

MISE AU POINT ET ETALONNAGE D'UN APPAREIL DE PULVERISATION CATHODIQUE

Brahim GHARBI, Aomar BOUKRAA et Abdelouahab OUAHAB

Laboratoire LENREZA et Département Sciences de la Matière, Faculté des Sciences et Technologies et des Sciences de la Matière, Université Kasdi Merbah – Ouargla, 30000 Ouargla, Algérie

E-mail: gharbi.brahim@gmail.com

RÉSUMÉ : Dans ce travail nous examinons en détail le principe et les applications d'un appareil de pulvérisation cathodique que l'Université Kasdi Merbah - Ouargla a récemment acquis dans le but de préparer des échantillons de laboratoire (métalliques ou isolants) en couches minces. Le principe de cette technique consiste à extraire des atomes de la surface d'une matière cible par bombardement par des particules énergétiques d'un plasma (ordinairement d'un gaz d'argon formé par Ar, Ar⁺, e⁻) et à les déposer sur un substrat pour former des films minces. Dans ce travail, nous décrivons les réglages, les calibrations et les optimisations effectuées sur l'appareil concernant les conditions du dépôt, le vide, la pression du gaz, la puissance délivrée, la distance anode-cathode afin d'obtenir les meilleurs rendements possibles.

MOTS-CLÉS : pompes à vide, pulvérisation cathodique, couches minces, magnétron, manomètre, interaction ion-surface

1. Généralité

Le matériau à déposer, également appelé matériau cible, est introduit dans l'enceinte à vide sous forme d'une plaque de quelques millimètres d'épaisseur et de dimension sensiblement égale à celle de la pièce à recouvrir.

Cette cible est fixée sur une électrode refroidie (la cathode) qu'on porte à une tension négative par rapport à une deuxième électrode (l'anode) disposée parallèlement à la cible, à une distance de quelques centimètres. Dans de nombreux cas, l'anode sert de porte-substrat et est généralement maintenue à la masse (potentiel électrique nul) ce qui facilite son utilisation.

Le champ électrique créé entre les deux électrodes provoque l'ionisation du gaz résiduel. Cette ionisation apparaît sous forme d'un nuage luminescent localisé entre les deux électrodes; c'est ce même phénomène que l'on observe dans les tubes fluorescents. Au même moment, un courant électrique s'établit entre les deux électrodes: le gaz résiduel est devenu conducteur; il contient alors [1]:

- *des électrons et des ions négatifs qui sont attirés par l'anode.
- * des ions positifs qui sont attirés par la cible (cathode).

Si on place une pièce devant la cible, on observe que cette pièce se recouvre progressivement d'une couche du même matériau que celui de la plaque constituant la cible. Le dépôt est dû à la condensation d'atomes provenant de la cible, expulsés de celle-ci sous l'effet de l'impact d'ions positifs contenus dans le gaz luminescent et attirés par la cible du fait de sa polarisation négative.

2. Description du dispositif

Pour concevoir une installation de pulvérisation cathodique, il faut réunir le nécessaire minimum pour réaliser un dépôt par cette technique. Une unité standard de pulvérisation cathodique comporte les parties suivantes:

- *Partie électrique: elle alimente tous les appareils de l'installation.
- *Partie gaz: elle est constituée d'une enceinte où on doit mesurer et régler la pression.
- *Partie pompage: ce sont les pompes utilisées pour obtenir le vide.
- *Partie de dépôt: elle est formée par deux électrodes et un magnétron.
- *Partie mécanique: pièces de connexion (pièces d'adaptation, éléments de canalisation...)

3. Les plasmas de laboratoire [2]

Les plasmas de laboratoire ont pour paramètres :

- Densité : $n_e = n_i = 10^{14} - 10^{17}$ particules/m³.
- Température : 0,1 eV à une dizaine d'eV, (1 eV = 11000 K).

Les plasmas d'intérêt pour la fusion thermonucléaire ont une densité de l'ordre de $10^{19} - 10^{20}$ particules/m³. Les températures sont de 1 keV à 10 keV.

Le tableau 1 donne les densités et températures typiques de quelques plasmas.

