



INSTITUTO
TECNOLÓGICO
DE AERONÁUTICA



www.lpp.ita.br

www.ita.br

MT-203

Ciência e Tecnologia de Filmes Finos

Prof. Douglas M G Leite

leite@ita.br

Sala LPP-203

www.lpp.ita.br/leite

Aula 09 – Pulverização Catódica - Sputtering – cap 8 e 9

- Interação Plasma-Superfície
- Sputtering Yield
- O processo de deposição por Sputtering
- Configurações de Reatores
- Sputtering Reativo

Interação Plasma/Superfície

Processos bombardeamento iônico na superfície

- Reflexão
- Movimentação Atômica / Defeitos
- Implantação
- Ativação Química da Superfície
- Reação com a Superfície

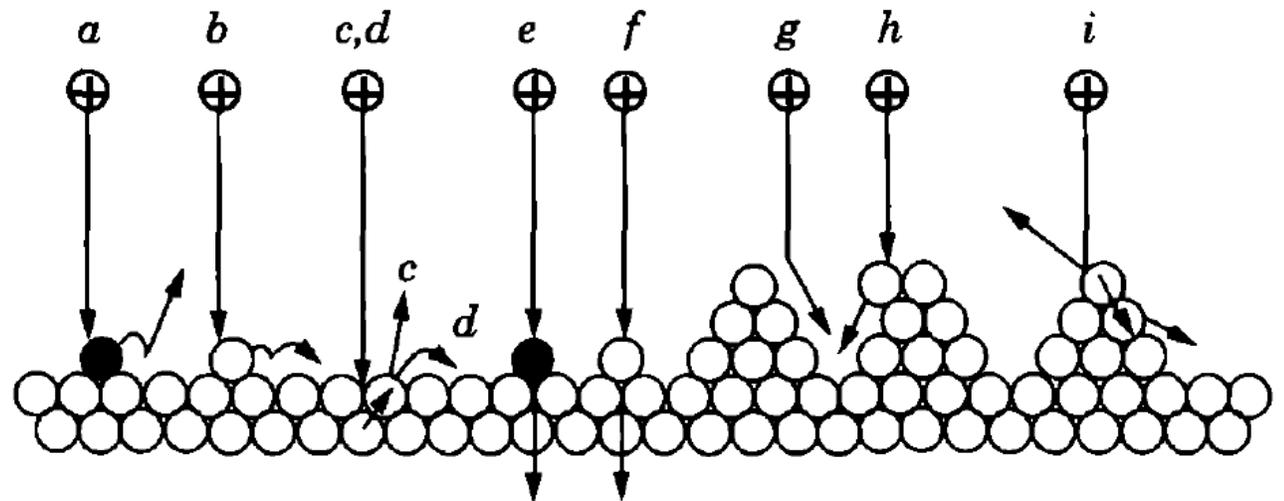


Figure 8.15 Effects of bombarding ions on surface atoms: (a) adsorbate removal or chemical activation, (b) lateral displacement, (c) surface vacancy created by sputtering, (d) surface vacancy created by displacement to an adatom position, (e) knock-on implantation of an impurity atom, (f) knock-on implantation of a film atom, (g) crevice filling by ion-enhanced surface mobility, (h) crevice filling by forward sputtering, and (i) breakup of 3D nucleus. Note that processes c through f also involve the subsurface.

Interação Plasma/Superfície

Processos bombardeamento iônico na superfície

► Sputtering

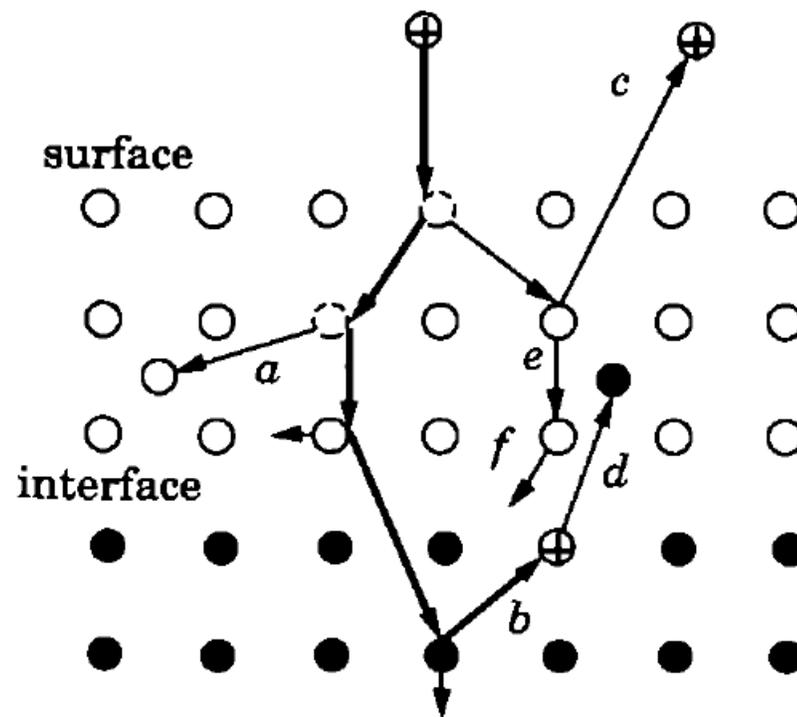


Figure 8.16 Types of atomic displacements produced in the collision cascade. The heavy line is the path of the impinging ion. (a) Frenkel-pair creation, (b) replacement collision, (c) sputtering, and (d) ion mixing. All displaced atoms shown are primary knock-ons except atoms (e) and (f), which are secondary and tertiary knock-ons.

Sputtering Yield - rendimento

Limiar de Sputtering (E_0)

- Energia mínima dos íons (E_i) para ejeção de átomos de um alvo específico
- Depende da massa do íon (M_i), da massa do átomo do alvo (M_t), e da energia (calor específico) de sublimação do alvo ($\Delta_s H$)
- Não há uma equação exata para E_0

Sputtering Yield - rendimento

Limiar de Sputtering (E_0)

- Energia mínima dos íons (E_i) para ejeção de átomos de um alvo específico
- Depende da massa do íon (M_i), da massa do átomo do alvo (M_t), e da energia (calor específico) de sublimação do alvo ($\Delta_s H$)
- Não há uma equação exata para E_0
- Equações empíricas:

- Para $M_i < 0,3 M_t$, $E_0 = \Delta_s H / (1 - \gamma_m) \gamma_m$

- Para $M_i > 0,3 M_t$, $E_0 = 8 \Delta_s H (M_i / M_t)^{2/5}$

γ_m = fração de energia transferida para o átomo ejetado (“sputterado”)

Sputtering Yield - rendimento

Yield de Sputtering Y_s

➤ Número de átomos ejetado / íon incidente

$$Y_s = \frac{4.2\alpha S_n}{\Delta_s H}$$

α = coeficiente de seção de choque (depende de M_t/M_i) - adimensional

S_n = poder de parada nuclear (nuclear stopping power) depende de E_i (eV·nm²/atom)

