

Capítulo 12

Deposição de Filmes Finos por PVD – Pt II

Ioshiaki Doi

FEEC/UNICAMP

- **PVD - Sputtering**

- Sputtering: processo PVD dominante para formação de filmes metálicos na fabricação de CIs de Si, substituindo as evaporadoras.

- **Maioria dos filmes metálicos em VLSI são ligas – Al-Si, Al-Cu, Ti-W.**

- **Permite obter ligas de composição uniforme em lâminas grandes e melhor cobertura de degrau do que evaporação.**

- **Vantagens e Desvantagens do Sputtering:**

- **Vantagens:**

1. **Uso de alvos grandes \Rightarrow facilita obtenção de filmes de boa uniformidade;**
2. **Controle de espessura mais fácil. Ajusta-se os parâmetros do processo e integra-se o tempo;**
3. **Permite depositar ligas mais facilmente e com melhor controle sobre a composição;**

- 4** Permite melhor cobertura de degrau do que evaporadora (fonte maiores versus fonte pontual). Cobertura de degrau e estrutura granular são controlados por tensão negativa e temperatura da amostra;
- 5** Stress e aderência são controlados por potência e pressão;
- 6** É possível fazer limpeza in-situ por sputtering de superfície;
- 7** Há menos radiação que no caso de e-beam.

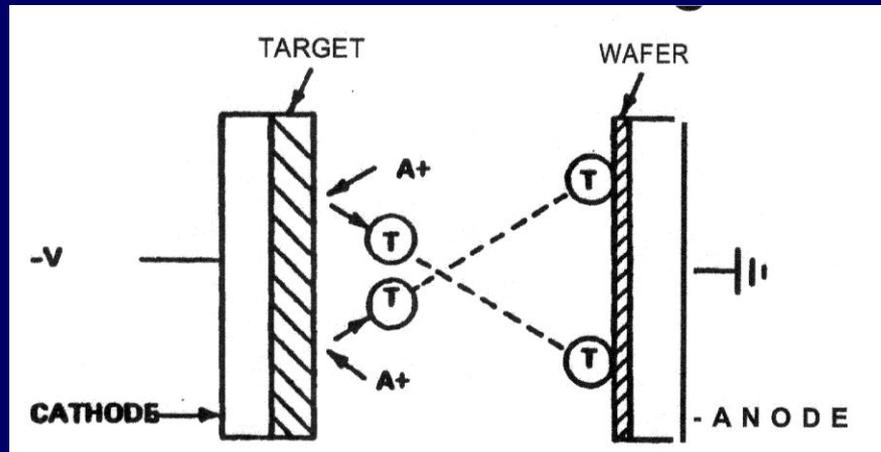
- **Desvantagens:**

1. Alto custo do equipamento;
2. Maior incorporação de impurezas (pressão média);
3. Pode degradar o F.R. (quando presente).

- **Filmes metálicos mais comuns depositados por sputtering:**

- Ligas de alumínio: Al-Si, Al-Cu, Al-Si-Cu.
- Ti-W, Ti, TiN, Pt.

• Processo de Sputtering

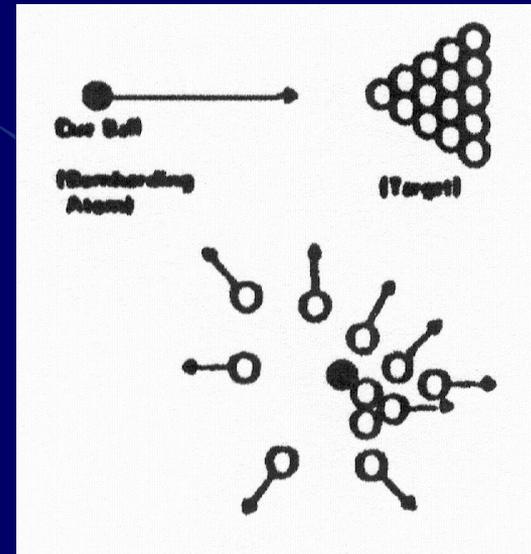


- Ions de Argônio desaloja átomos do alvo.
- Átomos do alvo deposita sobre o wafer.

- Ions de energia alta são direcionados para impingir sobre a superfície do material alvo. \Rightarrow causa sputtering da superfície do alvo.
- Átomos do alvo são transportados para o substrato. \Rightarrow condensa e forma o filme fino.
- Os ions para o bombardeio do alvo são providos por descargas em glow.

- **Física do Sputtering**

• **Jogo de bilhar atômico**



- **Interação íon - superfície**

Bombardeamento de uma superfície com ions ou neutros:

- Efeitos inelásticos:
 - fofons
 - raio X
 - eletrons secundários.
- Efeitos elásticos:
 - sputtering
 - reflexão do íon ou netro.
- Implantação

- **Energias dos íons de bombardeamento**

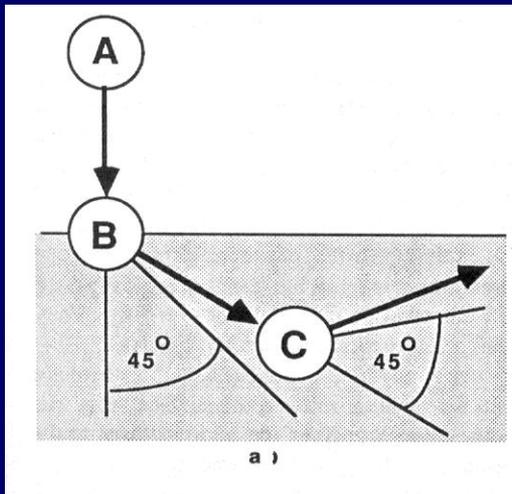
- $< 5 \text{ eV}$: - íons são refletidos ou adsorvidos
- $5 - 10 \text{ eV}$: - íons causam danos superficiais,
- migração superficial.
- $10 \text{ eV} < E < 10 \text{ keV}$: - íons causam desalojamento de átomos (sputtering),
- aquecimento e danos.
- $> 10 \text{ keV}$: - implantação iônica.

➤ Probabilidade de implantação: $\eta = f(E, m_i)$.

➤ Reflexão: probabilidade = $1 - \eta \approx 1$ para $E < 1 \text{ keV}$

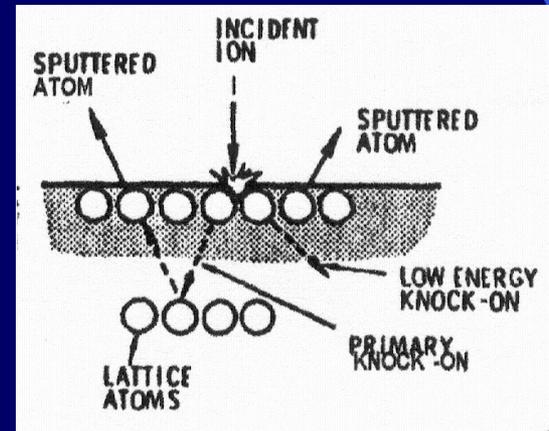
As partículas são refletidas com alta energia e podem alcançar o anodo.

- **Colisão Binária**



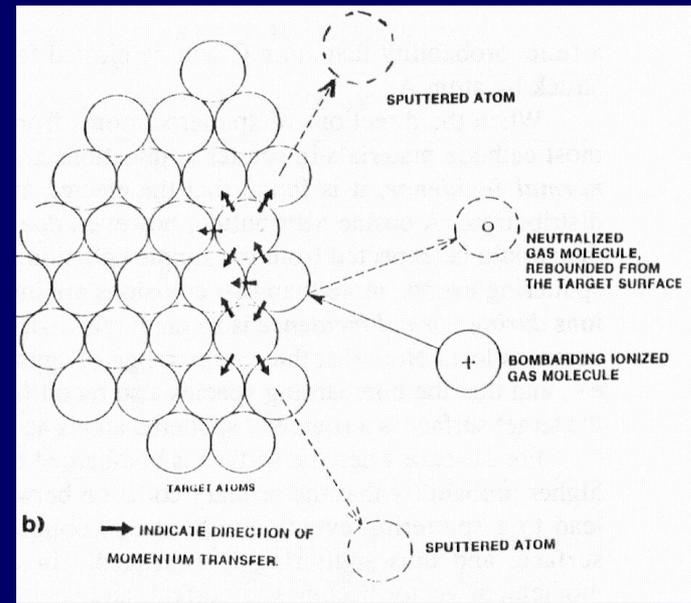
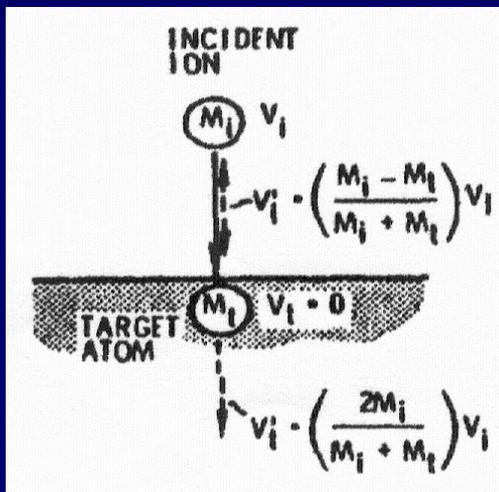
- Colisão binária entre o átomo incidente A e o átomo B, seguida de colisão binária entre átomos B e C.

- **Processo de colisões e sputtering**



• Transferência de Momentum para Sputtering

- Processo de colisões responsável por sputtering.
→ direção da transferência de momentum.



- Quantidade de momentum transferido.

