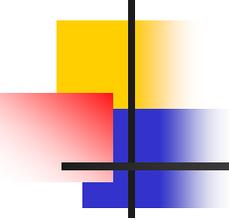


# L'évaporation

---

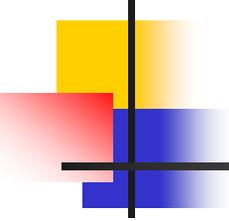
Ludovic Salvagnac



# Plan

---

- Principe
- Différents états
- Théorie de l'évaporation
  - Pression de vapeur saturante ( loi de Clapeyron )
  - Relation entre pression de gaz et vitesse de condensation
  - Taux de contamination
- Evaporation des alliages ( loi de Raoult )
- Appareillage de mesures d'épaisseur
  - Par variation de fréquence d'un quartz piezoélectrique
- Méthodes d'évaporation
  - Effet joule
  - Canon à électrons
- Problèmes d'uniformité



# Principe de l'évaporation

---

- Le matériau à déposer est porté à haute température afin qu'un nombre important d'atomes ou de molécules dispose de suffisamment d'énergie et quitte la surface du matériau pour se déposer sur un substrat.
- Cette opération est réalisée dans une enceinte sous vide et étant donnée la faible pression des gaz résiduels, les molécules ou atomes évaporés ne subissent pas de collision et traversent l'espace entre la source d'évaporation et le substrat suivant des trajectoires rectilignes.

# Différents états

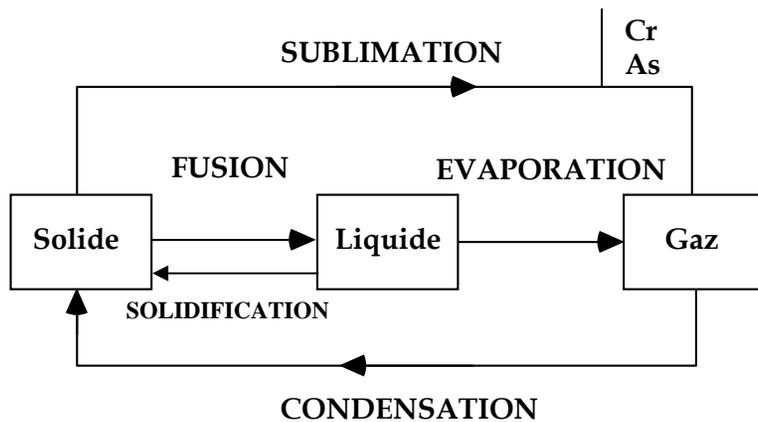
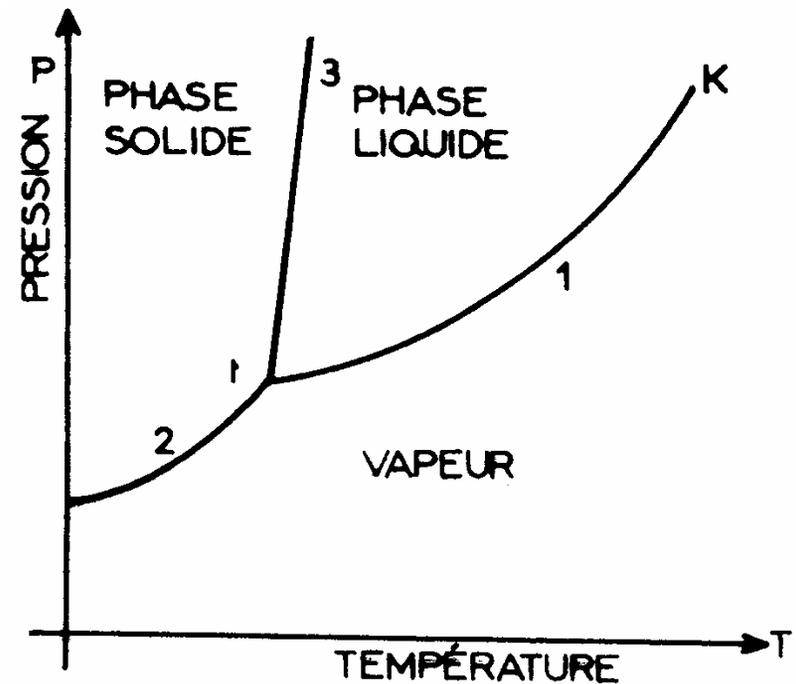
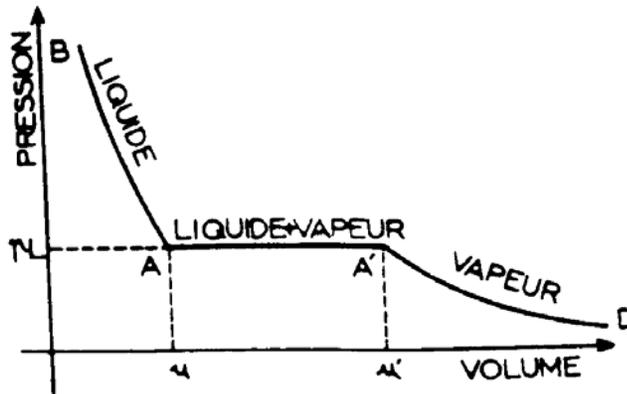


Diagramme de phase



# Pression de vapeur saturante

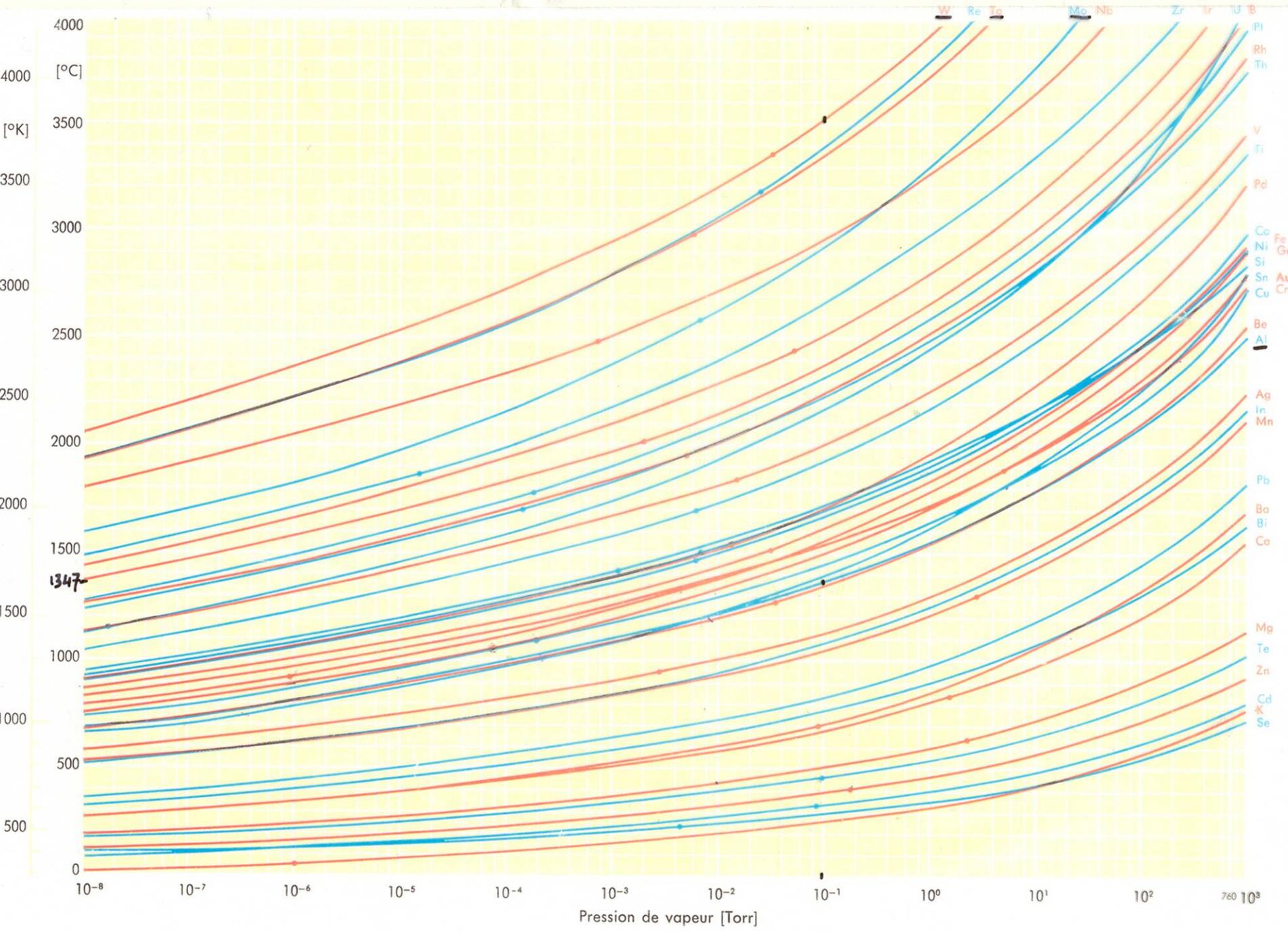


## Loi de Clapeyron

$$\log p_l = A - \frac{B}{T} - C \log T$$

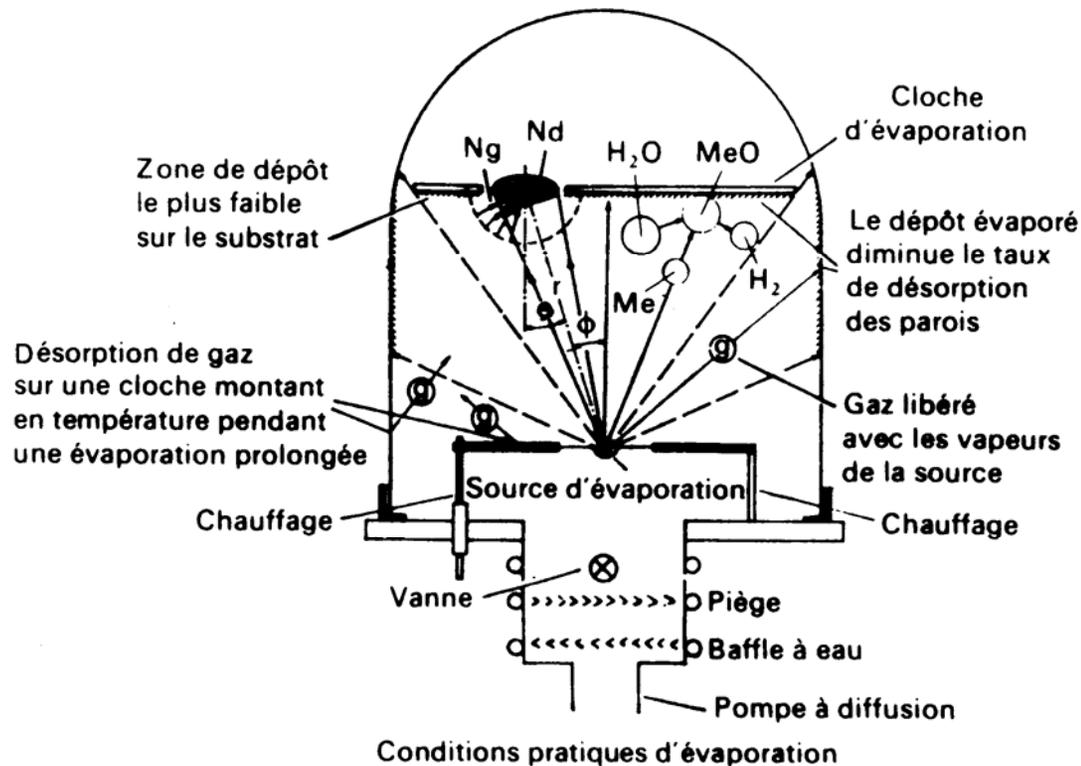
- p<sub>l</sub>: pression de vapeur saturante
- T: Température en °K
- A et B: Constantes caractéristiques du corps