$\Delta_s H$ = energia (calor específico) de sublimação do alvo

Sputtering Yield - rendimento

Yield de Sputtering Y_s

➤ Número de átomos ejetado / íon incidente

$$Y_s = \frac{4.2\alpha S_n}{\Delta_s H}$$

➤ Dependência de α com M_t/M_i

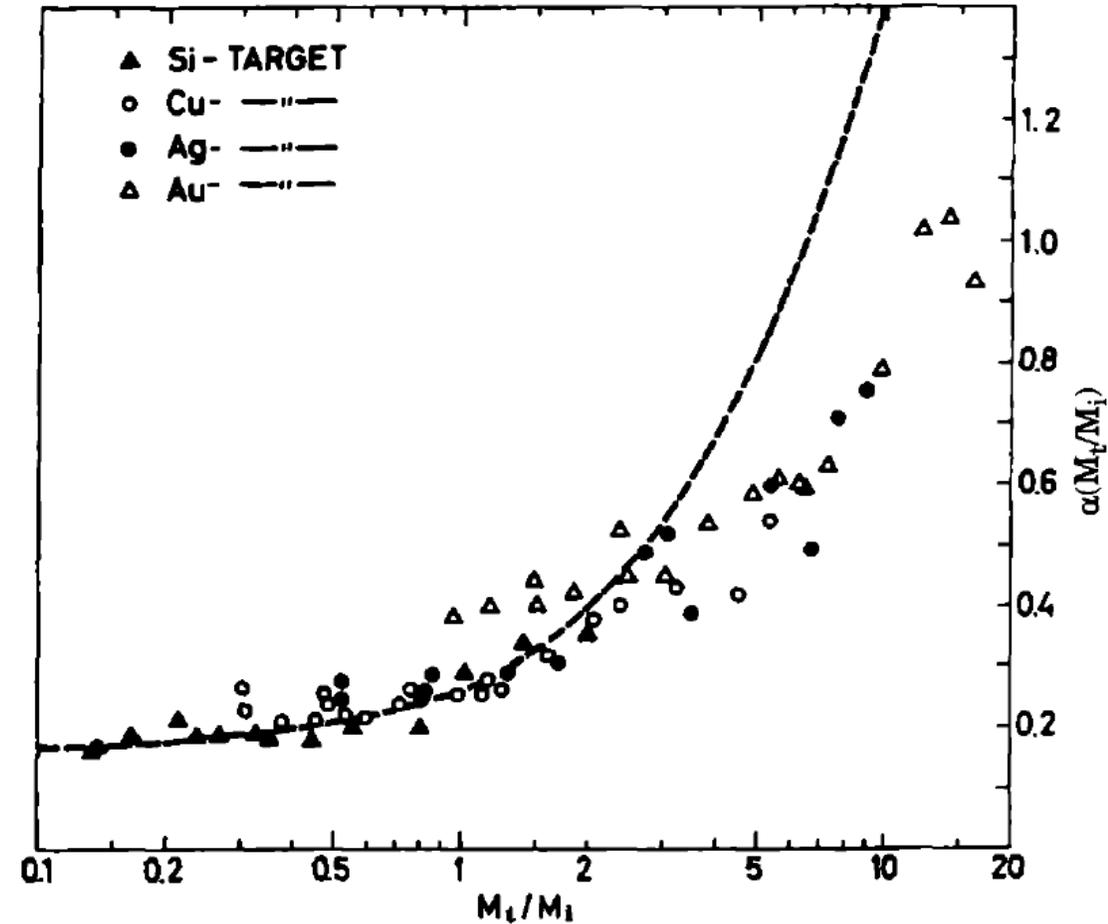


Figure 8.28 The factor α of Eq. (8.37). Dashed line was calculated from transport theory [60], and data points from measured sputtering yields for the targets indicated and ions of various masses, M_i . (Source: Reprinted from Ref. 58 by permission.)

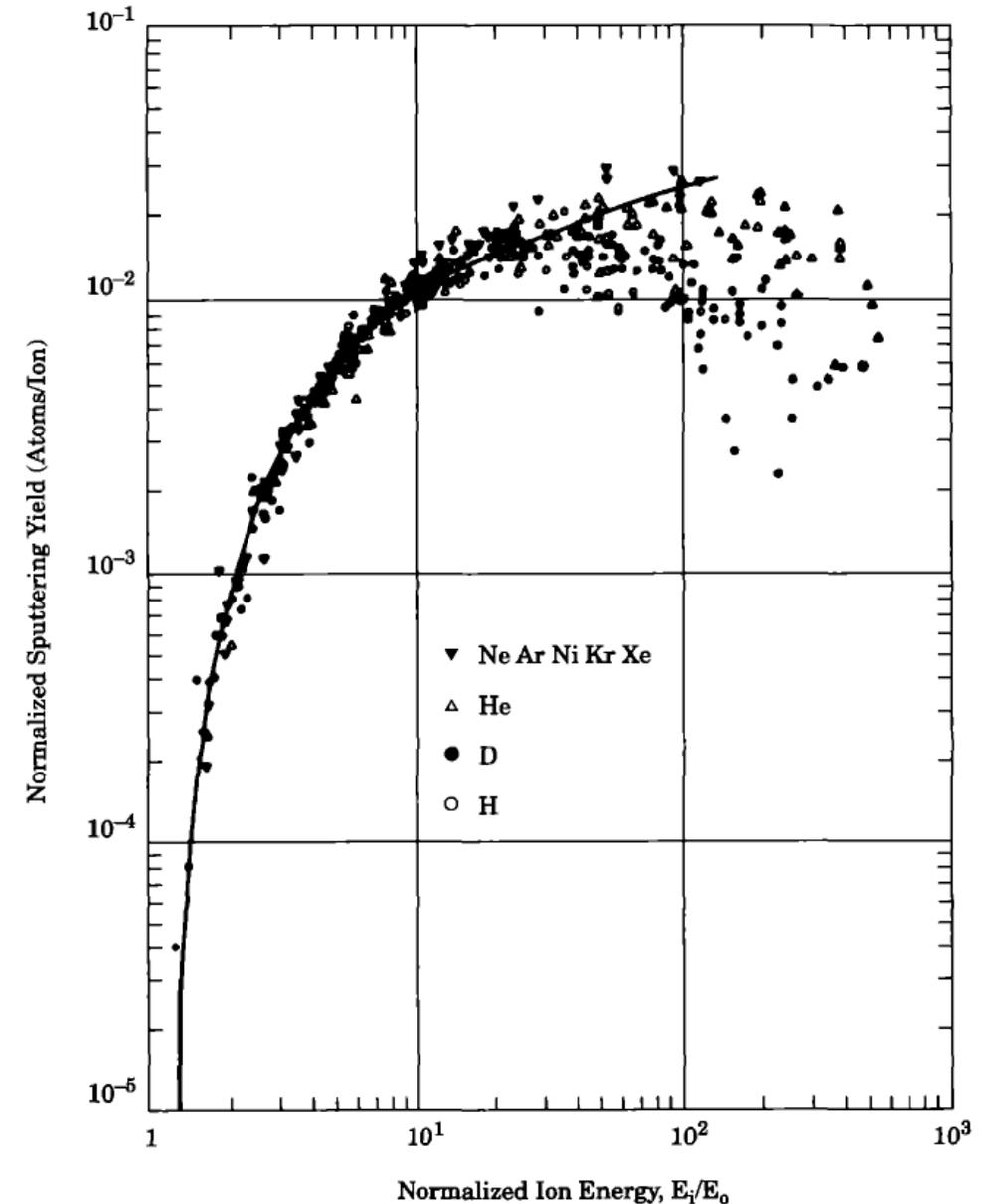
Sputtering Yield - rendimento

Yield de Sputtering Y_s

➤ Dependência com a energia dos íons

$$Y_s = \frac{4.2\alpha S_n}{\Delta_s H}$$

Figure 8.26 Sputtering yield, Y_s , near threshold, E_o , for the elements Be, C, Al, Si, Ti, V, Fe, Ni, Zr, Mo, Ta, W, and Au, normalized as Y_s as described in the text. (Source: Reprinted from Ref. 57 by permission.)