• **Rendimento de Sputtering**

- **O rendimento de sputtering influencia largamente a taxa de deposição por sputtering.**
- **Rendimento de sputtering é o número de átomos desalojados da superfície do material por íon de bombardeamento.**

• **O rendimento de sputtering γ depende de :**

- **Material do alvo;**
- **Massa do íon de bombardeamento;**
- **Energia E do íon de bombardeamento.**

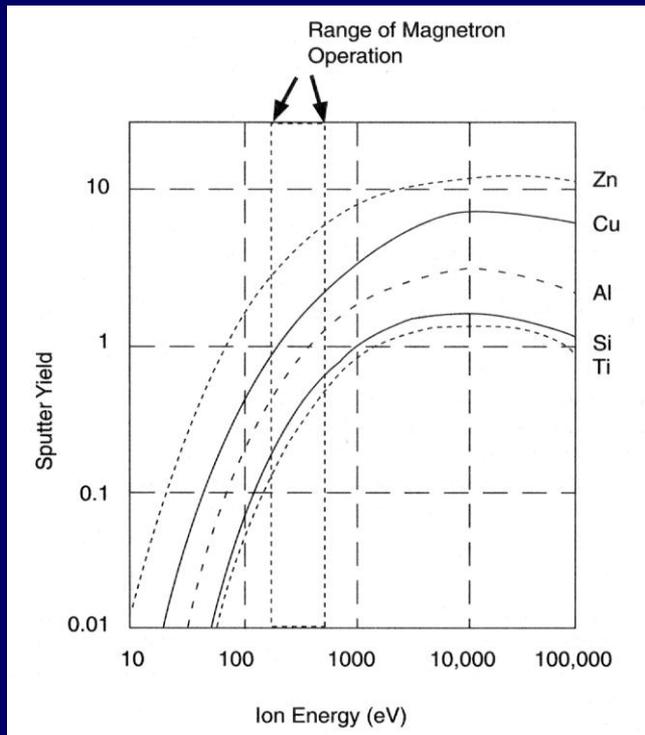
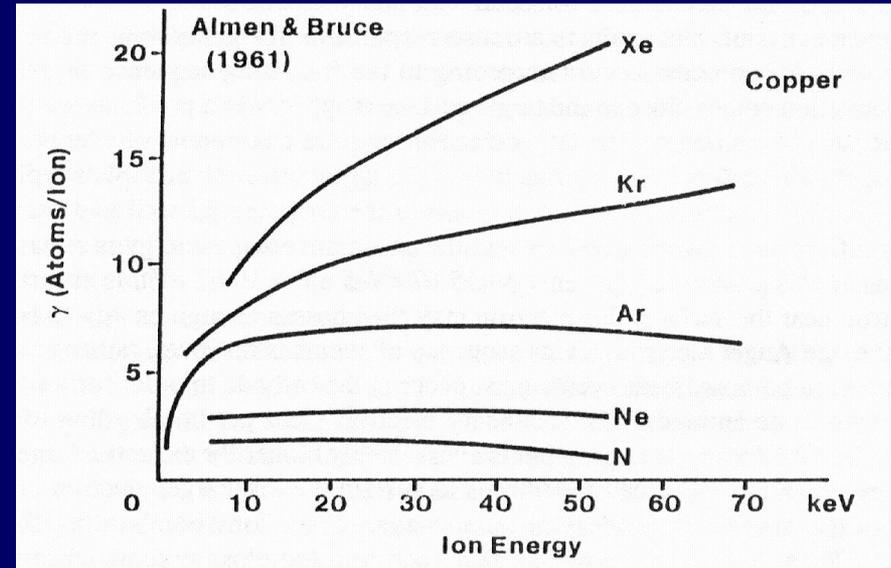
- **Na faixa de energia de sputtering de 10 – 5000 eV, o rendimento γ aumenta com a energia e a massa do íon.**

- **Rendimento de sputtering de vários materiais em Ar a diferentes energias em átomos/ion**

Alvo	At.wt./ dens.	100 eV	300 eV	600 eV	1000 eV	2000 eV
Al	10	0.11	0.65	1.2	1.9	2.0
Au	10.2	0.32	1.65	2.8	3.6	5.6
Cu	7.09	0.5	1.6	2.3	3.2	4.3
Ni	6.6	0.28	0.95	1.5	2.1	
Pt	9.12	0.2	0.75	1.6		
Si	12.05	0.07	0.31	0.5	0.6	0.9
Ta	10.9	0.1	0.4	0.6	0.9	
Ti	10.62	0.08	0.33	0.41	0.7	
W	14.06	0.12	0.41	0.75		

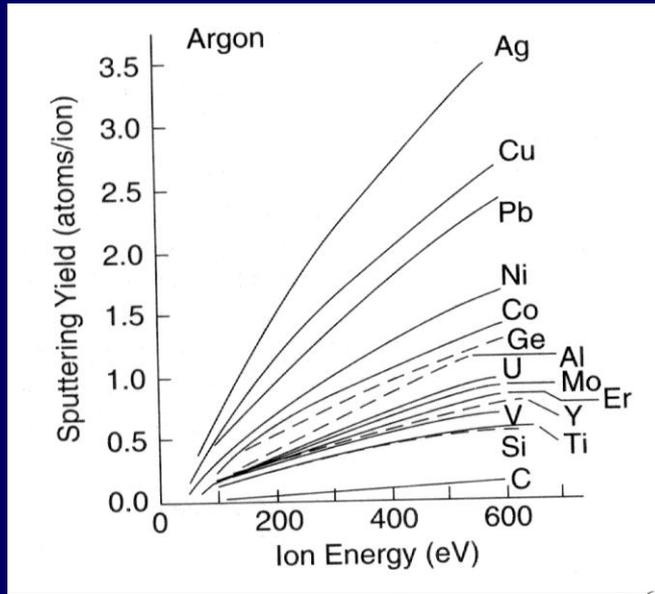
➤ O rendimento de vários materiais são diferentes. Como um grupo, por exemplo, de materiais de pressão de vapor comparáveis, eles tem valores muito próximos um do outro. Isso faz com que a deposição de filmes de multicamadas ou multi-componentes seja mais controlável por sputtering.

- **Rendimento de sputtering de gases nobres sobre cobre em função de sua energia.**



- **Rendimento de sputtering em função da energia de bombardeamento para Ar^+ de alguns materiais conhecidos.**

- **Rendimento de sputtering em Ar⁺ de diversos materiais para baixa energia.**

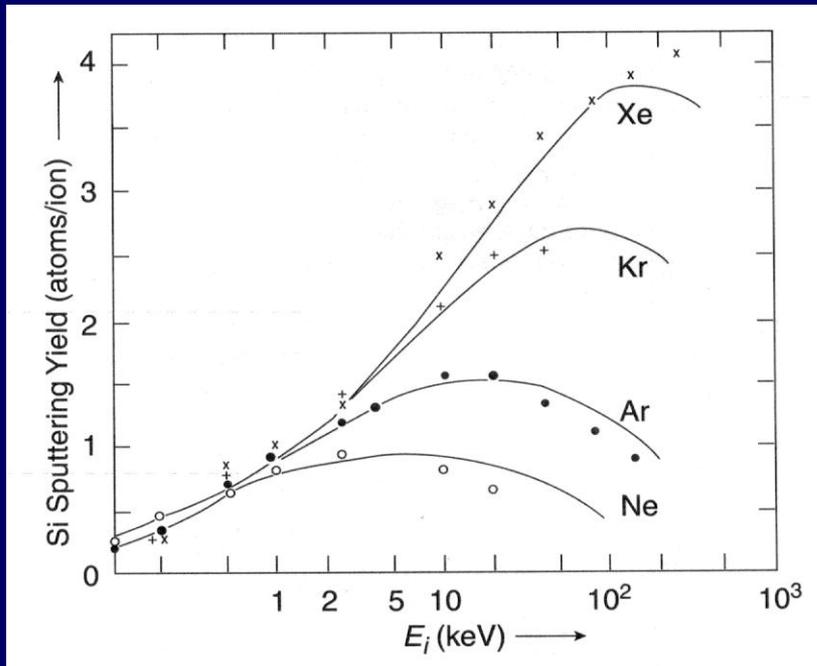


➤ **Sputtering** : processo de transferência de momentum e energia entre o átomo incidente e o alvo. ⇒ espécie usada no bombardeamento é importante.

Diferenças no rendimento se deve a:

- **Energia de ligação diferente para cada material. ⇒ barreira para emissão do átomo da superfície.**
- **Eficiência na transferência de momentum. Este tem máximo valor para 2 espécies de massas iguais (conservação de energia). ⇒ rendimento mais alto, bombardeamento do alvo por íons de mesma espécie.**

- **Rendimento de sputtering de gases nobres sobre Si numa ampla faixa de energia do íon.**



➤ **Energia altas \Rightarrow dependência significativa com massa.**

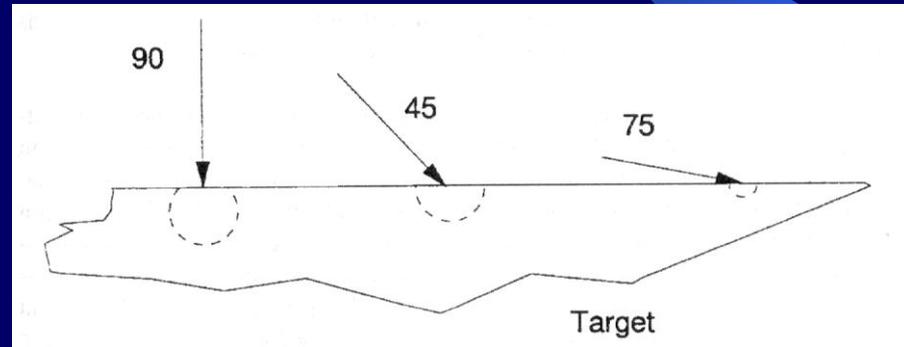
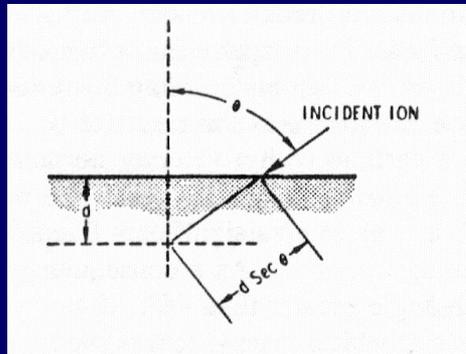
➤ **$E < 1$ keV, pouca dependência com massa.**

➤ **Alto rendimento de sputter $\gamma \Rightarrow$ alta taxa de deposição do filme ?**

❖ **Do ponto de vista de rendimento isto é verdadeiro somente para alvos de massas relativamente altas bombardeadas com espécies de massa > 40 (Ar).**

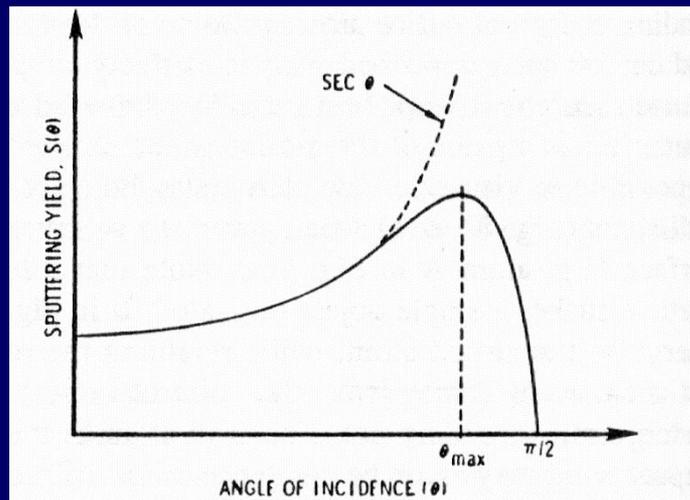
- Efeito do ângulo de incidência do íon no rendimento de sputtering.

