Ciência e Tecnologia de Filmes Finos – POSMAT/2011
Prof. José Humberto Dias da Silva

4 - Deposição de Filmes por Evaporação Térmica

Motivação

- Aplicações
  - Evaporação de metais - contatos elétricos/espelhos
  - Multicamadas ópticas / filtros interferométricos
  - Deposição de semicondutores e isolantes: dispositivos:
    - Processamento
    - Memória
    - LEDs / Lasers

Motivação

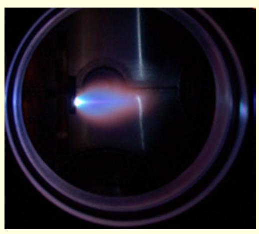
- Tecnologias / sistemas utilizados
  - Sistemas de MBE – multicamadas eletrônicas
  - Deposição por laser pulsado (PLD)
  - Deposição por feixe eletrônico (e-beam)
  - Deposição de compostos e ligas (flash)

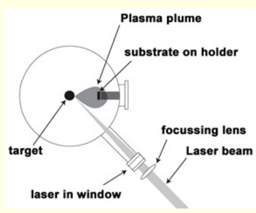
Motivação

- Sistemas de evaporação

PVD Products, Inc.

PLD – deposição por laser pulsado

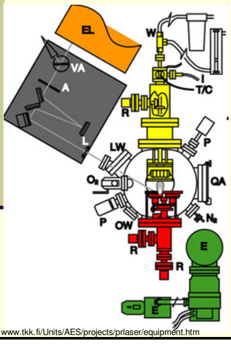




Wiki - H.Perowne 2006 (UTC)

Breakthrough: 1987 - Dijkkamp / Venkatesan $YBa_2Cu_3O_7$[6]

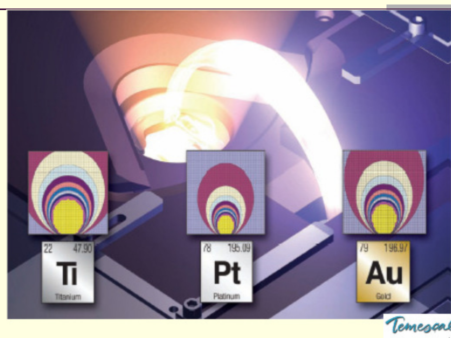
Câmara PLD



www.tkk.fi/Units/AES/projects/prlaser/equipment.htm

7

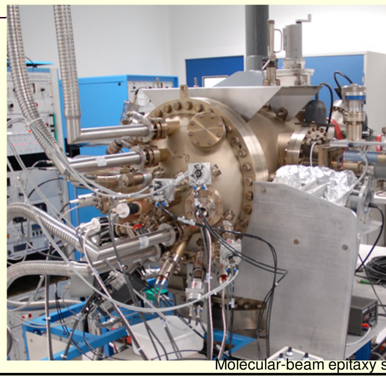
Evaporação por feixe eletrônico



8

Sistemas de evaporação

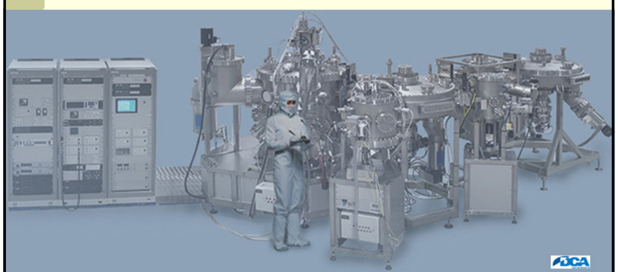
MBE – células de efusão



Molecular-beam epitaxy system at LAAS

10

Micro Processadores / MQW-LEDs e LASERs: várias etapas – em ultra-alto-vácuo



11

Evaporação Térmica

- 3 etapas
  - 1: Transformação de fase
    sólido ou líquido => vapor
  - 2: Transporte
    fonte => substrato
  - 3: Condensação e crescimento do filme

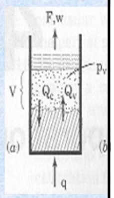
13

Condição de Equilíbrio (?!)

- Como são a física e a química das transformações de fase?

⇒ Começaremos a abordar esse problema quando há equilíbrio de fases. (+ simples)

⇒ Depois veremos as condições de não equilíbrio => deposição de filmes (+ complexa)



1. Transformação de fase

Questões:

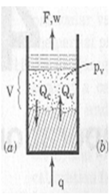
- Copo com água, Tamb.
  Evapora ? Por que?

- Forma de gelo – congelador.
  O que acontece ?

- Outra substância (Al, Au, Fe, Si....)