Sputtering Yield - rendimento

Yield de Sputtering Y_s

- Dependência com a energia dos íons

$$Y_s = \frac{4.2\alpha S_n}{\Delta_s H}$$

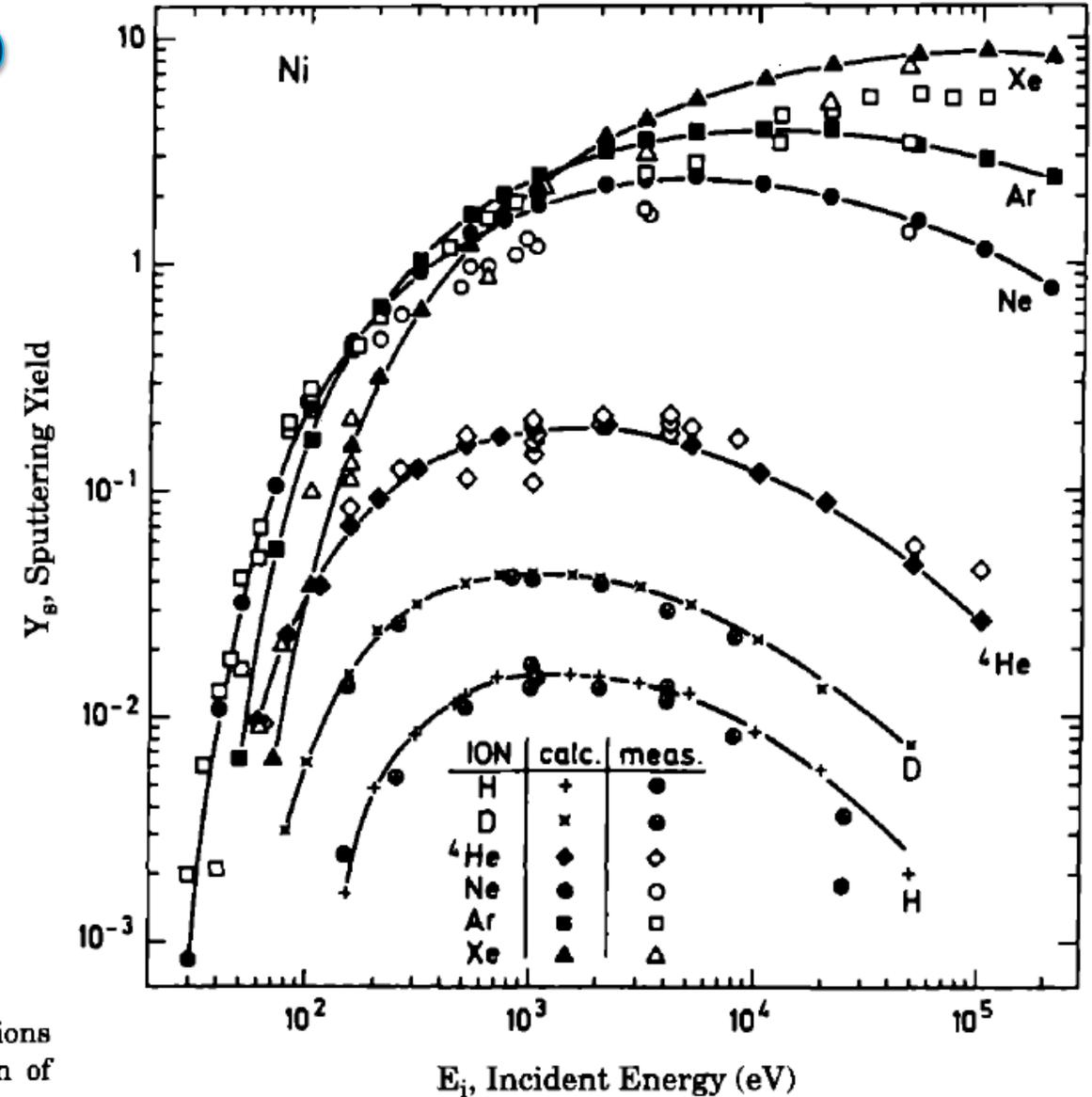


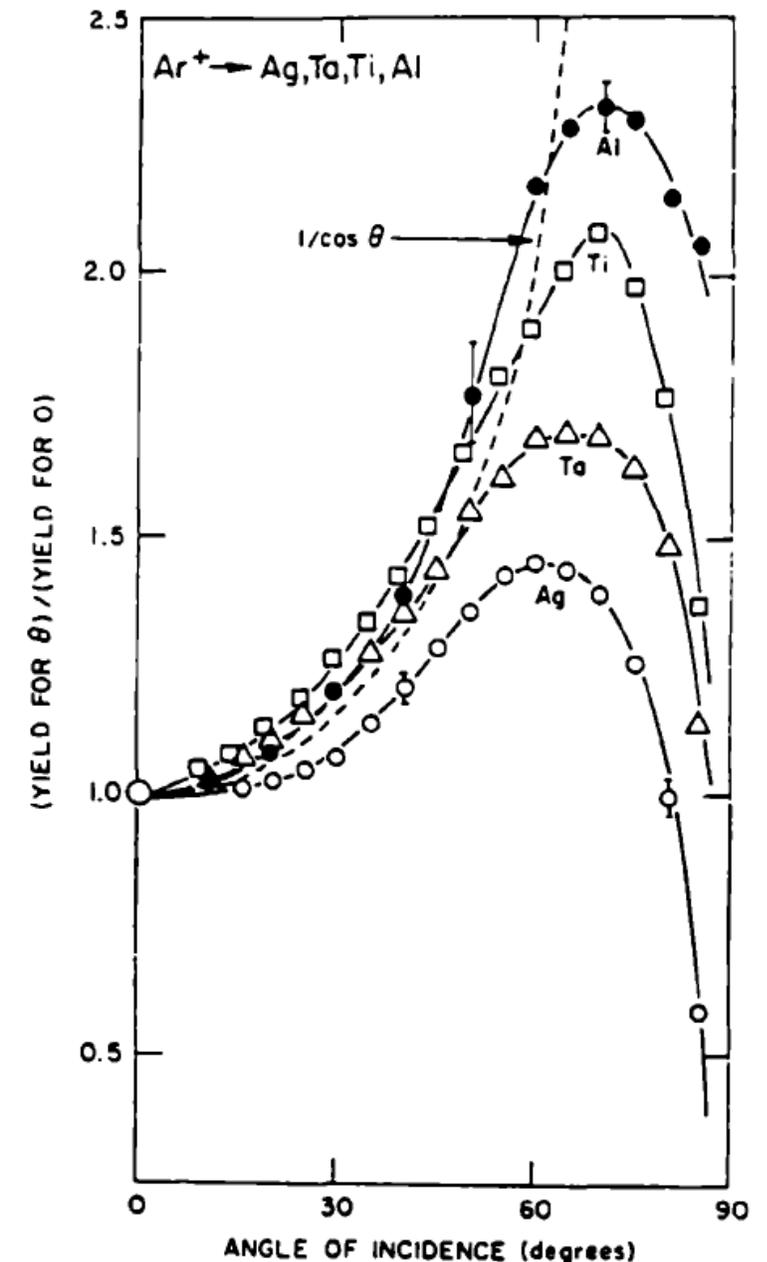
Figure 8.27 Measured sputtering yield for Ni and TRIM-code calculation for various ions impinging perpendicularly. [Source: Reprinted from Ziegler (1985) by permission of Macmillan Publishing Co., copyright © 1985 by Pergamon Press.]

