

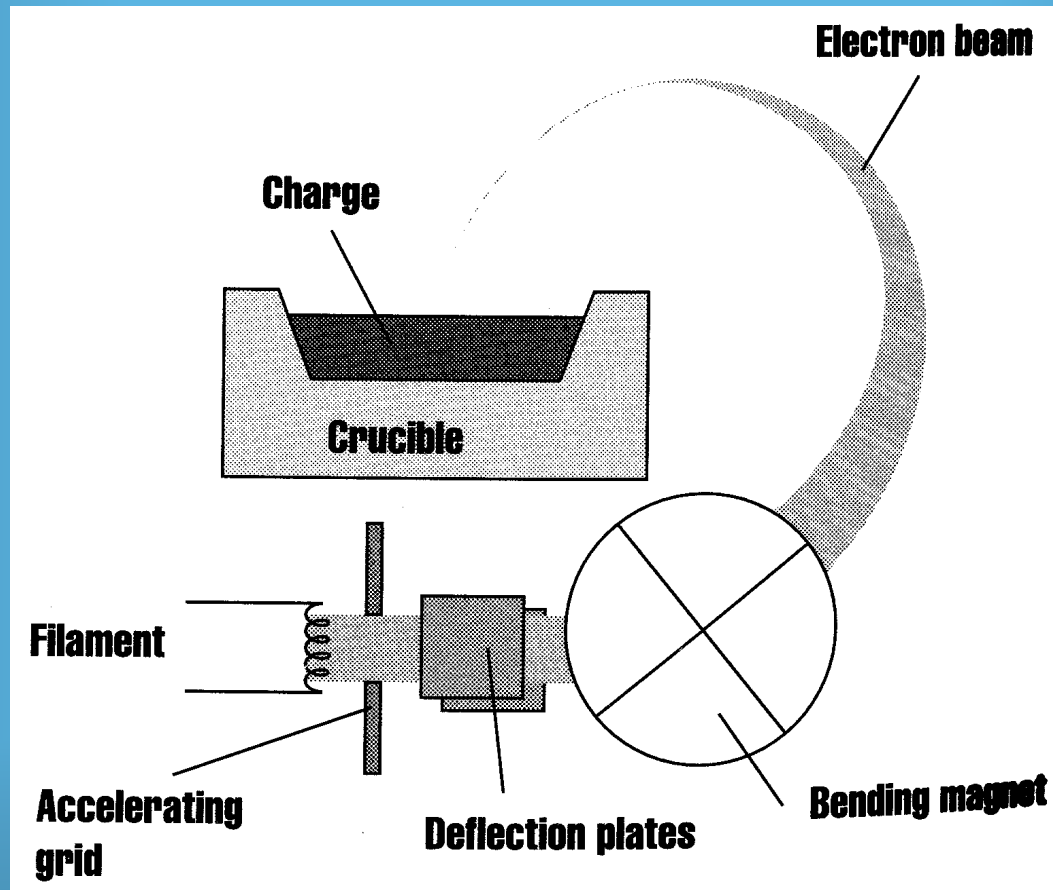
DEPOSIÇÃO FÍSICA À VAPOR
PHYSICAL VAPOR DEPOSITION

TIPOS DE PROCESSOS

- EVAPORAÇÃO TÉRMICA
- SPUTTERING
- EVAPORAÇÃO POR FEIXE DE ELÉTRONS

O MATERIAL É TRANSFERIDO DE UMA FONTE SÓLIDA, EM AMBIENTE DE BAIXA PRESSÃO, PARA O SUBSTRATO.