- Energia E dos átomos desalojados ≈ 3 a 10 eV.
- Íons incidentes são neutralizados ou refletidos.



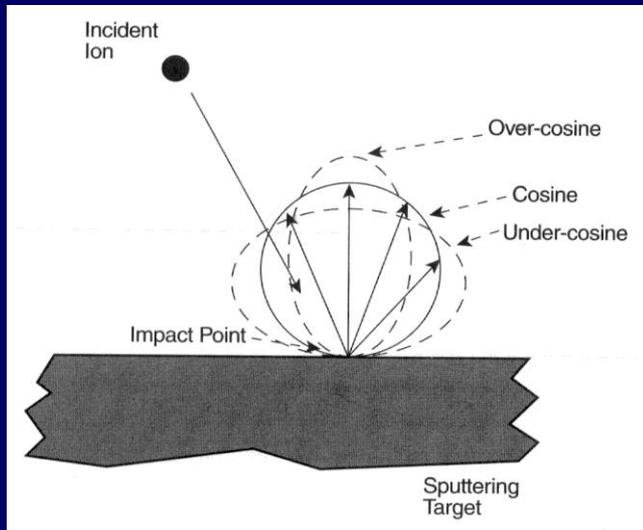
- Incidência normal (90°): afeta o alvo caracterizado por volume esférico denotado por círculo tracejado e somente uma pequena fração desse círculo intercepta a superfície que define a área em que o átomo desalojado energético possa ser emitido.
- 45° ou menor, volume afetado pelo impacto move para próximo da superfície. \therefore mais átomos próximos da superfície podem ser emitidos.

- Com bombardeamento $< 45^\circ$, o rendimento de sputtering supera facilmente o caso de incidência normal.
- Contudo, a medida que reduz o ângulo de incidência, aumenta a quantidade de íon incidente que pode simplesmente refletir. \Rightarrow pouca energia de deposição, conseqüentemente, muito pouco desalojamento de átomos da superfície do material.



- **Rendimento de sputtering mais alto próximo de 45° do que 90° . Decresce rapidamente a medida que o ângulo de incidência aproxima 0° .**

• Distribuição angular dos átomos desalojados



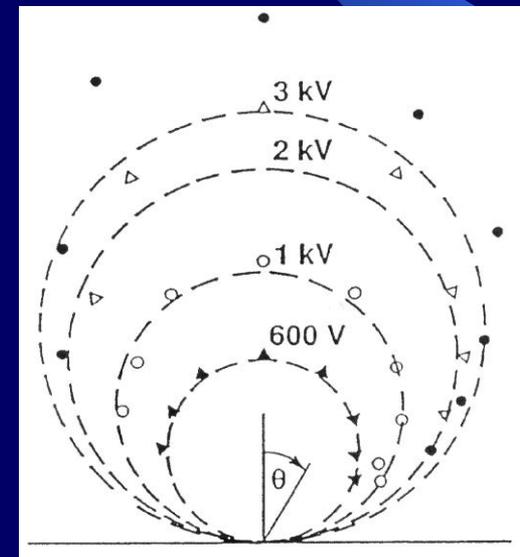
➤ Para maioria das situações, a emissão dos átomos desalojados segue uma distribuição cosseno.

➤ → representa fluxo relativo em cada direção, ou seja, o rendimento.

• Desvios devido a energia do ion incidente:

➤ Energias baixas \Rightarrow distrib. sub-cosseno.

➤ Energias altas \Rightarrow distrib. sobre-cosseno



❖ Maioria dos sistemas de plasma usados em sputtering (ex. magnetrons), há apenas pequena variação no perfil de emissão, devido a faixa de energia disponível.

- **Natureza das Partículas Desalojadas:**

- são tipicamente neutras;
- $\sim 10^{-4}$ são carregadas
- As positivas são re-captuladas.

- **Energia das partículas desalojadas:**

- a energia é alta comparada com a evaporação. 5 a 20 eV.

 - exemplo de Ge: - sputtering (1.2 keV Ar⁺) \Rightarrow 15 eV.

 - evaporação \Rightarrow \sim 0.1 eV.

- esta energia alta melhora a aderência e a cobertura de degrau.

- É uma das diferenças mais importantes entre a evaporação e o sputtering.

• Seleção das Condições de Sputtering

a) Gás : deve ser inerte \therefore gás nobre

- Ar é o mais abundante e barato com rendimento adequado.

b) Pressão :

- Mínima: para manter a descarga (2 ~ 3 mtorr – magnetron).
- Máxima: para limitar espalhamento (átomos com gás), ~ 100 mtorr.)

c) Potência : V e I

- Rendimento ótimo \Rightarrow centenas de volts (se $E \uparrow \Rightarrow \uparrow I/I$).
- Aumentando I $\Rightarrow \uparrow$ taxa (valor típico: 10-100 mA/cm² – magnetron).

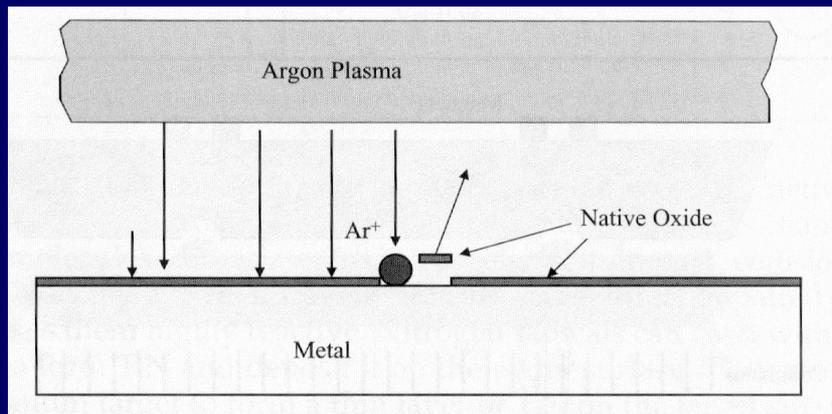
O processo é altamente ineficiente. A energia transferida ao átomo desalojado ~ 2-3%.

- ~ 70% da Potência \Rightarrow aquecimento da amostra \therefore necessita refrigeração.
- ~ 25% da Potência \Rightarrow produz eletrons secundários e ftons.

• Aplicações de Sputtering

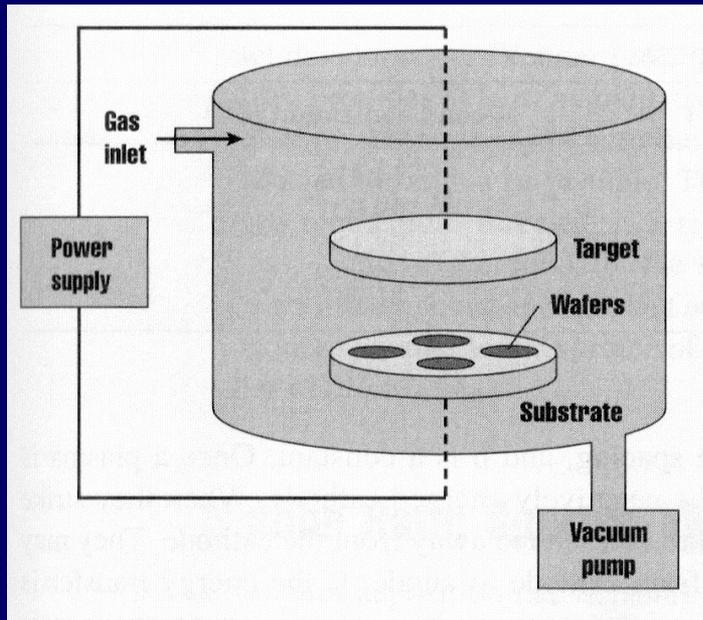
A) Sputter Etching:

- limpeza de superfície;
- afinar substrato;
- gerar padrão \Rightarrow litografia.



Plasma RF de Ar é o padrão usado para remover a camada de óxido nativo da superfície de metal e preparar o wafer para deposição do metal.

B) Deposição de Filmes por Sputtering



Sistema de sputtering simples de placas paralelas

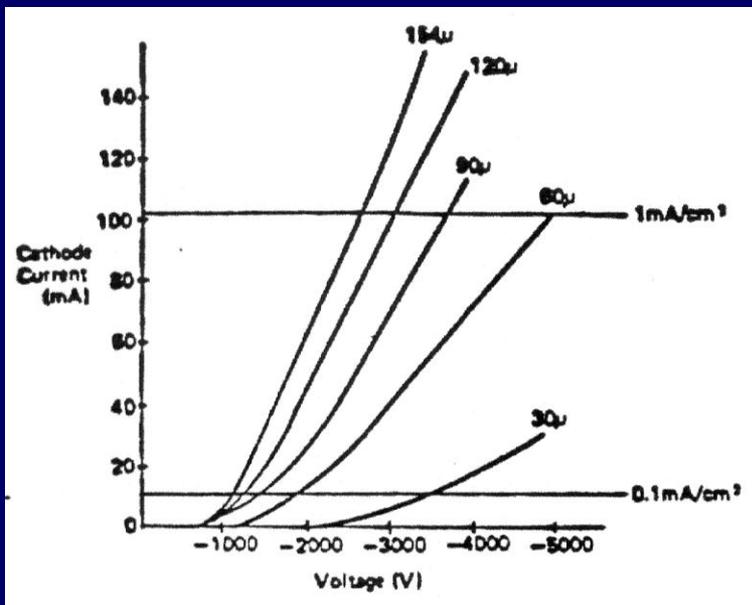
- Parâmetros típicos:

- Gás de descarga: Ar;
- $P_{\text{base}} = 10^{-6}$ a 10^{-9} torr;
- $P_{\text{ar}} = 20 - 200$ mtorr;
- $V_{\text{DC}} = -250$ a -5000 V;
- $J = 0.1$ a 2.0 mA/cm².