15

Clausius-Clapeyron, no quadro



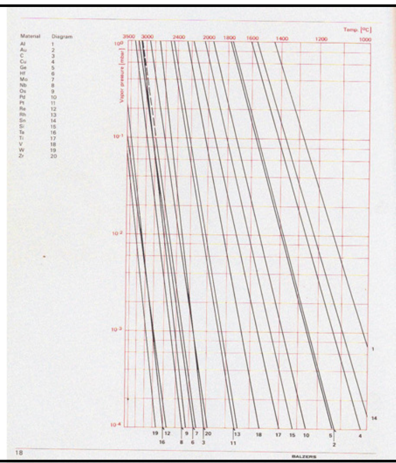
$$\frac{dp}{dT} \cong \frac{L_v}{R.T^2}$$

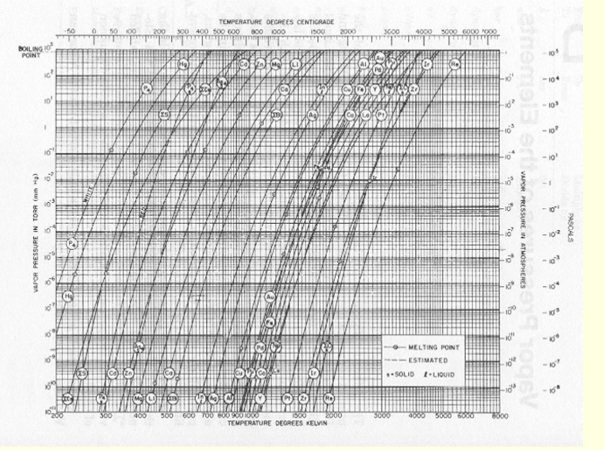
$$p(T) = p_o.e^{-L_v/RT}$$

17

Pressões de vapor – metais.

Catálogo Balzers





Equação de Clausius e Clapeyron

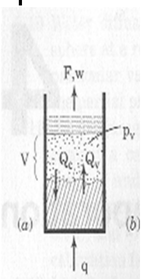
- Todas as substâncias evaporam!
(mesmo em equilíbrio há uma é dinâmica)

- Equilíbrio vs. evaporação efetiva

20

Evaporação:

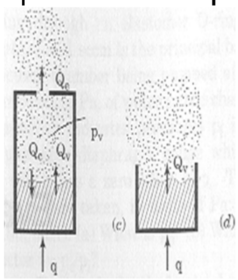
equilíbrio



21

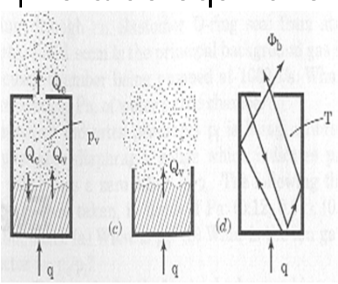
Evaporação:

| fora do equilíbrio



Evaporação:

| fora do equilíbrio

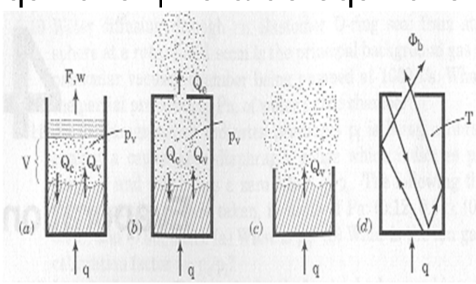


radiação cavidade

23

Evaporação:

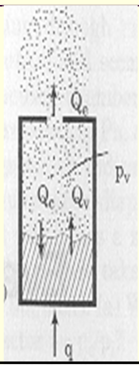
equilíbrio | fora do equilíbrio



radiação cavidade

24

Evaporação – célula de Knudsen

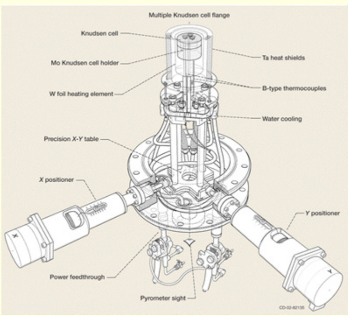


25

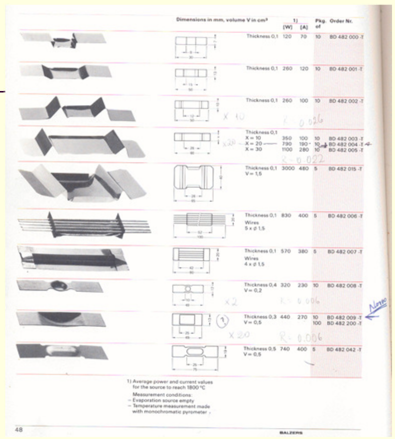
Célula de Knudsen

26

Célula de Knudsen - esquema



27



2. Transporte: Fonte => Substrato

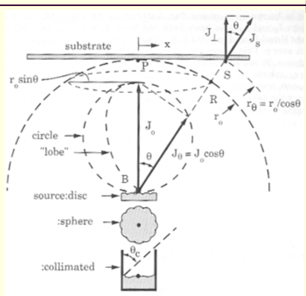


Figure 4.12 Geometry of vacuum evaporation. The flux ratio J_θ/J_o shown is for the "cosine distribution" characteristic of the disc-shaped source centered at point B; alternate source shapes shown below would have different flux distributions when positioned at B.