EVAPORAÇÃO POR FEIXE DE ELÉTRONS



UTILIZAÇÃO DE DOIS SISTEMAS DE CADINHOS

- CADINHO ÚNICO

POSSIBILITA A DEPOSIÇÃO DE APENAS UM MATERIAL

- CADINHO QUADRUPLO

POSSIBILITA A DEPOSIÇÃO DE ATÉ QUATRO MATERIAIS



- VANTAGENS

- FILMES MAIS UNIFORMES

- MELHOR COBERTURA DE DEGRAU

- MELHOR CONTROLE

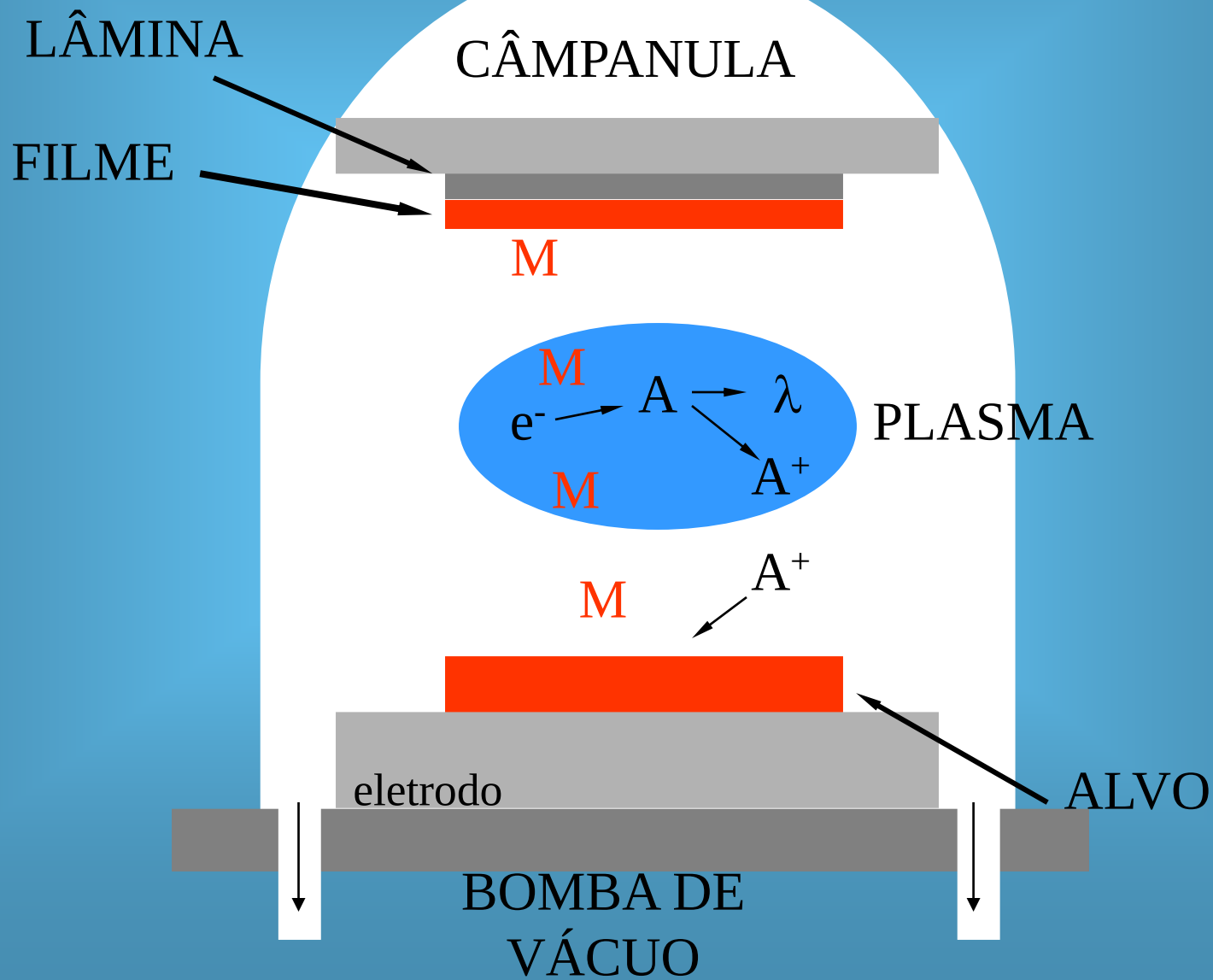
- DESVANTAGENS

- BAIXA TAXA DE DEPOSIÇÃO