- Os átomos desalojados condensam sobre o substrato formando o filme e também sobre as paredes do reator.

• Taxa de Deposição

❖ Efeito da tensão e corrente do catodo



Curva I-V típica para diferentes pressões de Ar com catodo de Ni

- **V alto = J alto.**
∴ alto fluxo de sputtering.
- **Também, V alto = alto S**

❖ Escolha da pressão:

- Para $P < 20$ a 30 mtorr $\Rightarrow I \downarrow \downarrow \therefore$ taxa $\downarrow \downarrow$.
 - Para $P \uparrow \uparrow \Rightarrow$ colisões $\uparrow \therefore$ taxa \downarrow .
- Limite ≈ 200 mtorr.

❖ Escolha de I e V:

- Se $V \uparrow \uparrow \Rightarrow S \downarrow$ e $I/I \uparrow$. Por outro lado, para $V > 10$ kV : $S \approx$ constante. $\therefore V < 10$ kV.
- As fontes apresentam um limite de I-V.
- $V_{\min.} = -250$ a 500 V para obter um I adequado.

• Bombardeio do Substrato

a) Átomos do catodo e contaminantes:

- taxa típica de crescimento: $\approx 200 \text{ \AA}/\text{min.}$ (batch) e $\approx 1 \text{ \mu m}/\text{min.}$ (single wafer).
 \therefore fluxo de $\sim 10^{15}$ átomos/cm²-s (~ 1 monocamada/s.
- Se gás contaminante : $P_{\text{parcial}} = 10^{-6} \text{ torr} \Rightarrow$ **fluxo** **fluxo** $\sim 10^{15}$ átomos/cm²-s.
- Se coeficiente de adsorção for alto (ex. O₂) \Rightarrow contaminação $\uparrow\uparrow$.
- Se a fonte de contaminante não for o gás de sputtering \Rightarrow podemos minimizar a contaminação pelo aumento de bombeamento e fluxo.

b) Átomos do gás de Ar :

➤ 20 mtorr \Rightarrow fluxo $\approx 10^{19}$ átomos/cm²-s. Porém o coeficiente de adsorção é baixa.

❖ Captura uma certa fração de Ar;

❖ Coef. adsorção \downarrow com T;

❖ Coef. adsorção \uparrow se $E(\text{Ar}) \uparrow$.

\therefore íons de Ar neutralizados e refletidos no catodo tem alta probabilidade de serem incorporados no filme.
Aumenta com \downarrow de P.

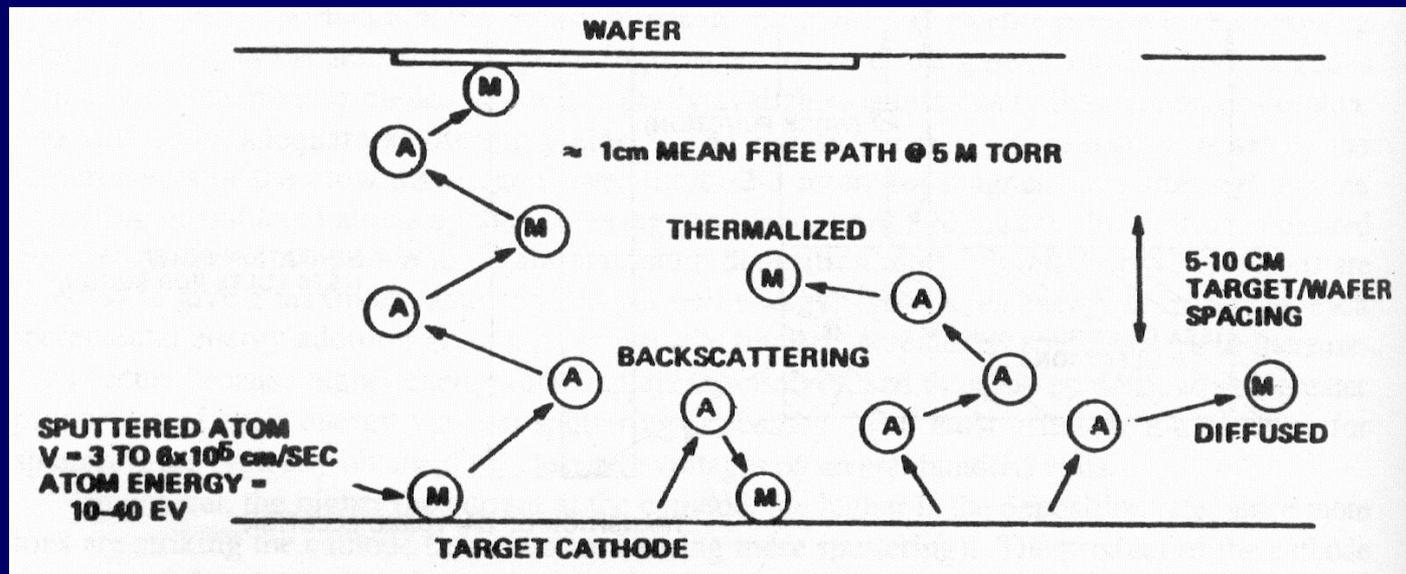
c) Eletrons:

➤ São eletrons térmicos do plasma e eletrons secundários gerados no catodo com $E \uparrow$.

\Rightarrow - $\sigma \downarrow$ (secção de choque de colisão $\approx 10^{-6}$ cm² e

- aquecimento dos substratos.

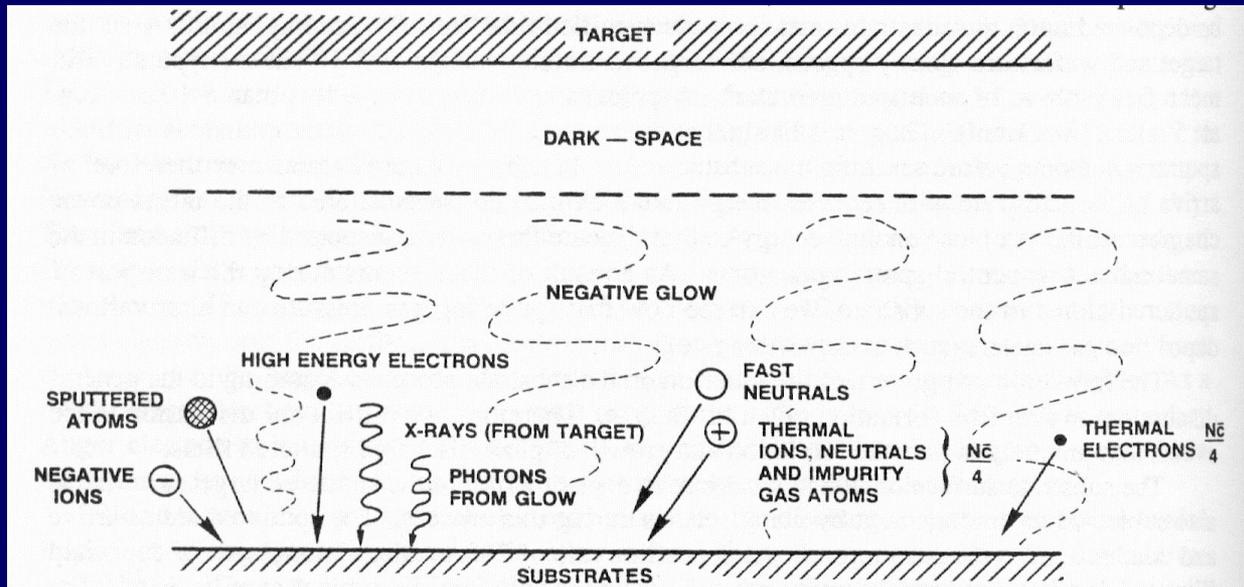
• Crescimento do Filme



❖ Eventos:

- os átomos após colisões alcança o substrato com a energia $E \approx 1 - 2 \text{ eV}$.
- O átomo é retroespalhado para o alvo.
- O átomo é perdido por difusão.

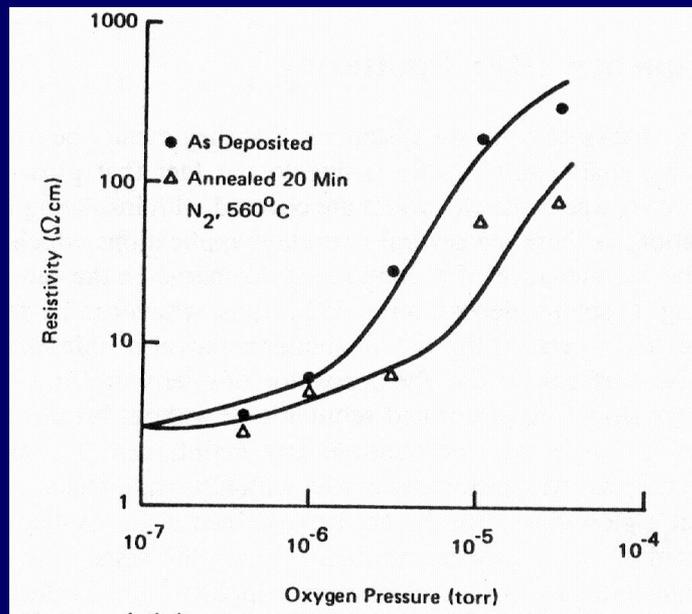
❖ Espécies que impingem o substrato durante a deposição



- átomos do alvo;
- átomos neutros do gás com energia, após retroespalhamento no alvo;
- íons negativos de impurezas tipo N^- e O^- , ionizado próximo do catodo (c/energia) pela reação:



- elétrons secundários do alvo \Rightarrow causa aquecimento do substrato;
- átomos neutros do gás com baixa energia, \Rightarrow estes apresentam baixo coeficiente de aderência;
- impurezas reativas neutras do gás.