29

Transporte: Fonte => Substrato

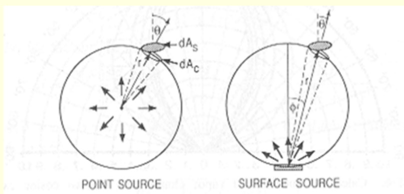


Figure 3-3. Evaporation from (a) point source, (b) surface source.

30

Frentes de deposição (r fixo)

$$J_\theta = J_o = \frac{Q}{4\pi r^2}$$

(Fonte esférica)

$$Q = \frac{J_v}{A}$$

(Taxa total de evap de uma fonte de área A, emitindo fluxo J_v)

$$J_\theta = J_o \cos(\theta)$$

(Disco, distribuição cossenoidal de fluxo)

Fluxo no substrato

$$J_S = J_\theta \cos^2(\theta)$$

$$J_T = J_o \cos^4(\theta) = \frac{Q\cos^4(\theta)}{\pi r_o}$$

32

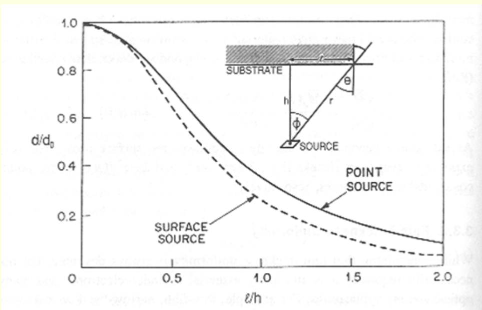


Figure 3-5. Film thickness uniformity for point and surface sources. (Insert) Geometry of evaporation onto parallel plane substrate.

3. Material => alvo formação do filme

- Monitoramento da espessura
- Morfologia/estruturação do filme

34

Monitoramento da taxa de deposição

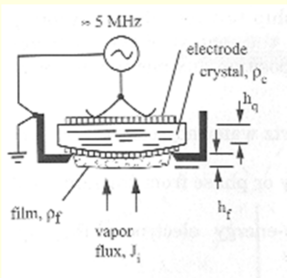


Figure 4.15 Quartz-crystal deposition monitor in cross section.

35

Refletância no filme

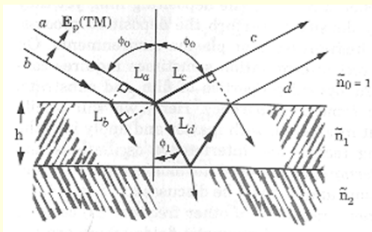


Figure 4.18 Geometry of refraction and interference.

36

Conclusões

- Equação de Clausius-Clapeyron (p_v)
- Equação de Knudsen ($J_i(p,M,T)$)
- Evap. aberta => $J_v \sim J_{v\text{-}eq}$
- Compostos – ligas (Flash)
- Transporte (disco – $\cos^4\theta$)

37

Adendo:

- Evaporação de compostos

38

Evaporação de compostos

- Compostos que mantêm a estequiometria
- Compostos que evaporam fora da estequiometria

39

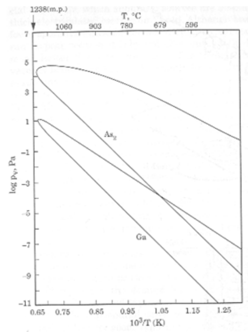
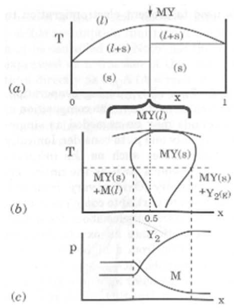
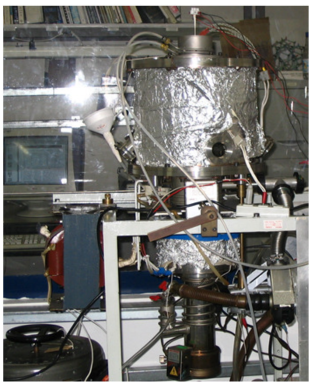


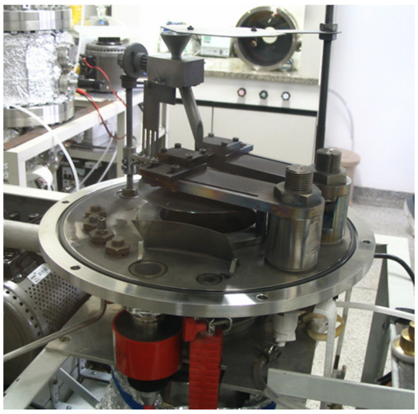
Figure 4.7 Equilibrium vapor pressures of Ga and As_2 along the GaAs liquidus, as functions of T. (Source: Reprinted from Ref.