Tableau 1 : Caractéristiques de quelques plasmas [2]

Type de plasma	Densité en m ⁻³	Température en eV
Plasmas interstellaires	$10^5 - 10^7$	$10^{-2} - 10$
Plasmas ionosphériques	$10^{10} - 10^{12}$	$10^{-2} - 1$
Décharge gazeuse	$10^{12} - 10^{19}$	~1eV
Plasmas industriels	$10^{16} - 10^{19}$	1 - 100
Plasmas de fusion	$10^{19} - 10^{21}$	~ 10^4

4. Décharge radio fréquence RF [3]

4.1 Introduction

Les décharges RF sont caractérisées par la fréquence f du signal appliqué on compare cette fréquence avec celle du plasma ionique f_{pi} et avec celle du plasma électronique f_{pe} ; à partir des équations suivantes:

$$f_{pe} = \omega_{pe} / 2\pi \qquad \omega_{pe} = \left[\frac{N_e e^2}{M_e \epsilon_0} \right]^{1/2} \qquad (1)$$

N_e : la densité des électrons,
 M_e : la masse d'électron,
 ω_{pe} : la pulsation d'électron.

$$f_{pi} = \omega_{pi} / 2\pi \qquad \omega_{pi} = \left[\frac{N_i e^2}{M_i \epsilon_0} \right]^{1/2} \qquad (2)$$

N_i : la densité des ions,
 M_i : la masse d'ion,
 ω_{pi} : la pulsation d'ion.

On obtient :

$$f_{pi} \approx f_{pe} \left[\frac{M_e}{M_i} \right]^{1/2} \qquad (3)$$

Avec: $N_e = N_i$, et comme $M_e \ll M_i$ alors $f_{pi} \ll f_{pe}$; on peut classer les décharges RF en trois catégories:

1. $f \leq f_{pi} < f_{pe}$ la décharge est classée en basse fréquence (BF); dans ce cas les ions ont le temps de suivre les oscillations.
2. $f_{pi} < f \leq f_{pe}$ la décharge est classée en haute fréquence (HF); dans ce cas les ions ne suivent plus les oscillations, par contre les électrons le font.

3. $f_{pi} < f_{pe} < f$ la décharge est classée en très haute fréquence (VHF); les électrons comme les ions sont complètement gelés.

4.2 La formation de la gaine [3]

Un des concepts les plus importants pour la description des décharges électriques est la notion de "gaine" qui entoure n'importe quelle surface située en contact avec le plasma (les électrodes, les substrats, les sondes, les parois...)

Si on plonge un corps dans le plasma et en l'isole électriquement, on constate que son potentiel se fixe à une valeur constante (potentiel flottant V_f). Cette valeur est inférieure au potentiel moyen du plasma (le potentiel plasma V_p), et ceci peut s'expliquer comme suit:

Initialement le corps est bombardé par les ions et les électrons; vue la grande mobilité des électrons par rapport à celle des ions, une charge négative s'accumule sur le corps. Cette dernière tend à repousser les électrons et attirer les ions positifs, et c'est ainsi que se forme une charge d'espace positive, appelée la gaine (figure.1).

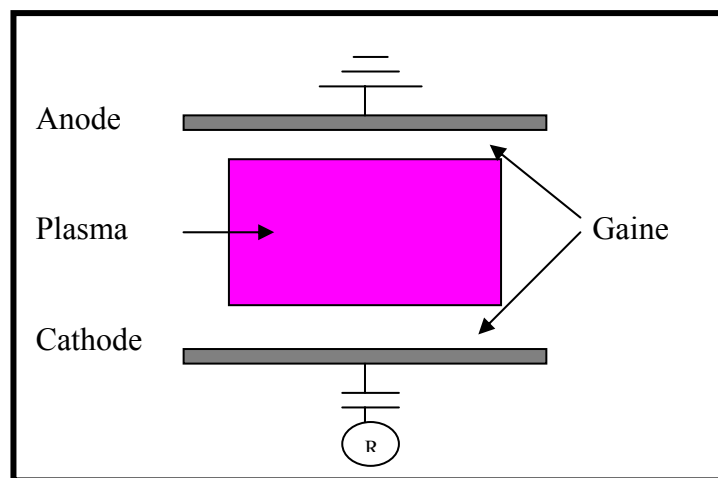


Figure 1 : Formation de la gaine

L'équilibre du système est obtenu lorsque les flux de chaque espèce de charge traversant cette gaine sont égaux.

La différence entre le potentiel plasma V_p et le potentiel flottant V_f détermine le potentiel de la gaine V_g ($V_g = V_p - V_f$). Ce dernier représente d'une part la barrière de potentiel qu'un électron doit franchir pour atteindre le corps et d'autre part, l'énergie avec laquelle les ions bombardent ce corps.

5. Résultats

5.1. Influence de la pression d'Argon sur la puissance réfléchie

Le but de cette étude est de cerner l'influence de la pression à 30°C sur la puissance réfléchie.