- CUSTO ELEVADO



SPUTTERING

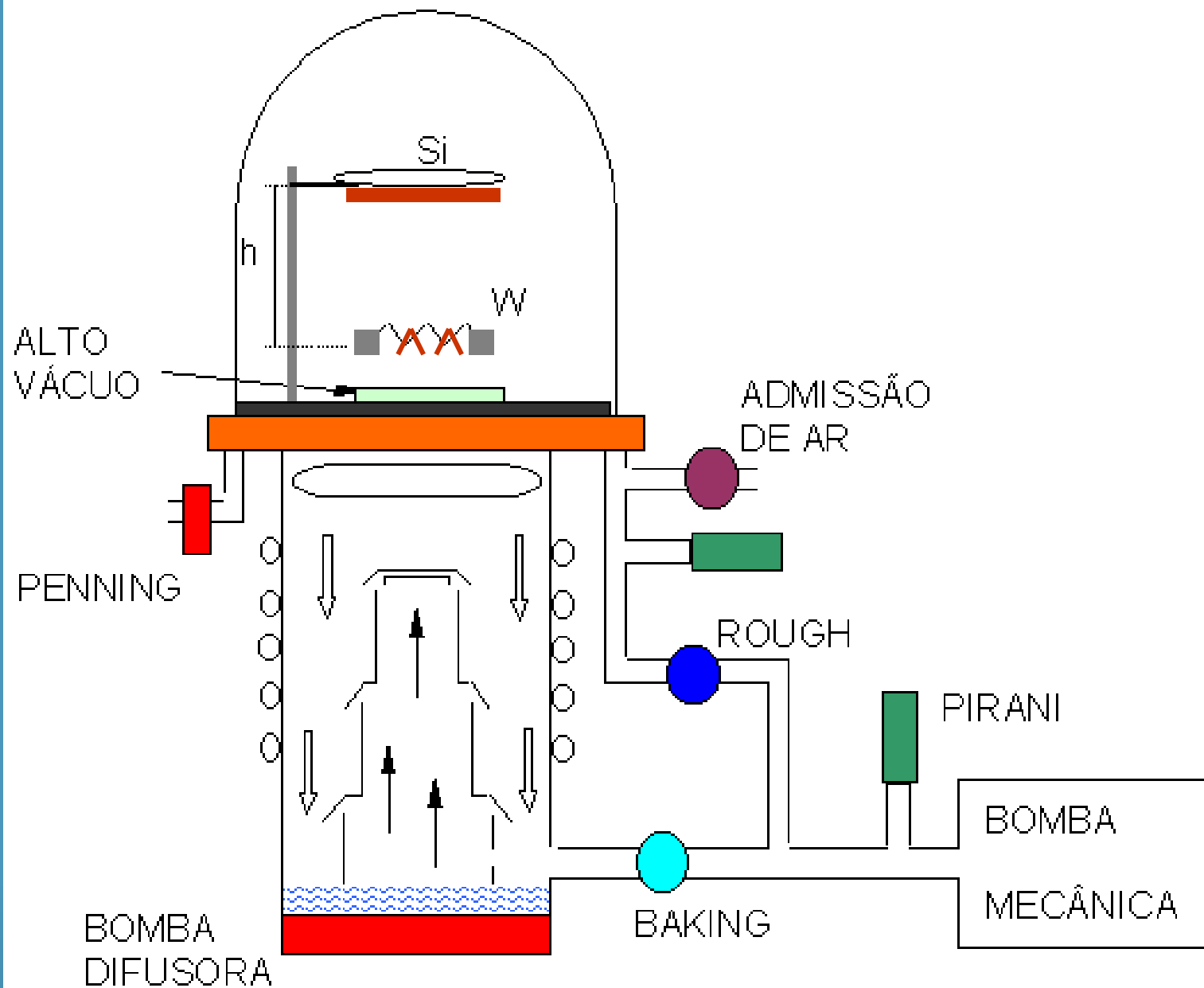


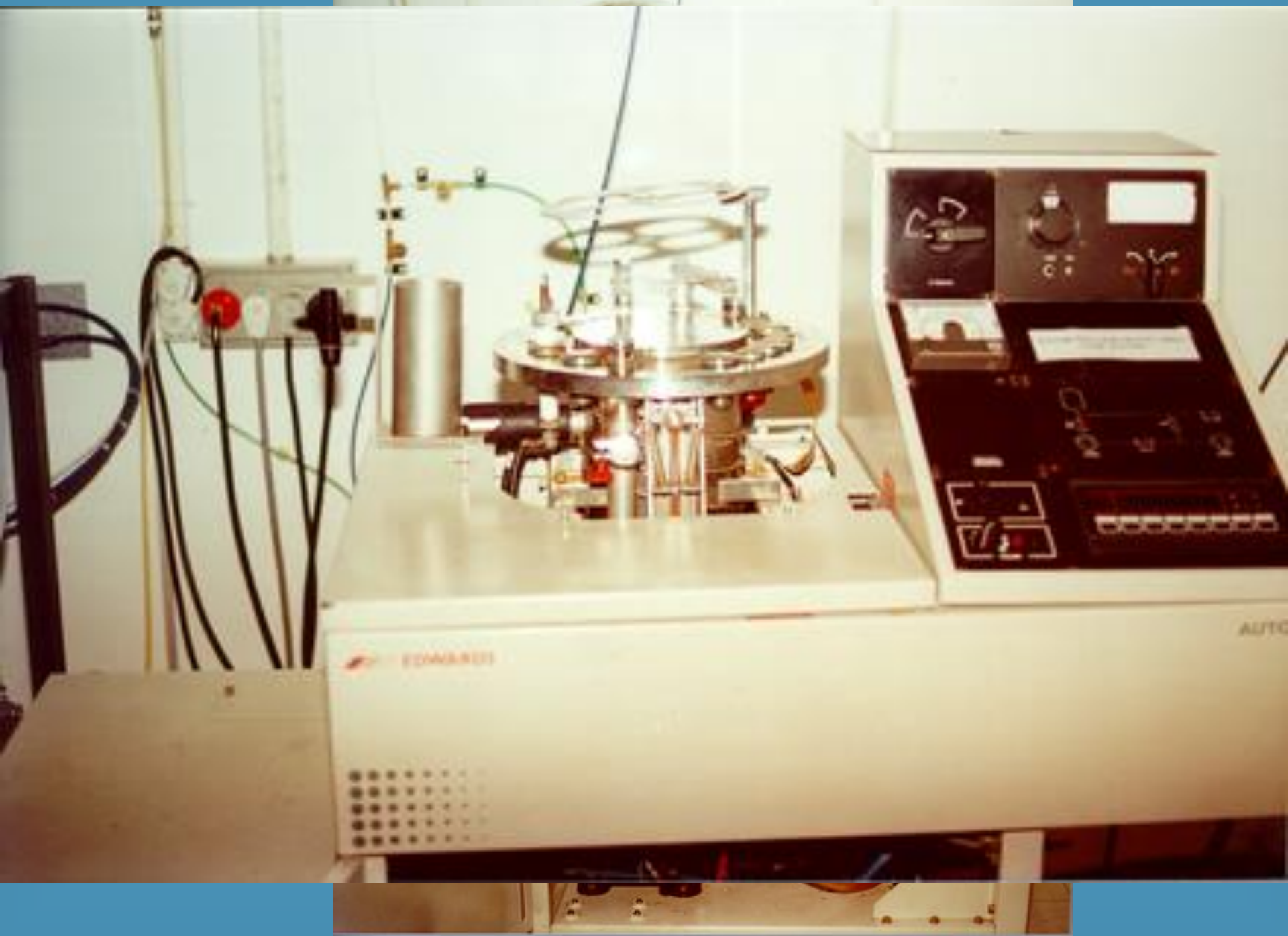


EVAPORAÇÃO TÉRMICA

SE UM MATERIAL É FUNDIDO, A PARTIR DO AQUECIMENTO DE UM FILAMENTO OU CADINHO, NA PRESENÇA DE VÁCUO, ESTE EVAPORARÁ IMEDIATAMENTE, GERANDO VAPOR DO MATERIAL. AS MOLÉCULAS/ÁTOMOS DO VAPOR SERÃO EMITIDAS EM TODAS AS DIREÇÕES ATÉ ATINGIR A SUPERFÍCIE DO SUBSTRATO.