| Métal           | A (pour $\rho_{\lambda}$ en Torr) | B      | C     |
|-----------------|-----------------------------------|--------|-------|
| Li              | 7,99                              | 8 070  | 7,18  |
| Na              | 7,72                              | 5 490  | 7,17  |
| K               | 7,28                              | 4 480  | 6,84  |
| Rb              | 7,11                              | 4 080  | 6,84  |
| Cs              | 6,91                              | 3 800  | 6,74  |
| Cu              | 8,96                              | 16 980 | 8,63  |
| Ag              | 8,85                              | 14 270 | 8,63  |
| Au              | 8,89                              | 17 580 | 8,80  |
| Bc              | 9,01                              | 16 470 | 8,25  |
| Mg              | 8,64                              | 7 650  | 8,10  |
| Ca              | 8,22                              | 8 940  | 7,79  |
| Sr              | 7,71                              | 7 830  | 7,45  |
| Ba              | 7,70                              | 8 760  | 7,54  |
| Zn              | 8,63                              | 6 560  | 8,30  |
| Cd              | 8,56                              | 5 720  | 8,35  |
| B               | 10,07                             | 29 620 | 9,36  |
| Al              | 8,79                              | 15 940 | 8,27  |
| Sc              | 8,94                              | 18 570 | 8,33  |
| Y               | 9,43                              | 21 970 | 9,17  |
| La              | 8,60                              | 20 850 | 8,44  |
| Ce              | 10,74                             | 20 100 | 10,58 |
| Ga              | 8,41                              | 13 840 | 8,09  |
| In              | 8,23                              | 12 480 | 8,03  |
| Tl              | 8,07                              | 8 960  | 7,99  |
| C               | 12,73                             | 40 030 | 12,04 |
| Si              | 9,72                              | 21 300 | 9,21  |
| Ti              | 9,50                              | 23 230 | 9,11  |
| Zr              | 9,33                              | 30 260 | 9,08  |
| Th              | 9,52                              | 28 440 | 9,47  |
| Ge              | 8,71                              | 18 030 | 8,40  |
| Sn              | 7,88                              | 14 870 | 7,69  |
| Pb              | 7,77                              | 9 710  | 7,69  |
| V               | 10,07                             | 25 720 | 9,69  |
| Cb              | 11,37                             | 40 400 | 11,12 |
| Ta              | 10,04                             | 40 210 | 9,93  |
| Sb <sub>2</sub> | 8,15                              | 8 630  | 7,96  |
| Bi              | 8,18                              | 9 530  | 8,10  |
| Cr              | 9,94                              | 20 000 | 9,56  |
| Mo              | 8,64                              | 30 850 | 8,40  |
| W               | 9,40                              | 40 680 | 9,30  |
| U               | 8,59                              | 23 310 | 8,54  |
| Mn              | 9,14                              | 13 740 | 8,77  |
| Fe              | 9,44                              | 19 970 | 9,08  |
| Co              | 9,70                              | 21 110 | 9,35  |
| Ni <sup>1</sup> | 9,75                              | 20 960 | 9,40  |
| Ru              | 10,50                             | 33 800 | 10,27 |
| Rh              | 9,94                              | 27 720 | 9,71  |
| Pd              | 8,78                              | 19 710 | 8,56  |
| Os              | 10,59                             | 37 000 | 10,50 |
| Ir              | 10,07                             | 31 230 | 9,98  |
| Pt              | 9,53                              | 27 280 | 9,44  |



# Théorie de l'évaporation

## Description du matériel



# Théorie de l'évaporation

Relations entre pression de gaz et vitesse de condensation [1]

- Taux d'incidence de molécules

Formule usuelle

$$Ng = 3.513 \cdot 10^{22} \cdot \frac{Pg}{\sqrt{Mg \cdot Tg}} \quad (\text{moles cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$$

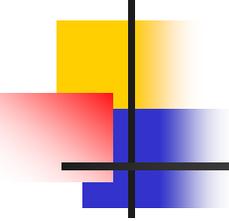
Pg: pression du gaz en torr; Mg: poids moléculaire du gaz; Tg: température absolue en °K

- Taux d'évaporation libre d'une substance

$$Ne = 3.513 \cdot 10^{22} \cdot \frac{a_1 \cdot Pe}{\sqrt{Me \cdot Te}} \quad (\text{moles cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$$

a<sub>1</sub>: coefficient d'évaporation; Pe: pression de vapeur saturante; Me: poids moléculaire du gaz

Te: température absolue en °K



# Théorie de l'évaporation

- Taux de molécules se condensant sur un substrat à partir d'une source point

$$Nd = \frac{a_2 \cdot \cos \theta}{4\pi \cdot r^2} \cdot A \cdot Ne \quad (\text{moles cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$$

$a_2$ : coefficient de collage:  $\longrightarrow$

$\frac{\text{nombre de molécules condensées}}{\text{nombre de molécules évaporées}}$

A: surface de la source émettrice

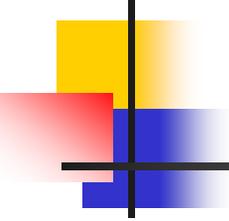
Ne: taux d'évaporation libre d'une substance dans le vide

r: distance entre la source et le substrat

$\theta$ : angle entre la direction de l'évaporation incidente et la normale du substrat

- Taux de condensation à partir d'une surface émettrice idéale

$$Nd = \frac{a_2 \cdot \cos \theta \cdot \cos \phi}{\pi \cdot r^2} \cdot A \cdot Ne \quad (\text{moles cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$$



# Théorie de l'évaporation

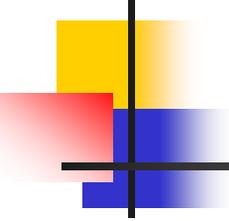
---

- Taux de contamination

$$\frac{Ng}{Nd} = \frac{Pg}{Pe} \cdot \sqrt{\frac{Me \cdot Te}{Mg \cdot Tg}} \cdot \frac{\pi \cdot r^2}{a_1 \cdot a_2 \cdot A \cdot \cos \theta \cdot \cos \phi}$$

$$\frac{Ng}{Nd} = \frac{Pg}{Pe} \cdot K$$

$$(K = C^{te})$$



# Evaporation des alliages

---

- Loi de Raoult

$$\frac{N_A}{N_B} = \frac{C_A \cdot P_A}{C_B \cdot P_B} \cdot \sqrt{\frac{M_B}{M_A}} \quad [3]-[4]$$

- Composants A et B

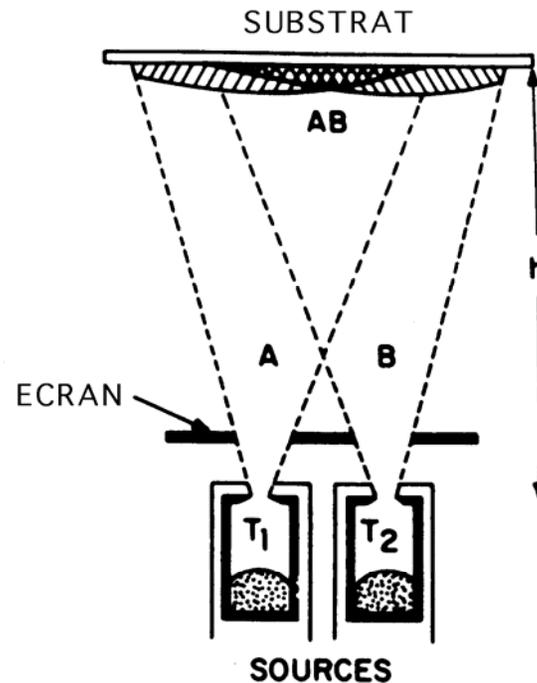
N: taux de condensation

C: fraction atomique des composants

P: pression de vapeur saturante

M: poids moléculaire

# Evaporation des alliages



Répartition d'un dépôt sur un substrat à partir d'une évaporation simultanée de deux métaux

[5]

# Appareillage de mesure d'épaisseur

- Par variation de fréquence d'un quartz piézoélectrique

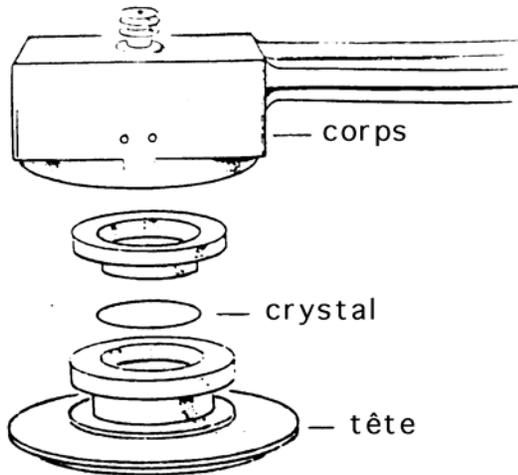
La variation de fréquence d'oscillation d'un quartz piézoélectrique est proportionnelle à la masse du matériau déposé.

$$\Delta\gamma = K\Delta m \quad [6]-[7]$$

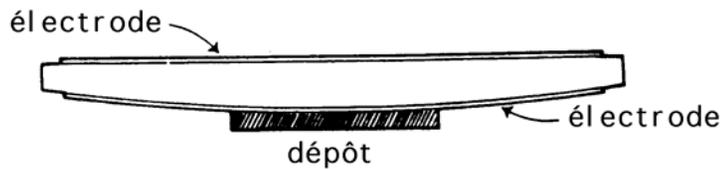
Tout matériau se déposant sur un quartz diminue la fréquence d'oscillation du quartz et donc augmente sa période.