5.1.a. Pour la puissance appliquée ($W_{appl} = 100W$)

Le tableau 2.a représente l'influence de la pression d'argon sur la puissance réfléchie.

- * Le vide dans l'enceinte: $P_0 = 10^{-4}$ mbar,
- * La puissance appliquée a la cible: $W_{app} = 100W$,
- * La température ambiante: $T = 30^\circ C$,
- * La distance anode-cathode: $d = 2cm$.

P: pression du gaz dans l'enceinte.

Tableau 2.a : Influence de la pression d'argon sur la puissance réfléchi.

P(mbar)	$>8.10^{-1}$	8.10^{-1}	6.10^{-1}	4.10^{-1}	2.10^{-1}	10^{-1}	8.10^{-2}	6.10^{-2}	4.10^{-2}	2.10^{-2}	$\leq 10^{-2}$
W_{refl} (W)	>50	50	40	38	36	30	25	18	2	50	>50

***Résultats 1**

La courbe 2.a, présente les variations des puissances réfléchies par rapport à la pression de gaz.

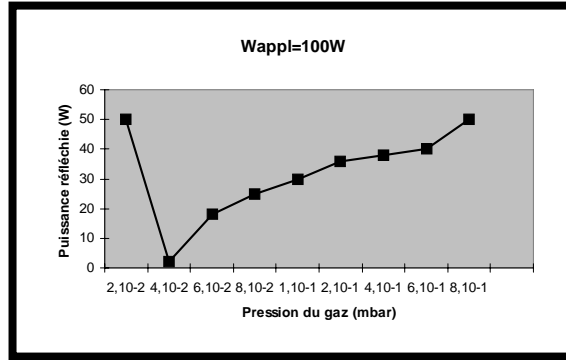


Figure 2.a : Variations des puissances réfléchies par rapport à la pression de gaz ($W_{appl} = 100$ W)

5.1.b. Pour la puissance appliquée ($W_{appl} = 200$ W)

Le tableau 2.b présente l'influence de la pression d'argon sur la puissance réfléchie.

$P_0 = 10^{-4}$ mbar, $W_{appl} = 200$ W,
 $T = 30^{\circ}C$, $d = 2$ cm

Tableau 2.b : Influence de la pression d'argon sur la puissance réfléchie

P (mbar)	$>8.10^{-1}$	8.10^{-1}	6.10^{-1}	4.10^{-1}	2.10^{-1}	10^{-1}	8.10^{-2}	6.10^{-2}	4.10^{-2}	2.10^{-2}	$\leq 10^{-2}$
W_{refl} (W)	>50	50	6	4	4	4	1	3	4	≥ 50	

***Résultats 2**

La courbe 2.b, présente les variations des puissances réfléchies par rapport à la pression de gaz.

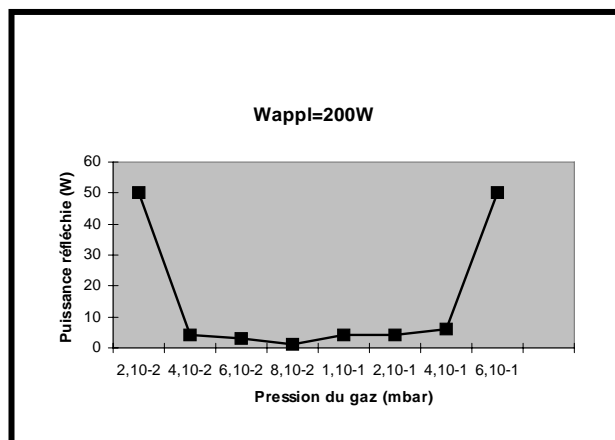


Figure 2.b : Variations des puissances réfléchies par rapport à la pression de gaz ($W_{appl} = 200$ W)

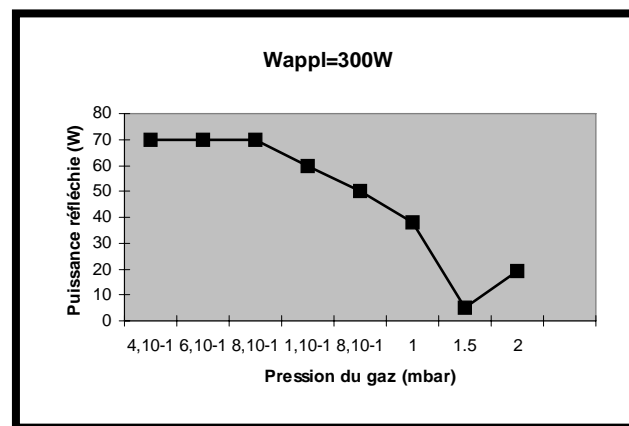
5.1.c Pour la puissance appliquée ($W_{\text{appl}} = 300\text{W}$)