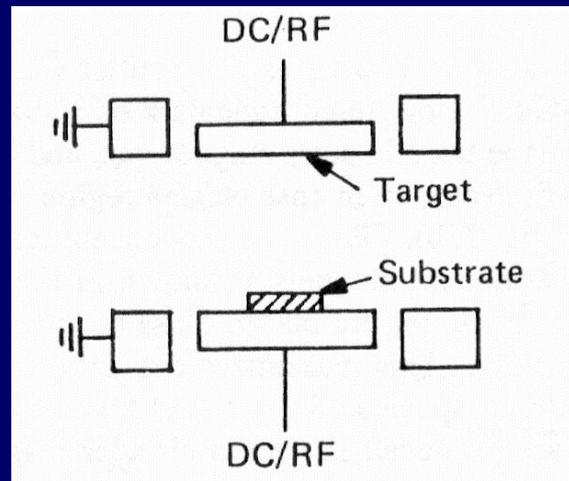


❖ Fontes de Gás Residual :

- Gás de Ar com impurezas;
- Vazamentos;
- Degaseificação das lâminas e suporte;
- Degaseificação das paredes da câmara.

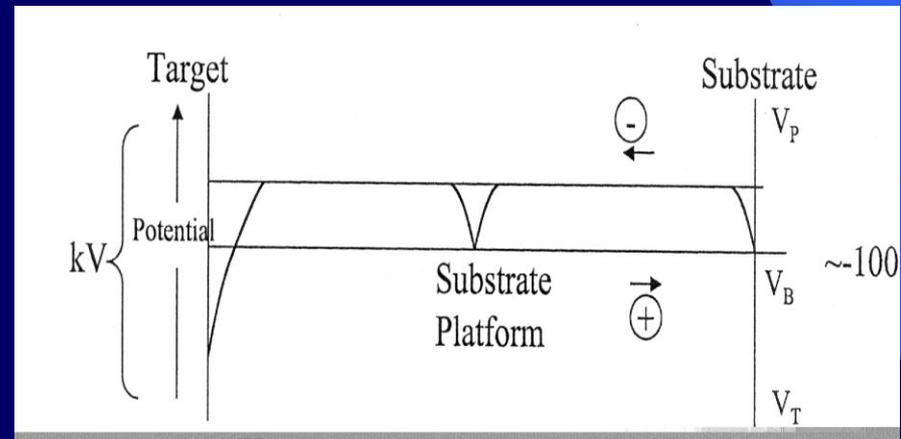
∴ Minimizar o gás residual

- Bias Sputtering (Sputtering com polarização)**



➤ Tensão de bias (geralmente negativa) é fornecido por fonte externa (dc ou RF) e geralmente $V_{\text{bias}} < 500 \text{ V}$.

➤ **Potencial do substrato ($V_P + V_B$) mais baixo do que o potencial do plasma.**



- **O potencial negativo aplicado nas lâminas altera o fluxo e E das partículas \Rightarrow bombardeio de Ar^+ \Rightarrow re-sputtering do filme.**
- **Altera as propriedades do filme e permite controlar:**
 - **incorporação de gás;**
 - **Cobertura de degrau;**
 - **Stress;**
 - **Refletividade;**
 - **Tamanho de grão;**
 - **Resistividade;**
 - **Rugosidade;**
 - **Dureza;**
 - **Composição da liga.**

- **Fenômenos:** energia da superfície $\uparrow \Rightarrow$ migração superficial \uparrow e reações químicas \uparrow ;
 - Re-sputtering do filme (se V alto);
 - Danos na superfície do filme;
 - Aquecimento.

❖ **Problemas de backscattering (colisões no gás):**

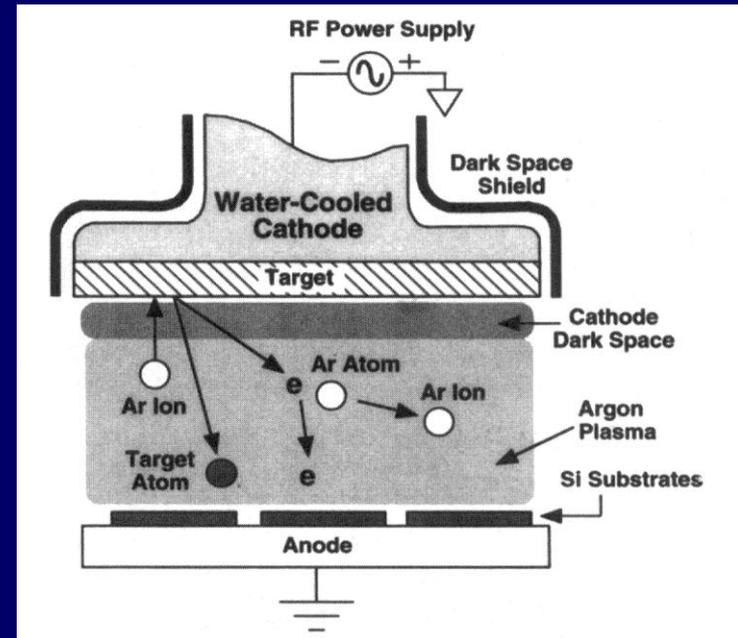
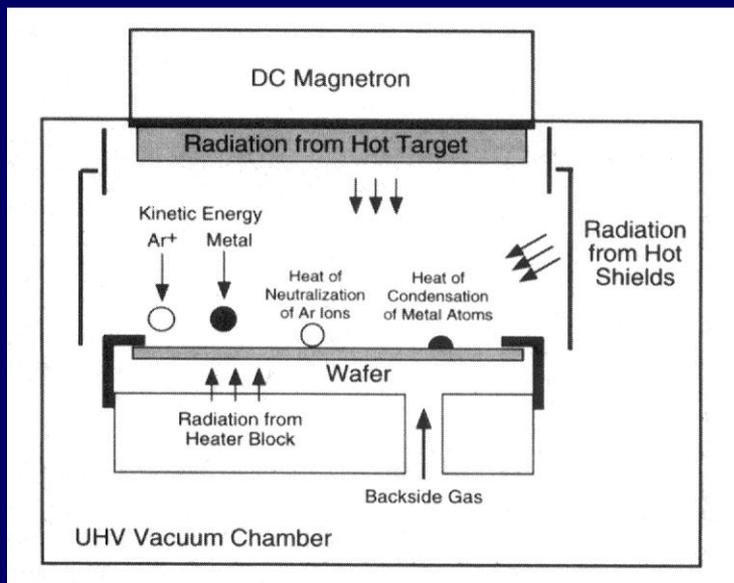
➤ há sputtering do suporte de lâminas.

\therefore o backscattering \Rightarrow contamina o filme.

\therefore usar material compatível.

• Sputtering Tipo Magnetron

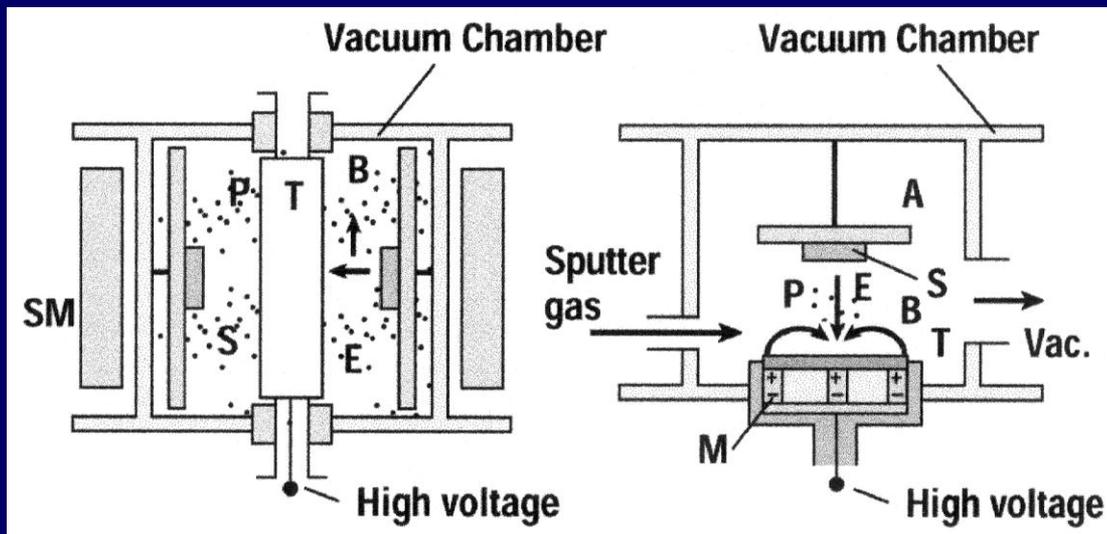
- ❖ Em sputtering tipo diodo DC ou diodo RF a maioria dos eletrons secundários não causam ionização mas apenas esquentam o anodo (lâminas).



Sputtering RF simples

Sputtering DC com magnetron e ambiente térmico

❖ Solução: Magnetron



T: alvo

P: plasma

SM: solenoide

M: magneto

E: campo elétrico

B: campo magnético.

Magnetron Cilindrico

Magnetron Planar

∴ Ionização ↑ ⇒ taxa ↑

Valores típicos de corrente: 10 – 100 mA/cm² – c/magnetron e

1 mA/cm² – sem magnetron.

❖ Princípio da configuração do magnetron

- Usa campo magnético para gerar plasma de densidade mais alta. $B \uparrow$ provoca sputtering maior próximo dos magnetos.

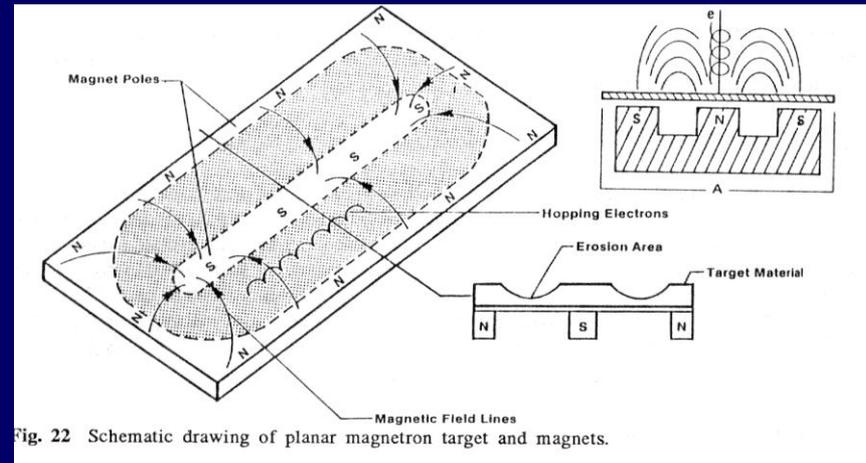


Fig. 22 Schematic drawing of planar magnetron target and magnets.