$$E = K \cdot \underbrace{\frac{P_f - P_i}{D}}_{\text{Densité du matériau}} \cdot \underbrace{\frac{P_f (z \text{ complexe})}{z (P_f \text{ complexe})}}_{\text{Coefficient acoustique du matériau}} \cdot \underbrace{\frac{Tf}{100}}_{\text{Coefficient de pondération}}$$

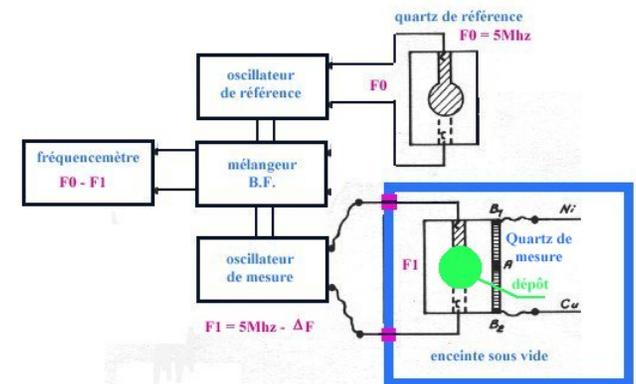
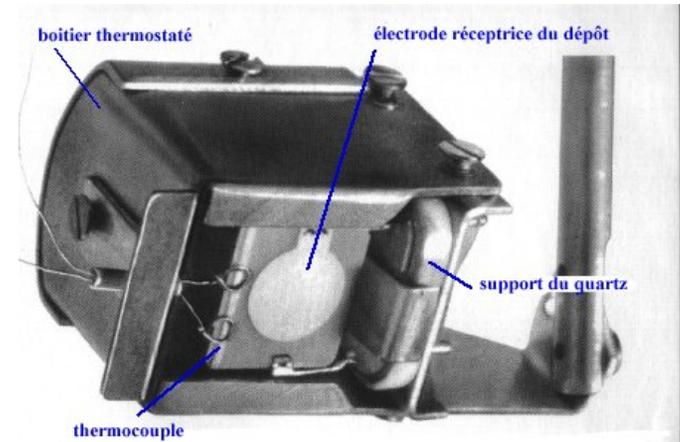
# Appareillage de mesure d'épaisseur



Mise en place des quartz

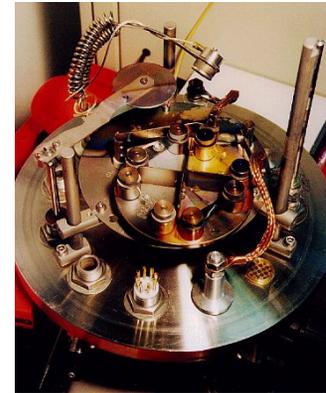


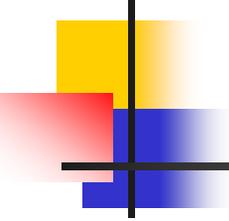
Dépôt de matériau sur le quartz



# Méthode d'évaporation

- Par effet joule
- Par canon à électrons





# Techniques d'évaporation

---

- Chauffage par effet joule d'une résistance (le métal à évaporer est contenu dans un creuset en matériau réfractaire:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , C, BN, quartz, ..., ou dans la résistance)

Pb: ➡ Interaction creuset métal

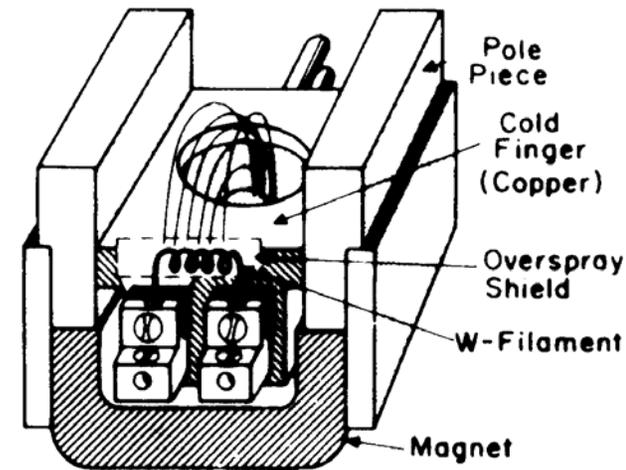
➡ Pas de possibilité de déposer des matériaux réfractaires

# Techniques d'évaporation

- Chauffage par faisceau d'électrons: le canon à électrons est constitué:
  - D'un filament émetteur d'électron, optiquement caché du creuset
  - D'un circuit d'alimentation
  - D'un aimant de focalisation qui impose aux e- une déflexion de 60° à 270°

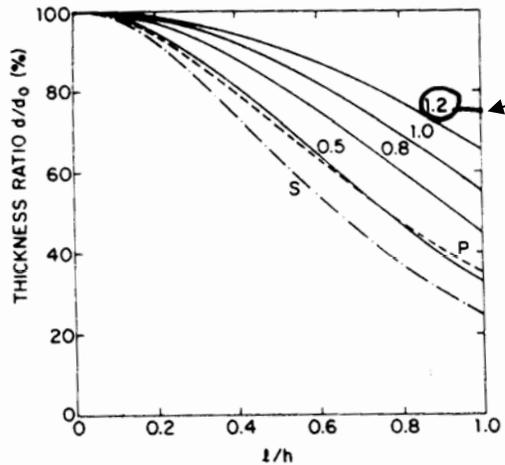
Il n'y a pas de perte d'énergie, l'énergie étant directement transmise au matériau à déposer.

- Possibilité d'évaporer des matériaux réfractaires et isolants ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Mo, W)
- Vitesse importante de dépôt
- Pas de problème d'interaction entre le matériau et le creuset (fusion localisée)
- Le faisceau d'électron peut bouger pour avoir une meilleure uniformité de dépôt
- Dommage dus aux radiations ionisantes (RX)

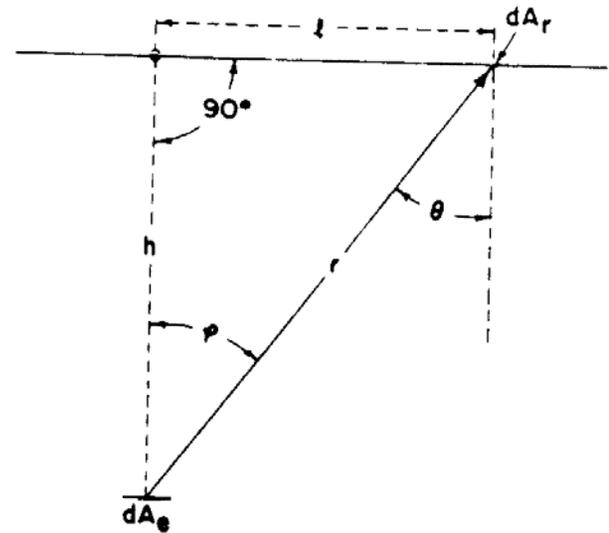


# Uniformité

- Source point
- Petite surface à métalliser



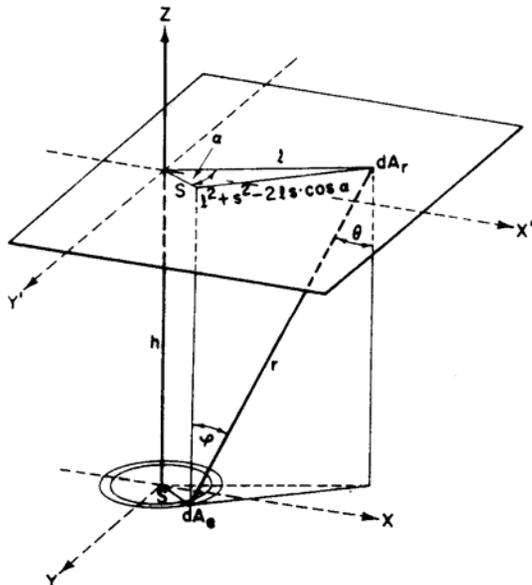
Film-thickness distributions for a small-surface source (S) and a point source (P). The drawn lines are profiles for circular-disk sources, whereby the numbers indicate the ratios of source radius to substrate distance  $s/h$ .



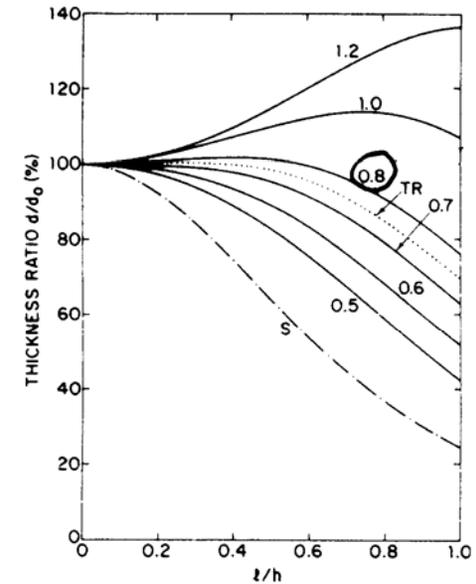
Evaporation onto a plane-parallel receiver.

# Uniformité

- Source circulaire
- Surface à métalliser plane



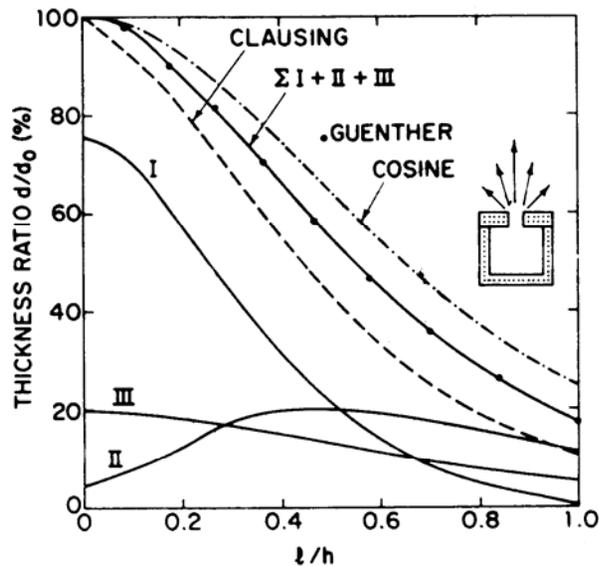
Evaporation from an element  $dA_s$  of a ring to a point  $dA_r$  on the substrate plane  $x', y'$ .



Film-thickness distributions for a small-surface source ( $S$ ) and for infinitesimally thin ring-surface sources (drawn lines). The numbers indicate the ratios of source radius  $s$  to shortest evaporation distance  $h$ . The dotted curve  $TR$  represents a ring source of finite dimensions with an inner radius  $s_i = 0.7h$  and an outer radius  $s_o = 0.8h$ .