EVAPORADORA



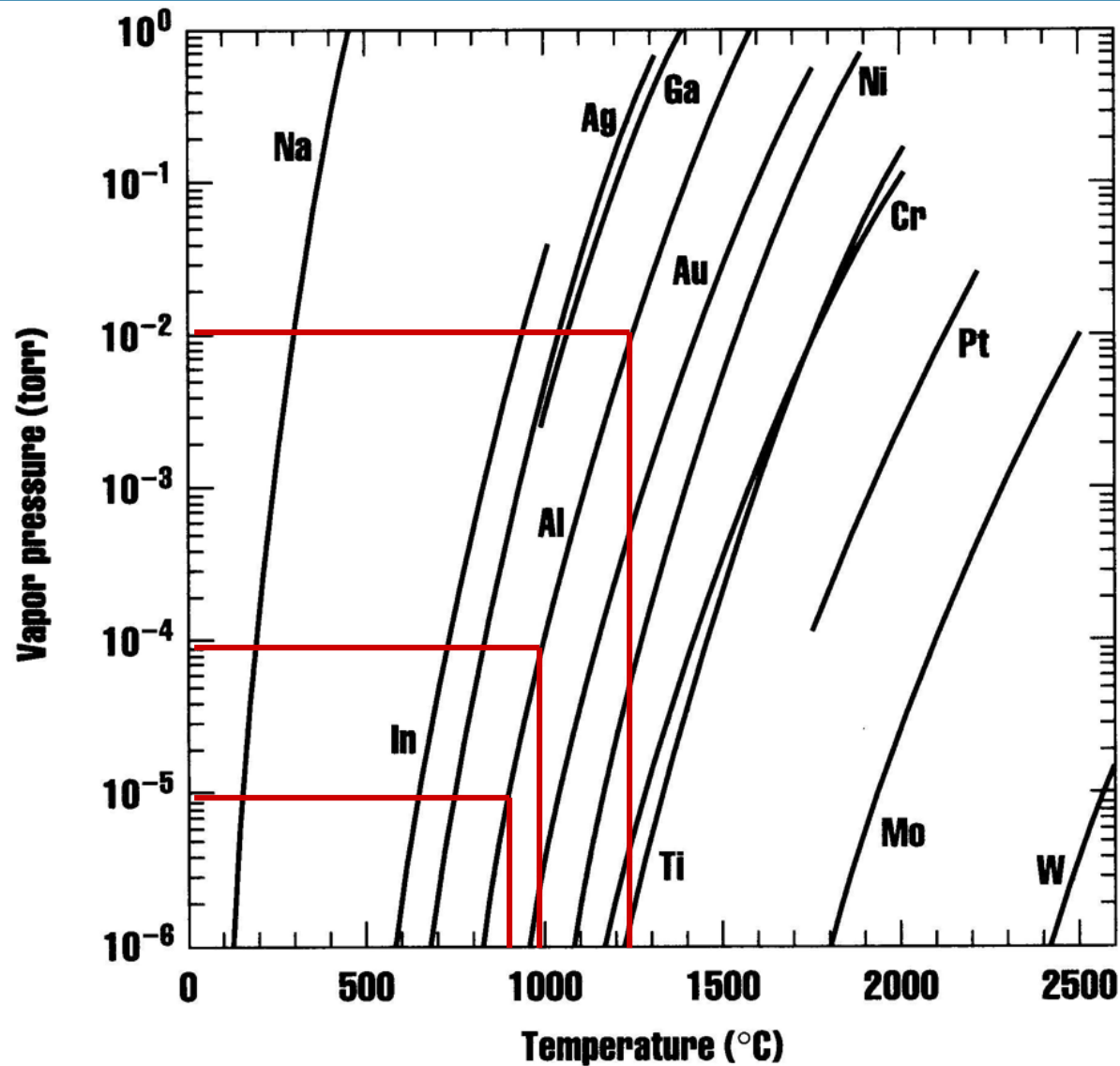


METAIS SÃO OS MATERIAIS MAIS CONVENCIONALMENTE DEPOSITADOS POR ESSA TÉCNICA.

MATERIAL	RESISTIVIDADE ($\mu.\Omega\text{cm}$)	PONTO DE FUSÃO (°C)
ALUMÍNIO	2,70	660
PRATA	1,59	962
OURO	2,44	1064
COBRE	1,77	1083
TITÂNIO	40	1660
PLATINA	10	1772
TUNGSTÊNIO	5,60	3410

PRESS

PODE
EVAP
AMOS



RA A
A DA

Vapor pressure curves for some commonly evaporated materials (*data adapted from Alcock et al.*).

PARA SE OBTER TAXAS DE DEPOSIÇÃO RAZOÁVEIS, A PRESSÃO DE VAPOR DEVE SER NO MÍNIMO 10 mtorr.

A CLASSE DE MATERIAIS CONHECIDOS COMO METAIS REFRATÁRIOS, Ta, W, Mo e Ti, POSSUEM ALTAS TEMPERATURAS DE FUSÃO E CONSEQUENTEMENTE POSSUEM BAIXAS PRESSÕES DE VAPOR EM MODERADAS TEMPERATURAS.

TUNGSTÊNIO REQUER UMA TEMPERATURA DE CERCA DE 3000 °C PARA SE OBTER UMA PRESSÃO DE VAPOR DE 10 mtorr. ENQUANTO QUE O ALUMÍNIO NECESSITA DE 1250 °C PARA A MESMA PRESSÃO DE VAPOR.

PRESSÃO E TEMPERATURA TAMBÉM DETERMINAM
OUTRO IMPORTANTE PARÂMETRO DE DEPOSIÇÃO DE
FILMES FINOS, CAMINHO LIVRE MÉDIO.

$$\lambda = k.T / 1,41.\pi.P.d^2$$

UMA MOLÉCULA/ÁTOMO DE CERCA DE 5 Å, NA
PRESSÃO DE 10^{-4} Pa, O LIVRE CAMINHO MÉDIO É DE
CERCA 40 m. ASSIM, NÃO OCORRE INTERAÇÃO
ENTRE AS PARTÍCULAS GASOSAS E A DISTÂNCIA
ENTRE A FONTE E O ALVO (DE ALGUNS
CENTÍMETROS) É PERCORRIDA EM LINHA RETA.

