \theta = m_i u_i + m_t u_t \quad (1)$$

By conservation of energy

$$\frac{1}{2} m_i v_i^2 = \frac{1}{2} m_i (u_i^2 + v_i^2 \sin^2 \theta) + \frac{1}{2} m_t u_t^2 \quad (2)$$

Eliminating u_i in (2) from (1) gives:

$$m_i v_i^2 \cos^2 \theta = \frac{m_i}{m_t} (m_i v_i \cos \theta - m_t u_t)^2 + m_t u_t^2$$

The fractional energy transferred from mass m_i to mass m_t is:

$$\begin{aligned} \frac{E_t}{E_i} &= \frac{\frac{1}{2} m_t u_t^2}{\frac{1}{2} m_i v_i^2} = \frac{m_t}{m_i v_i^2} \left(\frac{2 m_i v_i}{m_t + m_i} \cos \theta \right)^2 \\ &= \frac{4 m_i m_t}{(m_i + m_t)^2} \cos^2 \theta \end{aligned}$$

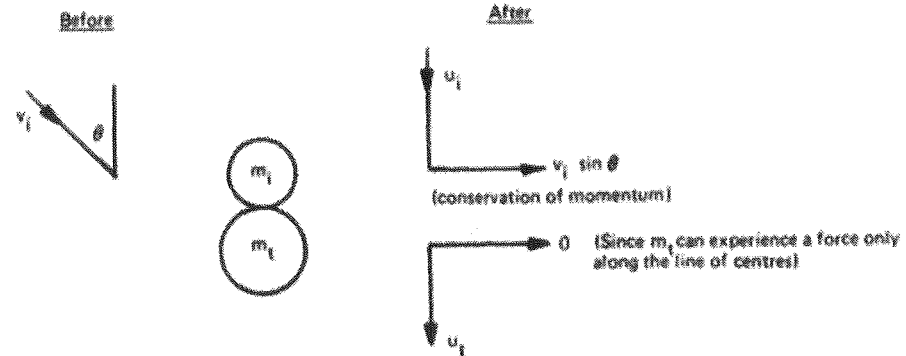


Figure 1-9. Velocity components before and after an elastic collision

NATUREZA DO EFEITO DE SPUTTERING

Tendência geral do rendimento de sputtering X energia do íon:

- aproximadamente linear para baixas energias (< 1 keV, tipicamente);
- mostrando um máximo para altas energias.

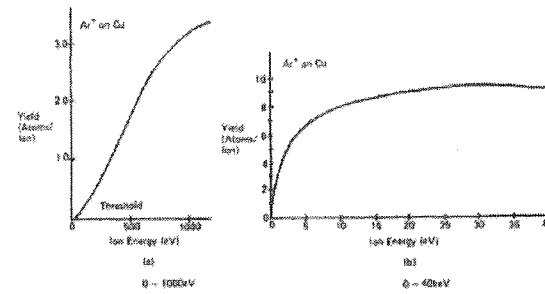


Figure 6-3. The variation of sputtering yield, for argon ions on copper, as a function of the ion bombardment energy (Carter and Colligon 1968)

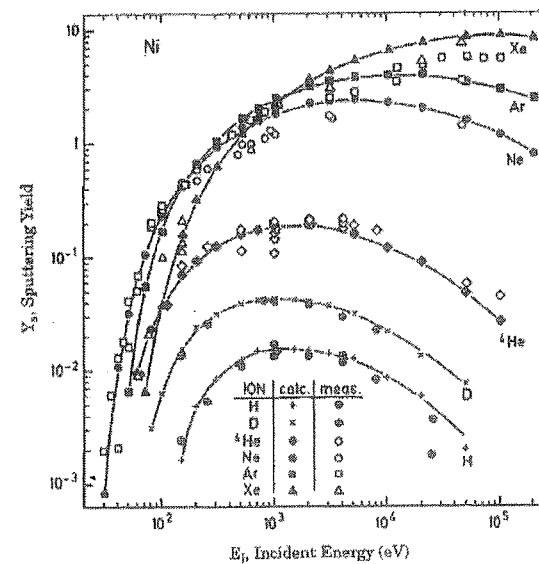


Figure 8.27 Measured sputtering yield for Ni and TRIM-code calculation for various ions impinging perpendicularly. [Source: Reprinted from Ziegler (1985) by permission of Macmillan Publishing Co., copyright © 1985 by Pergamon Press.]