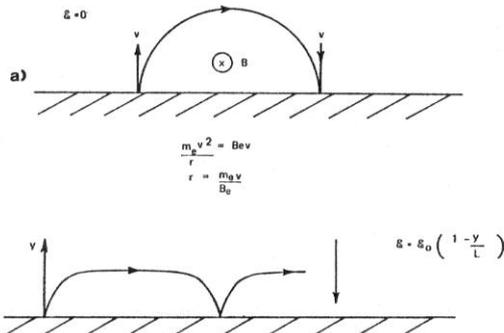
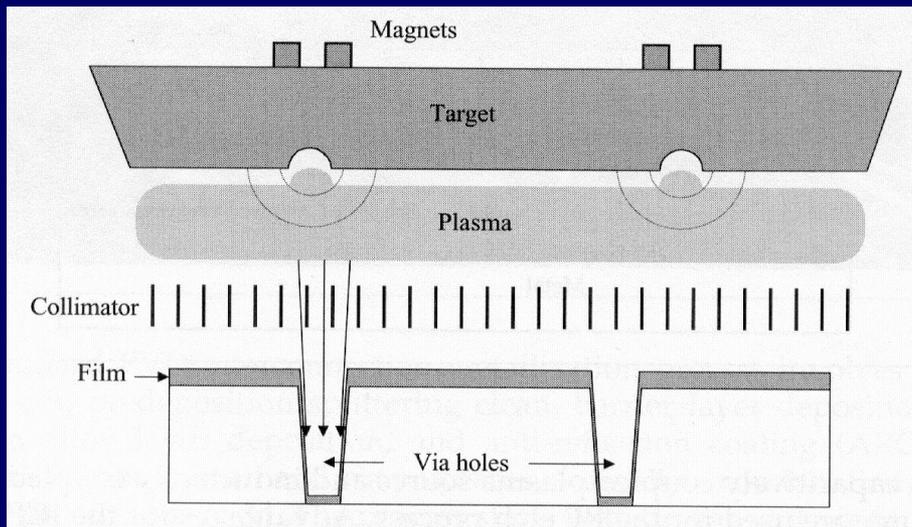


Fig. 20 (a) Motion of an electron in a region of magnetic field B parallel to the surface. (b) Motion of an electron ejected from a surface with velocity v into a region magnetic field B parallel to the surface, with no electric field and, (c) with a linearly decreasing field. From B. Chapman, *Glow Discharge Processes*, 1980, Copyright © John Wiley & Sons. Reprinted with permission of John Wiley & Sons.

- A uniformidade do filme pode ser obtido ajustando a localização dos magnetos.
- O uso de magnetron permite a formação do plasma a pressão mais baixa, tipicamente de 10^{-5} a 10^{-6} torr.

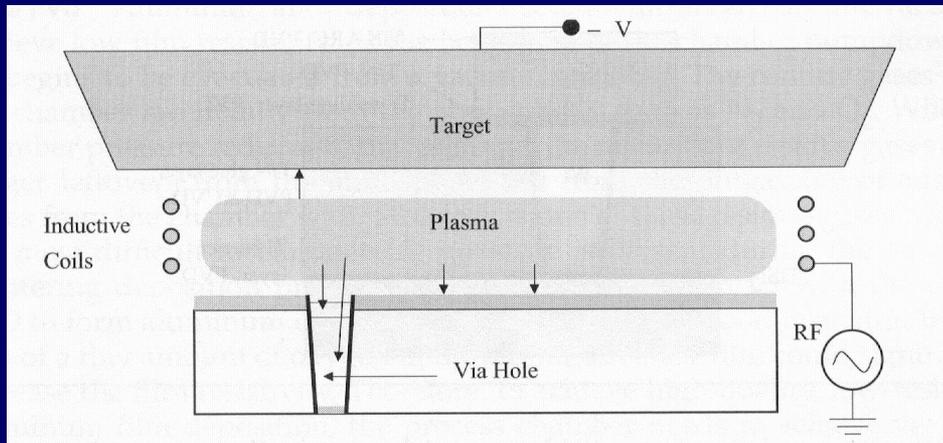
❖ Sistema de Sputtering Colimado



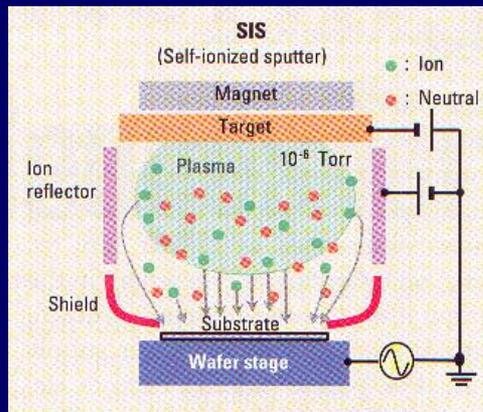
➤ No sistema colimado os átomos dos metais ou moléculas movem principalmente na direção vertical e podem alcançar o fundo de uma trincheira de contacto/via profunda e estreita.

➤ **Taxa de deposição é baixa, pois o colimador bloqueia os átomos de metais de alcançarem a superfície do substrato, mas melhora a cobertura de degrau em todo o wafer. Para compensar a diminuição da taxa de deposição, usa-se alta potência DC nos eletrodos para aumentar o efeito de sputtering.**

❖ Sistema de Sputtering I-PVD



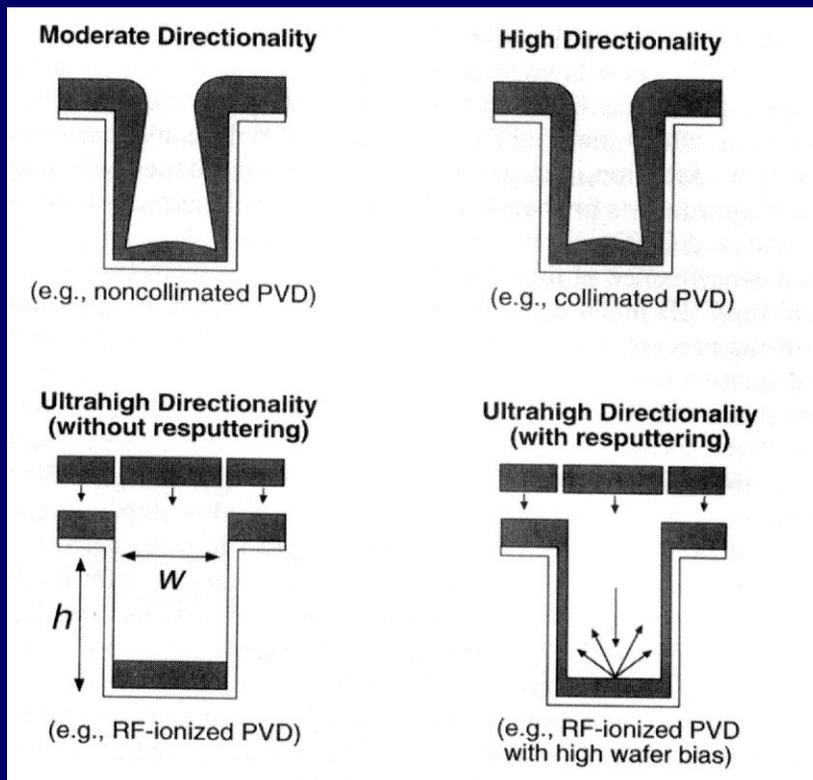
- Prover maior direcionalidade aos fluxos de metal para melhorar a cobertura do fundo e da paredes laterais do degrau e reduzir a resistência de contato.
- O uso de bobina de acoplamento indutivo permite o impacto da maior parte de íons (+) de metal com a superfície do wafer carregada negativamente na direção vertical.



- **A bobina está localizado dentro da câmara de vácuo. ⇒ a bobina deve ser de mesmo metal do alvo, pois sofre sputter por bombardeamento de íons.**

❖ Direcionalidade e Cobertura de Degrau

PVD com variação de direcionalidade dos íons de metal



- Uso de colimação e pressões baixas pode melhorar a direcionalidade.
- A cobertura do fundo de degrau muito boa pode ser obtida por RF I-PVD .

• Deposição de Filmes Multicomponentes

a) Ligas :

i) Sputtering de átomos de alvo A_xB_y .

$$S = f(\text{elemento}) \Rightarrow S_A \neq S_B.$$

no estado estacionário a superfície do alvo adquire a composição $A_x'B_y'$.

ii) Transporte até a lâmina:

$$\lambda_A \neq \lambda_B \text{ ou } D(A) \neq D(B)$$

\therefore fluxo (A)/fluxo(B) \neq x/y (na lâmina).

iii) Condensação nos substratos :

coef. de condensação = f (fluxo, energia de ligação átomo-substrato, T substrato)

\therefore coef. de cond. (A) \neq coef. de cond. (B)

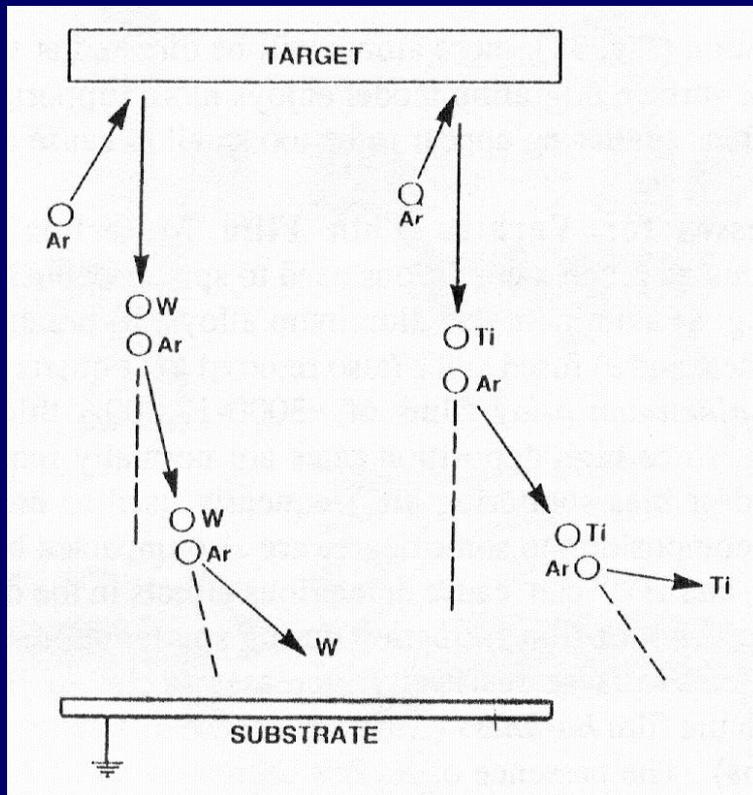
iv) Incorporação de A e B no filme:

podemos ter resputtering (c/bias) e como $S_A \neq S_B$ podemos remover frações diferentes de A e B.