EVAPORAÇÃO DO ALUMÍNIO

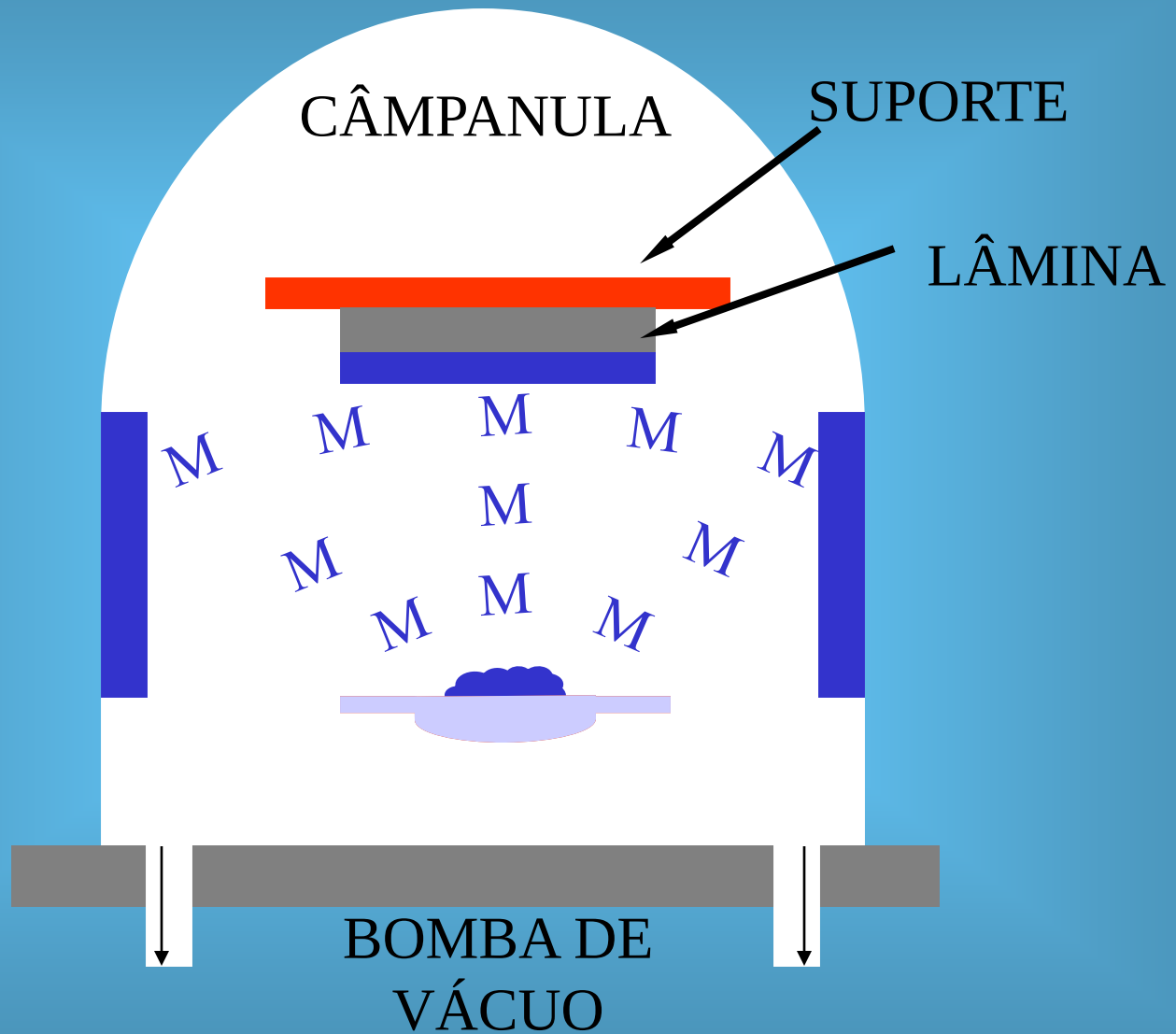
DENTRE OS METAIS O ALUMÍNIO TEM SIDO O MAIS EVAPORADO. SENDO O TERCEIRO MATERIAL MAIS EMPREGADO NOS DISPOSITIVOS MICROELETRÔNICOS, SILÍCIO E ÓXIDO DE SILÍCIO SÃO OS OUTROS DOIS.

ENTRETANTO, COM AS NOVAS DIMINUIÇÕES DOS DISPOSITIVOS ($< 0,5 \mu\text{m}$), O COBRE TEM SUBSTITUÍDO O ALUMÍNIO.

ALÉM DA SUA BAIXA RESISTIVIDADE, A ALTA COMPATIBILIDADE COM SILÍCIO E ÓXIDO DE SILÍCIO É UM FATOR MUITO IMPORTANTE NA UTILIZAÇÃO DO ALUMÍNIO.

A REAÇÃO ENTRE O ALUMÍNIO E O ÓXIDO DE SILÍCIO PERMITE BOA ADERÊNCIA.