Sputtering Yield - rendimento

Yield de Sputtering Y_s

- Dependência com o ângulo de incidência
- Para ângulos < 60 graus, $Y_s \propto 1/\cos(\theta)$

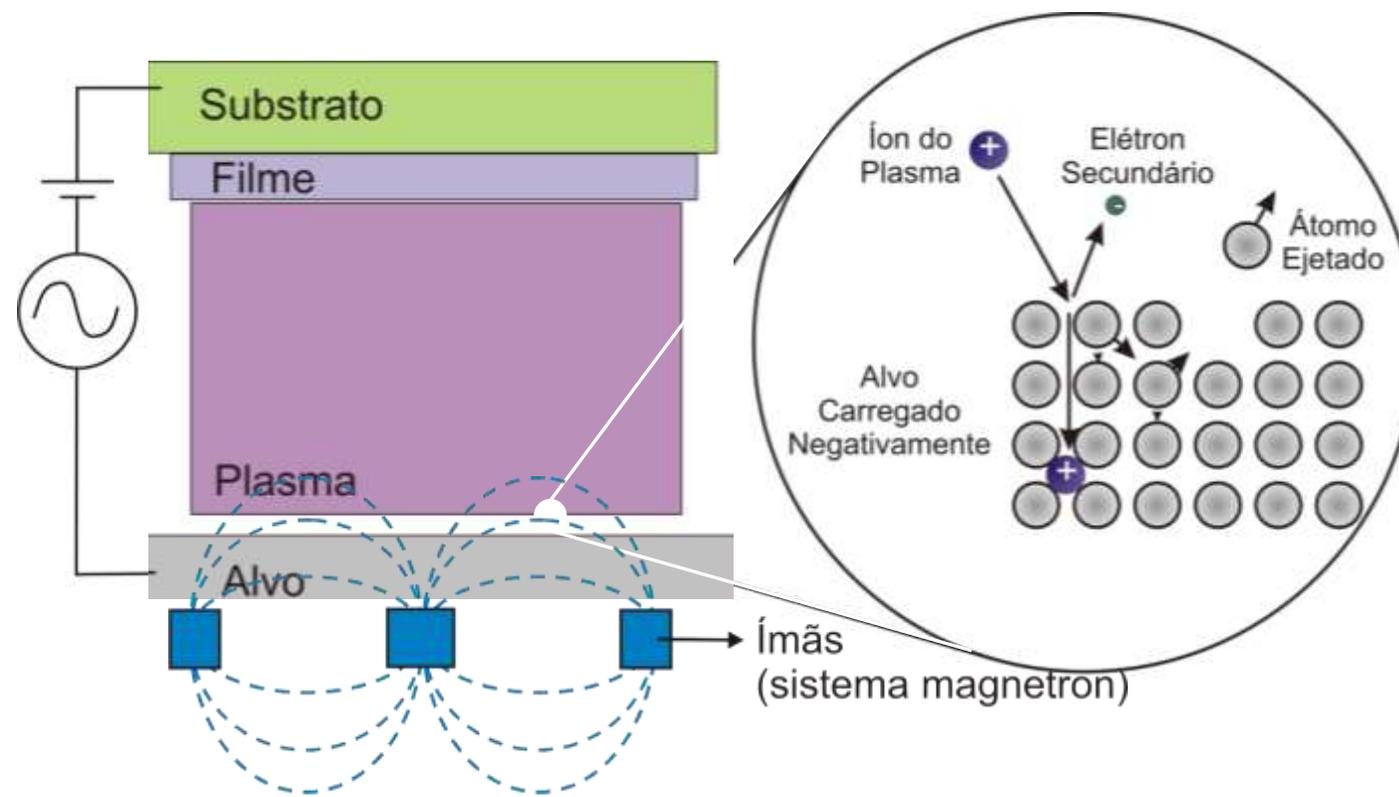
Figure 8.29 Dependence of sputtering yield on ion incident angle, θ , for 1.05-keV Ar^+ . (Source: Reprinted from Ref. 69 by permission.)



Deposição por Magnetron-Sputtering

Princípios e elementos básicos

- Pulverização catódica - sputtering



Deposição por Magnetron-Sputtering

O processo



Deposição por Magnetron-Sputtering

Características

- Pressões de trabalho (~1 a 100 mTorr)
 - Deposição direcional
 - Deposição não-balística (maioria)
 - Efeito de sombra
- Principalmente usada para
 - Filmes metálicos
 - Óxidos e nitretos

Deposição por Magnetron-Sputtering

Vantagens

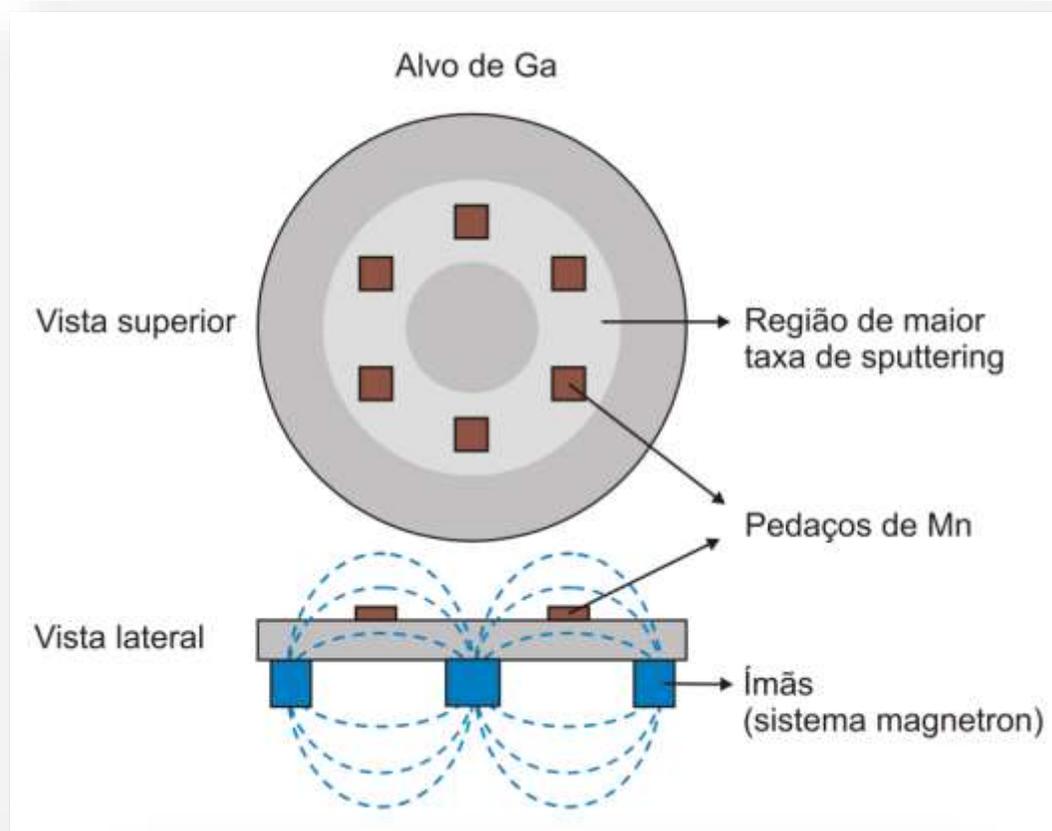
- Baixas temperaturas (temp ambiente pode ser usada)
- Variedade de alvos sólidos (e líquidos) que podem ser usados
- Altas taxas de deposição (até 100nm/min)
- Fácil adição de elementos:
 - Sputtering reativo
 - Co-sputtering