# Uniformité

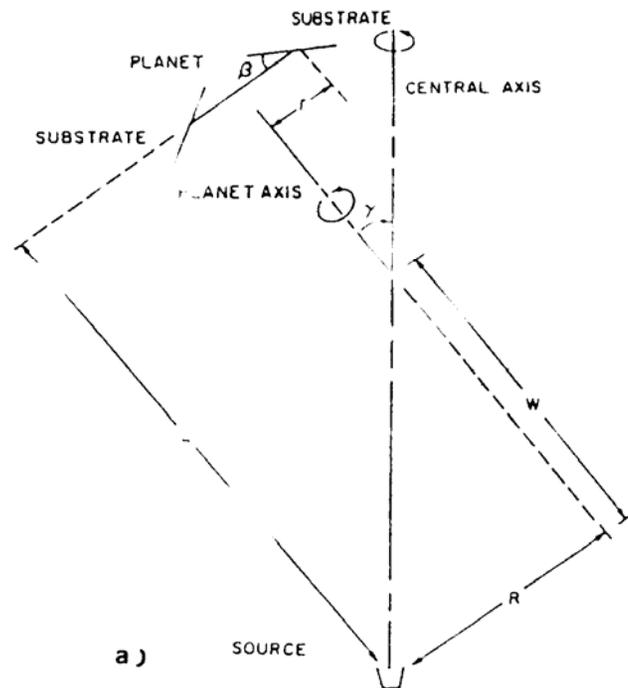
- Source tubulaire



Thickness distributions for a short tubular orifice (length = diameter). After Clausing[11] experimental points from Guenther[12] and calculated for Guenther's effusion cell by Ruth and Hirth[13] I = direct effusion from the interior of the cell; II = reemitted from the orifice wall; III = diffused onto and reemitted from the lid of the effusion cell.

# Uniformité

- Substrats positionnés sur un planétaire



(a) Schematic of planetary evaporator geometry [14] Reprinted with permission of the American Physical Society. (b) Photograph of a planetary system. Courtesy of Temescal.

# Groupes d'évaporations

Canon à électrons



Varian pour Au, Cr, Pt, Ti

Effet joule



Edwards auto 306 pour Cr

Effet joule

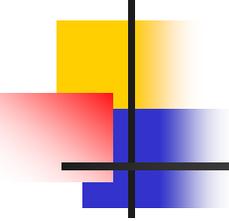


Veeco 770 pour tous métaux

Canon à électrons



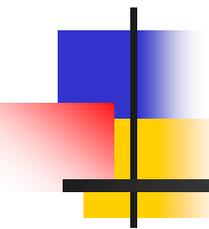
Edwards auto 306 pour Al



# Références

---

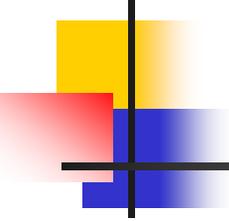
- [1] R.P. HENRY, Cours de science et technique du vide
- [2] CHAPMAN et HALL, Thin Film Microelectronics L. HOLLAND
- [3] KASTURI L. CHOPRA, Thin Film Phenomena
- [4] G. ZINSMEISTER, Vakuum Tech. 8:223 (1964)
- [5] MAISSEL et GLANG, Handbook of Thin Film Technology, p 1-90 (1970)
- [6] G. SAUERBREY, Z Physik 155:206 (1959)
- [7] G. SAUERBREY, Arch. Elektron. Ubertr., 18:617 (1964)
- [8] L. HARRIS and B.M. SIEGEL, J. Appl. Phys, 19, 739 (1948)
- [9] W. STECKELMACHER and L. HOLLAND, Vacuum, 2, 346 (1952)
- [10] A. VON HIPPEL, Ann. Physik, 81, 1043 (1926)
- [11] P. CLAUSING, Z. Physik, 66, 471 (1930)
- [12] K.G. GUENTHER, Z. Angew. Phys., 9, 550 (1957)
- [13] V. RUTH and J.P. HIRTH, ref 33, p 99
- [14] I.A. BLECH, D.B. FRASER and S.E. HASZKO, "Optimization of AL step Coverage through computer simulation and SEM", J. Vac. Sci. and Technol., 15, 13 (1978) errata J. Vac. Sci. Technol., 15, 1856 (1978)



# La pulvérisation cathodique

---

L.Salvagnac

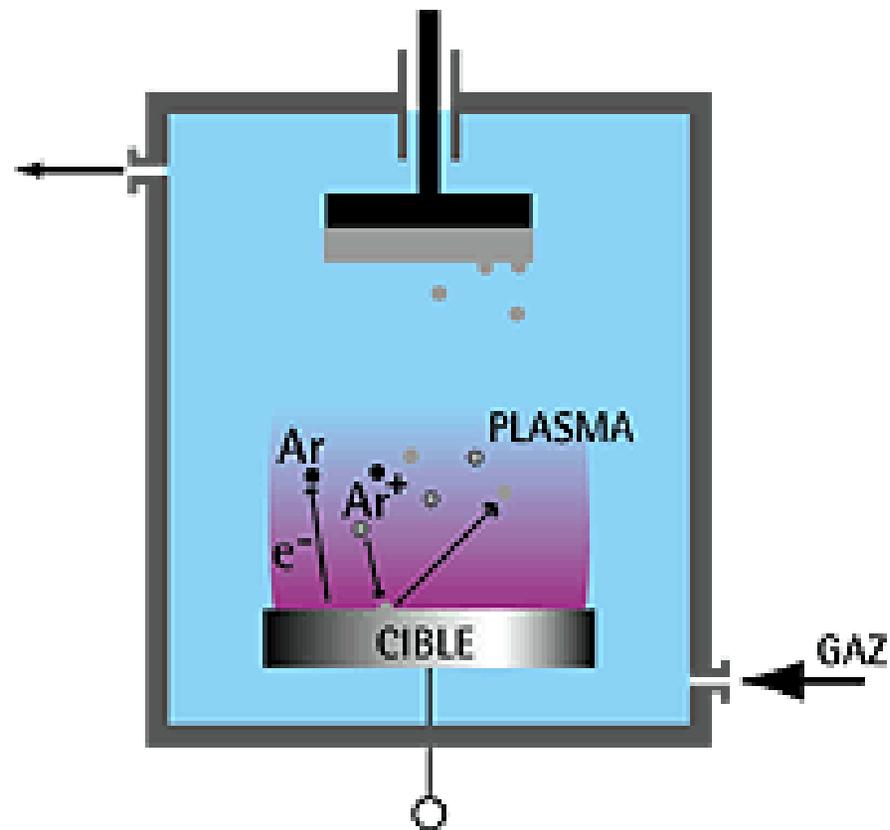


# Plan

---

- Principe
- Plasma
- Rendement
  - Définition
  - Variation avec le numéro atomique
  - Variation avec l'énergie de l'ion
  - Variation avec la structure cristalline de la cible
- Energie des atomes éjectés
- Structure du dépôt
- Contraintes internes
  - Conséquences
  - Généralisation
  - Variation avec la tension de bias
  - Variation avec la pression et la masse
- Contamination des films
  - Gaz
  - Espèces
- Recouvrement de marches
  - Effets des marches sur la microstructure des dépôt
  - Techniques utilisées pour améliorer le recouvrement
  - Géométrie de la source
  - Température du substrat
  - Bias sputtering
- Différents types de machines

# Principe



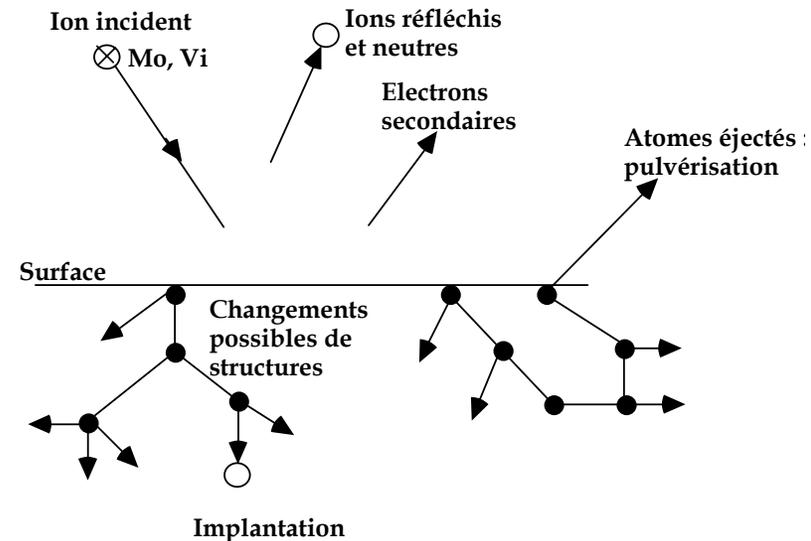
# Principe

- Modèle de G.K Wehner:  
bombardement d'une cible par ions  
issus d'un plasma
- La quantité de mouvement de l'ion  
incident est transférée aux  
matériaux de la cible et provoque  
l'éjection des atomes de la cible

$$P = m \cdot v = (2 \cdot m \cdot E)^{1/2}$$

## Effets de l'impact d'ion

- Absorption d'ions gazeux
  - Dégagement de chaleur
  - rayonnement: émission d'électrons secondaires



# Plasma

## Définition

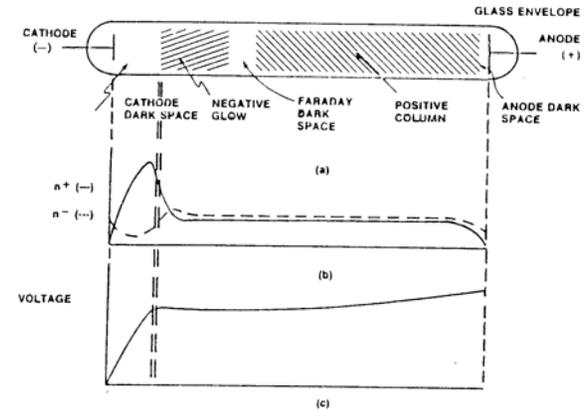
Gaz partiellement ionisé contenant un nombre égal de charges positives et négatives et d'autres espèces non ionisées

## Création du plasma

AP= 1 torr  
V= 1.5 KV

Si un électron est créé par l'ionisation d'un atome d'Ar par le passage d'un rayon cosmique, il est attiré par le champ électrique

- Libre parcours moyen de l' e<sup>-</sup> 1 torr d' Ar est 0.0122 cm
- Des collision inélastiques apparaissent – ionisation de Ar + émission lumineuse



## Structure de la décharge-déplacement des charges

La région la plus importante est l'espace sombre de Crookes entre la décharge négative et la cathode