- FILAMENTO

$$M = 4.\pi.h^2.e.\rho$$

M - MASSA DO MATERIAL

h - ALTURA ENTRE FILAMENTO E SUBSTRATO

e - ESPESSURA

ρ - DENSIDADE DO MATERIAL

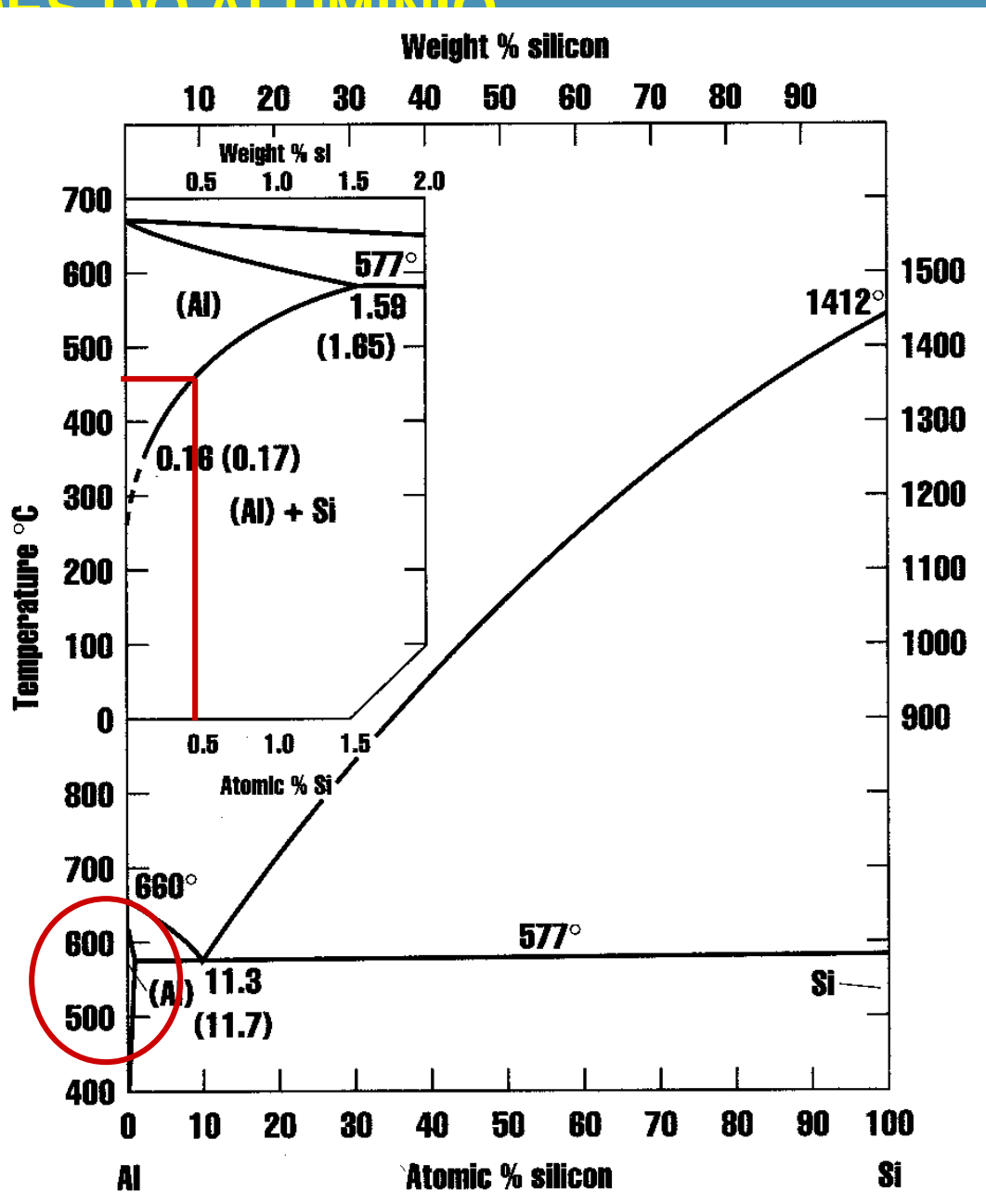
- CADINHO

$$M = \pi.h^2.e.\rho$$

LIMITAÇÕES DO ALUMÍNIO

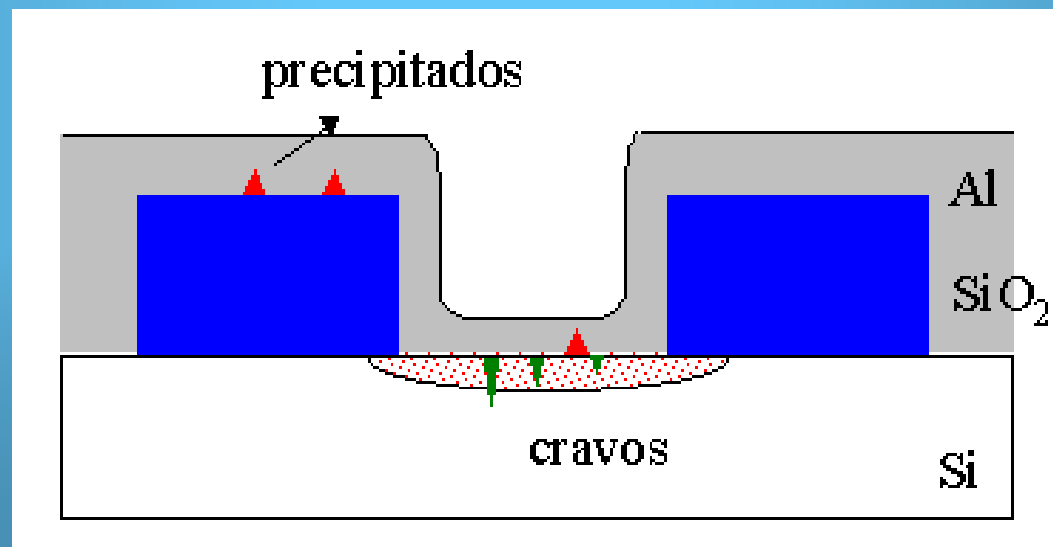
1 - ALTA S
450°C A S
NO ALUM

DIAGRAM



MÍNIO. A
M PESO)

DEVIDO À SOLUBILIDADE, OCORRE MIGRAÇÃO DE ÁTOMOS DE SILÍCIO PARA O ALUMÍNIO, ALCANÇANDO DISTÂNCIAS DE CERCA DE 20 μm A PARTIR DA SUPERFÍCIE DE CONTATO. COMO A INTERFACE NÃO É UNIFORME, OCORRE MIGRAÇÃO PREFERENCIAL EM ALGUNS PONTOS. NESTES PONTOS SÃO FORMADOS "BURACOS" QUE SÃO PREENCHIDOS POR ALUMÍNIO. UMA VEZ PREENCHIDOS, CONSTITUEM OS "SPIKES" OU CRAVOS.



OS CRAVOS DE ALUMÍNIO PODEM PERFURAR JUNÇÕES RASAS, AUMENTANDO A CORRENTE DE FUGA.

A MIGRAÇÃO DO SILÍCIO E A FORMAÇÃO DE CRAVOS PODE SER MINIMIZADA PELA ADIÇÃO PRÉVIA DE UMA CERTA CONCENTRAÇÃO DE SILÍCIO AO ALUMÍNIO A SER EVAPORADO. COMUMENTE UTILIZA-SE 1 % EM PESO.

2 - PRECIPITADOS

O SILÍCIO NO FILME DE ALUMÍNIO, INTRODUZIDO INTENCIONALMENTE OU POR SOLUBILIDADE, TENDE A FORMAR PRECIPITADOS DE SILÍCIO DURANTE O RESFRIAMENTO, APÓS A SINTERIZAÇÃO. ESSES PRECIPITADOS DE SILÍCIO AUMENTAM A RESISTÊNCIA DE CONTATO.

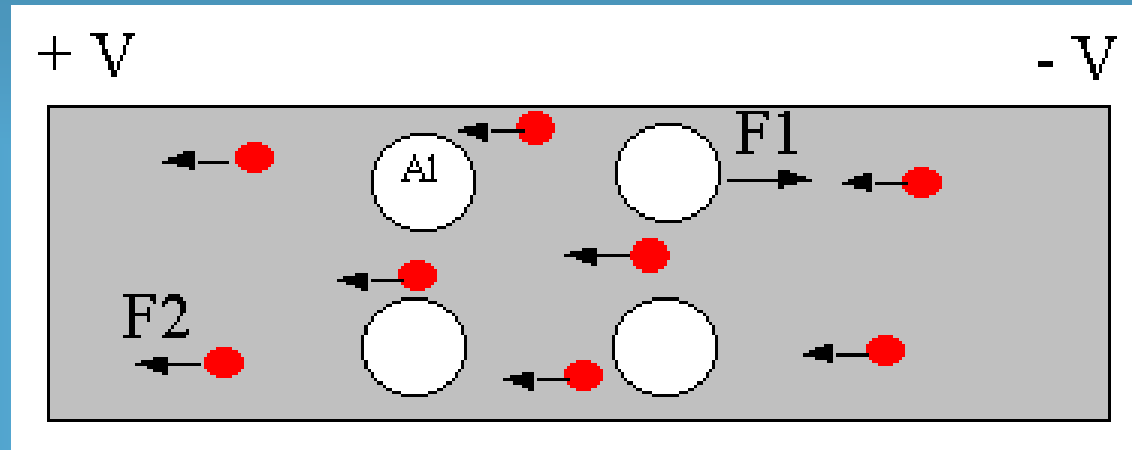
3 - O ALUMÍNIO FORMA Al_2O_3 QUANDO EXPOSTO AO AR, MESMO A TEMPERATURA AMBIENTE. A PRESENÇA DESTE ÓXIDO PODE AFETAR A RESISTÊNCIA DE CONTATO QUANDO OUTRA CAMADA DE METAL É DEPOSITADA SOBRE O ALUMÍNIO.