NATUREZA DO EFEITO DE SPUTTERING

Tabelas para rendimento de sputtering

Table I
Sputtering Yield of Elements at 500 eV

Gas	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Reference
Element						
Be	0.24	0.42	0.51	0.48	0.35	[23]
C	0.07	—	0.12	0.13	0.17	[23]
Al	0.16	0.73	1.05	0.96	0.82	[23]
Si	0.13	0.48	0.50	0.50	0.42	[23]
Ti	0.07	0.43	0.51	0.48	0.43	[23]
V	0.06	0.48	0.65	0.62	0.63	[23]
Cr	0.17	0.99	1.18	1.39	1.55	[23]
Mn	—	—	—	1.39	1.43	[23]
Mn	—	—	1.90	—	—	[24]
Bi	—	—	6.64	—	—	[24]
Fe	0.15	0.88	1.10	1.07	1.00	[23]
Fe	—	0.63	0.84	0.77	0.88	[25]
Co	0.13	0.90	1.22	1.08	1.08	[23]
Ni	0.16	1.10	1.45	1.30	1.22	[23]
Ni	—	0.99	1.33	1.06	1.22	[25]
Cu	0.24	1.80	2.35	2.35	2.05	[23]
Cu	—	1.35	2.0	1.91	1.91	[25]
Cu (111)	—	2.1	—	2.50	3.9	[26]
Cu	—	—	1.2	—	—	[27]
Ge	0.08	0.68	1.1	1.12	1.04	[23]
Y	0.05	0.46	0.68	0.66	0.48	[23]
Zr	0.02	0.38	0.65	0.51	0.58	[23]

Table II

Sputtering Yield of Elements at 1 keV

Gas	He	N	Ne	N ₂	Ar	Kr	Xe	Reference
Element								
Fe	—	—	0.85	—	1.33	1.42	1.82	[25]
Fe	—	0.55	—	0.78	—	—	—	[3]
Ni	—	—	1.22	—	2.21	1.76	2.26	[25]
Ni	—	0.74	—	1.05	—	—	—	[3]
Ni	—	—	—	—	2.0	2.0	2.0	[26]
Cu	—	—	1.88	—	2.85	3.42	3.6	[25]
Cu	—	1.5	—	—	—	—	—	[3]
Cu	—	—	—	—	3.2	2.5	—	[27]
Cu (111)	—	—	2.75	—	4.5	4.65	6.05	[26]
Cu	—	—	—	1.95	—	—	—	[31]

Para tabelas mais completas, ver "Tabelas de Rendimento de Sputtering" no site do FI204.

NATUREZA DO EFEITO DE SPUTTERING

Limiares (thresholds) de sputtering

1. Existe um valor mínimo de energia do íon abaixo do qual não há sputtering. Chamamos esse valor de limiar de sputtering.
2. O limiar pode variar de até 100% de um elemento para outro, mas varia pouco com o íon incidente.

Limiares de pendem da energia de coesão H (calor de sublimação) do alvo e seu valor é $\approx 4H$.

Exemplo para Ar^+ :

Ag (15 eV na tabela $\rightarrow 4H = 11,8$ eV

Mo(24 eV na tabela) $\rightarrow 4H = 27,3$ eV

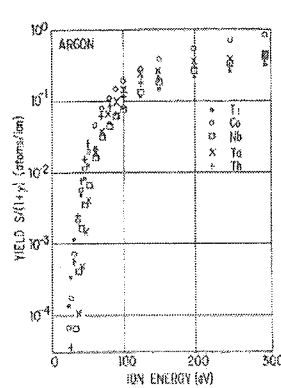


Fig. 5 Yield curves in argon.