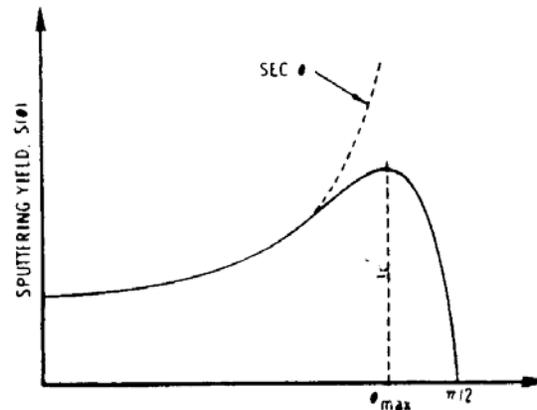
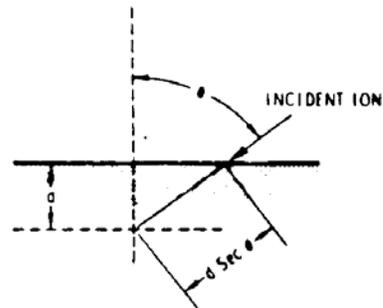
Les ions + sont présents en grande quantité près de la cathode et sont accélérés sur elle

Les électrons près de la cathode sont accélérés vers l' anode

# Rendement

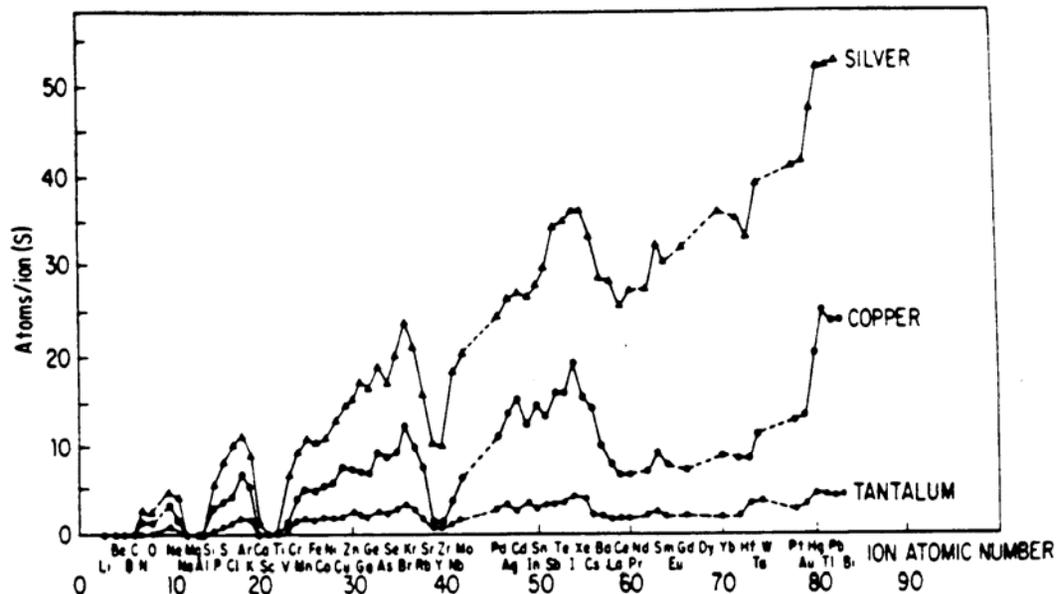
## Définition

$$R = \frac{\text{nombre d' atomes éjectés}}{\text{nombre d' ions incidents}}$$



# Rendement

## Variation avec le numéro atomique



Variation of sputtering yield with atomic number of the bombarding ion for 45-keV bombardment of copper, silver, and tantalum targets.

Variation du rendement avec le numéro atomique en bombardement avec des ions de 45 KeV pour des cibles de Cu, Ag, Ta [1]

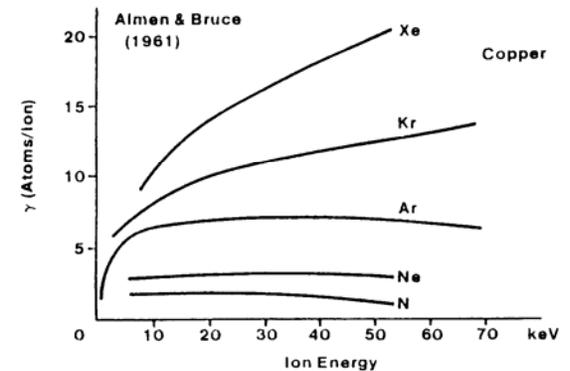
# Rendement

## Variation du rendement avec l'énergie de l'ion

- Le seuil de pulvérisation existe entre 5 et 25 eV pour la plupart des métaux.
- Le R croît très rapidement avec E, près du seuil, puis approche une saturation
- A haute énergie, il décroît à cause de la profondeur de pénétration des ions
- Le rendement est indépendant de la température de la cible (sauf à très haute température)

SPUTTERING YIELDS FOR METALS IN ARGON IN ATOMS /ION

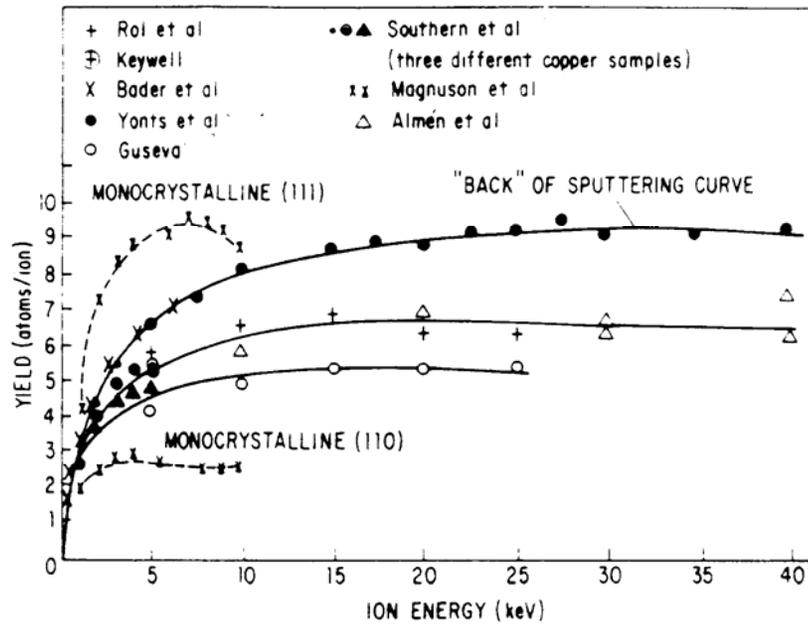
| Target | At.Wt. | Dens. | 100 eV | 300 eV | 600 eV | 1000 eV | 2000 eV |
|--------|--------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|
| Al     | 10     |       | 0.11   | 0.65   | 1.2    | 1.9     | 2.0     |
| Au     | 10.2   |       | 0.32   | 1.65   | 2.8    | 3.6     | 5.6     |
| 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   |         |         |



Sputtering yields of the noble gases on copper, as a function of energy

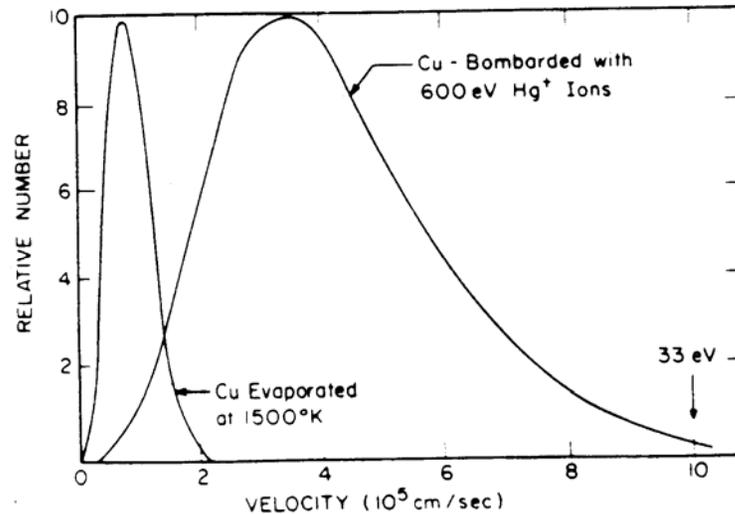
# Rendement

## Variation du rendement avec la structure cristalline de la cible



Variation of sputtering yield with energy for argon ions bombarding copper (high-energy region).

# Energie des atomes éjectés



**Velocity distribution of sputtered and evaporated Cu atoms. Cu bombarded with 600-eV Hg<sup>+</sup> and Cu evaporated at 1500°K (Stuart and Wehner) [2]**

- Les atomes éjectés ont des énergies importantes
- Une vitesse de dépôt de  $10^{18}$  at/cm<sup>2</sup>.S de Cu bombardé par Hg<sup>+</sup> correspond à une température d'évaporation de 1500° K- forte adhérence du matériau
- 1% des atomes éjectés sont chargés (>0 ou < 0)

# Structure du dépôt

Représentation de l'influence de la température du substrat, en travaillant avec une pression d'Argon et structure des dépôts métalliques (MOVCHON et DEMCHICHIN).

T est la température du substrat,  $T_m$  le point de fusion en °K [3], [4].

**Z1** : le diamètre des cristaux + avec  $T/T_m$

- effets d'ombres : les sommets reçoivent plus de dépôt que les vallées
- grande rugosité de surface
- dépôts amorphes
- haut degré de dislocations

**ZT** : zone de transition

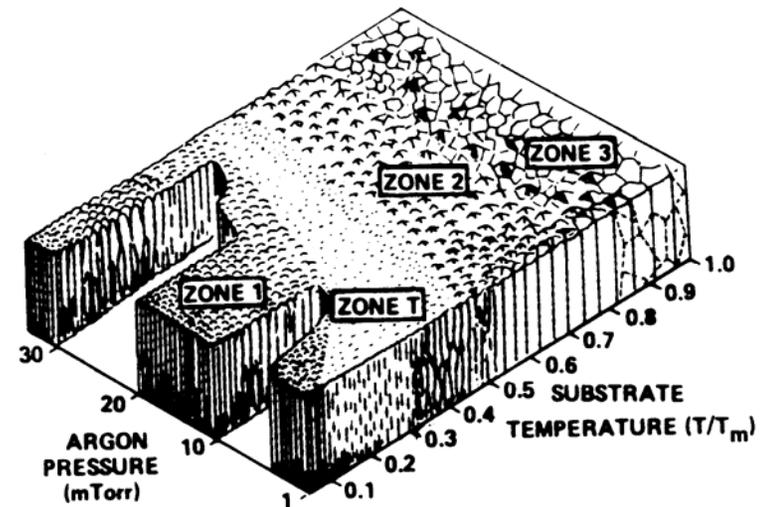
- zone colonnaire
- petits cristaux, grains fibreux
- les valeurs  $T/T_m$  permettent une diffusion des atomes