4 - O ALUMÍNIO PODE SOFRER PROBLEMAS DE CORROSÃO DEVIDO ÀS ETAPAS DE PROCESSO. ÓXIDO DE SILÍCIO DOPADO COM FÓSFORO É DEPOSITADO SOBRE ALUMÍNIO, ÁCIDO FOSFÓRICO (HPO_3) PODE SER FORMADO SE UMIDADE É ABSORVIDA PELO ÓXIDO. DESSA FORMA, O ALUMÍNIO SERÁ CORROÍDO POR ESSE ÁCIDO.

5 - ELETROMIGRAÇÃO

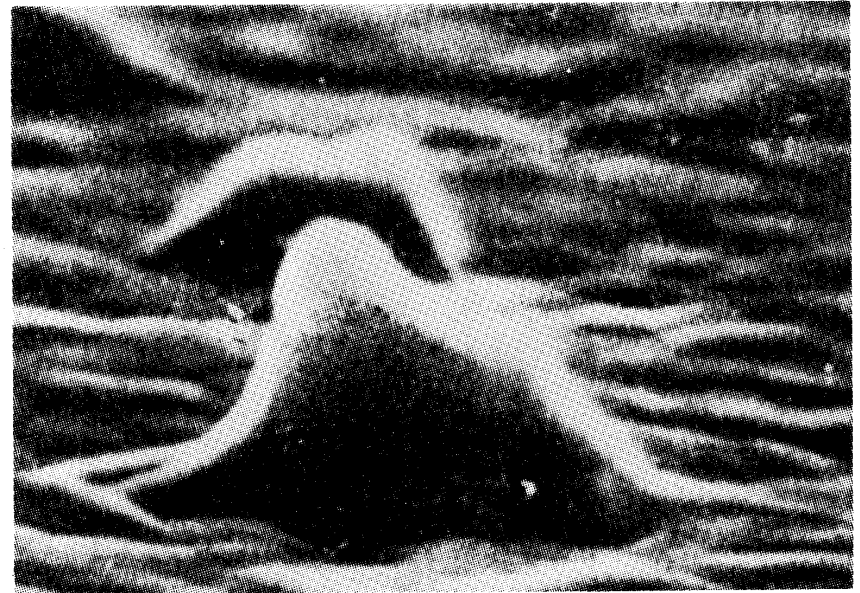
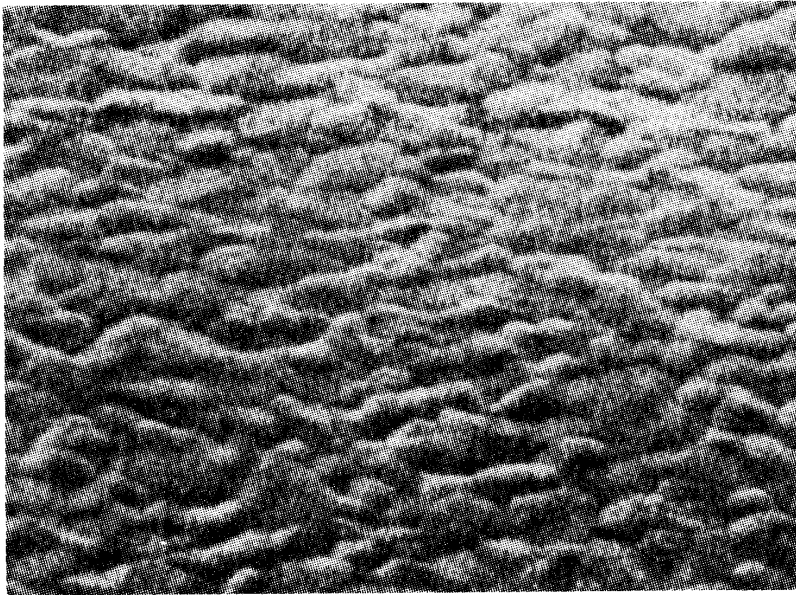
É O TRANSPORTE DE MASSA PROVOCADO POR ALTA DENSIDADE DE CORRENTE.

É UMA LIMITAÇÃO ASSOCIADA A MIGRAÇÃO DE ÁTOMOS DE ALUMÍNIO, COM CONSEQUENTE ROMPIMENTO DA LINHA METÁLICA.



COMO O FLUXO DE ELÉTRONS $F2 \gg F1$, OCORRE TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO PARA OS ÁTOMOS DE ALUMÍNIO. ESSA TRANSFERÊNCIA PRODUZ MOVIMENTO NOS ÁTOMOS NO MESMO SENTIDO DOS ELÉTRONS. COMO O FLUXO DOS ÁTOMOS NÃO OCORRE SIMULTANEAMENTE EM TODA A EXTENSÃO DA LINHA METÁLICA, ÁTOMOS SERÃO REMOVIDOS DE SUAS POSIÇÕES ACUMULADO-SE EM OUTRAS.