Desvantagens

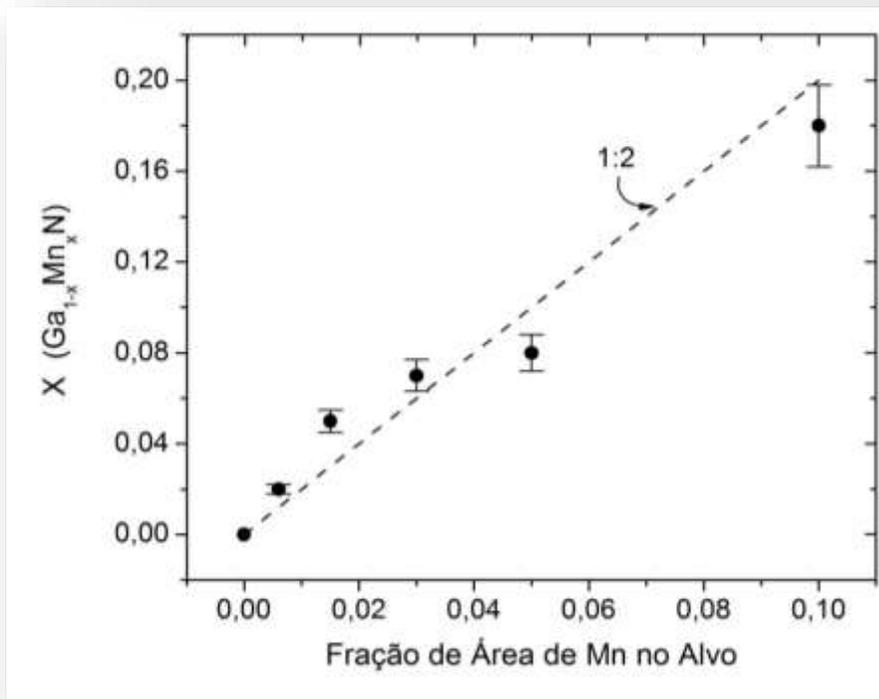
- Contaminação pelo plasma:
 - do próprio gás (mesmo inerte – Argônio)
 - das superfícies em contato com o plasma

Deposição por Magnetron-Sputtering

Co-Sputtering (único alvo)