Le tableau 2.c représente l'influence de la pression d'argon sur la puissance réfléchie
 $P_0 = 10^{-4}\text{mbar}$, $W_{\text{appl}} = 300\text{W}$, $T = 30^\circ\text{C}$, $d = 2\text{cm}$

Tableau 2.c : Influence de la pression d'argon sur la puissance réfléchie

P (mbar)	>2	2	1,5	1	$8 \cdot 10^{-1}$	10^{-1}	$8 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$
$W_{\text{réfl}}$ (W)	>23	9	5	38	50	60	70	70	70

***Résultats 3 :** La courbe 2.c, présente les variations des puissances réfléchies par rapport à la pression de gaz.

**Figure 2.c : Variations des puissances réfléchies par rapport à la pression de gaz ($W_{\text{appl}} = 300\text{W}$).****6. Discussions**

Les courbes dans les figures 2 montrent que la pression d'argon a une influence sur la puissance réfléchie des systèmes de dépôt.

Quand la pression appliquée est inférieure à $4 \cdot 10^{-2}\text{mbar}$ pour $W_{\text{appl}} = 100\text{W}$ et inférieure $8 \cdot 10^{-2}\text{mbar}$ pour $W_{\text{appl}} = 200\text{W}$ et inférieure à $1,5\text{mbar}$ pour $W_{\text{appl}} = 300\text{W}$, la puissance réfléchie diminue jusqu'à 2, 1, 5 W respectivement. Cette évolution peut s'expliquer de la façon suivante.

A partir de la relation [4]:

$$W_{\text{appl}} = W_{\text{réfl}} + W_{\text{cons}} \quad (4)$$

(W_{cons} est la puissance consommée), la puissance réfléchie diminue quand la puissance consommée augmente. Cela dépend de l'énergie de l'ion incident E_i et de l'énergie de cohésion du solide E_s .

$$E_i \uparrow \Rightarrow W_{\text{cons}} \uparrow \Rightarrow W_{\text{réfl}} \downarrow \quad (5)$$

Quand la pression appliquée est supérieure aux limites mentionnées, la puissance réfléchie augmente parce que les atomes éjectés de la cible voient leur libre parcours moyen diminuer et donc leur énergie à leur arrivée sur le substrat diminuer (à température constante).

Il existe une sorte de seuil énergétique: les espèces éjectées de la cible voient encore leur libre parcours moyen diminuer [5].

Donc les valeurs optimales des pressions sont :

*Pour $W_{\text{appl}} = 100 \text{ W}$

$P = 4.10^{-2} \text{ mbar}$

*Pour $W_{\text{appl}} = 200 \text{ W}$

$P = 8.10^{-2} \text{ mbar}$

*Pour $W_{\text{appl}} = 300 \text{ W}$

$P = 1.5 \text{ mbar}$

7. Conclusion

La valeur de la pression 1,5 mbar est à l'extérieur de la plage admise de pression qui est comprise entre 10^{-3} et 10^{-1} mbar [6].

Une étude à des pressions supérieures est donc exclue.

Remarque : Nous observons une faible formation de plasma au dessous du support de la cible dont l'origine reste encore inexplicée.

[1]: Yan – mei Jiang, *pulvérisation cathodique assistée par ordinateur, thèse, université de Paris – sud, centre D'Orsay 04/12/1992*

[2] *Physique des plasmas I-semester d'Eté 2005*

[3] Meglali Omar –*caractérisation d'une décharge luminescent radio-fréquence par sonde électrostatique- Mémoire de magister, Université Mentouri – Constantine, 2002*

[4] *Manuel d'utilisation, Générateurs HF PFG-RF, Article n°:A04-0058-00.BFR-001-06, FICHER: Pproofoi, 08.08.2000*

[5] *Matthieu Valetas, couches minces magnétiques pour applications hyperfréquences:étude des samarium-cobalt et de Néodume-Fer-Bor par pulvérisation radiofréquence magnétron, thèse de doctorat, Université de Limoges, 27-11-2003*

[6] *Aimé Richard et Anne – Marie durand, Le vide, les couches minces, Les couches dures, Edition IN Fine 1994*