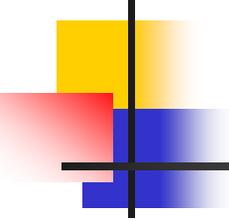
**Z2** :  $T/T_m$  le phénomène de diffusion des atomes de surface prédomine

- structure colonnaire de grains séparés par des cristaux
- la grosseur des grains + avec  $T/T_m$
- surface tend à être facettée, présence de whisker

**Z3** : la diffusion en volume est prédominante

- grains en colonnes





# Contraintes internes

---

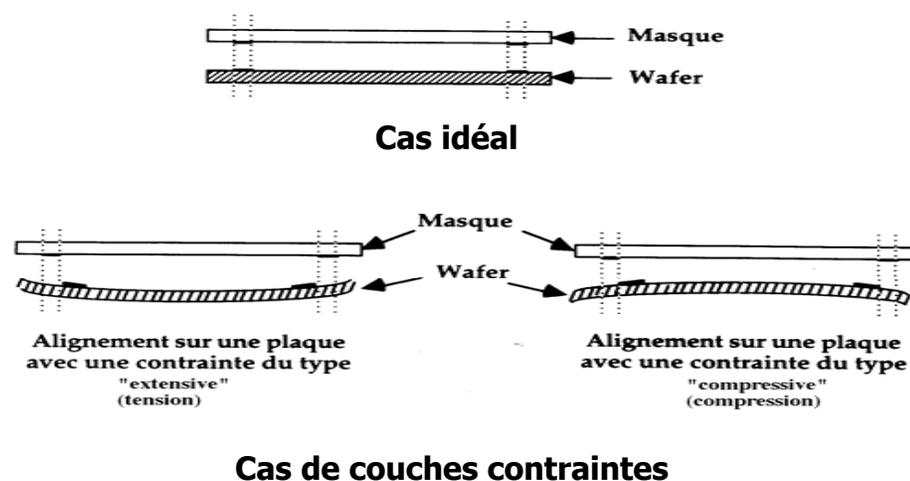
## différents types de contraintes

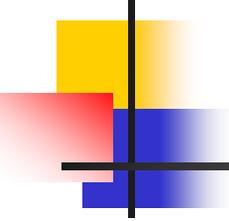
- Contrainte totale:
  - Contrainte thermique (différence des coefficients de dilatation)
  - Contrainte intrinsèque (effets cumulatifs des forces générées dans le volume par les atomes en position non optimale des champs de forces inter atomiques [5])
- A  $T/T_m$  petit → contraintes intrinsèques dominante par rapport aux contraintes thermiques
- A  $T/T_m = 0.3$  → les contraintes internes sont réduites [6]
- A  $T/T_m$  élevé → les contraintes thermiques dominant

les contraintes thermiques sont + pour des couches déposées à  $T/T_m$  bas, dès qu'elles sont utilisées à haute température

# Contraintes internes

- Conséquences
  - Rupture de continuité électrique
  - Fragilisation des plaques
  - Changement de la conductivité électrique (densité)
  - Alignement des niveaux de masquage





# Contraintes internes

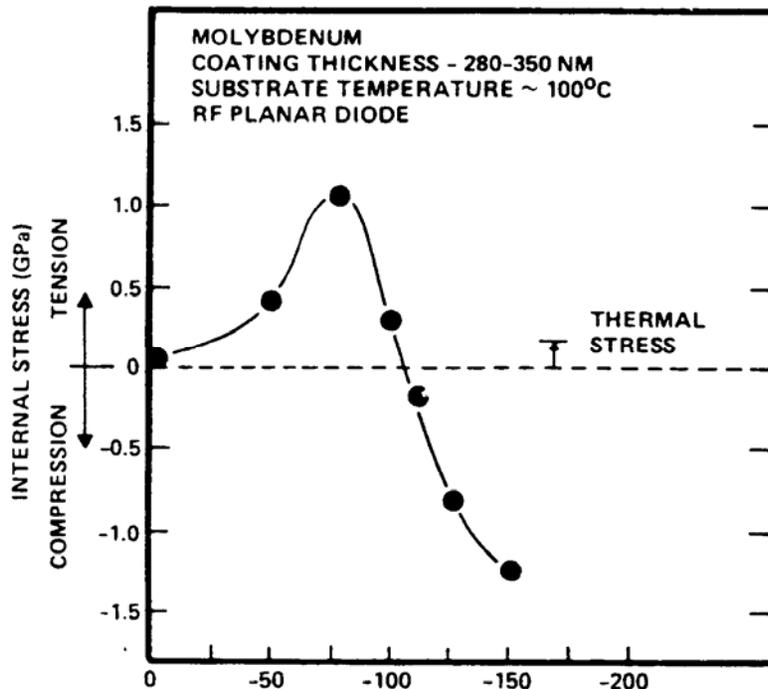
---

## Généralisation

- Les contraintes intrinsèques ne dépendent pas beaucoup du matériau du substrat
- Les contraintes intrinsèques sont constantes tant que  $e < 5000 \text{ \AA}$
- Les contraintes intrinsèques "tension" pour métaux et diélectriques (évaporation)
- Un bombardement durant le dépôt – contraintes "compression"
- La pulvérisation - "compression" ou "tension"

# Contraintes internes

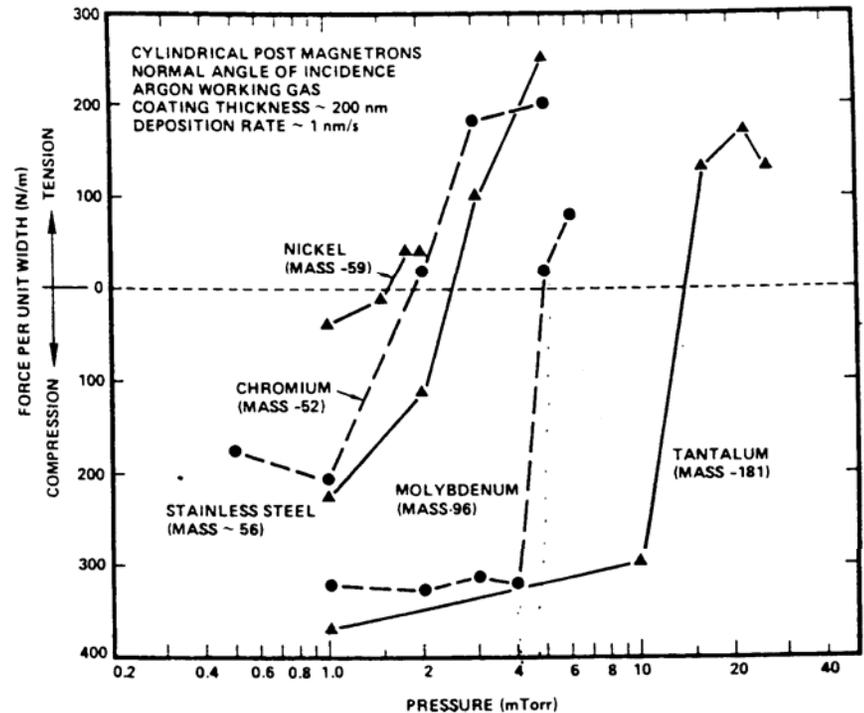
Variation de la contrainte avec la tension de bias [7]



- **Contraintes :** "tension" : - grains qui placent les couches dans des états de sous densité [8-11].  
"compression" - générées par un mécanisme ou des particules incidentes qui frappent la couche en train de croître et déplacent les atomes de la surface (le dépôt est densifié).
- Les contraintes "tension" se trouvent généralement dans la zone Z1 et les contraintes "compression" dans les zones denses ZT [12].

# Variation des contraintes

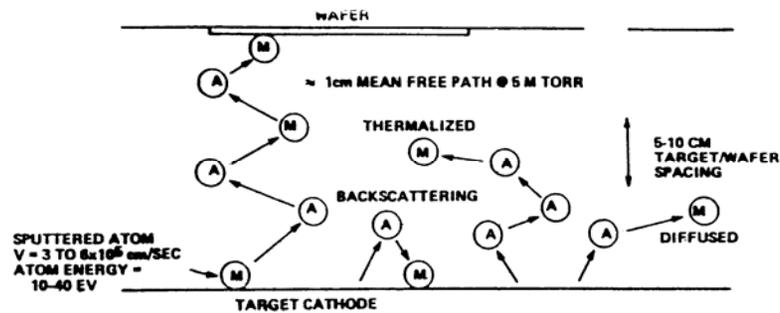
- Tension de bias
- Pression de gaz et masse de la cibles [13] [14]
- Angle d' incidence des ions gaz



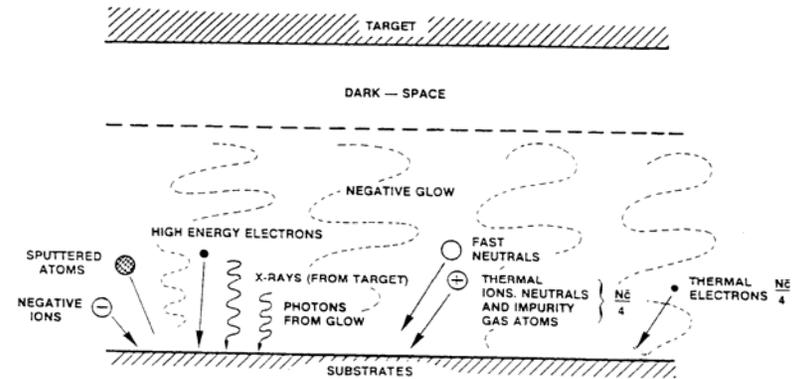
: Force per unit width at coating/substrate interface as a function of argon pressure for metallic coatings of various atomic mass which were deposited using cylindrical-post magnetron sputtering sources.

# Contamination des films

## Gaz



## Espèces



Species arriving at the substrate in a sputtering system.