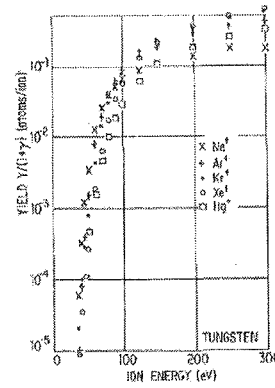


Fig. 6 Tungsten yield curves.

TABLE 1 Threshold Energies

	Ne	Ar	Kr	Xe	Hg		Ne	Ar	Kr	Xe	Hg
Be...	12	15	16	16		Mo...	24	24	28	27	32
Al...	13	13	16	18	18	Rh...	25	24	25	25	
Ti...	22	20	17	18	26	Pd...	20	20	20	18	20
V...	21	23	26	28	25	Ag...	12	15	15	17	
Cr...	22	22	18	20	23	Ta...	24	26	24	29	30
Fe...	22	20	25	23	25	W...	26	33	30	30	30
Co...	20	25	22	22		Re...	25	25	25	30	35
Ni...	23	21	25	26		Pt...	27	25	22	22	25
Cu...	17	17	16	16	20	Au...	20	20	20	18	
Ce...	23	25	22	18	25	Th...	20	24	25	25	
Zr...	23	22	18	25	30	U...	20	20	25	22	27
Nb...	27	25	26	22							

Boldface values are those for which the energy-transfer factor $4m_1m_2/(m_1 + m_2)^2$ is 0.9 or higher.

NATUREZA DO EFEITO DE SPUTTERING

Dependência do rendimento de sputtering no ângulo de incidência do íon

Na incidência oblíqua, (1) menos mudança direcional do momento do feixe é requerida para a ejeção de átomos da superfície e, (2) confina as trocas de momento na região próxima à superfície, favorecendo o rendimento.

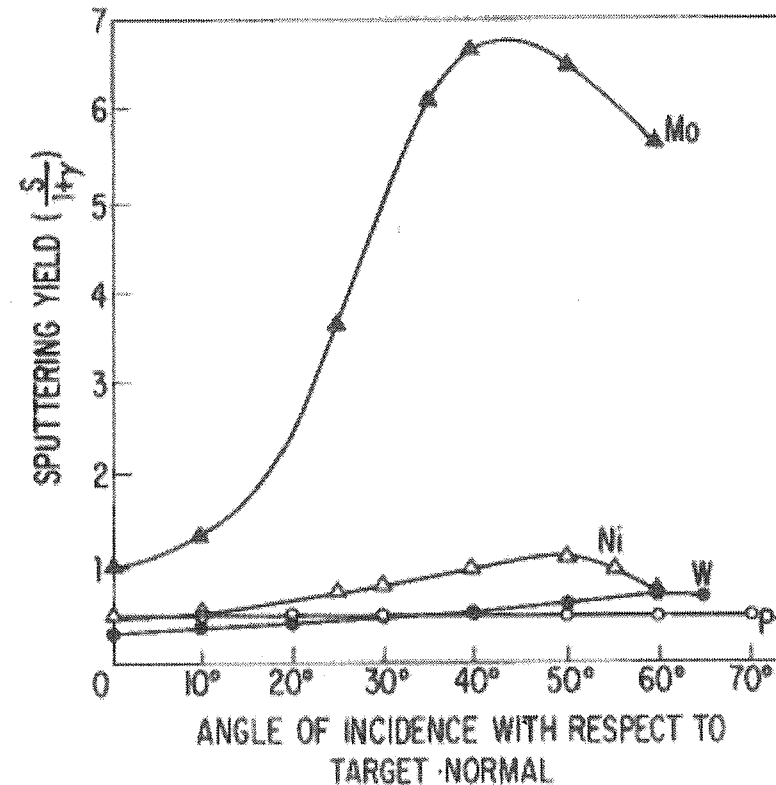


Fig. 4 Variation of sputtering yield with angle of incidence for 200-eV mercury-ion bombardment of nickel, molybdenum, tungsten, and platinum.¹⁶⁹