\therefore composição do filme \neq composição do alvo.

• Sputtering de TiW_x ($x \approx 0.9$)

❖ Modelo de espalhamento do Ti



➤ Mais Ti do que W é espalhado pelo Ar para a parede.

➤ Composição de Ti no filme é mais baixo do que a do alvo.

∴ para compensar esta perda do Ti durante o transporte do alvo para o substrato, deve ser aumentado a composição do Ti no alvo.

b) Compostos :

➤ Alvos compostos \Rightarrow átomos e moléculas.

\therefore filme \neq alvo

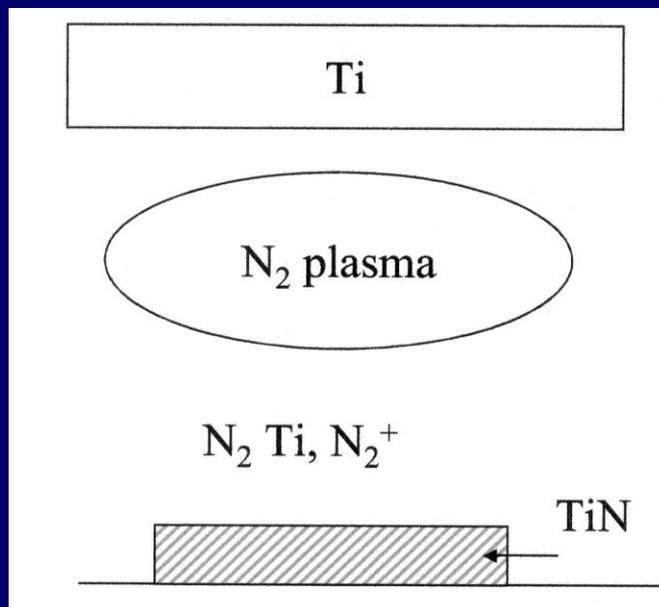
➤ Filme deficiente dos componentes gasosos/voláteis;

➤ Para recompor estequiometria \Rightarrow adicionar gás reativo.

ex.: $\text{SiO}_2 \Rightarrow$ usar 95% Ar + 5% O_2

c) Sputtering Reativo

- Usa alvo de elemento puro + (Ar + gás reativo).
ex.: $\text{Si} + (50\% \text{ Ar} + 50\% \text{ O}_2) \Rightarrow \text{SiO}_2$
 $\text{Si} + (x\% \text{ Ar} + (1-x)\% \text{ N}_2) \Rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4$



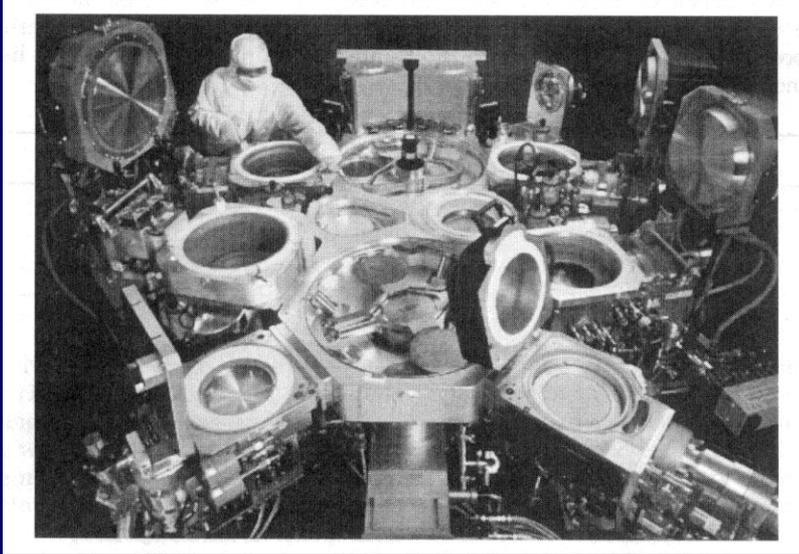
❖ Exemplo de TiN

• Sistemas de Sputtering

- a) **Batch;**
- b) **Single wafer;**
- c) **Single wafer com multi-câmeras.**

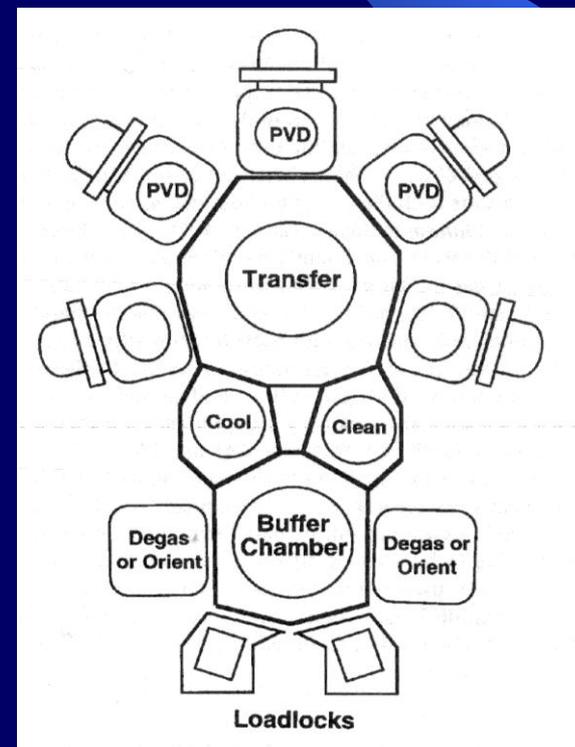
Vantagens:

- facilmente automatizável;
- menor volume;
- melhor controle e uniformidade;
- maior flexibilidade: integração de várias etapas de processos: limpeza, sputtering, CVD, etc.
- com load-lock (pré-câmara) evita-se o contato da câmara de processo com o ambiente atmosférico \Rightarrow evita oxidação dos filmes depositados nas paredes \Rightarrow reduz stress \Rightarrow menos flake-off \Rightarrow menos partículas.



Cluster tool para processo de metalização integrado.

Ilustração de uma arquitetura básica de um cluster tool de aplicação flexível.



- **Considerações Sobre Processos de Sputtering**

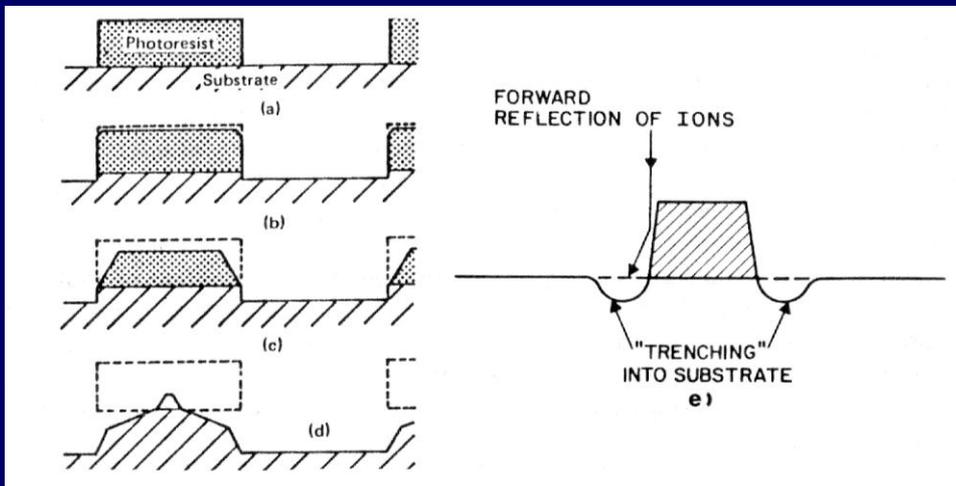
A) Características Gerais Desajadas:

1. Controle de espessura;
2. Uniformidade da espessura ($< 5\%$);
3. Resistência baixa;
4. Uniformidade na resistividade ($< 5\%$);
5. Boa aderência;
6. Boa cobertura de degrau ($> 50\%$);
7. Alta resistência a eletromigração;

8. Alta resistência a formação de hillocks (saliências);
9. Refletividade controlada;
10. Dureza controlada – compatibilidade com solda de fios;
11. Baixa resistência de contacto c/Si ou outros metais;
12. Controle da composição – liga e multi-camadas;
13. Tamanho de grão controlado;
14. Stress baixo;
15. Latitude razoável de processo para as diversas propriedades.

B) Facetamento e Entricheiramento

- Pode ocorrer em: - plasma etching tipo RIE
- sputtering com polarização.



❖ Causas:

1) **Facetamento:** - ângulo de incidência $< 90^\circ \Rightarrow$ eficiência de sputtering \uparrow .

- campo elétrico \uparrow em quinas \Rightarrow energia dos íons \uparrow .

2) **Entricheiramento:** fluxo de íons \uparrow (reflexão).