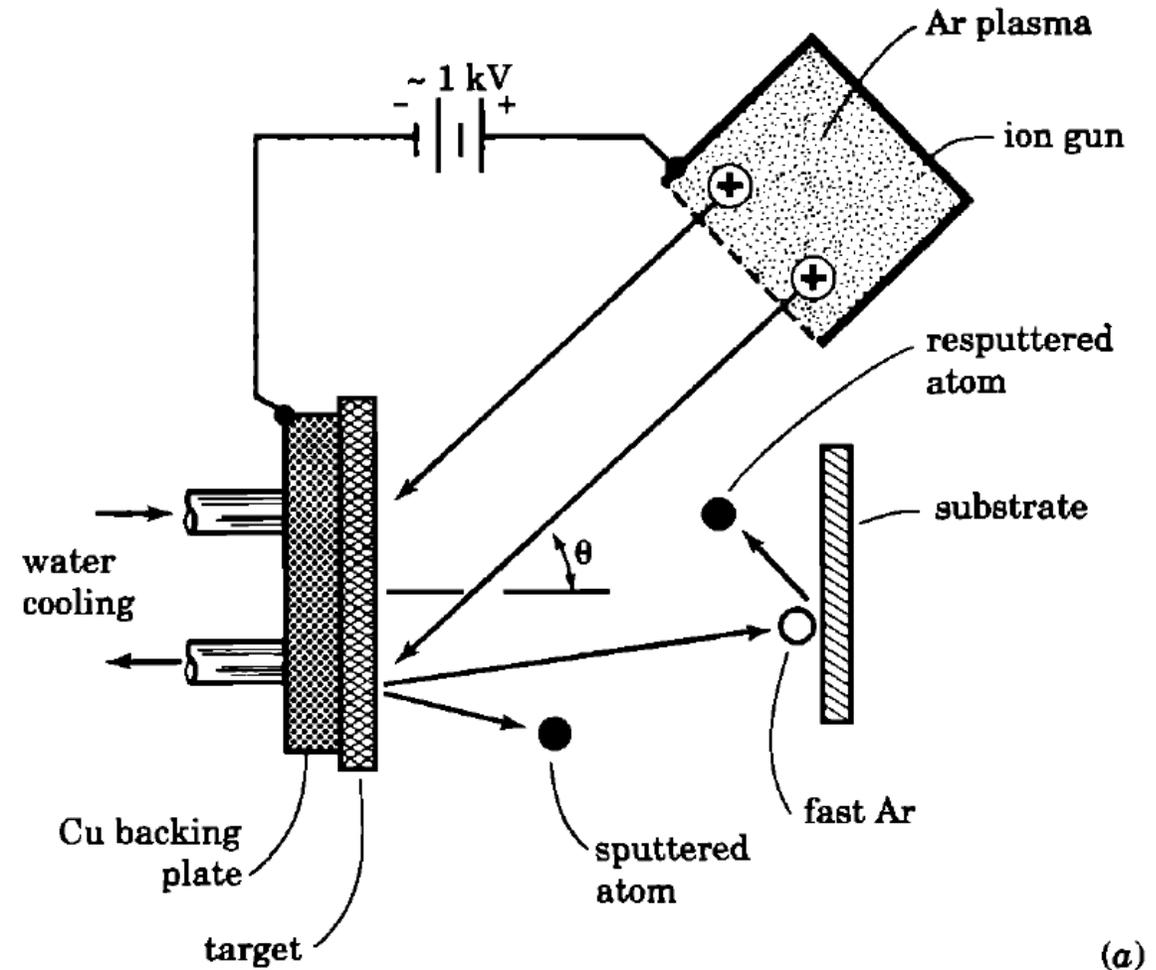


Journal of Crystal Growth 294 (2006) 309–314



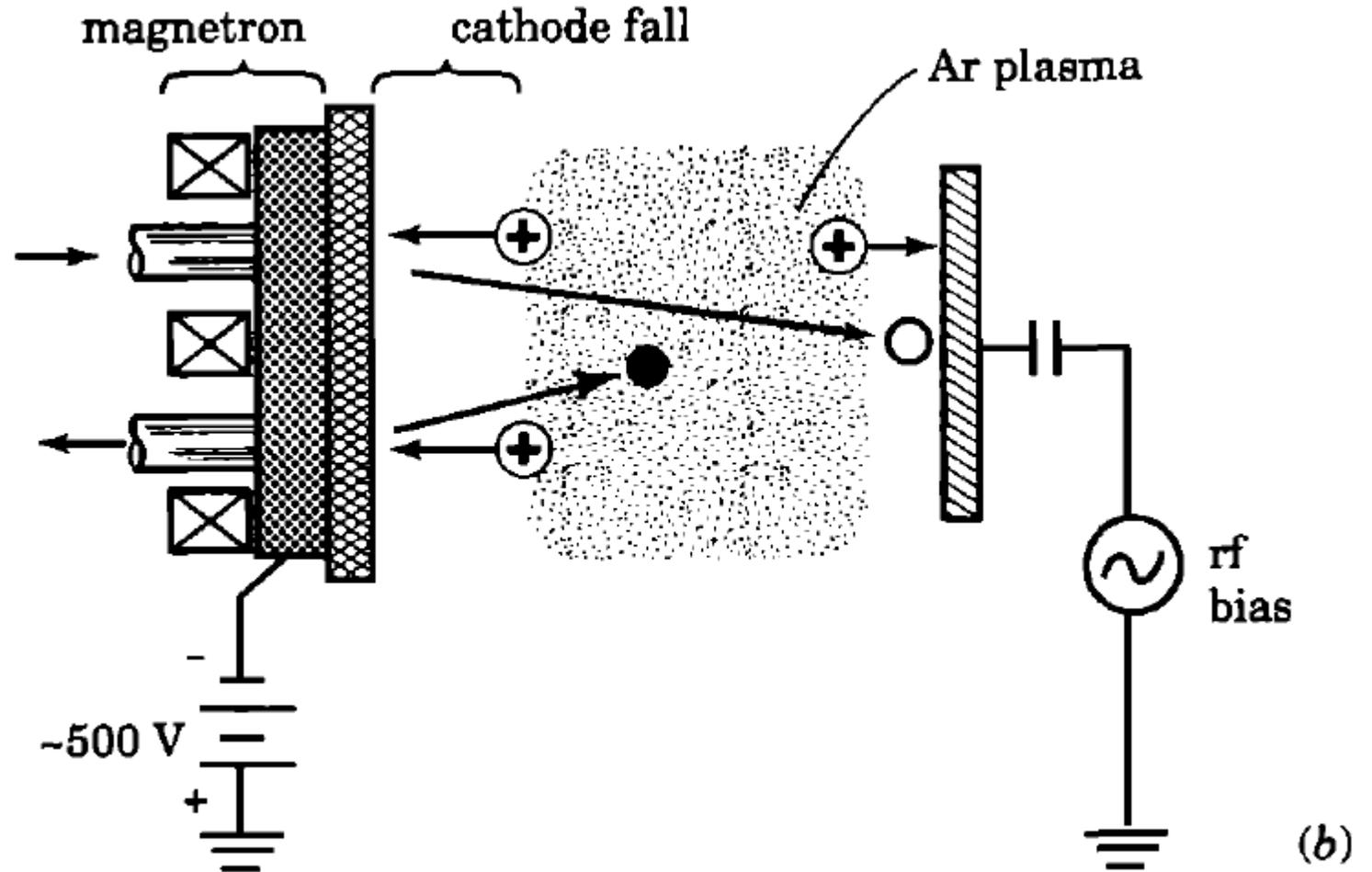
Configurações de Reatores

Feixe de íons (Ion Beam)



Configurações de reatores

Descarga luminescente



Configurações de Reatores

Sistema Defletor

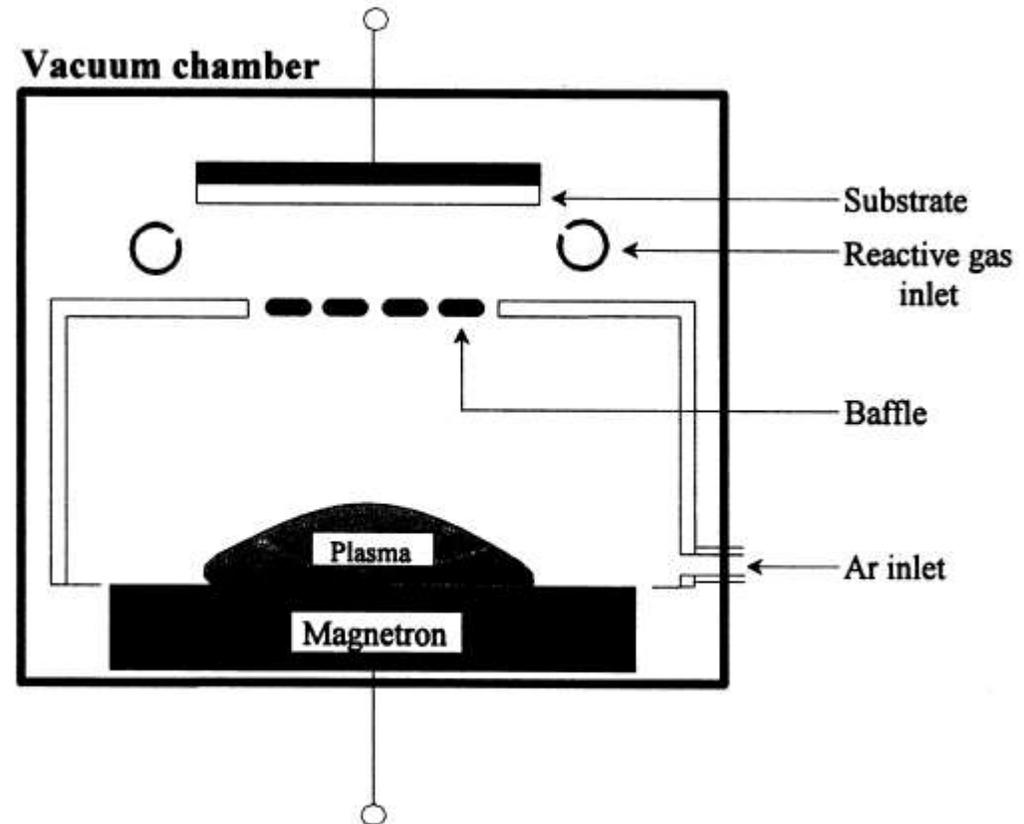


Fig. 8. Schematic of baffled magnetron sputtering system.

Configurações de Reatores

Multi-alvos

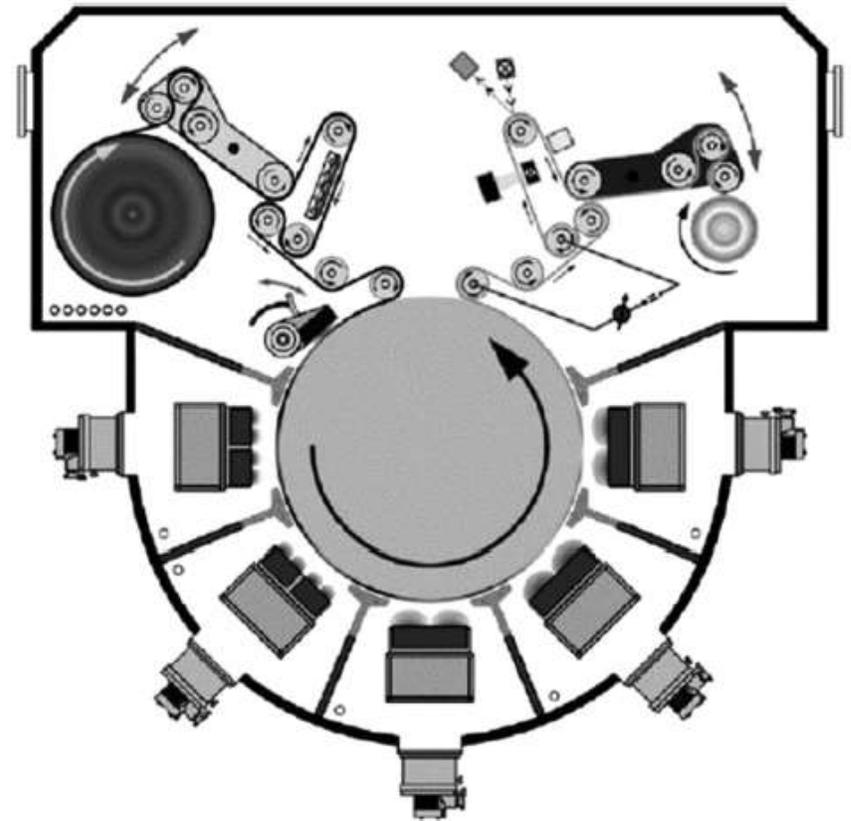
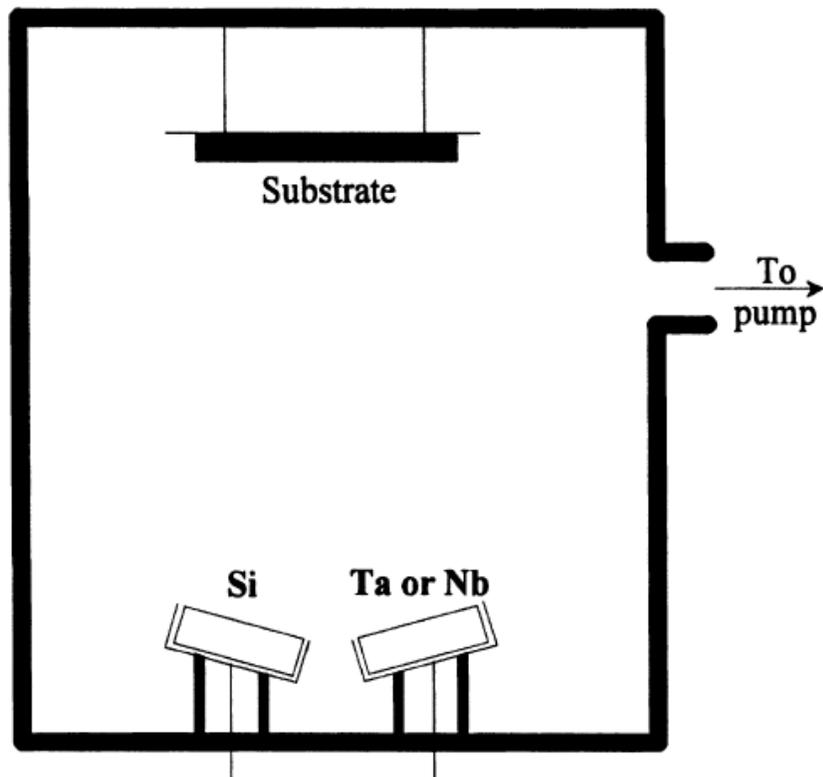