# Contamination des films

## Gaz résiduels

- Taux de contamination

$$f = \frac{\alpha \cdot N}{\alpha \cdot N + R}$$

$\alpha$  : coefficient de collage

N: nombre d'atomes d'impuretés bombardant le film

R: vitesse de dépôt du film

O, N, H [15]

- O<sub>2</sub> augmente la résistivité des films Al
- N<sub>2</sub> augmente le stress (Al) [16]
- H<sub>2</sub> augmente les îlots [17] et diminue le rendement de la pulvérisation

## Radiations [18-20]

Des défauts peuvent être produits par

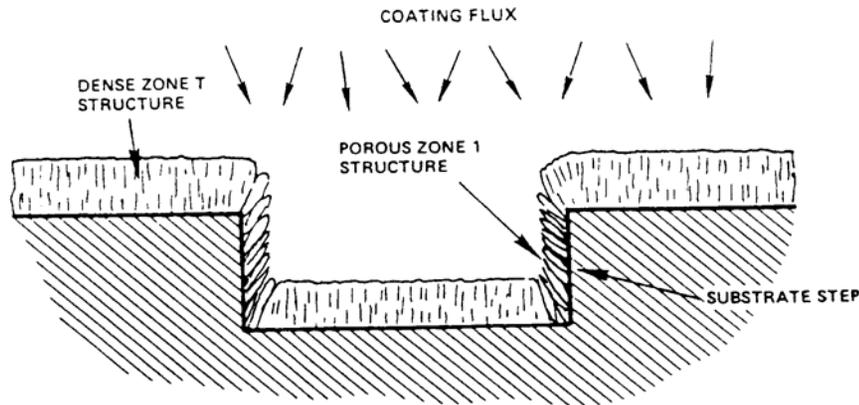
- bombardement ionique
- bombardement électronique
- rayon X et UV

## Réduction des contamination

- Système de pompage
- Etuvage
- Recuit
- Forme de cathode magnétron
- Prédépôt par évaporation (pour éliminer l'action des UV)
- Bias

# Recouvrement des marches

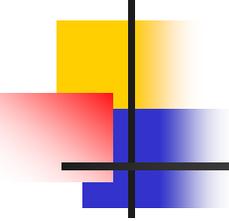
## Effet des marches sur la microstructure des dépôt



Zone T au-dessus  
Zone poreuse 1 sur les flancs

## Techniques utilisées pour améliorer le recouvrement

- Géométrie de la source
- Géométrie des marches
- Température du substrat
- Bias sputtering



# Recouvrement des marches

---

## Géométrie de la source

- Les atomes approchent la surface suivant une direction qui dépend de la configuration géométrique du système
  - En évaporation → trajectoires rectilignes
  - En pulvérisation → à  $P \uparrow$  → atomes approchent la surface suivant une trajectoire qui est fonction de la dernière collision (50 mT → libre parcours moyen = 1mm)
- Améliorations
  - Rotation et déplacement des substrats/source

## Géométrie de la marche

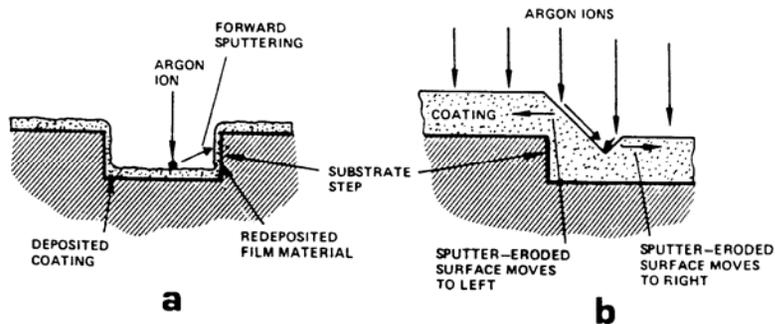
- Pente de  $30^\circ$  par rapport à la normale + déplacement du substrat

## Température du substrat

- $T \uparrow$  la diffusion des atomes en surface  $\uparrow$
- Structure Z2 est produite par  $T/T_m \approx 0.5$
- $T/T_m = 0.6$  est recommandé
  - $300^\circ\text{C}$  pour Al
  - $1936^\circ\text{C}$  pour W inacceptable ( $T_m = 3410^\circ\text{C}$ ) et  $T_{m\text{Si}} = 1410^\circ\text{C}$

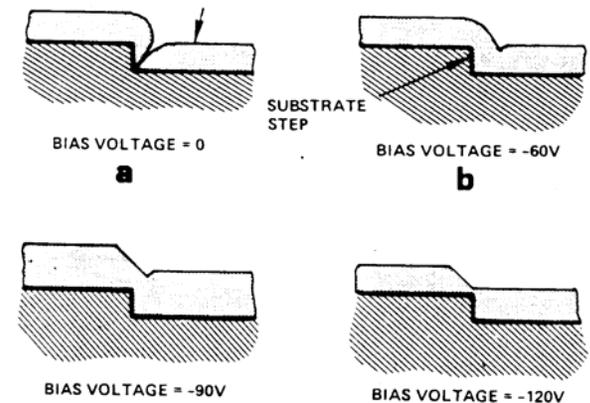
# Recouvrement des marches

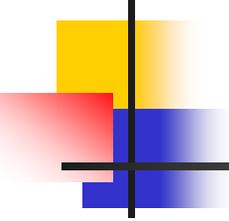
## Bias sputtering [21-22]



Le dépôt est repulvérisé; le matériau déposer au-dessus de la marche est repulvérisé et est redéposé sur les parois de la tranche

La tension de bias et le courant doivent être sélectionnés pour produire une bonne adéquation entre le dépôt et pulvérisation [23-25]



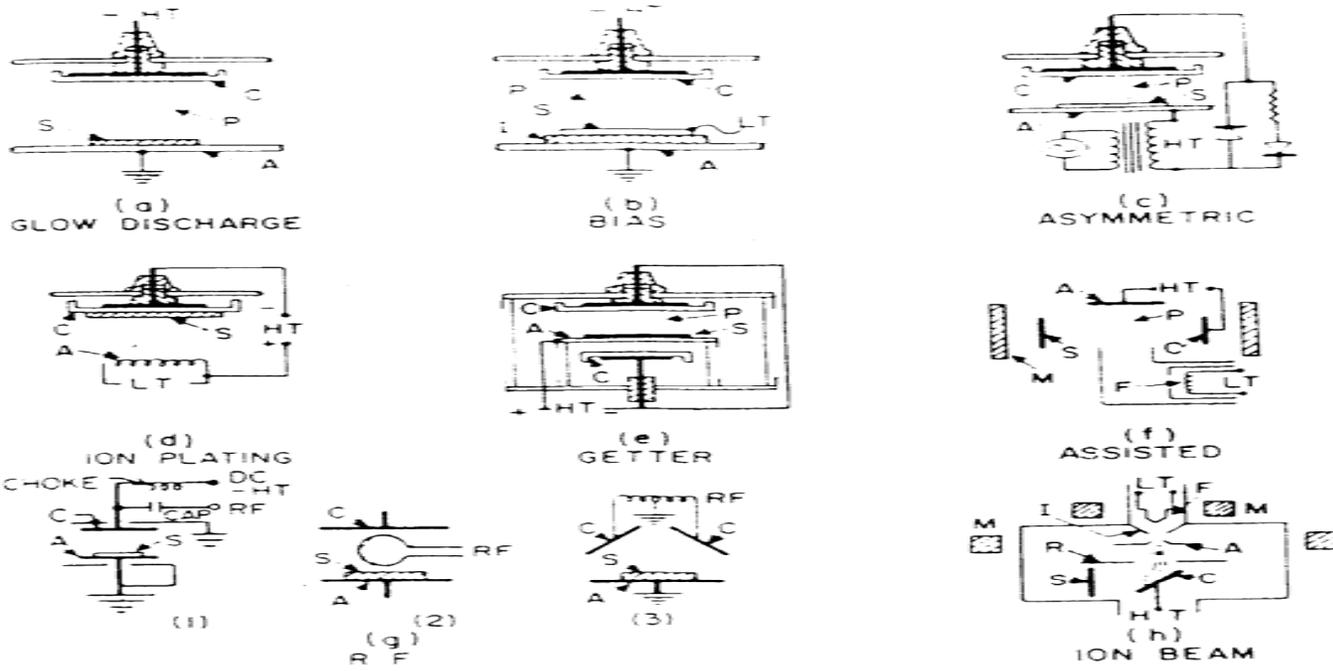


# Machines

---

- Différents systèmes
  - Diode continue
  - Radio fréquence
- Cathodes
  - Cathodes normales
  - Cathodes magnétron

# Différents types de système de dépôt

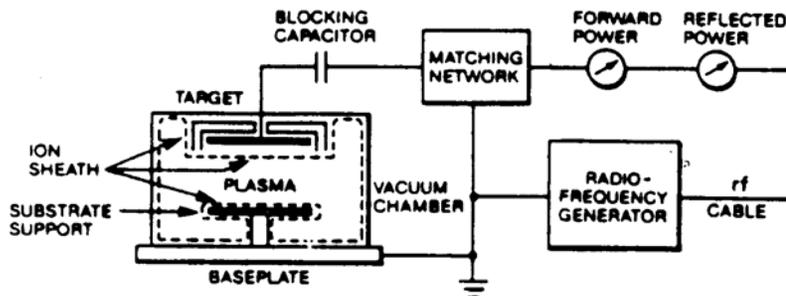


Schematic arrangements for several sputtering variants: (a) dc glow discharge (diode sputtering); (b) dc bias; (c) ac asymmetric (or bias); (d) ion plating (deposition by evaporation with partial dc sputtering); (e) getter sputtering; (f) thermionically and/or magnetically assisted glow discharge; (g) rf sputtering with (1) capacitor coupling for sputtering of metals and the inductor coupling for isolating dc from rf power supply, (2) indirect or induced rf coupling, and (3) push-pull double cathode; (h) duoplasmatron ion-beam source. The notations are P, plasma or discharge; C, cathode; A, anode; S, substrate; LT, low tension; HT, high tension; F, filament (electron source); M, magnet; V, vapor; R, reference; I, intermediate electrode, insulating in (b).

# Machines

## Radio fréquence

- Une cible isolante bombardée par des ions + accumule des charges + à sa surface; la différence de potentiel entre la cathode et l'anode diminue jusqu'à l'extinction du plasma.
- Si on applique une tension alternative (RF) à la cathode, on crée un bombardement de la cible par des électrons qui neutralisent les charges positives (fréquence de 13.56 Mhz).



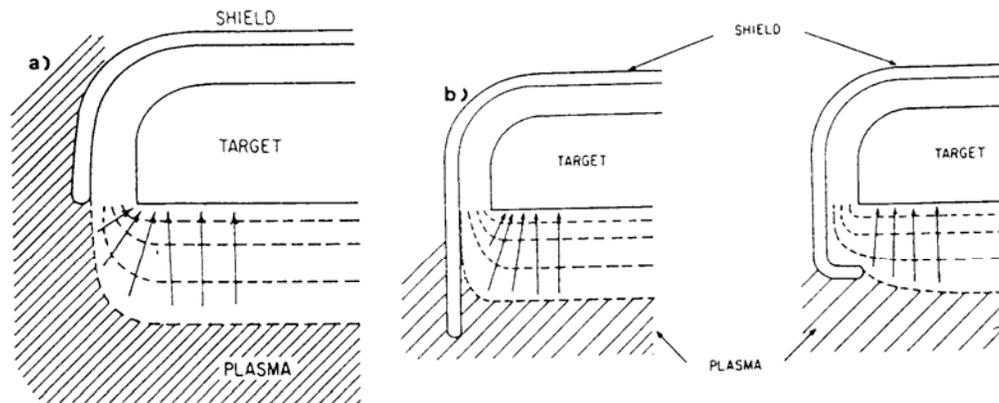
Radio frequency sputtering system.