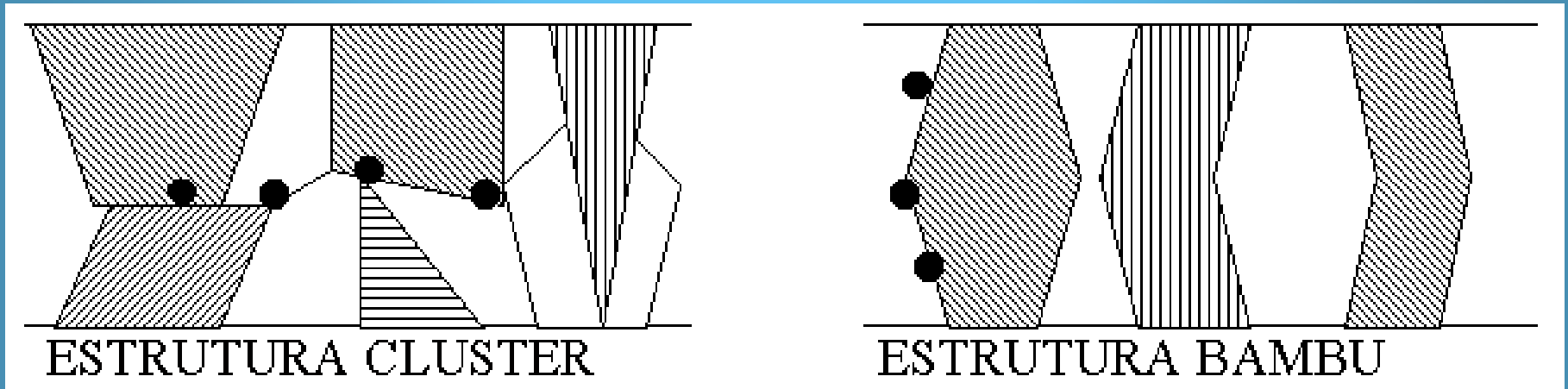
A REMOÇÃO DE MATERIAL LEVA A ABERTURA DA LINHA METÁLICA ATÉ TOTAL RUPTURA. A ACUMULAÇÃO PRODUZ A DEPOSIÇÃO METÁLICA SOBRE A PRÓPRIA LINHA METÁLICA, PRODUZINDO OS DEPÓSITOS DE AI.



SE OS DEPÓSITOS DE AI FOREM ESPESSOS O SUFICIENTE, LINHAS ADJACENTES PODEM SER CURTO-CIRCUITADAS.

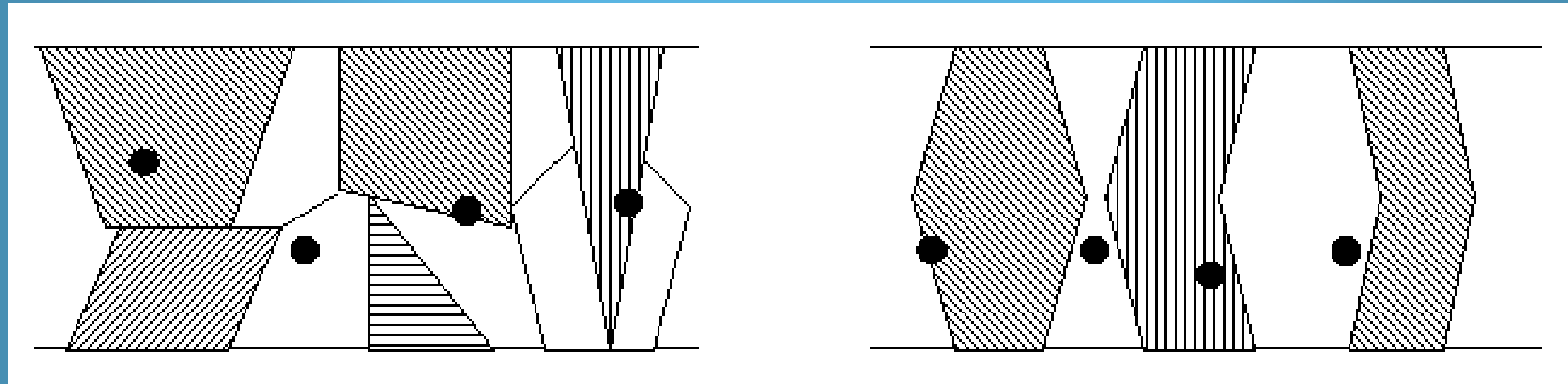
O TRANSPORTE DE ÁTOMOS DE ALUMÍNIO PODE SER DAR POR TRÊS MECANISMOS:

A - CONTORNO DE GRÃO (ATÉ 250 °C)



PARA DIMINUIR A DIFUSÃO DO ALUMÍNIO PELO CONTORNO DE GRÃO, DEVE-SE AUMENTAR O TAMANHO DE GRÃO. ASSIM, LINHAS MENOS ESPESSAS E **LARGAS DURAM** MAIS.

B - PELA REDE CRISTALINA (ACIMA DE 300 °C)



NESTE CASO, AS LINHAS MAIS ESPESSAS E LARGAS SÃO MAIS RESISTENTES À ELETROMIGRAÇÃO.

C - PELAS INTERFACES ALUMÍNIO-MATERIAL

A ADIÇÃO DE PEQUENAS CONCENTRAÇÕES DE OUTROS MATERIAIS, POR EXEMPLO Cu (0,5 - 4,0% EM PESO) OU Ti (0,1 - 0,5% EM PESO), AO ALUMÍNIO AUMENTA A RESISTÊNCIA À ELETOMIGRAÇÃO. A DESVANTAGEM É QUE A RESISTIVIDADE DESSAS LIGAS É MAIOR DO QUE A DO ALUMÍNIO PURO.

CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

- ALTAS TAXAS DE DEPOSIÇÃO, $Al = 0,5 \mu\text{m}/\text{min}$.
- O ÁTOMO ATINGE A SUPERFÍCIE DO SUBSTRATO COM BAIXA ENERGIA ($\sim 0,1 \text{ eV}$) DEIXANDO-A SEM DANOS.
- UTILIZA-SE ALTO VÁCUO, POR ISSO OS FILMES POSSUEM POUCOS CONTAMINANTES.
- O SUBSTRATO É AQUECIDO APENAS PELA CONDENSAÇÃO DO FILME E PELA FONTE.

PARA APLICAÇÕES EM VLSI, TODAVIA, EVAPORAÇÃO SOFRE DAS SEGUINTE LIMITAÇÕES:

- CONTROLE DA COMPOSIÇÃO DE LIGAS É MAIS DIFÍCIL DO QUE COM SPUTTERING.
- NÃO É POSSÍVEL FAZER LIMPEZA IN SITU SEMELHANTE AO SISTEMA DE SPUTTERING.

- MENOR COBERTURA DE DEGRAU COMPARADA COM SPUTTERING.