FIG. 52. Cross-sectional view of a roll-to-roll sputter web-coating system containing five rectangular planar magnetrons, each in a separately pumped chamber. The flexible substrate is fed from the spool in the upper left, via rollers and tensioners, onto the coating drum and then sequentially through the deposition chambers. The final product is wound onto the output spool in the upper right. Reproduced with permission from Ludwig *et al.*, Proc. IEEE 93, 1483 (2005). Copyright 2005 by IEEE.

Re-sputtering

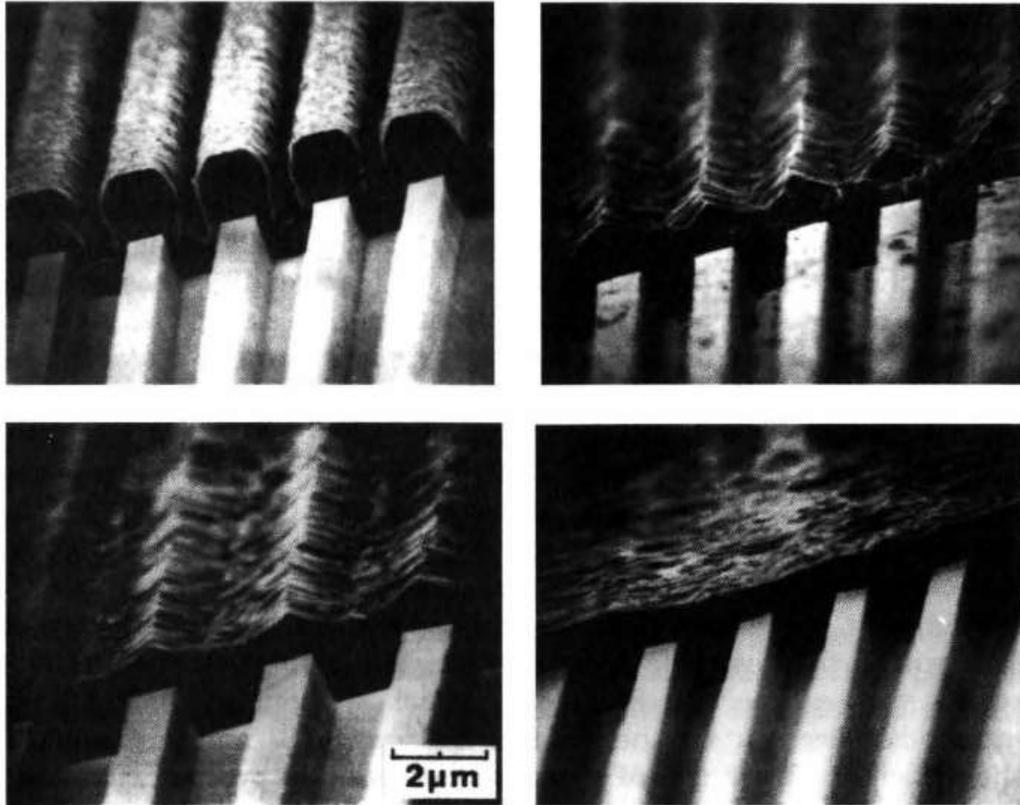


Figure 8.31 Cross-sectional scanning electron micrographs of sputtered Al coverage over a grooved substrate for various resputtering rates given as a percentage of the deposition rate: top left, 0%; top right, 40%; bottom left, 50%; bottom right, 70%. (Source: Reprinted from Ref. 68 by permission.)

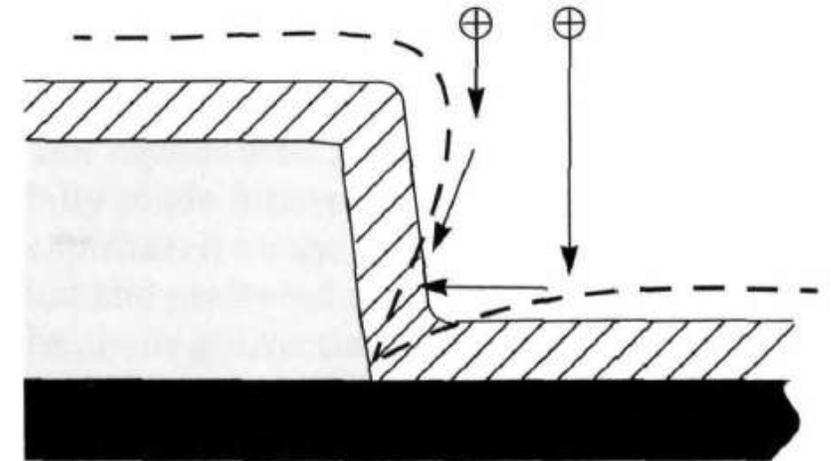
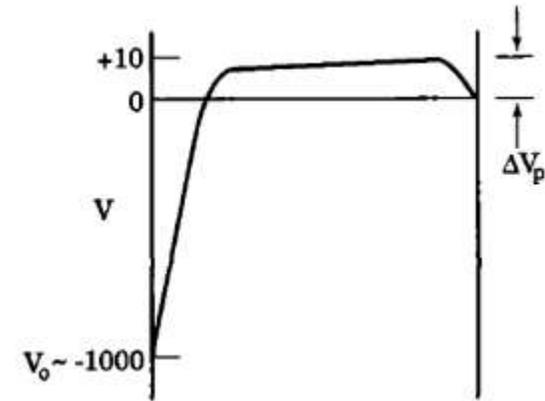


Figure 8.30 Improvement of film coverage over steep steps by resputtering during deposition. Thickness profiles are shown without (dashed line) and with (area with hash marks) resputtering.

Sputtering Reativo

- Plasma composto por gases que irão fazer parte do filme
- Exemplos
 - Alvo de Ti + plasma de O_2 (+Ar) \rightarrow TiO_2
 - Alvo de Al + plasma de O_2 (+Ar) \rightarrow Al_2O_3
 - Alvo de Al + plasma de N_2 (+Ar) \rightarrow AlN
 - Alvo de Ga + plasma de N_2 (+Ar) \rightarrow GaN