- la vitesse des  $e^- \rightarrow$  ions  $\rightarrow$  polarisation  $< 0$  de la surface
- la vitesse de dépôt de conducteur est  $<$  au D.C
- convient très bien pour les isolants

# Machines

## Cathodes normales

- Distribution du potentiel



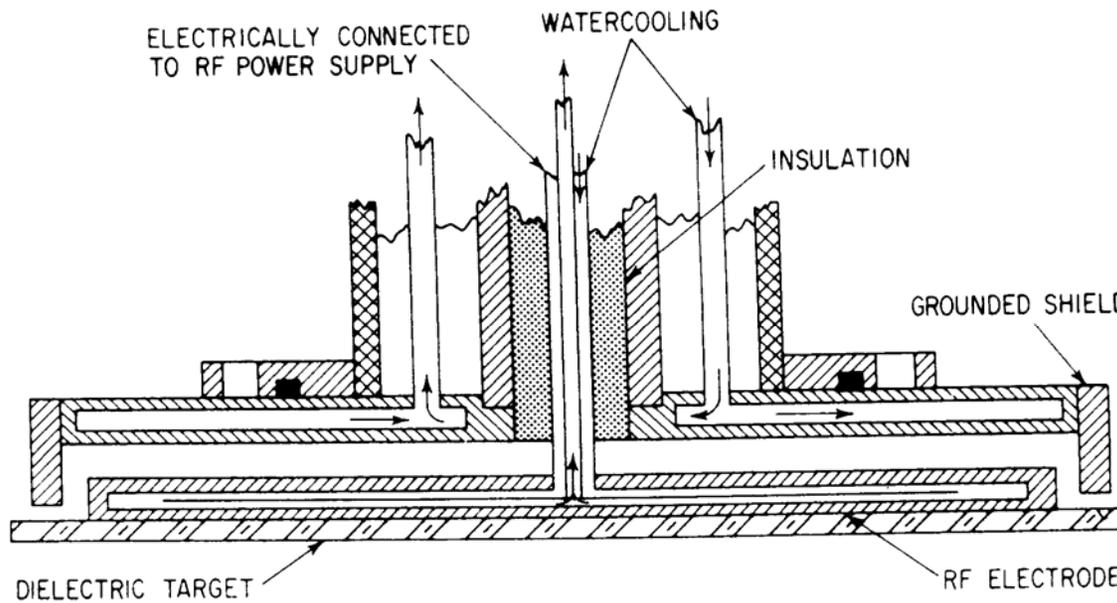
(a) Potential distribution in vicinity of cathode shield (b) Reducing rim effect by extending cathode shield. (c) Reducing rim effect by wrapping shield around the cathode . From L. Maissel and R. Glang, Eds., *Handbook of Thin Film Technology*, 1970. . . .

L' écran est placé à une distance de la cathode inférieure à la longueur de l'espace sombre de Crookes

# Machines

## Cathodes normales

- Système de refroidissement



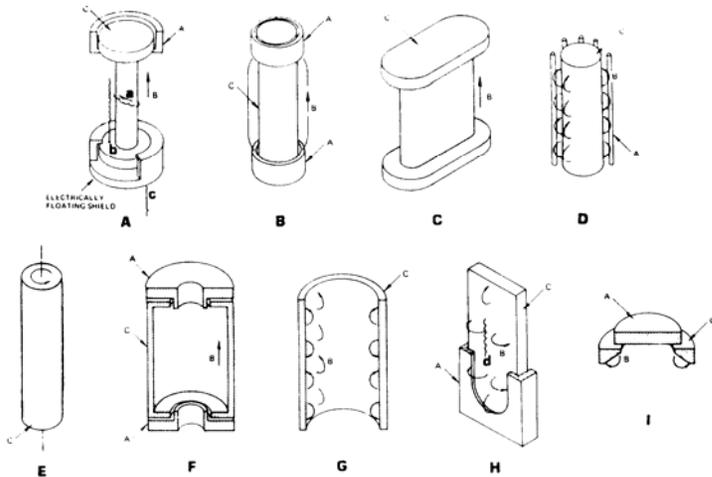
Cross section of typical rf cathode including cooling system.

# Machines

## Cathodes magnétron

- Principe: Dans la pulvérisation magnétron, le rendement d'ionisation est augmenté en utilisant un champ magnétique qui confine les électrons près de la surface de la cible.

Les densités de courant sont 10 à 100 fois plus élevées



Schematic illustrations of various types of magnetron sputtering sources. In each illustration A is anode, B is magnetic field direction, C is cathode. (A) cylindrical post magnetron with electrostatic end confinement, (B) cylindrical post magnetron with magnetic end confinement, (C) rectangular post magnetron, (D) ring discharge post magnetron, (E) spiral discharge magnetron, (F) cylindrical hollow magnetron, (G) ring discharge hollow magnetron, (H) planar magnetron, (I) "gun type" magnetron.

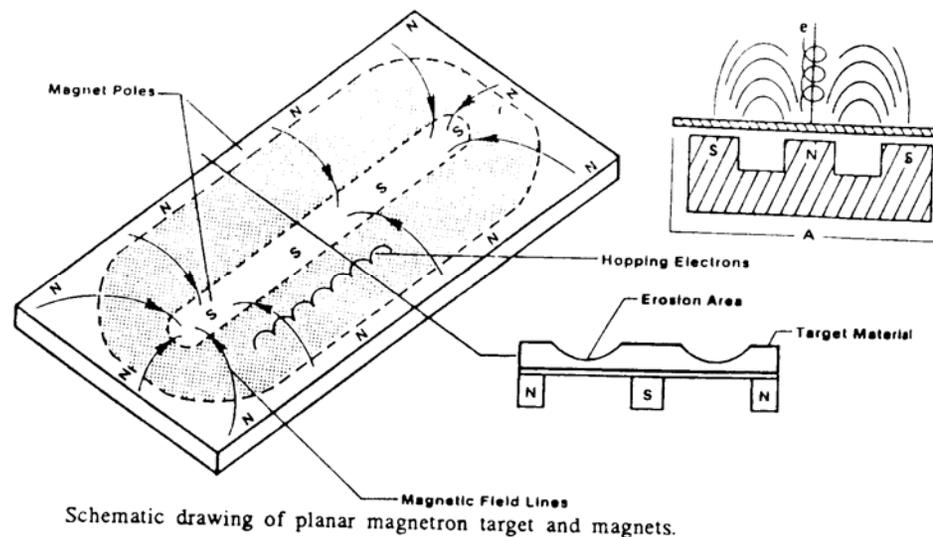
Deux principaux types de configuration d'électrodes:

- type planaire
- type circulaire

# Machines

## Cathodes magnétron

- Type planaire



- La surface de la cible est plane
  - Les cathodes peuvent fonctionner en DC ou RF
  - L' impédance  **$\sim 50 \Omega$  ( $40\ 000 \Omega$  DC)**

# Groupes de pulvérisations



## **Alcatel 600**

**Métaux:** Al, AlSi, ITO, Ti

**Substrat:** 1 de 4"

**Alim:** RF ou DC

**Pompage:** pompe cryogénique

# Groupes de pulvérisations



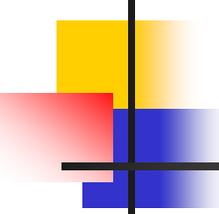
## Alcatel 450

**Métaux:** Au, AuGe, AuZn, Ni

**Substrat:** 1 de 2"

**Alim:** RF

**Pompage:** pompe à diffusion



# Bibliographie

---

- [1] O. Almen and G. Bruce, *Transac. 8th National Vac. Sym., New-York, Pergamon Press (1962)*, p 245
- [2] J.A. Thornton, *Ann. Rev. Pater. Sci.* 7, 239 (1977)
- [3] J.A. Thornton, *J. Vac. Sci. Technol.*, 11, 666 (1979)
- [4-5] R.W. Hoffman, in *Physics of Thin Films, Vol 3, G. Hass and R.E. Thin, ed, Academic Press, New-York (1974)*
- [6] P.G. Shewman, *Transformations in Metals, Mc Graw Hill, New-York (1969)*
- [7] R.N. Castellano, M.R. Notis and G.W. Simmons, *Vacuum*, 27, 109 (1977)
- [8] J.E. Yehoda and R. Messier, *Applications of Surface Science* 22/23, 118 (1985)
- [9] P.S. Vincett, *J. Vac. Sci. Technol.*, 21, 972 (1982)
- [10] E. Klokholm and B.S. Berry, *J. Electrochem. Soc.* 115, 823 (1968)
- [11] H. Oikawa and Y. Nakajima, *J. Vac. Sci. Technol.* 14, 164 (1977)
- [12] J.A. Thornton, in *Proceedings of the Sixth Symposium on Ion Sources and Ion-Assisted Technology, Tokyo, Japan, June 7-9, 1982*, p 363. Also see J.A. Thornton, *Rev. Brasil Apl. Vac.*, 2, 89 (1982)
- [13] D.W. Hoffman and J.A. Thornton, *J. Vac. Sci. Technol.* 16, 134 (1979)
- [14] J.A. Thornton, J. Talock and D.W. Hoffman, *Thin Solid Films*, 64, 111 (1979)
- [15] A.R. Nyaiesh and L. Holland, "Effects of Gas composition on discharge and deposition characteristics when magnetron sputtering aluminium vacuum", 31, n° 8/9 (1981) p 371
- [16] D.R. Derrison, "Sputtering system design for optimum deposited film quality", *Microelectronics Manufacturing and testing*, July 85, p 12
- [17] F.F. Mullins and A. Brunnschweiler, *Solid State Electron.* 19, 47 (1976)
- [18] A. Ashok, S.J. Fonash, R. Singh and P. Wiley, *IEEE Electron Devices Lett. EDL* 2, 184 (1981)
- [19] H. Lee, *IEEE Trans. Electron. Devices*, 25, 795 (1978)
- [20] S. Alexandrova, K. Kirov and A. Szekeves, *Thin Solid Films* 75, 37 (1981)
- [21] A. Mumtaz, J. Drapkin and R. Mathew, *J. Vac. Sci. Technol.*, A3, 596 (1985)
- [22] J.L. Vassen, G.L. Schnable and W. Kern, *J. Vac. Sci. Technol.*, 11, 60 (1974)
- [23] T.N. Kennedy, *J. Vac. Sci. Technol.*, 13, 1135 (1976)
- [24] R.C. Mosely, C.A. Sans, S.D. Campbell and L.T. Lamant, Jr., *J. Vac. Sci. Technol.*, A3, 596 (1985)
- [25] T. Mogami, M. Morimoto, H. Okabayashi and E. Nagasawa, *J. Vac. Sci. Technol.*, B3, 857 (1985)