40

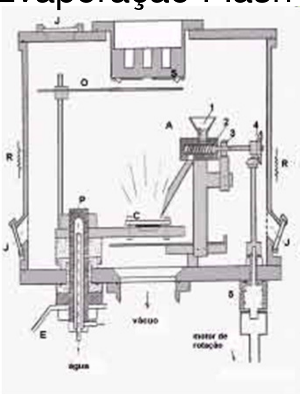


41



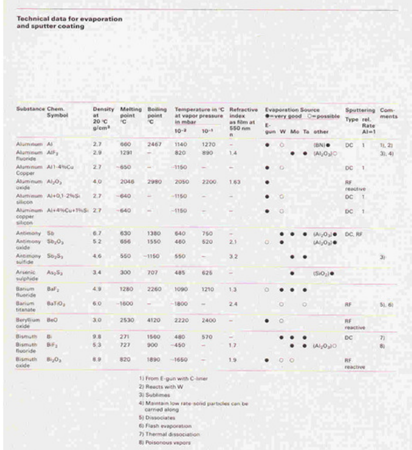
42

Evaporação Flash



43

Na prática:
(Ex: manual Balzers)

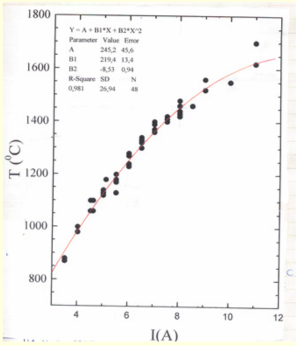


Technical data for evaporation and sputter coating

Substance	Chem. Symbol	Density at 20 °C g/cm³	Melting point °C	Boiling point °C	Temperature in °C at vapor pressure in mbar 10^{-2}	Temperature in °C at vapor pressure in mbar 10^{-1}	Refractive index as film at 550 nm n	Evaporation Source (●=very good ○=possible) E-gun	W	Mo	Ta	other	Sputtering Type	rel. Rate Al=1	Comments
Aluminum	Al	2.7	660	2467	1140	1270	–	●	○			(BN)●	DC	1	1), 2)
Aluminum fluoride	AlF_3	2.9	1291	–	820	890	1.4			●	●	(Al_2O_3)○			3), 4)
Aluminum Copper	Al 1-4%Cu	2.7	~650	–	~1150	–	–	●	○				DC	1	
Aluminum oxide	Al_2O_3	4.0	2046	2980	2050	2200	1.63	●					RF reactive		
Aluminum silicon	Al+0,1-2%Si	2.7	~640	–	~1150	–	–	●	○				DC	1	
Aluminum copper silicon	Al+4%Cu+1%Si	2.7	~640	–	~1150	–	–	●	○				DC	1	
Antimony	Sb	6.7	630	1380	640	750	–		●	●	●	(Al_2O_3)●	DC, RF		
Antimony oxide	Sb_2O_3	5.2	656	1550	460	520	2.1	○	●			(Al_2O_3)●			
Antimony sulfide	Sb_2S_3	4.6	550	~1150	550	–	3.2			●	●				3)
Arsenic sulphide	As_2S_3	3.4	300	707	485	625	–			●		(SiO_2)●			
Barium fluoride	BaF_2	4.9	1280	2260	1090	1210	1.3	○	●	●	●				
Barium titanate	$BaTiO_3$	6.0	~1600	–	~1800	–	2.4		○		○		RF		5), 6)
Beryllium oxide	BeO	3.0	2530	4120	2220	2400	–	●	○				RF reactive		
Bismuth	Bi	9.8	271	1560	480	570	–		●	●	●		DC		7)
Bismuth fluoride	BiF_3	5.3	727	900	~450	–	1.7			●	●	(Al_2O_3)○			8)
Bismuth oxide	Bi_2O_3	8.9	820	1890	~1650	–	1.9	●	○	○			RF reactive		

1) From E-gun with C-liner
2) Reacts with W
3) Sublimes
4) Maintain low rate-solid particles can be carried along
5) Dissociates
6) Flash evaporation
7) Thermal dissociation
8) Poisonous vapors

- Calibração (corrente no primário vs temperatura) – cadinho BD 482009-T



45

Exercícios – Cap.4

46