- **Aquecimento do Substrato**

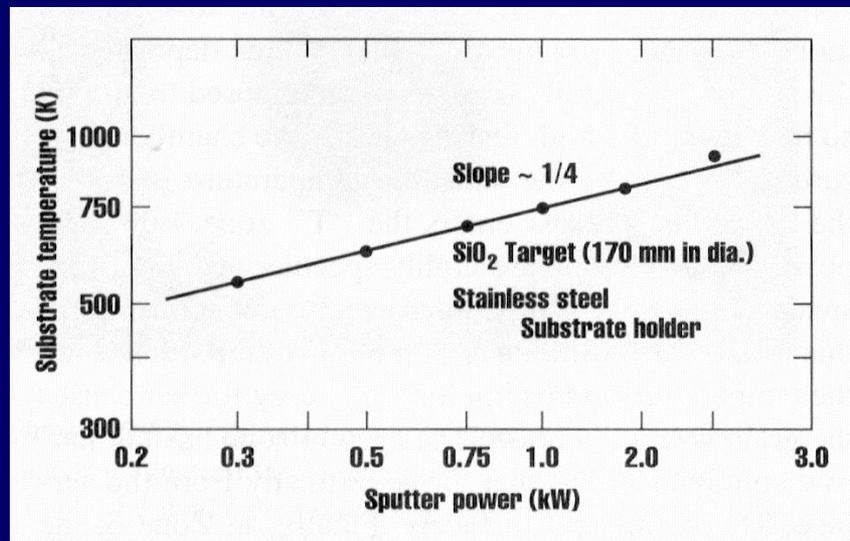
- i) Intencional:**

- lâmpadas IR;
 - Ar quente nas costas das lâminas.

- ii) Não intencional:**

- elétrons secundários (mínimo com magnetron)
 - calor de condensação (importante para altas taxas, ex. $1\mu\text{m}/\text{min.}$ de Al $\Rightarrow \Delta T = 50\text{-}100^\circ\text{C}$).

Aumento da temperatura do substrato em função da potência do plasma RF de Ar



❖ **1 W/cm² dissipado no substrato ⇒ 4°C/segundo.**

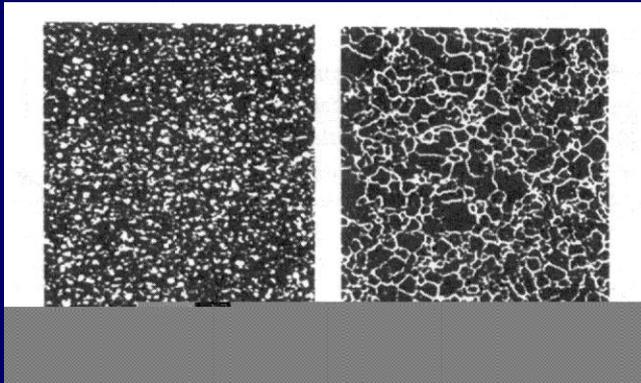
T_s ↑ ⇒ difusão superficial ↑;

T_s ↑ ⇒ adsorção gás inerte ↓.

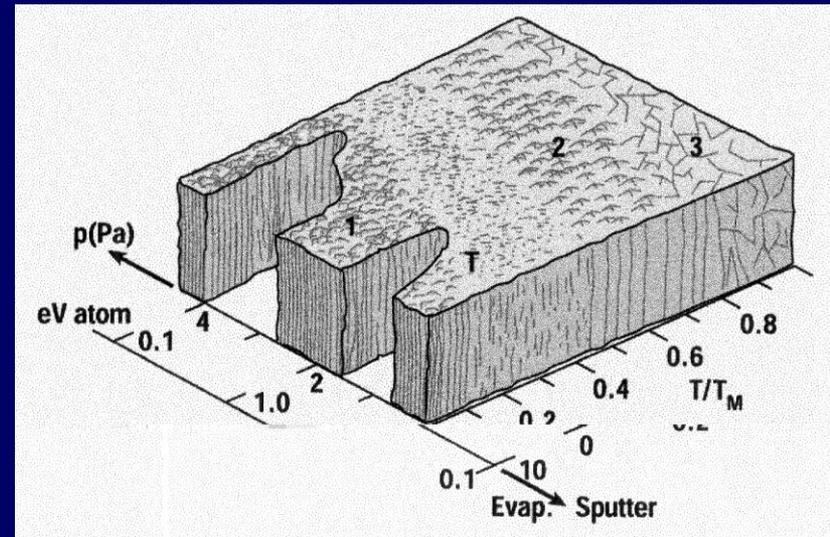
- ❖ **Efeitos :**
- **Desejados** ⇒ - melhor cobertura de degrau.
 - filme menos poroso.
 - **Indesejados** ⇒ aumento da rugosidade.

• Deposição de Filmes – Modelo de 3 Zonas

$T = 20^{\circ}\text{C}$ $T = 400^{\circ}\text{C}$



Filme de Al - Distribuição do tamanho de grãos fortemente influenciado pela temperatura.



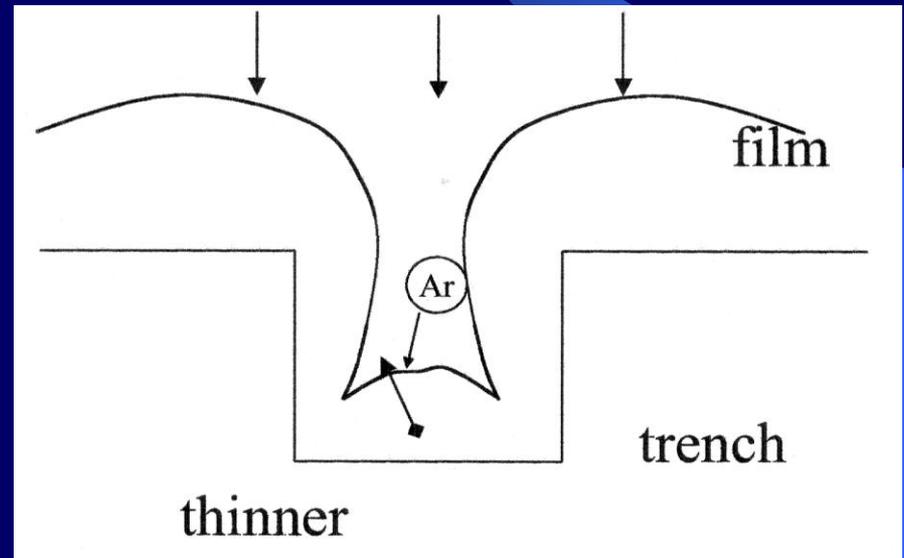
- **Zona 1:** mobilidade superficial baixa e sombreamento
 ⇒ grãos separados de porosidades de 100 \AA de largura. Cristais \uparrow densidade de deslocamentos.
- **Zona 2:** grãos colunar (densidade \uparrow);
- **Zona 3:** grãos re-cristalizados

D) Controle da Cobertura de Degrau

➤ É função de:

1) Topografia do degrau:

- altura;
- razão de aspecto;
- forma;
- ângulo.



2) Parâmetros de Sputtering:

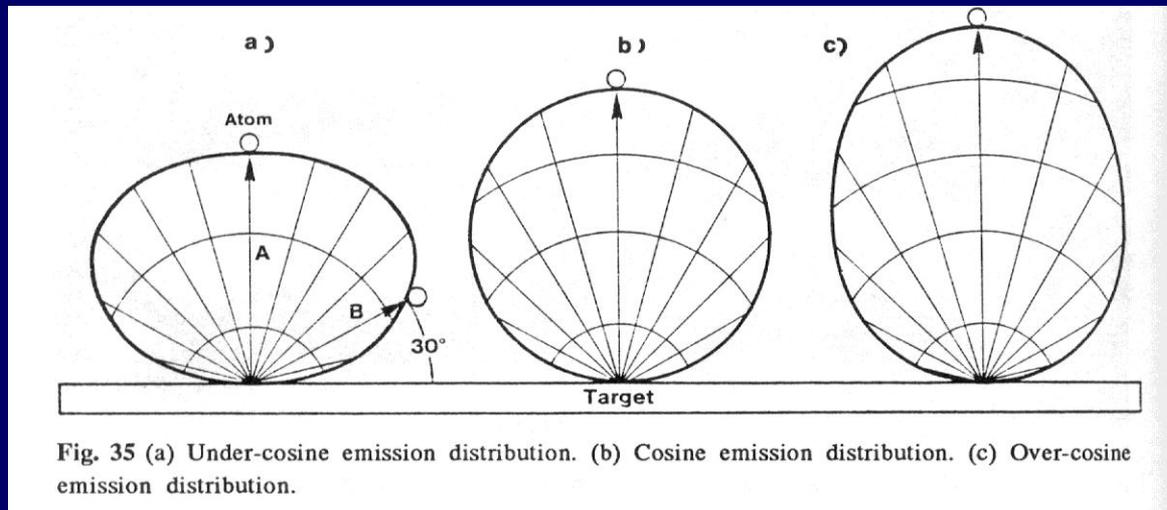
- Sputter etching antes da deposição \Rightarrow reduz o ângulo (facetamento);
- Otimização da forma do alvo.
- Aquecimento \Rightarrow migração superficial (difusão/gradiente de matéria).
 - $T \uparrow \Rightarrow D_s \uparrow \Rightarrow$ planariza por difusão superficial;
 - $V_{\text{substrato}} \uparrow \Rightarrow$ planariza por re-sputtering do filme.
 - Para Al $\Rightarrow T > 250^\circ\text{C}$.
- Sistema giratório com $\sim 200 \text{ \AA}/\text{ciclo}$ é efetivo (grande fração do ciclo há apenas migrações).
 - T muito alto pode gerar hillocks. Há um compromisso.

➤ Sputtering com polarização

Bombardeio do filme com íons Ar^+ \Rightarrow :

❖ \uparrow migração superficial;

❖ Re-sputtering do fundo e re-deposição nas paredes do degrau. A direção dos átomos emitidos nestas condições parece ocorrer segundo a distribuição sub-coseno.



• **Referências :**

- 1) S. Wolf and R. N. Tauber; Silicon Processing for the VLSI Era, Vol.1 – Process Technology, Lattice Press, 1986.
- 2) J. D. Plummer, M. D. Deal and P. B. Griffin; Silicon VLSI Technology – Fundamentals, Practice and Modeling, Prentice Hall, 2000.
- 3) S. A. Campbell; The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication, Oxford University Press, 1996.