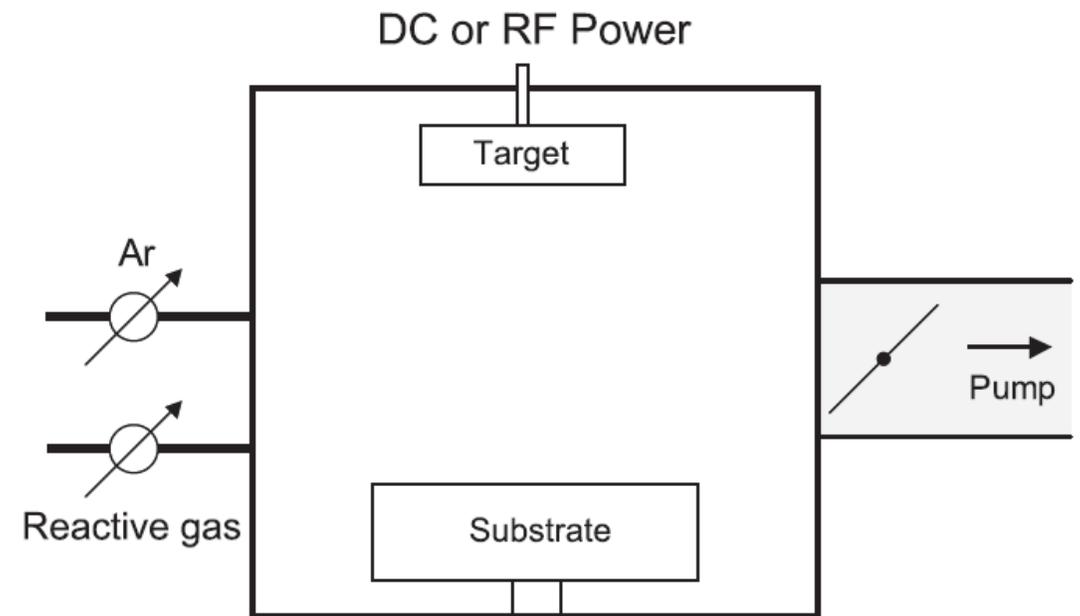


Fig. 3. Schematic of a simple reactive sputtering system.

Sputtering Reativo

Problemas

- Diminuição da taxa de Sputtering pela menor massa dos íons bombardeando alvo
- Complexidade de oferta de precursores (podem agora ser moléculas Ti-O, Ga-N)
- Reação com a superfície do alvo (envenenamento)

Sputtering Reativo

Problemas

- Diminuição da taxa de Sputtering pela menor massa dos íons bombardeando alvo
- Complexidade de oferta de precursores (podem agora ser moléculas Ti-O, Ga-N)
- Reação com a superfície do alvo (envenenamento)
 - Alteração da composição do alvo com o tempo (gradiente de processo)
 - Parte da superfície do alvo passa a ser um composto (TiO_2 , AlN,...) com diferente Yield de sputtering
 - Diminuição da taxa de deposição pela diminuição de Yield do alvo ($\Delta_s H$ composto $>$ $\Delta_s H$ metal)
 - Alteração na composição/estequiometria do filme
 - Efeito de histerese (memória)

Sputtering Reativo

Problemas

- Diminuição da taxa de Sputtering pela menor massa dos íons bombardeando alvo
- Complexidade de oferta de precursores (podem agora ser moléculas Ti-O, Ga-N, etc...)
- Reação com a superfície do alvo (envenenamento)
 - Efeito de histerese (memória)

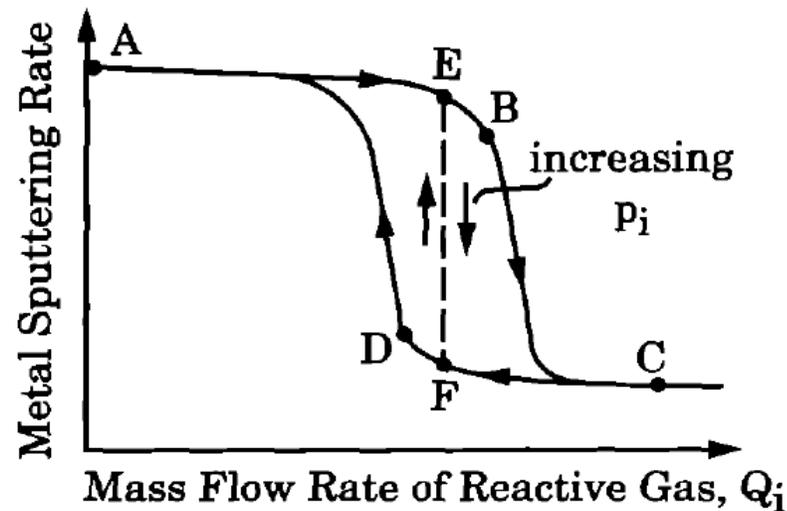
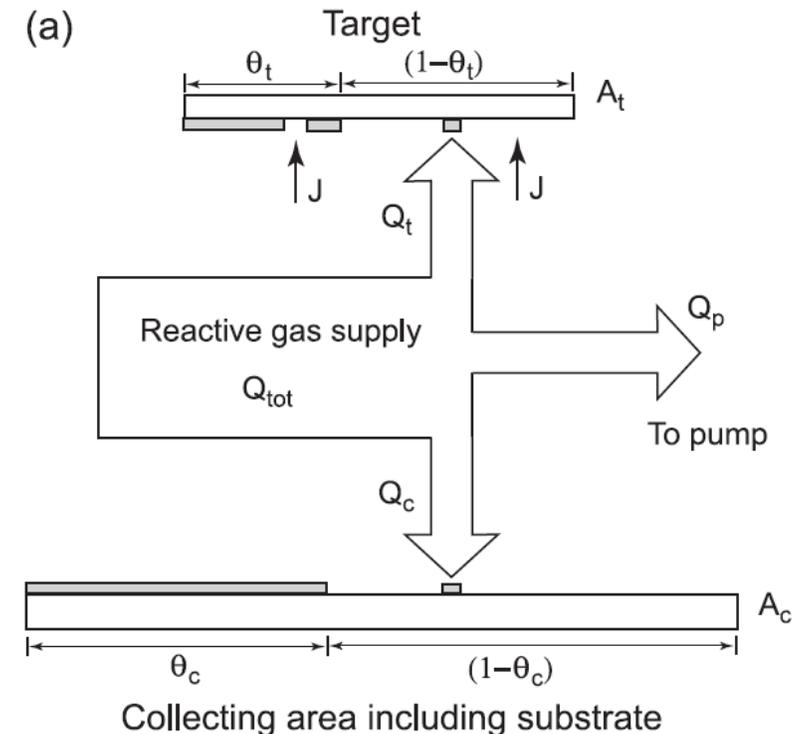


Figure 9.9 Typical process behavior of metal sputtering in reactive gas i , with the mass flow rate of Ar fixed.



Sputtering Reativo

Problemas – como contornar

- Usar pressões parciais de gases inertes significativamente maior que a do gás reativo
- Anel de Injeção de gás inerte na proximidade do alvo
- Pré-sputtering com gás inerte – limpeza do alvo evitando efeito de memória do experimento anterior

Sputtering Reativo

Problemas – como contornar

- Usar pressões parciais de gases inertes significativamente maior que a do gás reativo
- Anel de Injeção de gás inerte na proximidade do alvo
- Pré-sputtering com gás inerte – limpeza do alvo evitando efeito de memória do experimento anterior
- ENTENDER E CONTROLAR O EFEITO – Modelos matemáticos como o Modelo de Berg

Fundamental understanding and modeling of reactive sputtering processes

S. Berg*, T. Nyberg

The Angstrom Laboratory, Uppsala University, Box 534, 751 21 Uppsala, Sweden

Thin Solid Films 476 (2005) 215–230

Conclusões

- Sputtering é uma técnica versátil e relativamente simples e barata para o produção de filmes finos
- Filmes metálicos são os mais estabelecidos pela técnica
- Principal parâmetro do material alvo é o rendimento de Sputtering (Yield)
- Deposição é majoritariamente direcional – efeito de sombra (ao contrário do CVD e PECVD)
 - Controlar o re-sputtering pode ajudar a depositar uniformemente em degraus
- Filmes compostos e ligas podem facilmente ser produzidos por:
 - Co-sputtering (mesmo alvo)
 - Multi-Alvos
 - Sputtering reativo
- Sputtering reativo pode levar ao envenenamento do alvo (cuidados especiais devem ser tomados)
- Controle do plasma e polarização do substrato → energia dos precursores (deposição energética)

Exercícios

Cap 8: 10, 11, 14, 18